

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ”

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ С
ОЧЕРЕДЯМИ

Автор Савин Алексей Анатольевич _____
(Фамилия, Имя, Отчество) (Подпись)

Направление подготовки 09.04.01 «Информатика и
(специальность) вычислительная техника»

Квалификация магистр

Руководитель Алиев Т.И., профессор, д.т.н. _____
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

К защите допустить

Зав. кафедрой Алиев Т.И., профессор, д.т.н. _____
(Фамилия, И., О., ученое звание, степень) (Подпись)

« ____ » _____ 20 ____ г.

Санкт-Петербург, 20 18 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Раздел 1. ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ	9
1.1. Аналитический обзор предметной области.....	9
1.1.1. Особенности организации вычислительных систем с динамической структурой	9
1.1.2. Классификация процессов	11
1.1.3. Описание математических моделей вычислительных систем	17
1.1.4. Характеристики систем массового обслуживания.....	19
1.2. Постановка задачи	21
1.3. Выводы.....	22
Раздел 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА.....	24
2.1. Аналитический метод.....	24
2.2. Построение имитационной модели.....	28
2.3. Проверка времени первой потери с помощью имитационного эксперимента ..	33
2.4. Проверка выдерживания перегрузки с помощью эксперимента.....	41
2.5. Выводы.....	48
Раздел 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ.....	50
3.1. Целевая архитектура блока управления.....	50
3.2. Выбор инструмента для разработки	51
3.3. Постановка экспериментов	51
3.4. Анализ полученных данных	54
3.5. Выводы.....	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	56
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	57
ПРИЛОЖЕНИЕ	62

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В вычислительной технике все большее распространение получают программно-аппаратные комплексы, в основе функционирования которых лежит подход динамического перераспределения вычислительных ресурсов [6]. Этот подход позволяет владельцу таких систем эффективнее распределять вычислительные ресурсы: уменьшать число простаивающих или временно выключать бездействующие, в результате чего происходит уменьшение операционных финансовых затрат на владение системой [7]. В то же время, с уменьшением числа готовых к работе ресурсов увеличивается вероятность потери пользовательского запроса при наступлении временной перегрузки системы [9]. Поэтому задача эффективного управления ресурсами вычислительной системы в реальном времени является актуальной.

Для решения этой задачи во многих вычислительных системах используют блоки автоматического управления доступными ресурсами [10]. Как правило, они основываются на динамической оценке потока поступающих от пользователей запросов и предсказании будущих состояний системы [11]. В основе современных методов этой оценки лежит использование встроенных в систему имитационных моделей, которые позволяют подобрать требуемую в каждый момент времени структуру вычислительных ресурсов [12]. Проблемой существующих решений является их низкая производительность: для выполнения расчетов требуется выполнить тысячи запусков имитационной модели, в результате чего на момент завершения расчетов состояние системы может отличаться от начального, а полученные результаты – не иметь ценности [13]. На практике для решения этой проблемы используют имитационные модели, имеющие более простую структуру, что существенно ухудшает точность получаемых результатов [14]. Поэтому актуальной задачей является разработка аналитического метода, который может быть использован для

прогнозирования нагрузки вычислительных систем и осуществления выбора их оптимальной конфигурации в реальном времени [15].

Степень теоретической разработанности темы. В ходе анализа предметной области не было найдено трудов, напрямую посвященных теме исследования. Среди рассмотренных материалов присутствуют работы, посвященные исследованию нестационарных процессов с помощью аналитических моделей, например, работы под авторством Бесекерского В.А. [8], Бабишина В.Д., Давыдова А.Н. [10], Мартынчука И.Г., Киреева В.Ю. [3], однако данные работы не затрагивают вопрос оценки устойчивости вычислительной системы к перегрузкам, а также выбора конфигураций систем, способных выдерживать заданные временные перегрузки. Большинство результатов, описывающих аналитические методы математического моделирования, получены в предположении о стационарности протекающих в системах процессов. Таким образом, тема имеет низкую степень теоретической разработанности.

Цель работы состоит в увеличении производительности блоков управления вычислительными системами с динамической структурой за счет замены используемых в них для прогнозирования нагрузки имитационных моделей на аналитические. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**.

1. Построить аналитические модели систем массового обслуживания с различными нестационарными процессами и в аналитической форме получить зависимости их характеристик от параметров системы и нестационарных процессов.
2. Разработать имитационные модели систем массового обслуживания с нестационарными процессами и выполнить проверку полученных аналитических результатов.
3. Оценить эффект от замены имитационных моделей на аналитические в прикладных системах, определить область применимости

предложенного метода и дать рекомендации по использованию полученных результатов.

Область исследования. Диссертация соответствует специальности 09.04.01. “Вычислительные системы и сети” и содержание диссертации полностью соответствует техническому заданию.

Объектом исследования являются вычислительные системы с нестационарными процессами.

Предметом исследования являются методы оценки устойчивости системы к временным перегрузкам, периодически возникающим в ходе их функционирования.

Теоретическую и методологическую основу исследования составляют методы теории массового обслуживания, методы математической статистики и теории вероятностей.

Информационная база исследования.

Основными научными источниками диссертации являются книга Алиева Т.И. "Основы моделирования дискретных систем" – [1] и книга Алиева "Основы проектирования систем" [7].

Научная новизна исследования заключается в следующем.

1. Предложен метод оценки требуемой емкости накопителя в системе массового обслуживания, в отличие от существующих, учитывающий нестационарность процесса поступления заявок в систему и позволяющий уменьшить процент потерь заявок, возникающих в результате временных перегрузок.
2. Впервые предложен метод оценки длины временного интервала от момента начала перегрузки до начала массовых потерь заявок в системах массового обслуживания, интенсивность поступления заявок которых изменяется по линейному, экспоненциальному и синусоидальному законам.

Практическая значимость исследования состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы в модулях управления вычислительными

системами с динамической структурой, в частности, в вычислительных облачных системах, для увеличения их производительности и уменьшения времени реакции системы на изменения в нагрузке.

