

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Корелин Иван Андреевич

**Разработка специального математического и алгоритмического
обеспечения для анализа динамики контрольно-пропускных систем
объектов проведения массовых мероприятий**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации

(информатизация и связь)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата

технических наук

Екатеринбург – 2021

Работа выполнена в учебно-научном центре «Информационная безопасность» Института радиоэлектроники и информационных технологий - РТФ ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Поршнев Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: **Авдеенко Татьяна Владимировна**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, профессор кафедры теоретической и прикладной информатики;

Берг Дмитрий Борисович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры анализа систем и принятия решений Школы экономики и менеджмента Института экономики и управления;

Соколов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, заведующий кафедрой «Защита информации» Высшей школы электроники и компьютерных наук.

Защита диссертации состоится «15» июня 2021 г. в 11:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.11.29 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
<https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=2152>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сафиуллин Николай Тахирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Массовые скопления людей являются неотъемлемой частью жизни любого современного человека. Очереди образуются на входах и выходах в метро, аэропорты, вокзалы, концертные залы, места проведения митингов и шествий, что приводит к массовому скоплению людей, нахождение в которых оказывается, как показывает история, потенциально опасными для их участников. Напомним некоторые трагические события с участием большого количества людей, завершившиеся давкой и массовой гибелью ее участников: давку во время коронация Николая II на Ходынском поле в г. Москва 4 мая 1896 г. (1379 человек убиты и более 900 ранены); давку во время похорон И.В. Сталина 9 мая 1953 г. (данные о количестве жертв отсутствуют или засекречены); давки, возникшие во время проведения футбольных матчей, – Большая спортивная арена Центрального стадиона им. В.И. Ленина, г. Москва, 20 октября 1982 г. (66 погибших); стадион «Хиллсборо», г. Шеффилд, 15 апреля 1989 г. (96 погибших, 766 пострадавших); стадион г. Порт-Саид, Египет, 1 февраля 2012 г. (73 погибших) и др. Таким образом, обеспечение безопасности участников массовых мероприятий и недопущения повторения трагических событий, по-прежнему, остается актуальной задачей.

Сегодня для снижения рисков возникновения нештатных ситуаций на этапе входа участников на объект проведения массовых мероприятий и их выхода с объекта по его окончанию (в первую очередь, футбольные стадионы) используют информационные контрольно-пропускные системы (ИКПС), одним из компонентов которой являются турникеты, обеспечивающие автоматизированную проверку билетов и управление потоками участников. При этом понятно, что проектирование и модернизация подобных систем для объектов проведения массовых мероприятий, предназначенных для размещения нескольких десятков тысяч участников мероприятий, является нетривиальной задачей, в ходе решения которой, исходя из априори ожидаемых количественных характеристик очередей посетителей, необходимо обосновать выбор типа и числа турникетов, мест их размещения. Также отметим, что информация о количественных характеристиках ожидаемых потоков посетителей планируемого массового мероприятия необходима представителям службы безопасности объекта его проведения для превентивной разработки адекватных мер по обеспечению безопасности участников массового мероприятия. Традиционным методом решения обсуждаемых задач являются методы аналогии и масштабирования ранее найденных решений (например, увеличение числа турникетов ИКПС пропорционально увеличению максимальной вместимости объекта проведения массового мероприятия). Однако выбранные технические решения, полученные на основе использования данных методов, как показывает практика, далеко не всегда оказываются оптимальными. При этом обнаружить их недостатки, которые не позволяют обеспечить требуемый уровень безопасности, удается только на практике. (Например, недостатки ИКПС стадиона «Лужники», модернизированного в преддверии чемпионата мира по футболу 2018 г., были обнаружены только в ходе проведения футбольного матча между сборными Аргентины и Российской Федерации 11 ноября 2017 г. При этом понятно, что их устранение потребовало дополнительных материальных и финансовых расходов).

В этой связи разработка научно-обоснованных подходов, обеспечивающих принятие правильных технических решений в части выбора технических характеристик турникетов ИКПС и их числа, а также получения оценок количественных показателей потоков посетителей массовых мероприятий, является актуальной задачей.

Степень проработанности темы. Анализ особенностей обслуживания очередей в различных технических и социальных системах является предметом исследования теории массового обслуживания (ТМО). С точки зрения ТМО отдельный турникет, представляет собой одноканальную систему массового обслуживания (СМО), контрольно-пропускная система объекта проведения массовых мероприятий – многоканальную СМО. Так как

интенсивность потока заявок на обслуживание изменяется во времени обсуждаемые СМО относятся к классу нестационарных СМО (НСМО). В наиболее общем виде динамика НСМО описывается следующей системой дифференциальных уравнений (СДУ):

$$\begin{cases} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda(t)P_0(t) + \mu(t)P_1(t), \\ \dots, \\ \frac{dP_n(t)}{dt} = -(\lambda(t) + n\mu(t))P_n(t) + \lambda(t)P_{n-1}(t) + (n+1)\mu(t)P_{n+1}(t) \text{ при } 0 < n < c(t), \\ \dots, \\ \frac{dP_n(t)}{dt} = -(\lambda(t) + c(t)\mu(t))P_n(t) + \lambda(t)P_{n-1}(t) + c(t)\mu(t)P_{n+1}(t), \text{ при } n \geq c(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $P_n(t)$ – зависимость вероятности нахождения в системе n заявок от времени, $\lambda(t)$ – зависимость интенсивности поступления заявок в систему от времени, $\mu(t)$ – зависимость интенсивности обслуживания заявок от времени, $c(t)$ – зависимость числа обслуживающих устройств от времени. Зная решение СДУ (1), далее, потенциально, можно перейти от вероятностей $P_n(t)$ к вычислению ряда макроскопических характеристики НСМО, например, зависимости числа обслуженных заявок от времени, зависимости длины очереди заявок на обслуживание и т.д.

Однако получить аналитическое решение СДУ (1) в общем виде и, соответственно, вычислить количественные показатели НСМО, оказывается невозможно. В этой связи были предприняты попытки нахождения аналитических решений упрощенных СДУ, получаемых из (1). Здесь следует отметить Д.Р. Кокса, получившего аналитическое решение (1) для случая одноканальной НСМО, которое, однако, использовать на практике оказалось невозможным, поскольку при этом возникает необходимость вычисления бесконечных сумм. Также Г.Г. Сигаловым и А.М. Люперольским, были получены аналитические решения (1) для случая, когда НСМО функционирует в недогруженном состоянии, а также предложены их аппроксимации.

Известны работы, авторы которых предпринимали попытки найти численное и численно-аналитическое решение СДУ (1) (В.П. Бубнов, В.И. Сафонов, В.А Смагин, Я.Н. Гусеница). Однако из-за имевших место вычислительных трудностей они не были доведены до расчетов количественных показателей НСМО для интенсивностей поступления заявок, аналогичных наблюдаемым на практике.

Свободным от указанных недостатков оказывается подход, основанный на имитационном моделировании НСМО, который использовался в работах П.К. Колесара, Л.В. Грина, Г.М. Томсона, В. Вита и др. Отметим цикл работ С.В. Поршнева и Д.А Якоба, в которых, были построены имитационные модели НСМО и их программные реализации, основанные на использовании статистической информации, собранной на футбольных стадионах во время чемпионата РФ, которые оказывались, однако, не универсальными, привязанными к конкретному набору статистической информации.

Целью диссертационной работы является разработка специального математического и алгоритмического обеспечения для анализа динамики контрольно-пропускных систем объектов проведения массовых мероприятий и исследование особенностей функционирования ИКПС объектов проведения массовых мероприятий с целью получения оценок количественных макроскопических показателей НСМО, представляющих практический интерес для разработчиков и владельцев объектов проведения массовых мероприятий, а также служб безопасности данных объектов.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **основные задачи исследования**:

1. Анализ состояния предметной области.