Апробация результатов исследования. Основные положения работы обсуждались на XLVII научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО [59], а также на VII Конгрессе молодых ученых [60]. Материалы, отражающие основное содержание работы изложены в следующих изданиях:

1. Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО [4];
2. Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых [5];

Объем и структура работы. Работа состоит из 73 страниц машинописного текста, 32 рисунков, 16 таблиц и списка литературы, включающего 60 источников. Структурно работа состоит из введения, трех глав и заключения. Во введении обоснована актуальность и новизна исследования, определены цели и задачи, объект и предмет исследования. В первой главе представлены результаты обзора предметной области, а также полученные аналитические результаты. Вторая глава описывает имитационные модели и экспериментальную проверку полученных аналитических результатов. Третья глава содержит описание и оценку применения полученных результатов на практике. В заключении приведены основные результаты работы.

Раздел 1. ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Аналитический обзор предметной области

1.1.1. Особенности организации вычислительных систем с динамической структурой

Вычислительные системы (ВС) с программируемой структурой – это распределённые средства обработки информации, которые основаны на модели коллектива вычислителей. В этих системах нет функционального и конструктивного устройства, реализованного единым образом: все его компоненты (устройство управления, память и процессор) – распределённые.

Элементарная машина (ЭМ) является основной функционально-структурной единицей в системах данного класса. Примерами использования могут быть ЭВМ, многоядерные микропроцессоры, вычислительные ядра, вычислительные узлы, которые оснащены средствами межмашинной коммутации. ВС может быть сконфигурирована с произвольным числом ЭМ. Значит ВС с программируемой структурой относятся к масштабируемым средствам обработки информации, и они допускают формирование конфигураций с массовым параллелизмом.

Во время построения вычислительных систем с программируемой структурой ключевыми являются три принципа:

- массовый параллелизм (параллельность выполнения большого количества операций);
- программируемость (автоматическая реконфигурируемость структуры);
- конструктивная однородность;

Во время построения вычислительных систем с программируемой структурой ключевыми являются три принципа:

Также можно выделить подкласс пространственно-распределённых вычислительных систем – объединения сосредоточенных вычислительных систем, географически удалённых друг от друга. В него входят макросистемы –

системы, обладающие сложной конфигурацией, в которых функциональные элементы являются пространственно-распределенными вычислительными средствами, которые основаны на моделях вычислителя и коллектива вычислителей, и сети связи, обеспечивающих взаимный теледоступ между средствами обработки информации [40]. Пространственно-распределенная вычислительная система основана на следующих принципах:

- параллельность функционирования вычислительных ресурсов (способность всех или нескольких вычислительных систем вместе и одновременно решать некоторую сложную задачу, которая представлена программой с параллелизмом);
- превалирующее использование компьютерных сетей, включая Internet, а также массовых аппаратурно-программных средств;
- совместимость сосредоточенных вычислительных систем;

Эти системы предназначены в основном для реализации параллельных программ решения задач произвольной сложности в монопрограммном и мультипрограммном режимах [41]. Они также должны быть приспособлены и для выполнения тех функций, которые присущи вычислительным сетям [7].

Важнейшими критериями функционирования вычислительных систем помимо возможности параллельного решения задач является анализ их эффективности по таким критериям: производительность, надёжность, живучесть и экономичность [42]. Сложность анализа обусловлена следующими факторами:

- масштабируемость и большемасштабность вычислительных систем (современные суперкомпьютеры – вычислительные системы с массовым параллелизмом, их архитектура допускает количество ЭМ до 10^6 вычислительных машин);
- программируемость структуры вычислительной системы;
- стохастичность вычислительной системы (вычислительная система по своей природе из-за неабсолютной надёжности ресурсов является

стохастическим объектом, предназначенным для обслуживания вероятностных потоков заданий, которые представлены параллельными программами со случайными параметрами, такими как: число ветвей, время решения и т.п.);

Для большемасштабных распределенных вычислительных систем успех анализа зависит от моделей, которые описывают их функционирование [43]. Эти модели должны быть адекватны распределённым вычислительным системам, что будет гарантировать простоту и точность расчетов критериев эффективности [16].

1.1.2. Классификация процессов

Моделирование сложных систем удобно проводить в терминах процессов. Процесс – последовательная смена состояний системы во времени. Состояние системы описывается совокупностью значений переменных, которые задают это состояние [17].

Процессы классифицируются по следующим признакам:

- способ изменения значений величин, которые описывают состояние системы или процесса;
- характер процессов, которые протекают в системе;
- режим функционирования системы (режим процесса).

1. В зависимости от способа изменения значений величин, которые описывают состояния (рис. 1):

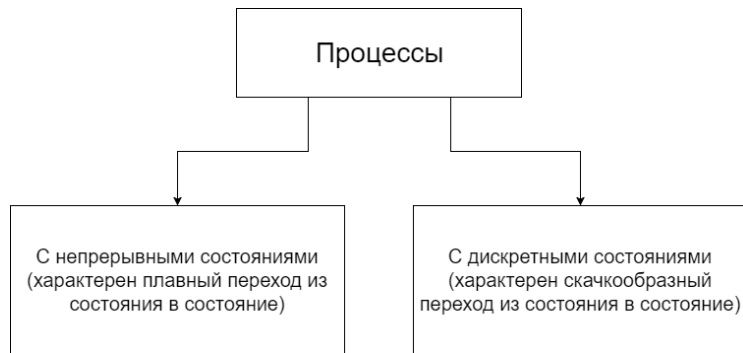


Рис. 1. Классификация процессов в зависимости от способа изменения значения величин, описывающих состояния

2. В зависимости от характера протекающих в системах процессов (рис. 2):

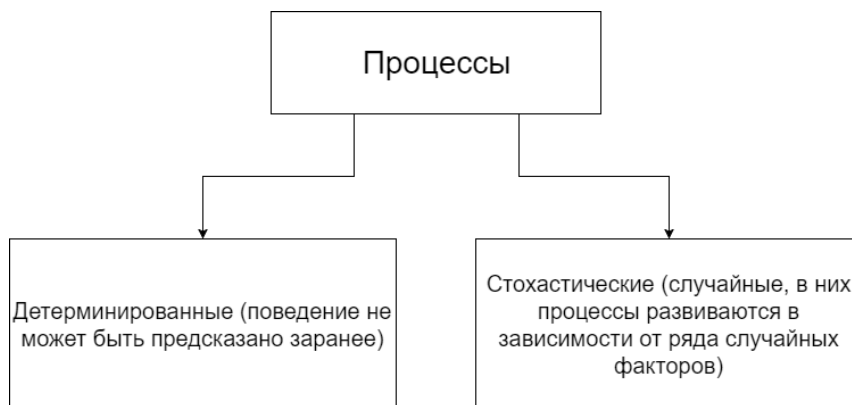


Рис. 2. Классификация процессов в зависимости от характера протекающих в системе процессов

3. В зависимости от режима функционирования вычислительной системы (рис. 3):

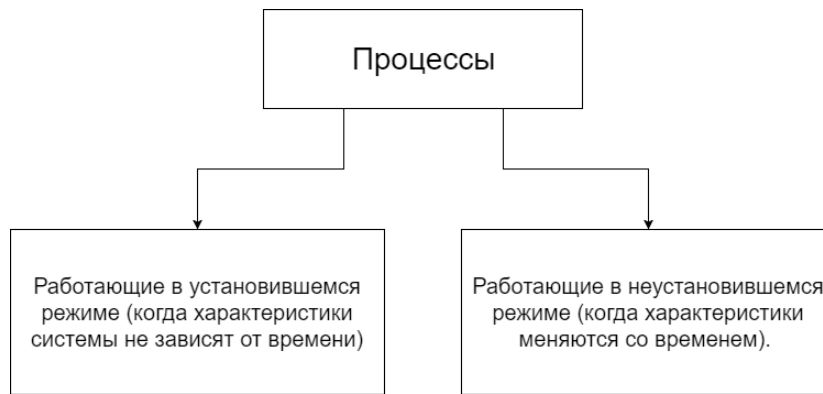


Рис. 3. Классификация процессов в зависимости от режима функционирования системы

Неуставившийся режим в системе может быть обусловлен: началом работы системы (переходной режим), нестационарностью параметров системы (нестационарный режим), перегрузкой системы (режим перегрузки) [44].

В данной работе в виду нестационарности процессов система будет находиться в неуставившемся режиме, при этом процессы, происходящие в системе можно классифицировать, как стохастические с дискретными состояниями [58].

Также процессы можно разбить на два больших класса (рис. 4):

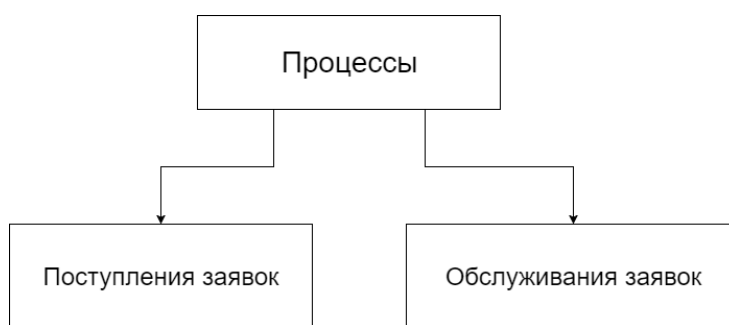


Рис. 4. Классы процессов

При этом процессы поступления и обслуживания заявок в системе могут быть (рис. 5):

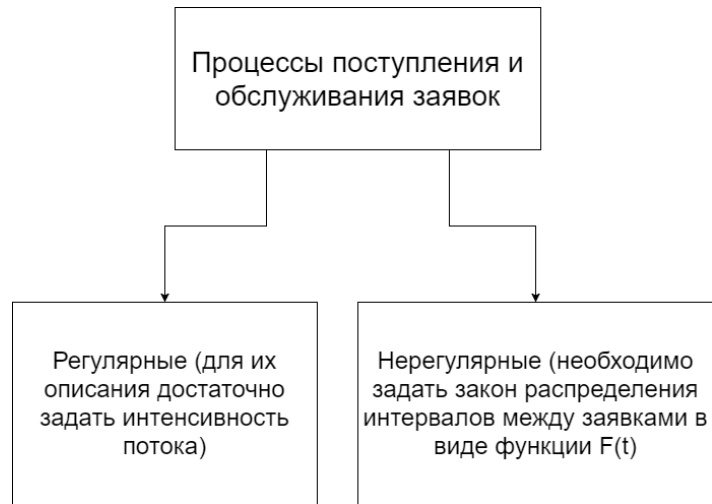


Рис. 5. Способы описания процессов поступления и обслуживания заявок

Поток поступления характеризуется временем между поступлением двух последовательных заявок и временем, которое заявка находится в обслуживании, соответственно [45]. Эти временные промежутки являются случайными величинами и описываются функцией $A_k(\tau_k)$ для всех интервалов τ_k ($k = 1, 2, \dots$) [56]. Аналогичным образом характеризуется поток обслуживания временем, которое заявка находится в обслуживании и описывается функцией $B_k(\tau_k)$ для всех интервалов τ_k ($k = 1, 2, \dots$) [57]. В рамках данной работы для упрощения будем рассматривать регулярные процессы, описываемые интенсивностью потока. Но также для каждого из них ещё нужно описать закон распределения, которые в свою очередь классифицируются следующим образом (рис. 6) [46]:



Рис. 6. Классификация законов распределения

Часто предполагается, что длительность обслуживания заявок распределена по экспоненциальному закону [47]. Это существенно упрощает аналитические выкладки. Данное допущение обусловлено тем, что процессы, которые протекают в системах с экспоненциальным распределением интервалов времени, являются марковскими [55].