2. Разработка алгоритма имитационного моделирования НСМО, у которой интенсивность поступления заявок на вход $\lambda(t)$ подобна интенсивности потока посетителей объектов проведения массовых мероприятий, и его программная реализация.

3. Исследование особенностей функционирования выбранного типа одноканальных и многоканальных НСМО.

4. Разработка методики решения задач, возникающих на этапах проектирования, эксплуатации и модернизации ИКПС объектов проведения массовых мероприятий с помощью разработанных математических моделей и их программных реализаций.

Объектом исследования являются ИКПС объектов проведения массовых мероприятий.

Предметом исследования является математическое и программное обеспечение для анализа особенностей функционирования ИКПС объектов проведения массовых мероприятий.

Методы исследования. Для решения задач исследования в работе использованы методы теории массового обслуживания, непараметрической математической статистики, компьютерного моделирования.

Научная новизна полученных результатов заключается в:

- обосновании возможности использования вместо непрерывной функции $\lambda(t)$ ее кусочно-постоянной аппроксимации, что эквивалентно описанию динамики НСМО на последовательных временных интервалах, длительность которых мала в сравнении с длительностью интервала моделирования, как последовательность состояний стационарной СМО, начальные условия функционирования которой на данном временном интервале совпадают с конечным состоянием СМО на предыдущем временном интервале;

- обосновании совокупности макроскопических показателей, достаточных для описания динамики НСМО, у которой интенсивность поступления заявок на обслуживание $\lambda(t)$ подобна интенсивности потока посетителей объектов проведения массовых мероприятий;

- нахождении функциональных зависимостей макроскопических показателей НСМО из выбранной совокупности показателей, характеризующих динамику НСМО, от параметров функции $\lambda(t)$ и энергии случайной составляющей интенсивности поступления заявок на обслуживание;

- доказательстве отсутствия влияния политики выбора посетителем турникета (с наименьшей длиной очереди или случайного турникета) в перегруженном режиме.

Теоретическая значимость исследования состоит в обосновании возможности описания динамики НСМО, у которой интенсивность поступления заявок на обслуживание $\lambda(t)$ подобна интенсивности потока посетителей объектов проведения массовых мероприятий, с помощью набора макроскопических количественных характеристик, стационарных во времени.

Практическая значимость работы заключается в разработке:

- алгоритма имитационного моделирования ИКПС, у которой интенсивность поступления заявок на обслуживание $\lambda(t)$ подобна интенсивности потока посетителей объектов проведения массовых мероприятий, и его программной реализации;

- методических рекомендаций по использованию разработанного программного инструмента для оценивания макроскопических показателей динамики НСМО на этапах проектирования ИКПС и подготовке к проведению массового мероприятия;

- научно-обоснованных рекомендаций для посетителей массовых мероприятий о том, как целесообразно вести себя после его окончания при выходе с объекта.

Положения, выносимые на защиту:

– динамика изученных НСМО эквивалентна динамике множества СМО, функционирующих на последовательных временных интервалах, длительность которых мала в сравнении с длительностью интервала моделирования, а начальные условия функционирования СМО на данном временном интервале совпадают с конечным состоянием СМО на предыдущем временном интервале;

– для описания динамики НСМО, у которой интенсивность поступления заявок на обслуживание на временном интервале $[T_1, T_2]$ монотонно возрастает от нуля до максимального значения λ_{\max} , и далее на временном интервале $[T_2, T_3]$ убывает от λ_{\max} до нуля, достаточно использовать следующий набор макроэкономических показателей: максимальную длину очереди – L_{\max} , максимальную длительность ожидания в очереди – τ_{\max}^w , момент времени, в который длина очереди достигает максимальной длины – $t_{L_{\max}}$, момент времени, в который время ожидания в очереди оказывается максимальным – $t_{\tau_{\max}^w}$, число обслуженных к моменту начала массового мероприятия заявок – N_0 , время, затраченное на обслуживание всех заявок – T_{All} ;

– политика выбора турникета в зависимости от длины очереди на обслуживание влияет на макроэкономические характеристики НСМО при ее функционировании в недогруженном режиме (когда относительная пропускная способность $\rho = \lambda/\mu < 1$), в то время как в перегруженном режиме работы ($\rho = \lambda/\mu > 1$) влияние данной политики на макроэкономические характеристики НСМО при различных политиках выбора очереди незначительно (п.5).

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием адекватных методов анализа первичной информации; непротиворечивостью количественных характеристик, получаемых в работе программной библиотеки, и аналитических расчетов, полученных для стационарных СМО; согласованностью выбранных макроэкономических характеристик с зависимостями количественных характеристик функционирования НСМО от времени. Дополнительно достоверность основных результатов работы аргументируется их апробацией на конференциях, а также публикациями в рецензируемых журналах.

Внедрение результатов диссертационного исследования. Результаты диссертационного исследования используются в ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия (акт об использовании результатов от 16.10.2020); в ПАО «Сбербанк России», Москва, Россия (акт об использовании результатов от 18.08.2020); в ООО «Институт информационных датчиков и технологий», Екатеринбург, Россия (акт об использовании результатов от 14.10.2020).

Апробация работы. Материалы работы докладывались на следующих научных конференциях: 26-я международная крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМИКО'2016) Севастополь, 04-10 сентября 2016 г.; межвузовская школа-семинар «Задачи системного анализа, управления и обработка информации» 14 февраля 2017; Межведомственная научно-практическая конференция «Специальные информационные технологии», 19 апреля 2017, Москва, Россия; XI International scientific and technical conference «Applied Mechanics and Dynamics Systems» 14–16 November 2017, Omsk, Russian Federation; Международная конференция «Информационные технологии в промышленности и производстве» 15 февраля 2018, Томск, Россия; Международная научно-практическая конференция «Средства обеспечения безопасности массовых мероприятий», 19 апреля 2018, Москва, Россия; The First International Conference on Physics, Mathematics and Statistics (ICPMS2018) 12–14 May 2018, Shanghai, China; XII Международной конференции «Новые информационные технологии и

исследовании сложных структур» (ИСАМ 2018), Россия, пос. Катунь, 04-08 июня 2018 г.; II Международной конференции «Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг» (АРИТЕСН-II – 2020), Россия, г. Красноярск.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 научных работах, в том числе 9 статей опубликованных в рецензируемых научных журналах определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 6 в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; 4 статьи в других изданиях.

Личный вклад автора состоит в проведении анализа состояния предметной области, формулировке цели и задач исследования, обосновании алгоритма имитационного моделирования изученной НСМО, и его программной реализации, а также проведении исследований динамики данной НСМО.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 78 наименований, 11 приложений, содержит 95 рисунков (без приложений) и 14 таблиц (без приложений). Основной текст работы составляет 154 страниц, общий объем – 208 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, сформулирована цель работы, описаны задачи, отражена научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведен анализ состояния предметной области, в том числе:

- рассмотрены основные проблемы обеспечения безопасности посетителей объектов проведения массовых мероприятий, для решения которых в том числе используются информационные контрольно-пропускные системы с точки зрения теории массового обслуживания представляющие собой НСМО;

- проведен анализ математических моделей НСМО и программного обеспечения, предназначенного для их моделирования; результаты которого позволили сделать обоснованные выводы о том, что подавляющее большинство существующих решений используют метод Монте-Карло, но не предоставляют готовых решений для моделирования ИКПС, сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе на основе информации со стадионов РФ обоснована математическая модель отдельного турникета ИКПС (с точки зрения СМО – обслуживающее устройство (ОУ)), в соответствии с которой функционирование ОУ характеризуется временем обслуживания заявки – случайной величиной, плотность вероятности которой вычисляется по формуле:

$$p\{\xi\} = \begin{cases} 0, & \text{при } \xi \leq 1, \\ \frac{2M[\xi]}{9(M[\xi]-1)}(\xi-1), & \text{при } 1 < \xi \leq M[\xi], \\ \frac{2M[\xi]}{9(M[\xi]-10)}(\xi-10), & \text{при } M[\xi] < \xi < 10, \\ 0, & \text{при } \xi \geq 10, \end{cases} \quad (2)$$

где $p(\xi)$ – плотность вероятности обслуживания данной заявки в момент времени $\xi \in [1, 10]$

с, $M[\xi] = \int_1^{10} \xi p(\xi) d\xi$ – математическое ожидание ξ , а средняя интенсивность

обслуживания (количество обслуженных заявок в течение одной минуты) $\bar{\mu} = 60/M[\xi]$.