В классической теории массового обслуживания оперируют таким понятием, как простейший поток заявок, т.е. поток, в котором одновременно соблюдаются следующие условия (рис. 7):

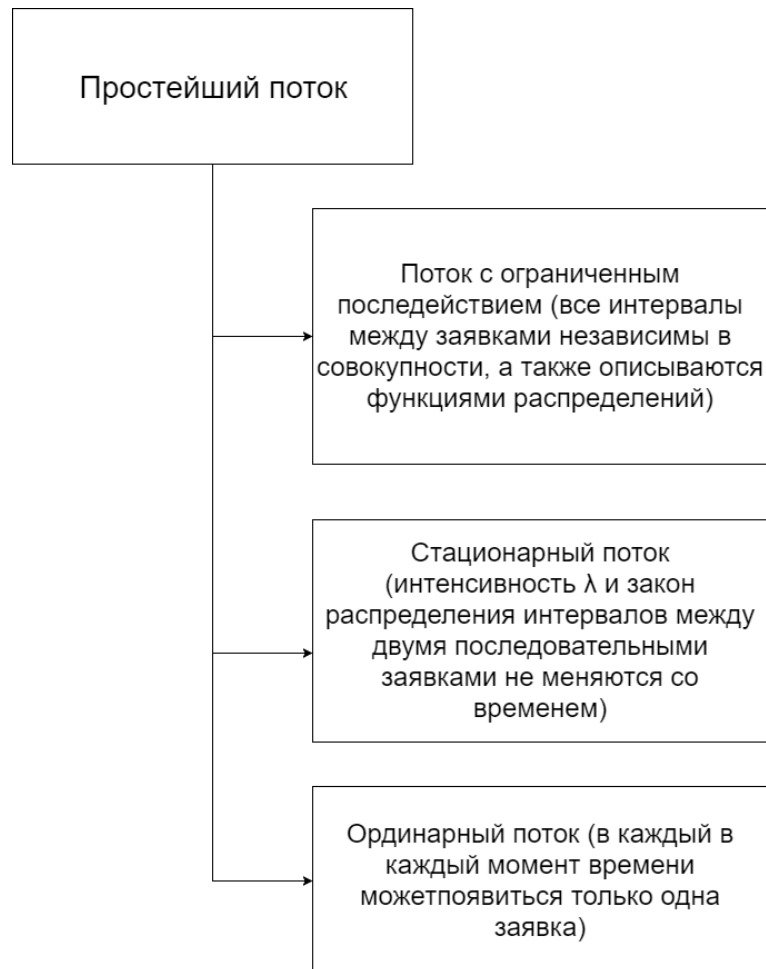


Рис. 7. Описание простейшего потока

В простейшем потоке интервалы времени τ распределены по экспоненциальному закону [48]. В рамках данной работы применительно к входящему потоку заявок будут соблюдаться только два условия: поток является ординарным, а также имеет ограниченное последствие. Такой поток называется нестационарным Пуассоновским потоком [1].

1.1.3. Описание математических моделей вычислительных систем

Проектирование сложных вычислительных систем с использованием математических моделей, разрабатываемых на основе концептуальных моделей, даёт возможность получить значения параметров проектируемой системы [54], необходимые для должного качества их функционирования [18].

Многообразие структурно-функциональной организации большого количества систем определяет использование различных математических моделей [49]. Выбор зависит от особенностей, которые присущи исследуемой системе [53]. Классификация математических моделей основывается на некоторых из этих особенностей. В частности, классифицируют модели по назначению следующим образом (рис. 8):

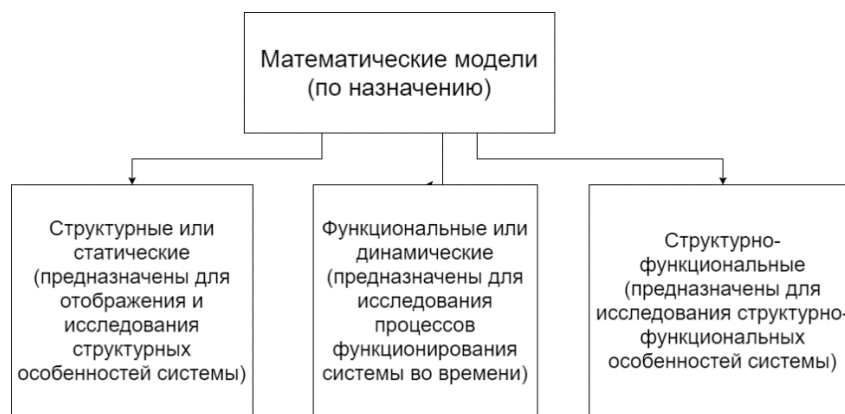


Рис. 8. Классификация математических моделей по назначению

По характеру функционирования исследуемой системы математические модели делятся на (рис. 9):



Рис. 9. Классификация математических моделей по характеру функционирования

В зависимости от характера процессов, которые протекают в исследуемой системе используются модели (рис. 10):

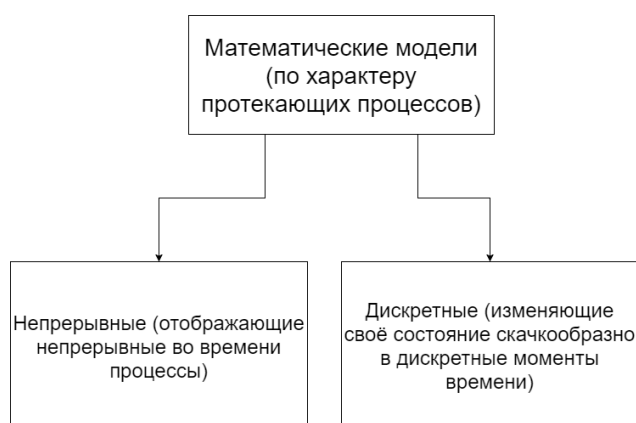


Рис. 10. Классификация математических моделей по характеру протекающих в них процессов

В зависимости от режима функционирования системы используются модели (рис. 11):



Рис. 11. Классификация математических моделей по режиму функционирования системы

Модели и классы систем могут не всегда соответствовать однозначным образом. Например, детерминированные системы могут быть представлены вероятностными математическими моделями [52], а непрерывные системы могут быть отражены дискретными моделями, и, наоборот [1].

1.1.4. Характеристики систем массового обслуживания

В данной работе в качестве математической модели возьмём систему массового обслуживания.

Система массового обслуживания (СМО) – математический объект, который содержит один или несколько приборов, обслуживающих поступающие в систему заявки; накопитель, в котором заявки, ожидающие обслуживания, образуют очередь [50]. Система массового обслуживания описывается символикой Кендалла [51]: **A/B/N/L**, где **A** и **B** – задают законы распределений интервалов времени между моментами поступления заявок в систему и, соответственно, длительности обслуживания заявок; **N** – количество обслуживающих приборов; **L** – ёмкость накопителя (отсутствие этого значения обозначает неограниченную ёмкость) [1].

Основными характеристиками систем массового обслуживания являются следующие величины:

- нагрузка системы:

$$\gamma = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda b;$$

- загрузка системы, которая определяется как доля времени, в течение которого прибор (или система в случае многоканальной СМО) обслуживает заявки. Загрузка может быть рассчитана как отношение среднего работы одного прибора к общему времени наблюдения T . Для СМО с K обслуживающими приборами время работы усредняется по всем приборам:

$$\rho = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{KT} \sum_{i=1}^K T_i;$$

Становится очевидным, что $0 \leq \rho \leq 1$;

- коэффициент простоя системы:

$$\eta = 1 - \rho;$$

- вероятность потери заявок:

$$\pi_{\Pi} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{N_{\Pi}(T)}{N(T)},$$

где T – время наблюдения за системой (ее работы); $N(T)$ – число заявок, которые поступили в систему за это время; $N_{\Pi}(T)$ – число потерянных заявок за это время;

- вероятность обслуживания заявки:

$$\pi_0 = 1 - \pi_{\Pi} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{N_0(T)}{N(T)},$$

где $N_0(T)$ – число обслуженных заявок за время T ;

- производительность системы (интенсивность потока обслуженных заявок, выходящих из системы):

$$\lambda' = \pi_0 \lambda = (1 - \pi_{\Pi}) \lambda;$$

если накопитель имеет неограниченную ёмкость, то если отсутствуют перегрузки, то вероятность потери заявок $\pi_{\Pi} = 0$, и, значит,

производительность системы будет равна интенсивность поступления заявок в СМО: $\lambda' = \lambda$;

- интенсивность потока необслуженных (потерянных) заявок из-за ограничения размера накопителя:

$$\lambda'' = \pi_n \lambda = (1 - \pi_0) \lambda;$$

здесь очевидно то, что сумма интенсивностей потоков потерянных и обслуженных заявок должна быть равна интенсивности потока заявок, входящего в систему: $\lambda' + \lambda'' = \lambda$;

- среднее время ожидания заявок в очереди w ;
- среднее время пребывания заявок в системе:

$$u = w + b;$$

- средняя длина очереди заявок:

$$l = \lambda' w;$$

- среднее число заявок в системе (на обслуживании в приборе и в очереди):

$$m = \lambda' u;$$

1.2. Постановка задачи

В рамках данной работы исследуется система с одним вычислительным узлом с стационарным непрерывным стохастическим процессом обслуживания входящих запросов, а также нестационарным непрерывным стохастическим процессом поступления запросов. Система работает в неустановившемся режиме.

Для этой системы будет построена функциональная модель, представляющая собой одноканальную систему массового обслуживания **М/М/1** (ёмкость накопителя не ограничена, на вход поступает однородный поток заявок с экспоненциальным распределением интервалов времени, а также экспоненциальной длительностью обслуживания). На вход модели будет подаваться нестационарный пуассоновский поток заявок, поток обслуживания заявок будет экспоненциальным. Потоки поступления и обслуживания заявок

будут регулярными, поток поступления будет задаваться интенсивностью $\lambda(t)$, поток обслуживания задается постоянной во времени интенсивностью μ .

Варьируемыми параметрами в системе будут являться:

- L – ёмкость накопителя;
- b – среднее время обслуживания;
- λ_1 – минимальная интенсивность входящего потока;
- λ_2 – максимальная интенсивность входящего потока;
- T_{Π} – время перегрузочного периода;
- характер изменения интенсивности входящего потока (линейная, экспоненциальная, синусоидальная);

Необходимо измерить следующие характеристики:

1. Время начала массовых потерь. Поскольку в стохастической системе с накопителем ограниченной ёмкости потери могут происходить в любых условиях и в любое время с некоторой вероятностью, то будем считать, что потери являются массовыми в нестационарной системе, когда при возрастающей интенсивности вероятность потери заявки становится больше $\pi_{\Pi} > 0.001$.
2. Параметры системы, способные выдержать определённый вид нагрузки. Для этого создадим на некоторое время T_{Π} перегрузку, изменяющуюся в соответствии с определённо-заданной функцией. Если с вероятностью 95% в системе за это время не случится ни одной потери, то будем считать, что системы выдерживает данный вид перегрузки и параметры системы удовлетворяют требованиям.

1.3. Выводы

Замещение системы математической моделью открывает большие возможности по исследованию её характеристик в зависимости от её параметров [19]. Чем больше производится допущений и упрощений в

модели, тем более неадекватной своей системе она становится [20]. Аналитический метод позволяет численно рассчитать интересующие нас характеристики системы через её параметры [21]. Метод имитационного моделирования позволяет более точно по сравнению с аналитическим методом рассчитать значения необходимых величин [22]. Однако на получение результата этим методом часто становится необходимо затрачивать большое количество времени [23].

Раздел 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА

2.1. Аналитический метод

Проведем исследование характеристик СМО в нашей модели для нестационарного процесса поступления заявок. Для начала идентифицируем нашу модель. Система состоит из одного обслуживающего прибора и накопителя ограниченной ёмкости.