Например, при выборе $M[\xi] = 4$ с, средняя интенсивность обслуживания составляет 15 заявок/минуту, что соответствует параметрам НСМО, изученной ранее С.В. Поршневым и Д.А. Якобом.

Далее обоснован выбор математической модели, описывающей зависимости интенсивности поступления заявок на обслуживание в исследуемую НСМО. Зависимости числа посетителей, вошедших на стадион, от времени $N^{out}(t)$, нормированные на общее число посетителей футбольного матча $\max(N^{out}(t))$, а также соответствующие зависимости числа попыток прохода на стадион в течение одной минуты от времени (в терминах СМО – интенсивности поступления заявок $\lambda(t)$), нормированные на максимальную интенсивность поступления заявок λ_{\max} , представлены на (рис. 1).

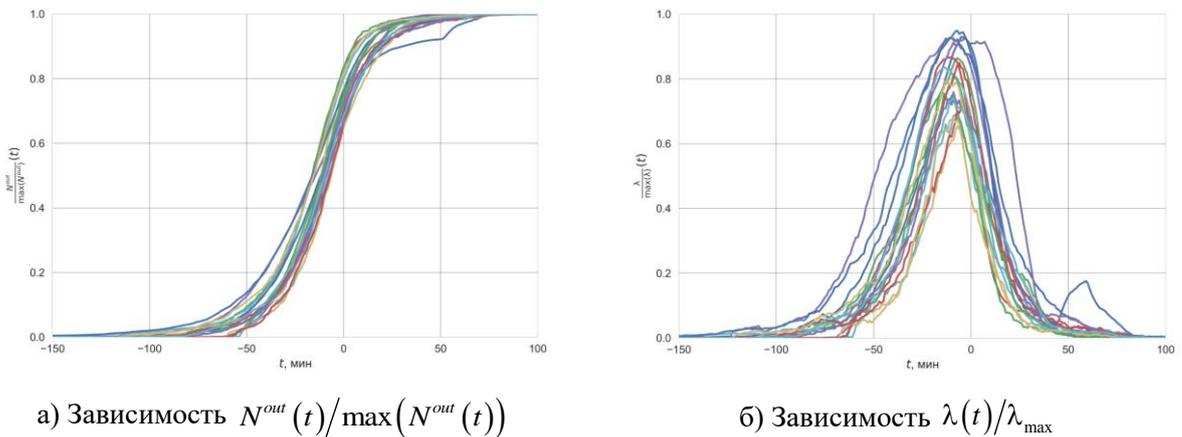


Рисунок 1.

Из рисунка 1а видно, что 17 из 18 зависимостей $N^{out}(t)/\max(N^{out}(t))$ представляют собой некоторые монотонно возрастающие функции, значения которых в момент начала футбольного матча варьируются в диапазоне $[0,65; 0,85]$. Из рисунка 1б видно, что зависимости $\lambda(t)/\lambda_{\max}$ монотонно возрастают от нуля до некоторого максимального значения, которое достигается примерно за 10–15 минут до начала футбольного матча. После достижения максимального значения зависимости $\lambda(t)/\lambda_{\max}$ монотонно убывают до нуля. Из рис. 1б видно, что зависимость интенсивности поступления заявок от времени представляет собой аддитивную смесь детерминированной и случайной составляющих:

$$\lambda(t) = \lambda^{\det}(t) + \lambda^{md}, \quad (3)$$

где $\lambda^{\det}(t)$ – детерминированная составляющая, а λ^{md} – случайная составляющая зависимости интенсивности поступления заявок в НСМО от времени. Была высказана гипотеза о возможности использования при моделировании НСМО кусочно-постоянной аппроксимации зависимости $\lambda^{\det}(t)$:

$$\lambda^{\det}(t) = \sum_{k=0}^K (\theta(t-t_k) - \theta(t-t_{k+1})) \cdot \bar{\lambda}_k, \quad (4)$$

где $\theta(t-\xi)$ – функция Хэвисайда:

$$\theta(t-\xi) = \begin{cases} 0, & t < \xi, \\ 1, & t \geq \xi, \end{cases}$$

где K – количество интервалов кусочно-линейной аппроксимации, $\bar{\lambda}_k$ – среднее значение функции $\lambda(t)$ на интервале $[t_k, t_{k+1}]$. Длину очереди заявок на обслуживание на интервале $[t_k, t_{k+1}]$, необходимо вычислять с учетом числа заявок, оставшихся необслуженными на интервале $[t_k, t_{k+1}]$, соответственно, общее число обслуженных заявок в момент времени t_{k+1} следует вычислять как сумму числа заявок, обслуженных на временных интервалах

$[t_1, t_2], \dots, [t_{k-1}, t_k], [t_k, t_{k+1}]$. Это эквивалентно переходу от изучения динамики НСМО, описываемой СДУ (1), к рассмотрению динамики совокупности СМО, функционирующих на последовательных временных интервалах, длительность которых мала в сравнении с длительностью интервала моделирования, а начальные условия функционирования СМО на данном временном интервале совпадают с конечным состоянием СМО на предыдущем временном интервале. Высказанная гипотеза была подтверждена результатами моделирования НСМО, представленными в Главе 3.

Далее обоснован алгоритм моделирования НСМО, блок-схема которого представлена на рис. 2 и рис.3, и описана программная реализация алгоритма на MATLAB, листинг m-пакета представлен в Приложении 11.

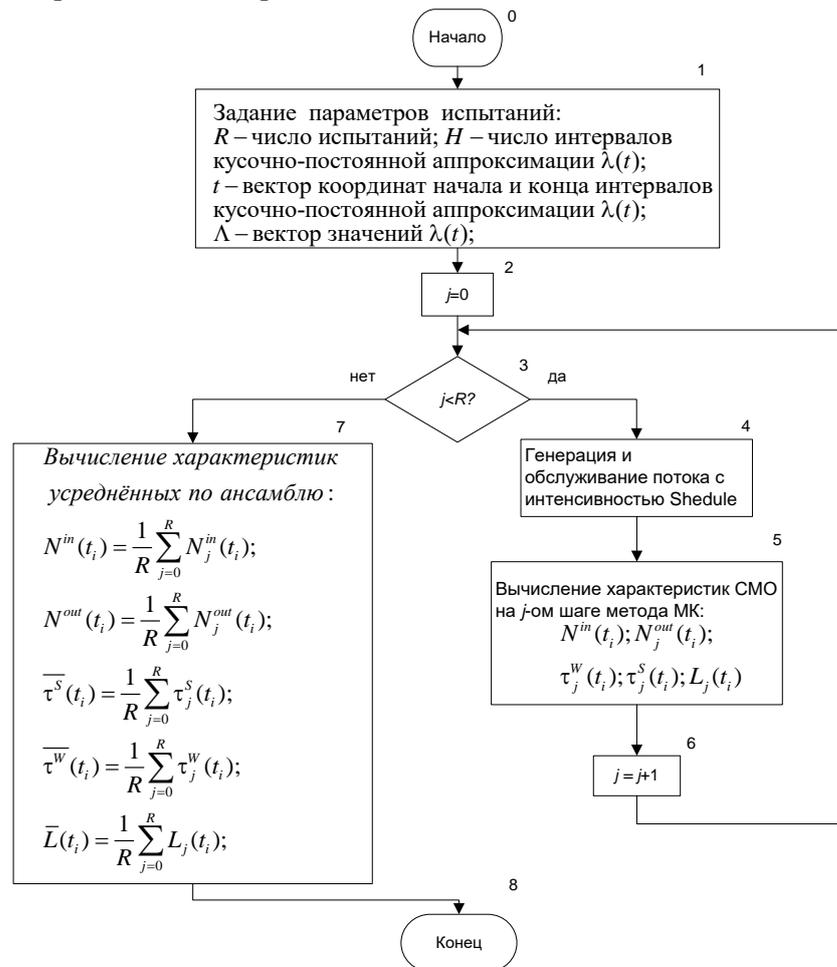


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма моделирования нестационарной СМО с кусочно-постоянным законом, описывающим изменение интенсивности от времени: 1 – блок задания значений входных параметров алгоритма; 2 – блок инициализации счетчика числа испытаний; 3 – блок контроля значения счетчика шагов метода Монте-Карло; 4 – блок генерации и обслуживания потока заявок (детализация данного блока представлена на рис. 2); 5 – блок вычисления характеристик СМО на j -ом шаге метода Монте-Карло (здесь $N_j^{in}(t_i)$ – входной поток заявок; $N_j^{out}(t_i)$ – поток обслуженных заявок; $\tau_j^S(t_i)$ – зависимость длительности обслуживания от времени; $\tau_j^W(t_i)$ – зависимость длительности ожидания заявки в очереди от времени; $L_j(t_i)$ – зависимость длины очереди от времени); 6 – блок увеличения значения счетчика числа испытаний на единицу; 7 – блок вычисления усредненных по ансамблю реализаций характеристик СМО. Блок генерации и обслуживания потока заявок детализирован на рис.3.

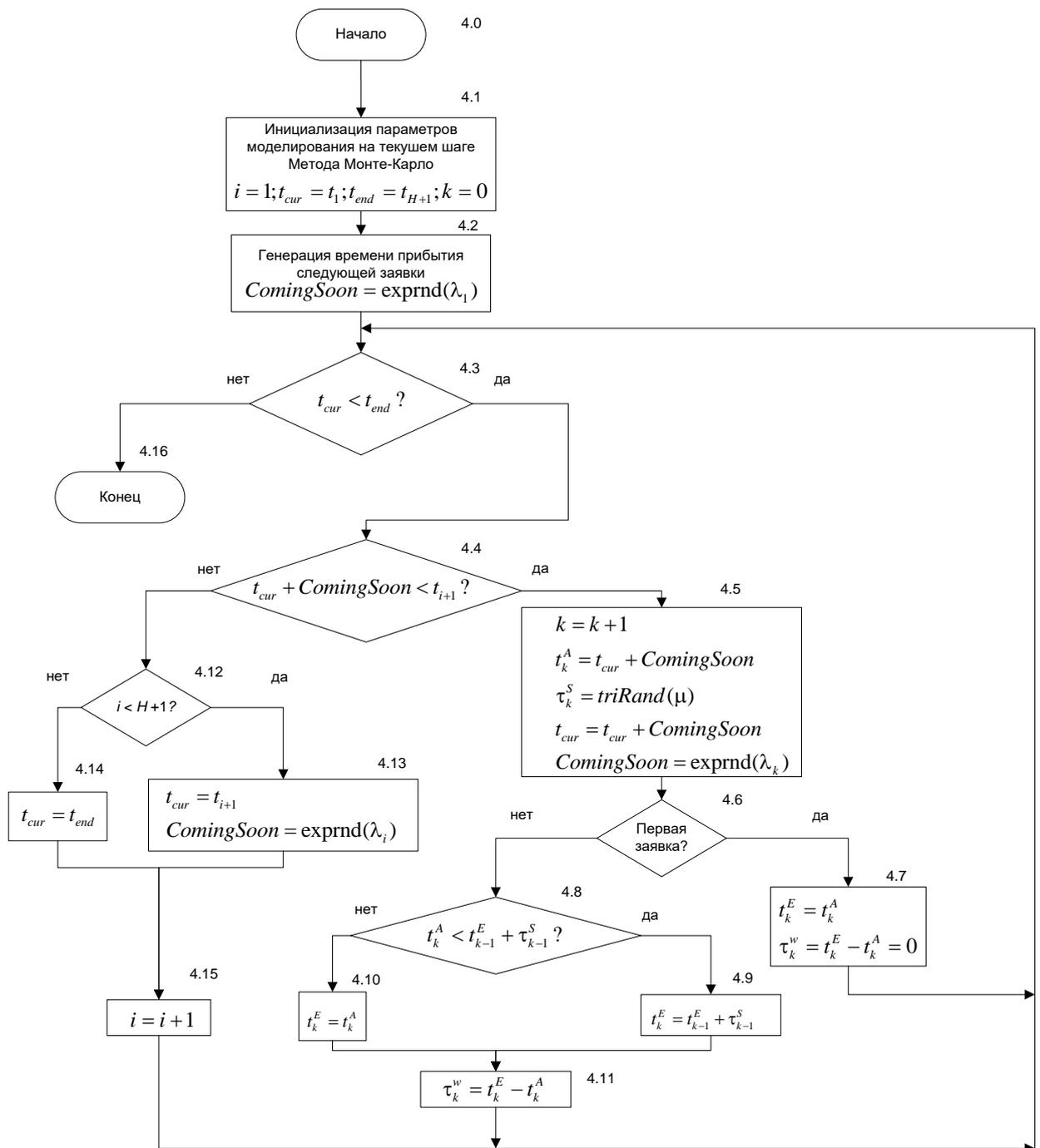


Рис. 3. Детализация блока 4: 4.1 – блок задания значений входных параметров алгоритма $\lambda_{cur} = \lambda_i; t_{cur} = t_i; t_{end} = t_K$; для j -го шага метода Монте-Карло; 4.2 – блок генерации случайного числа ($ComingSoon$ – время прихода следующей заявки) с законом распределения $F(t) = 1 - e^{-\lambda_{cur}}$; 4.3 – блок проверки необходимости продолжать моделирование; 4.4 – блок проверки попадания следующей заявки в текущий интервал; 4.5 – блок установки модельного времени в момент $ComingSoon$; генерации заявки и добавление её в конец очереди (здесь же осуществляется генерация случайного числа с треугольным законом распределения с параметрами $[min, mean, max]$ (min – минимальное время обслуживания заявки, $mean$ – момент времени, соответствующий максимальному значению плотности треугольного распределения времени обслуживания заявки, max – максимальное время обслуживания заявки), используемого как значение времени обслуживания данной заявки; момент $ComingSoon$ переопределяется аналогично блоку 4.2; блок 4.6 – проверка была ли обслужена хотя бы одна заявка; 4.7 – блок обслуживания первой заявки без очереди; 4.8 – блок проверки обслужилась ли предыдущая заявка до момента поступления текущей заявки (есть ли очередь); 4.9 – блок вычисления момента, когда текущая заявка поступит

на обслуживание; 4.10 – блок вычисления момента, когда текущая заявка поступит на обслуживание; 4.11 – блок вычисления времени ожидания в очереди; 4.12 – блок проверки не завершились ли интервалы для моделирования; 4.13 – блок перехода на следующий интервал моделирования; 4.14 – блок перехода на конец последнего интервала моделирования; 4.15 – блок инкремента счётчика интервалов;

В третьей главе проведено экспериментальное исследование особенностей функционирования моделей одноканальной и многоканальных НСМО, в ходе которого вычислены зависимости числа обслуженных заявок $N_{all}(t)$, длины очереди заявок на обслуживание $L(t)$, длительности ожидания обслуживания $\tau^w(t)$ от времени. Рассмотрим типичные зависимости $N_{all}(t)$, $L(t)$, $\tau^w(t)$ одноканальной НСМО, на вход которой подавались потоки заявок, интенсивность поступления которых менялась во времени и описывалась функциями, графики которых представлены на рис. 5 (здесь интервал кусочно-постоянной аппроксимации был выбран равным 0,25 мин.)