На вход системе поступает поток заявок с интенсивностью λ_1 . Затем интенсивность потока меняется произвольным образом от λ_1 до λ_2 в течение промежутка времени T_n – время перегрузочного периода (рис. 12)

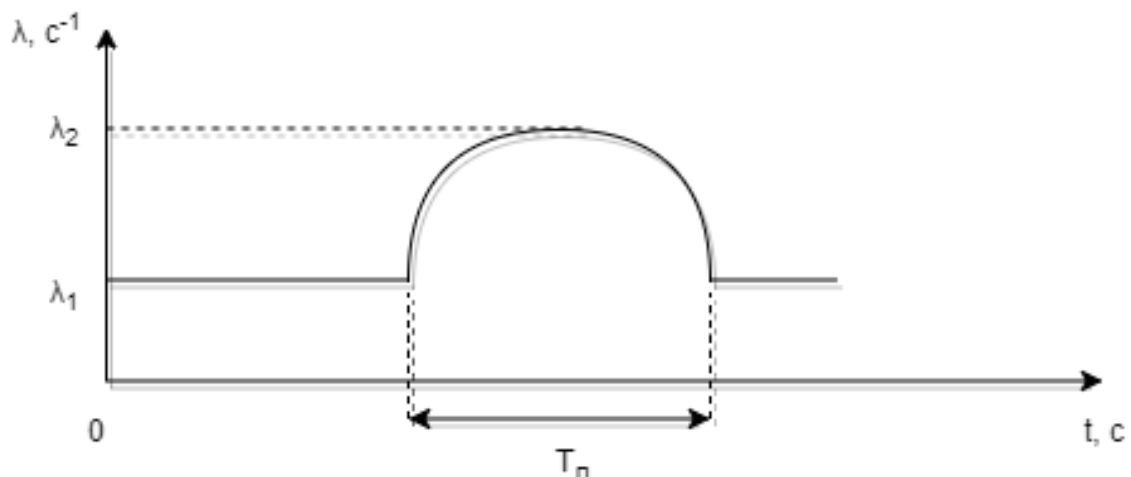


Рис. 12. Интенсивность нестационарного потока заявок в СМО

В экспериментах будем варьировать следующие параметры: минимальную и максимальную интенсивности λ_1 до λ_2 соответственно, время перегрузочного периода T_n . Также будем варьировать параметры самой модели: ёмкость накопителя L и среднее время обслуживания прибора b .

Рассчитаем время начала массовых потерь заявок в системе (когда $\pi_n > 0.001$). Пусть в течение перегрузочного периода интенсивность меняется по некоторому закону $\lambda(t)$ (рис. 13). При этом значение $\lambda_1 < \mu$ (нагрузка $y_1 < 1$), а значение $\lambda_2 > \mu$ (нагрузка $y_2 > 1$).

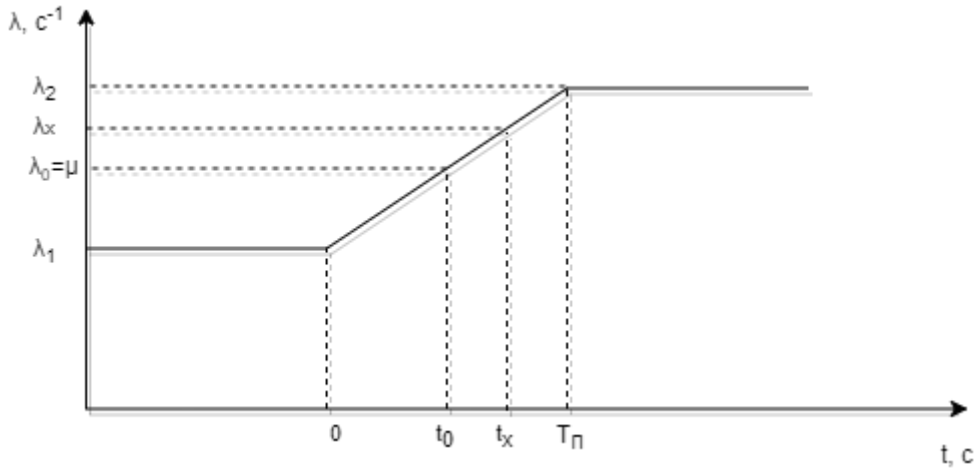


Рис. 13. Нестационарный поток с переменной интенсивностью

В этом случае заявки всегда будут быстрее обрабатываться, чем поступать, до наступления момента времени t_0 , при котором $\lambda(t_0) = \mu$ или $y(t_0) = 1$. Очередь начнет заполняться только от момента времени t_0 до t_x – момента времени, когда очередь будет заполнена полностью. За промежуток времени от t_0 до t_x в систему поступит $m(t) = \int_{t_0}^{t_x} \lambda(t) dt$ заявок. За это же время будет обслужено $n(t) = \mu * (t_x - t_0)$ заявок. В результате время t_x можно рассчитать, когда разность поступивших и обслуженных заявок заполнит очередь ёмкостью L : $m - n = L$. Получается соотношение:

$$\int_{t_0}^{t_x} \lambda(t) dt - \mu * (t_x - t_0) = L. \quad (1)$$

В частном случае, когда в перегрузочный период нагрузка возрастает линейно: $y(t) = y_1 + k * t$, где $k = \frac{y_2 - y_1}{T_{\Pi}}$, получаем соотношение $y_x = 1 + k * (t_x - t_0)$, значит:

$$t_x - t_0 = \frac{y_x - 1}{k}. \quad (2)$$

Используя соотношение (2), число поступивших заявок будет равно:

$$m = \int_{t_0}^{t_x} \lambda(t) dt = \frac{1}{b} * \int_{t_0}^{t_x} y(t) dt = \frac{1}{b} * \int_{t_0}^{t_x} (1 + k * (t - t_0)) dt = \frac{1}{b} * \left(t_x - t_0 + k * \frac{(t_x - t_0)^2 - (t_0 - t_0)^2}{2} \right) = \frac{1}{b} * \left(t_x - t_0 + k * \frac{(t_x - t_0)^2}{2} \right) = \frac{1}{b} * \left(\frac{y_x - 1}{k} + \frac{k}{2} * \left(\frac{y_x - 1}{k} \right)^2 \right) = \frac{1}{b} * \left(\frac{y_x - 1}{k} + \frac{(y_x - 1)^2}{2k} \right)$$

$$\left(\frac{2*y_x-2}{2*k} + \frac{y_x^2-2y_x+1}{2*k}\right) = \frac{1}{b} * \frac{y_x^2-1}{2*k}. \quad (3)$$

$$n = \mu * (t_x - t_0) = \frac{y_x-1}{k*b}. \quad (4)$$

Тогда из соотношений (3) и (4) получаем:

$$L = m - n = \frac{1}{b} * \left(\frac{y_x^2-1}{2*k} - \frac{2*y_x-2}{2*k}\right) = \frac{1}{b} * \frac{(y_x-1)^2}{2*k}, \text{ отсюда получаем формулу:}$$

$$y_x = \sqrt{2 * b * L * k} + 1. \quad (5)$$

Из формулы (5) можно легко узнать время первой потери t_x , зная, что $t_x = \frac{y_x-y_1}{k}$.