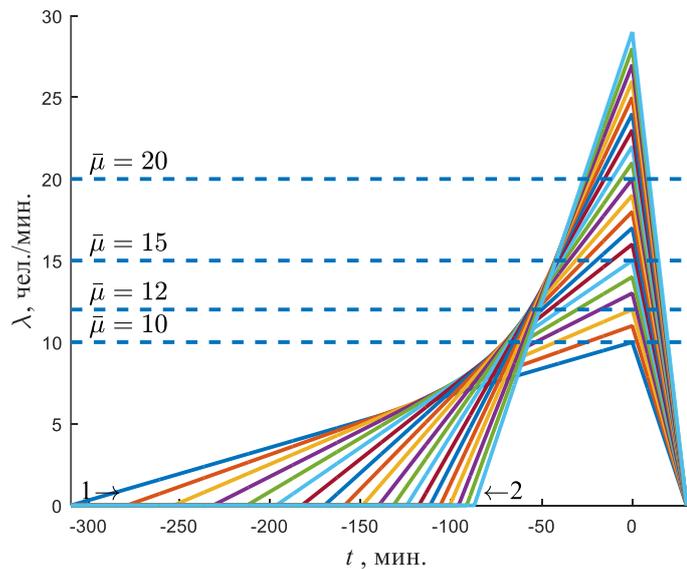


Рис. 4. Зависимости интенсивности поступления заявок на вход НСМО от времени $\lambda(t)$, использованные в обсуждаемых численных экспериментах

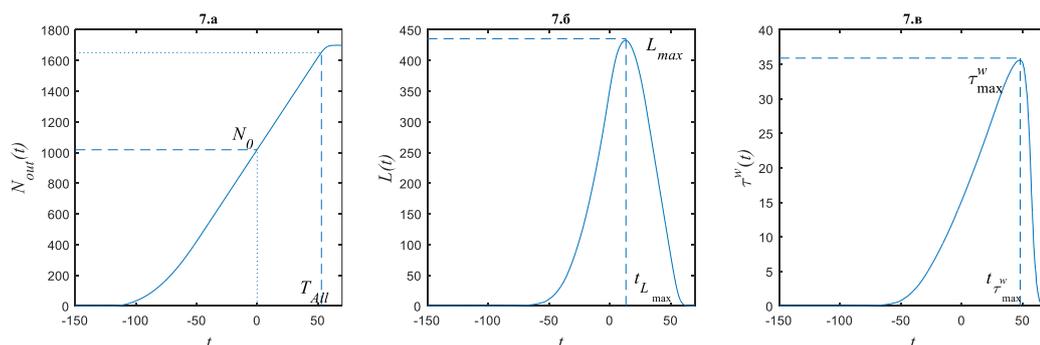


Рис. 5. Зависимости: а) числа вошедших от времени $N_{out}(t)$; б) длины очереди от времени $L(t)$; в) времени ожидания обслуживания от времени $\tau^w(t)$

Из рисунка 5 видно, что каждую из анализируемых зависимостей можно описать, указав координаты характерных точек:

– зависимости $L(t)$:

$$L_{\max} = \max(L(t)), \quad (5)$$

$$t_{L_{\max}} = \arg \max_t(L(t)), \quad (6)$$

– зависимости $\tau^w(t)$:

$$\tau_{\max}^w = \max(\tau^w(t)), \quad (7)$$

$$t_{\tau_{\max}^w} = \arg \max_t (\tau^w(t)), \quad (8)$$

– зависимости $N_{out}(t)$:

$$N_0 = N(0), \quad (9)$$

$$T_{All} = \{t : N(t) \geq 0.97 \cdot N_{\max}\}, \quad (10)$$

где $N_{\max} = \max(N(t))$.

Применительно к ИКПС данный результат означает, что данную НСМО можно описать следующим набором макроэкономических показателей:

- максимальным числом посетителей объекта проведения массового мероприятия, находящихся в очереди,
- моментом времени, в который длина очереди на входе на объект проведения массовых мероприятий достигает своего наибольшего значения;
- максимальной длительностью ожидания в очереди для входа на объект проведения массового мероприятия,
- моментом времени, в который длительность ожидания в очереди достигает своего максимального значения;
- числом посетителей, вошедших на объект проведения массового мероприятия к моменту его начала,
- моментом времени, к которому число посетителей массового мероприятия составит 97% от числа посетителей объекта проведения массовых мероприятий.

Работоспособность предложенного алгоритма имитационного моделирования НСМО подтверждена сходимость оценок макроэкономических показателей, полученных на основе имитационного моделирования, соответствующим оценкам, вычисленным аналитически.

Например, $\max(N_{out}(t))$ соответствует ожидаемому $N_{out} = \int_{T_1}^{T_3} \lambda(t) dt$, где T_3 – время окончания поступления новых заявок на обслуживание, $\lambda(t \geq T_3) = 0$.

Исследовано влияние вида функции, описывающей детерминированную составляющую интенсивности поступления заявок на обслуживание в НСМО, $\lambda^{\det}(t)$. В ходе исследования были вычислены зависимости $N_{all}(t)$, $L(t)$, $\tau^w(t)$. При этом были рассмотрены 2 вида функций:

$$1) \begin{cases} (\lambda_1^{\det}(t))' > 0, (\lambda_1^{\det}(t)) \geq 0, t \in [T_1, T_2], \\ (\lambda_1^{\det}(t))' < 0, (\lambda_1^{\det}(t)) \geq 0, t \in [T_2, T_3], \end{cases}$$

$$2) \begin{cases} (\lambda_1^{\det}(t))' > 0, (\lambda_1^{\det}(t)) \leq 0, t \in [T_1, T_2], \\ (\lambda_1^{\det}(t))' > 0, (\lambda_1^{\det}(t)) \leq 0, t \in [T_2, T_3]. \end{cases}$$

Анализ результатов показал, что вид графиков зависимостей $N_{all}(t)$, $L(t)$, $\tau^w(t)$ для обеих функций оказался подобен графикам, соответствующим зависимостям, представленным на рис. 5. При этом оказалось, что значения выбранных макроэкономических показателей НСМО зависят от значений T_1 , T_2 , T_3 и $\max(\lambda^{\det}(t))$, но не от вида функции $\lambda^{\det}(t)$, отвечающей указанным выше условиям.

Для обоснования выбора длительности интервалов кусочно-постоянной аппроксимации изучены зависимости выбранных макроэкономических показателей НСМО от длительности данных интегралов, которая обратно пропорциональна K – числу интервалов. График зависимости интенсивности входного потока заявок от времени, использованной в данном исследовании и ее кусочно-постоянные аппроксимации представлены на рис. 6.