Получаем формулу времени для первого отказа:

$$t_x = \frac{\sqrt{2*b*L*k}+1-y_1}{k}. \quad (6)$$

Проведём аналогичные расчёты для синусоидальной зависимости $y(t) = y_1 + (y_2 - y_1) * \sin(\pi * \frac{t}{T_n})$. С помощью математического пакета для ЭВМ рассчитаем конечную формулу, здесь становится невозможным, как в предыдущем случае, в чистом виде выразить величину y_x через остальные параметры, поэтому оставим формулу в виде такого соотношения:

$$L = \frac{\mu * T_n}{\pi} * \left[\sqrt{(y_2 - y_1)^2 - (1 - y_1)^2} - \sqrt{(y_2 - y_1)^2 - (y_x - y_1)^2} \right] + (1 - y_1) * \left(\sin^{-1} \frac{1-y_1}{y_2-y_1} - \sin^{-1} \frac{y_x-y_1}{y_2-y_1} \right) \quad (7)$$

Проведём расчеты для экспоненциальной зависимости $y(t) = y_1 * \left(\frac{y_2}{y_1}\right)^{\frac{t}{T_n}}$.

Точно так же с помощью математического пакета для ЭВМ рассчитаем конечную формулу, здесь тоже невозможно в чистом виде выразить величину y_x через остальные параметры, поэтому оставим формулу в виде такого соотношения:

$$L = \frac{T_{\Pi} * \mu}{\ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} * (y_x - 1 - \ln y_x) \quad (8)$$

Также была поставлена еще одна важная задача – определить, какими параметрами должна обладать система, чтобы она могла выдержать определённый тип перегрузки.

Поступим аналогичным образом, как при расчете времени первой потери. Очередь будет заполняться только от момента времени t_{01} до t_{02} . На рис. 14 изображен симметричный график относительно точки с абсциссой $\frac{T_{\Pi}}{2}$, поэтому на нём $t_{02} = T_{\Pi} - t_0$, $t_{01} = t_0$.

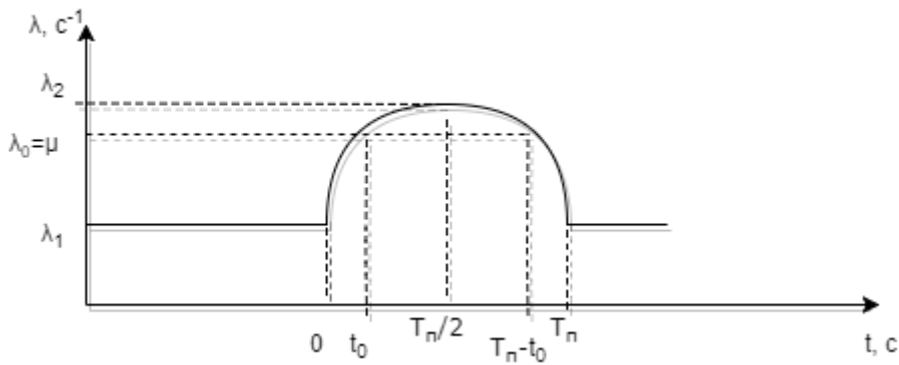


Рис. 14. Нестационарный синусоидальный поток с переменной интенсивностью

За промежуток времени от t_{01} до t_{02} в систему поступит $m(t) = \int_{t_{01}}^{t_{02}} \lambda(t) dt$ заявок. За это же время будет обслужено $n(t) = \mu * (t_{02} - t_{01})$ заявок. В результате, ёмкость накопителя, которой должна обладать система, можно определить из соотношения: $m - n = L$.

Получается соотношение:

$$\int_{t_{01}}^{t_{02}} \lambda(t) dt - \mu * (t_{02} - t_{01}) = L \quad (9)$$

Возьмём, к примеру, линейную зависимость загрузки от времени: $y(t) = y_1 + k * t$, где $k = \frac{y_2 - y_1}{T_{\Pi}}$, и подставим это в соотношение (9), зная, что $y(t) = \lambda(t) * \mu$.

С помощью математического пакета для ЭВМ рассчитаем конечную формулу:

$$L = \frac{\mu * T_{\pi}}{2} * \frac{(y_2 - 1)^2}{y_2 - y_1} \quad (10)$$

В итоге, если у нас заданы параметры нестационарного входного потока, а именно минимальная интенсивность y_1 , максимальная интенсивность y_2 и время перегрузочного периода T_{π} , то из соотношения (10) мы можем определить, какими параметрами (а именно L – ёмкость накопителя, b – среднее время обслуживания) должна обладать система, чтобы справиться с подобной перегрузкой, т.е. избежать потерь.

Теперь также возьмём синусоидальную зависимость загрузки от времени: $y(t) = y_1 + (y_2 - y_1) * \sin(\pi * \frac{t}{T_{\pi}})$ и подставим его в соотношение (9), зная, что $y(t) = \lambda(t) * \mu$. С помощью математического пакета для ЭВМ рассчитаем конечную формулу:

$$L = \frac{\mu * T_{\pi}}{\pi} * \left[2\sqrt{(y_2 - y_1)^2 - (1 - y_1)^2} - (1 - y_1) * (\pi - 2 * \sin^{-1} \frac{1 - y_1}{y_2 - y_1}) \right] \quad (11)$$

Теперь возьмём экспоненциальную зависимость загрузки от времени: $y(t) = y_2 * \left(\frac{y_1}{y_2}\right)^{\lfloor \frac{2t}{T_{\pi}} - 1 \rfloor}$ и подставим его в соотношение (9), зная, что $y(t) = \lambda(t) * \mu$. С помощью математического пакета для ЭВМ рассчитаем конечную формулу:

$$L = \frac{T_{\pi} * \mu}{\ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} * (y_2 - 1 - \ln y_2) \quad (12)$$

2.2. Построение имитационной модели

Выясним с помощью метода имитационного моделирования, насколько выведенная формула будет соотноситься с полученными результатами. Проведём опыт, в котором интенсивность входящего потока будет меняться от значения λ_1 до значения λ_2 по определенной функции, которую можно задать.