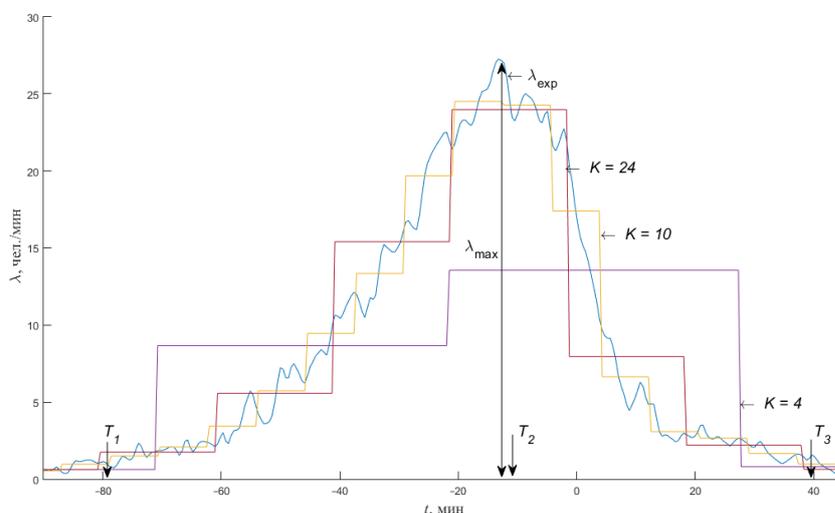


Рис. 6. Зависимости интенсивности поступления заявок на вход НСМО от времени $\lambda(t)$, при различном числе K интервалов кусочно-постоянной аппроксимации

Методика данных исследований состояла в вычислении ансамблей значений выбранных макроэкономических показателей ($M=500$) для каждого из выбранных значений единичного интервала кусочно-постоянной аппроксимации $\tau_k = (T_3 - T_1)/k$, $k = 1, 2, \dots$ и далее проверке статистической гипотезы о принадлежности ансамблей макроэкономических показателей, соответствующих временным интервалам τ_k, τ_{k+1} , одной и той же генеральной совокупности с помощью критерия типа Колмогорова-Смирнова. Полученные результаты позволили сделать обоснованный вывод о том, что для $T_3 - T_1 = 120$ мин достаточно использовать 64 интервала кусочно-постоянной аппроксимации, длина которых равняется 7,5 мин.

Исследовано влияние интенсивности случайной оставляющей поступления заявок. Для этого вычислены интервалы возможных значений макроэкономических параметров $\Delta \bar{L}_{\max}$, $\Delta \bar{\tau}_{\max}^w$, $\Delta \bar{N}_0$, $\Delta \bar{t}_{L_{\max}}$, $\Delta \bar{t}_{\tau_{\max}^w}$, $\Delta \bar{T}_{All}$ при различных значениях энергии случайной составляющей интенсивности входного потока заявок на вход НСМО и проведено их сравнение с аналогичными величинами в случае отсутствия случайной составляющей. Полученные результаты показали, что при увеличении энергии случайной составляющей интервалы возможных значений макроэкономических параметров $\Delta \bar{L}_{\max}$, $\Delta \bar{\tau}_{\max}^w$, $\Delta \bar{N}_0$, $\Delta \bar{t}_{L_{\max}}$, $\Delta \bar{t}_{\tau_{\max}^w}$, $\Delta \bar{T}_{All}$ оказываются существенно больше, чем в случае, когда она отсутствует. С физической точки зрения данный результат объясняется большим разбросом значений входной интенсивности из-за наличия в ней случайной составляющей. В тоже время, значения наиболее ожидаемых макроэкономических показателей \bar{L}_{\max} , $\bar{\tau}_{\max}^w$, \bar{N}_0 , $\bar{t}_{L_{\max}}$, $\bar{t}_{\tau_{\max}^w}$, \bar{T}_{All} в изученном диапазоне значений энергий случайной составляющей оказались слабо зависящими от данной величины (см. табл. 1).

Незначительное уменьшение параметров, представленных в табл. 1, при увеличении энергии случайной составляющей с физической точки зрения можно объяснить тем, что случайная составляющая генерировалась на основе плотности распределения остатков аппроксимации реальных зависимостей, вычисленной на основе метода Розенблатта-

Парзена, в котором использовалось ядро Коши. При этом оказалось, что математическое ожидание распределения изучаемых случайных величин, вычисленное на основе аппроксимаций Розенблатта-Парзена распределений ансамблей было отличным от нуля и возрастало при увеличении случайной составляющей.

Таблица 1 Значения макроскопических показателей НСМО и их разброса при различных уровнях SNR

SNR	6	9	12	15	18	21	∞
\bar{L}_{\max}	430,4	437,5	437,7	439,1	441,2	440,0	440,4
ΔL_{\max}	235,5	185,5	171,0	170,3	168,6	163,9	139,1
$\bar{\tau}_{\max}^w$	35,9	36,4	36,5	36,6	36,6	36,5	36,8
$\Delta \tau_{\max}^w$	16,5	15,0	14,2	13,5	12,3	12,7	11,7
\bar{N}_0	1011,0	1012,2	1014,0	1015,0	1017,1	1019,0	1017,6
ΔN_0	128,6	114,5	107,3	101,7	93,3	96,2	79,7
$\bar{t}_{L_{\max}}$	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,7	12,7
$\Delta t_{L_{\max}}$	11,4	11,0	10,5	10,07	9,6	9,2	8,5
$\bar{t}_{\tau_{\max}^w}$	48,1	49	49,2	49,26	49,5	49,7	49,5
$\Delta t_{\tau_{\max}^w}$	21,2	19,3	18,3	17,8	17,4	16,8	15,9
\bar{T}_{All}	51,7	52,3	52,5	52,7	52,7	52,7	52,9
ΔT_{All}	17,2	15,7	14,8	14,3	13,9	13,6	12,3

Проведено исследование влияния политики выбора ОУ (случайный выбор ОУ, выбор ОУ с наименьшей длиной очереди) на макроскопические количественные характеристики многоканальных НСМО, для чего был разработан соответствующий вычислительный алгоритм (алгоритм № 2), отличающийся от алгоритма № 1 наличием блока команд, представленного на рис. 7, который можно использовать, в том числе, для моделирования многоканальных СМО. Программная реализация, представленная в Приложении 11.

4.5.1.1

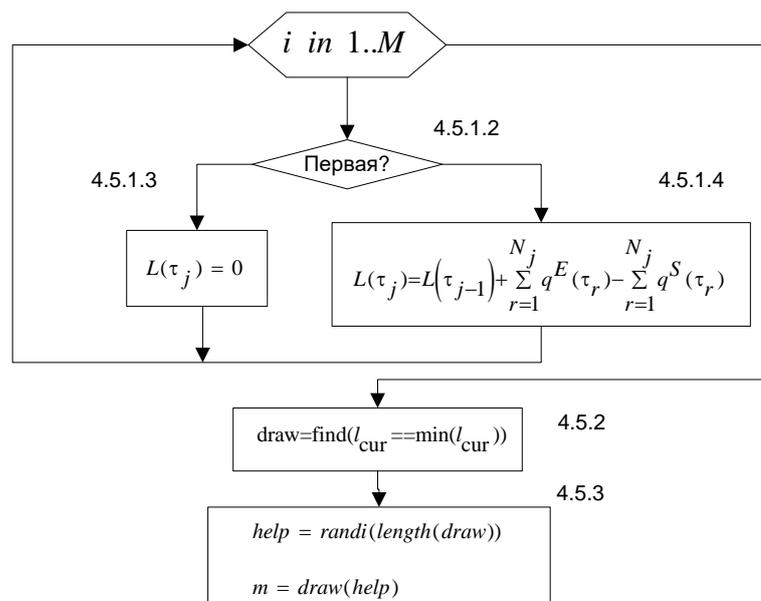


Рис. 7. Алгоритм реализации политики выбора наименьшей очереди

Проведена верификация алгоритма № 2 на основе сравнения макроэкономических показателей многоканальной СМО, вычисленных с помощью программной реализации алгоритма № 2, с известными теоретическими оценками, полученными для многоканальной СМО в режиме недогруда ($\lambda/\mu < 1$).

Анализ результатов исследования влияния политики выбора ОУ на макроэкономические характеристики НСМО показал, что ожидаемое влияние отсутствует.

Для объяснения полученного результата изучено влияние политики выбора очереди на макроэкономические показатели многоканальной СМО в недогруженном ($\lambda/m\mu < 1$), перегруженном ($\lambda/m\mu > 1$) и промежуточных режимах ($\lambda/m\mu \approx 1$). Вычисленные при этом зависимости длины очереди к выбранному ОУ от времени представлены на рис. 8.

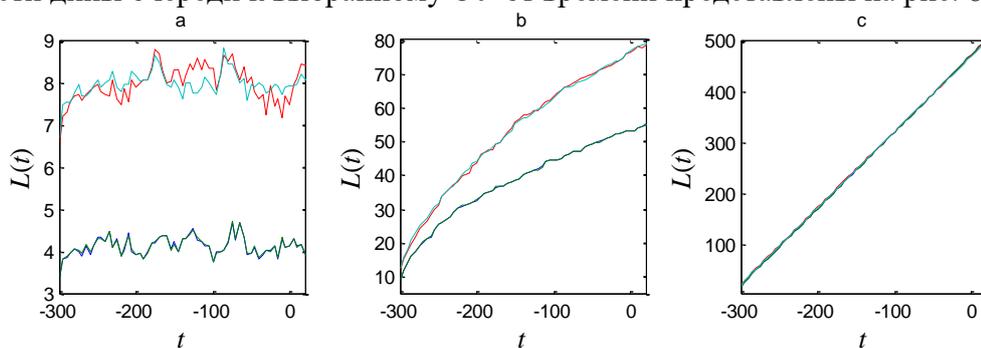


Рис. 8. Зависимость длины очереди от времени для 2-х канальной СМО в различных режимах. а) система недогружена $\rho_{1,2}=\rho/2=0.9$ б) система загружена $\rho_{1,2}=\rho/2=1$ в) система перегружена $\rho_{1,2}=\rho/2=1.2$

Из рис. 8 видно, что политика выбора ОУ с наименьшей длиной очереди заявок на обслуживание не влияет на длину очереди, в перегруженном режиме, когда длина очереди во времени увеличивается практически линейно. Политика выбора ОУ с минимальной длиной очереди заявок на обслуживание влияет на значение длины очереди в недогруженном режиме ($\lambda/m\mu < 1$), при этом, однако, длина очереди остается квазипостоянной, и в промежуточном режиме ($\lambda/m\mu \approx 1$), в котором длина очереди с течением времени увеличивается, однако, медленнее в сравнении с перегруженным режимом ($\lambda/m\mu > 1$). Данный результат объясняет независимость параметров многоканальной НСМО от политики выбора очереди, у которой интенсивность поступления заявок на обслуживание такова, что все ее ОУ работают в режиме перегруза.

Исследованы особенности функционирования многоканальных НСМО в режиме свободного прохода в следующих режимах:

– режим № 1, в котором интенсивность поступления заявок в НСМО на временном интервале $[T_1, T_2]$ монотонно возрастает от нуля до максимального значения λ_{max} и далее на временном интервале $[T_2, T_3]$ убывает от λ_{max} до нуля, при этом для любых T_2 $[T_1, T_2] + [T_2, T_3] = const$, $\lambda_{max} = const$;

– режим №2, в котором интенсивность поступления заявок в НСМО на временном интервале $[T_1, T_2]$ монотонно возрастает от нуля до максимального значения λ_{max} и далее на временном интервале $[T_2, T_3]$ убывает от λ_{max} до нуля, при этом T_2 фиксировано, а последовательность значений $\{T_3\}_k$, $k = \overline{1, K}$, такова, что $T_{3_1} < T_{3_2} < \dots < T_{3_K}$, а последовательность значений $\{\lambda_{max}\}_k = \{\lambda_{max}\}_1 \frac{T_{3_k} - T_1}{T_{3_k} - T_1}$.

При этом обнаружено, что:

1. В режиме № 1 для посетителей не имеет значения сразу – становиться в очередь к ОУ или выждать некоторое время и затем встать в очередь, так как время покидания объекта проведения массового мероприятия от этого не изменится.

2. В режиме № 2 длина очереди и, соответственно, длительность ожидания в очереди при увеличении T_3 уменьшается.

В этой связи следует рекомендовать посетителям не торопиться к выходу сразу после окончания массового мероприятия, но оставаться на месте в течение 10–20 минут.

В четвертой главе Проведен анализ типичных задач, представляющих практический интерес, понятных для инженеров, занимающихся проектированием и модернизацией ИКПС, а также лиц, принимающих решения о закупке соответствующего оборудования, и сотрудников служб безопасности объектов проведения массовых мероприятий.

Рассмотренные задачи разделены на 3 типа: а) задачи, возникающие при проведении реконструкции объекта проведения массовых мероприятий; б) задачи обеспечения комфортного и безопасного выхода посетителей и передвижения по городской среде, требующие оценки численности личного состава и дополнительных единиц общественного транспорта; в) задачи по оценке необходимого числа турникетов для включения в случае не полной продажи билетов.

Приведены примеры решений рассмотренных задач, в том числе задачи оценки макроскопических характеристик при заданных параметрах интенсивности поступления и интенсивности обслуживания для одноканальной НСМО; задачи оценки числа ОУ многоканальной НСМО при заданных параметрах интенсивности поступления и интенсивности обслуживания, а также расчёта зависимости макроскопических характеристик от числа турникетов в многоканальной НСМО; задачи оценки макроскопических характеристики НСМО от турникетов в режиме свободного прохода посетителей.

В заключении подведены итоги исследования и сформулированы основные научные и практические результаты. В приложениях приведены листинги разработанных алгоритмов и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, акты внедрения работ, проведенных в рамках диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Проведен анализ опыта проведения массовых мероприятий, результаты которого свидетельствуют о том, что сегодня для управления потоками посетителей используются информационные контрольно-пропускные системы, в состав которых входят турникеты, обеспечивающие проверку билетов и доступ посетителей на объект.

С математической точки зрения отдельный турникет является одноканальной НСМО, совокупность турникетов ИКПС – многоканальной НСМО, описывающиеся известной системой дифференциальных уравнений относительно вероятности поступления заявок на обслуживание в НСМО $P(t)$, получить решение которой в общем виде для произвольного числа турникетов и интенсивности обслуживания заявок не удастся, в связи с чем единственным методом, обеспечивающим вычисление количественных характеристик НСМО (зависимостей длины очереди от времени, числа обслуженных заявок от времени, времени ожидания обслуживания от времени и т.д.), является имитационное моделирование.

Проведенный анализ программных инструментов, предназначенных для имитационного моделирования НСМО, показал они не обладают функционалом, обеспечивающим вычисление макроскопических показателей, которые представляют интерес для разработчиков ИКПС и служб безопасности, что определяет необходимость разработки собственного программного инструмента.

2. Разработана научно-обоснованная имитационная модель турникета контрольно-пропускной системы объектов проведения массовых мероприятий и ее программная реализация в пакете MATLAB, в которой:

2.1. длительность обслуживания одного посетителя представляет собой случайную величину с треугольным законом распределения;

2.2. применяется кусочно-постоянная аппроксимация зависимости интенсивности поступления заявок от времени $\lambda(t)$, выбираемая на основе анализа статистической информации, собранной во время матчей чемпионата России по футболу;

2.3. Описана методика использования полученной имитационной модели.

3. Проведено исследование особенностей функционирования одноканальных НСМО (контрольно-пропускных систем объектов проведения массовых мероприятий), результаты которого позволяют сделать обоснованный вывод о том, что состояние НСМО у которой интенсивность поступления заявок на обслуживание на временном интервале $[T_1, T_2]$ монотонно нарастает от нуля до максимального значения λ_{max} , а затем на временном интервале $[T_2, T_3]$ убывает от λ_{max} до нуля характеризуется следующим набором макроскопических показателей: максимальной длиной очереди – L_{max} , максимальной длительностью ожидания в очереди – τ_{max}^w , моментом времени, в который очередь достигает максимальной длины – $t_{L_{max}}$, моментом времени, в который время ожидания в очереди окажется максимальным – $t_{\tau_{max}^w}$, числом обслуженных к моменту начала события заявок – N_0 , время, затраченное на обслуживание всех заявок – T_{All} , а также получены выражения, описывающие зависимости данных параметров от энергии шума, присутствующего во входной интенсивности поступления заявок в НСМО. Указанные показатели представляют интерес для проектировщиков, служб безопасности и собственников ИКПС.

4. Исследовано влияние политик выбора обслуживающего устройства на функционирование двухканальной СМО и многоканальной НСМО для выбранного закона изменения интенсивности поступления заявок во времени, результаты которого позволяют сделать обоснованный вывод о том, что:

4.1. исследованные политики выбора ОУ влияют на длину очереди к обслуживающему устройству СМО и НСМО, функционирующему в недогруженном состоянии;

4.2. исследованные политики выбора ОУ не оказывают существенного влияния на значения выбранных макроскопических показателей НСМО, когда система находится в перегруженном состоянии.

5. Исследованы особенности потоков посетителей массового мероприятия в режиме выхода посетителей:

– в режиме № 1, когда интенсивность поступления заявок в НСМО на временном интервале $[T_1, T_2]$ монотонно возрастает от нуля до максимального значения λ_{max} и далее на временном интервале $[T_2, T_3]$ убывает от λ_{max} до нуля, при этом для любых T_2 $[T_1, T_2] + [T_2, T_3] = const$, $\lambda_{max} = const$;

– в режиме № 2, когда интенсивность поступления заявок в НСМО на временном интервале $[T_1, T_2]$ монотонно возрастает от нуля до максимального значения λ_{max} и далее на временном интервале $[T_2, T_3]$ убывает от λ_{max} до нуля, при этом T_2 фиксировано, а

последовательность значений $\{T_3\}_k$, $k=\overline{1, K}$, такова, что $T_{3_1} < T_{3_2} < \dots < T_{3_K}$, а последовательность значений $\{\lambda_{\max}\}_k = \{\lambda_{\max}\}_1 \frac{T_{3_k} - T_1}{T_{3_k} - T_1}$.

При этом обнаружено что:

5.1. в режиме № 1 время покидания объекта проведения массового мероприятия посетителями не зависит от их поведения (сразу становиться в очередь к ОУ или выждать некоторое время и затем встать в очередь).

5.2. В режиме № 2 длина очереди и, соответственно, длительность ожидания в очереди при увеличении T_3 уменьшается, если посетители, выждав некоторое время будут вставать в очередь на выход. В этой связи следует рекомендовать посетителям не торопиться к выходу сразу после окончания массового мероприятия, но подождать 10–20 минут, что сократит их время ожидания выхода с объекта проведения массового мероприятия.

6. Продемонстрированы методики использования разработанного программного инструмента для решения ряда задач, возникающих на этапе проектирования контрольно-пропускных систем объекта проведения массовых мероприятий и на этапе планирования мероприятий по обеспечению безопасности посетителей планируемого массового мероприятия.

Рекомендуется дальнейшее развитие темы в направлении изучения возможности использования предложенных в диссертации подходов для анализа динамики других технических систем (например, в сетях связи), для описания которых применимы модели НСМО.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК и

Аттестационным советом УрФУ:

1. **Korelin I.A.** Research impact of queue choosing policy on macroscopic characteristics in multichannel non-stationary queue system / **Ivan A Korelin** and Sergey V Porshnev // Journal of Physics: Conference Series, II International Scientific Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering. – 2020. – Vol. 1679(3) – No. 032024. (0,37 п.л. / 0,18 п.л.) (Scopus)
2. **Korelin I.A.** Computational approach for researching visitor flow dynamics at public venues and mass gathering events / **Ivan A Korelin** and Sergey V Porshnev // Journal of Physics: Conference Series, II International Scientific Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering. – 2020. – Vol. 1679(3)– No. 032038 (0,37 п.л. / 0,18 п.л.) (Scopus)
3. **Корелин И.А.** Исследование влияния случайных вариаций интенсивности входного потока на макроэкономические показатели нестационарной СМО / **И.А. Корелин**, С.В. Поршневу // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2019. – № 47. С. 57-65. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)
4. **Korelin I.A.** Rationale choosing interval of a piecewise-constant approximation of input rate of non-stationary queue system / **Ivan A Korelin**, Sergey V Porshnev and Dmitry G. Shemyakin // Journal of Physics: Conference Series, XI International scientific and technical conference «Applied Mechanics and Dynamics Systems». – 2018. – Vol. 944. – No. 012060 (0,37 п.л. / 0,18 п.л.) (Scopus, WoS).
5. **Korelin I.A.** About influence of input rate random part of nonstationary queue system on statistical estimates of its macroscopic indicators / **Ivan A Korelin** and Sergey V Porshnev // Journal of Physics: Conference Series, International Conference «Information Technologies in Business and Industry 2018». – 2018. – Vol. 1015(3). – No. 032064 (0,37 п.л. / 0,18 п.л.) (Scopus, WoS)

6. **Korelin I.A.** Research of impact input rate random variations on macroscopic characteristics of non-stationary queuing system / Ivan A Korelin and Sergey V Porshnev // Journal of Physics: Conference Series, «The First International Conference on Physics, Mathematics and Statistics (ICPMS2018)». – 2018. – Vol. 1053. – No. 012011 (0,37 п.л. / 0,18 п.л.) (Scopus)
7. **Корелин И.А.** Математическое моделирование информационных контрольно-пропускных систем, обоснование выбора аппроксимации интенсивности поступления заявок / С.В. Поршневу, **И.А. Корелин** // Автоматизация. Современные технологии. – 2018. – Т. 72. № 7. – С. 324-329. (0,37 п.л. / 0,18 п.л.)
8. **Korelin I.A.** Non-Stationary Single-Channel Queuing System Features Research in Context of Number of Served Queries / Sergey Porshnev and **Ivan Korelin** // ITM Web Conf., 2017 Seminar on Systems Analysis. – 2017. – Vol. 10 – No. 03006 (0,37 п.л. / 0,18 п.л.) (WoS)
9. **Корелин И.А.** Исследование особенностей нестационарной одноканальной системы массового обслуживания в разрезе числа обслуженных заявок / С.В. Поршневу, **И.А. Корелин** // Cloud of Science – 2017. – № 3 (Т. 4.) – С. 366-375 (0,56 п.л. / 0,27 п.л.)

Патенты и свидетельства о регистрации программы:

10. Свидетельство 2018617426 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для моделирования одноканальных нестационарных систем массового обслуживания (Программа МОНСМО)» / **И. А. Корелин**, С. В. Поршневу. – Заявка № 2018614856 от 14.05.2018; дата гос. регистрации в Реестре 25.06.2018. – Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

В других изданиях:

11. **Корелин И.А.** Технологии оценки и прогнозирования состояния контрольно-пропускных устройств и очередей посетителей объектов проведения массовых мероприятий / **Корелин И.А.** // Международная научно-практическая конференция «Средства обеспечения безопасности массовых мероприятий», – 2018. – С. 38-41 (0,2 п.л. / 0,2 п.л.)
12. **Корелин И.А.** Исследование влияния случайных вариаций интенсивности входного потока на макроскопические показатели нестационарной системы массового обслуживания / Поршневу С.В., **Корелин И.А.** // Новые информационные технологии в исследовании сложных структур. Материалы двенадцатой конференции с международным участием, – 2018. – Т.1 – С: 114-115 (0,1 п.л. / 0,04 п.л.)
13. **Корелин И.А.** О возможности предсказания количественных характеристик потоков посетителей объектов проведения массовых мероприятий / **Корелин И.А.** // Межведомственная научно-практическая конференция «Специальные информационные технологии», – 2017. – С. 55-58 (0,2 п.л. / 0,2 п.л.)
14. **Корелин И.А.** Исследование особенностей математических моделей нестационарных систем массового обслуживания / Поршневу С.В., **Корелин И.А.**, Яков Д.А. // 26-я Международная Крымская Конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КРЫМИКО'2016) материалы конференции: в 13 томах. – 2016. – Т.1 – С. 600-608 (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)