Построим модель в AnyLogic (рис. 15).

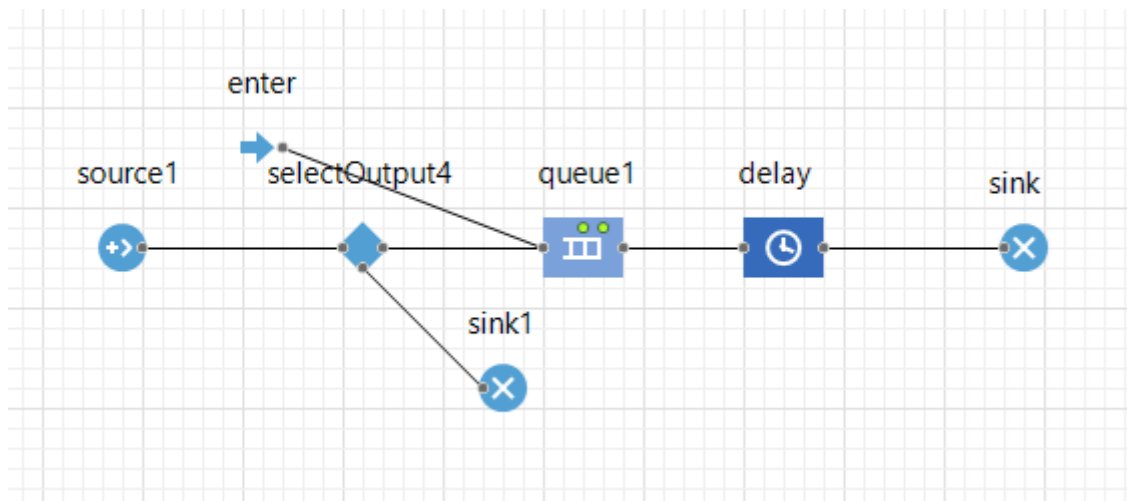


Рис. 15. Модель системы массового обслуживания в AnyLogic

Модель состоит из источника заявок (source1), блока проверки заполненности очереди (selectOutput4), накопителя (queue1), обслуживающего прибора (delay), терминатора успешно обработанных заявок (sink), терминатора потерянных заявок (sink1) и генератора начального числа заявок (enter). Поскольку при запуске модели в ней изначально нет заявок, то для того, чтобы смоделировать начальное поведение системы, когда система работает в нормальном режиме (без перегрузки) с интенсивностью потока входящих запросов λ_1 , нам необходимо выждать достаточно продолжительное количество времени, чтобы система пришла в установившийся режим. В течение всего этого времени источник будет создавать заявки, которые не нужны для исследования нестационарного режима, но которые нужны для прихода системы в установившийся режим. Ввиду ограничения в студенческой версии AnyLogic на число создаваемых заявок (50000 транзакций) было придумано альтернативное решение, как привести систему в установившийся режим. Для этого мы создаём необходимое количество транзакций в генераторе начального числа заявок, рассчитываемое по формуле среднего числа заявок в системе, работающей в установившемся режиме и принимающей на вход простейшей поток заявок:

$m = \frac{\rho^2}{1-\rho}$. Далее ждём относительно небольшой промежуток времени (200

единиц модельного времени) и считаем, что система работает в установившемся режиме, в таком случае можно начинать перегрузочный период.

Параметрами данной модели в AnyLogic являются средняя длительность обслуживания, минимальная интенсивность, максимальная интенсивность, время перегрузочного периода, ёмкость накопителя. Также, как возможная точка расширения есть параметр `endWithMax`, определяющий какая интенсивность должна оставаться после перегрузочного периода – минимальная или максимальная. Также параметром должна являться функция `lambdaOverload`, но в AnyLogic её нельзя сделать таковой [24]. Она является компонентом модели и для того, чтобы её поменять, надо перекомпилировать модель [25]. Пример тела функции `lambdaOverload` (линейная зависимость) – `"return lambda + lambdaIncline * timeOfOverloading();"`. Здесь `lambda`, `lambdaMax`, `lambdaIncline` являются вспомогательными параметрами, соответствующими λ_1 , λ_2 и k (тангенс угла наклона линейной функции).

Выходными параметрами (или характеристиками) системы являются время начала первой потери, нагрузка при первой потере. Также в качестве возможных точек расширения рассчитываются время выхода характеристик системы из стационарного состояния после начала действия перегрузочного периода, а также время прихода характеристик в стационарное состояние по завершению действия перегрузочного периода. Все времена рассчитываются не с начала процесса моделирования, а от момента начала действия перегрузочного периода.

Источник заявок генерирует заявки, время между прибытиями которых задаётся функцией `"exponential(getLambda())"`. Функция `getLambda()` вычисляет значения интенсивности: если период перегрузки еще не начался, то это будет минимальная интенсивность; если период перегрузки идёт, то это будет задаваемая функция `lambdaOverload`; если период перегрузки закончился, то это задаётся параметром `endWithMax`, определённым ранее.

Блок проверки заполненности очереди сравнивает ёмкость накопителя и текущую длину очереди, если накопитель свободен, то помещает заявку в него, если он заполнен, то отправляет заявку в терминатор потерянных заявок. При попадании заявки в терминатор потерянных заявок регистрируются выходные параметры: время первой потери и нагрузка при первой потере. В обслуживающем приборе время обслуживания заявок распределено по экспоненциальному закону: $\text{exponential}(1/b)$. Ещё в системе присутствуют два таймера. Первый таймер `stopOverload` запускается в момент начала перегрузки на время, равное длине перегрузочного периода. Его окончание сигнализирует другим компонентам системы, что перегрузочный период окончен. Второй таймер работает на протяжении всего цикла модели и срабатывает каждые 0.2 секунды (задаётся параметр `curr_period`). У него следующие задачи: запустить первый таймер, а также отметить время выхода/прихода характеристик системы из/в стационарные состояния. Эти времена определяются следующим образом: каждый запуск таймера записывается значение длины очереди в множество, хранящее 250 последних элементов, в другое множество записывается среднее значение предыдущего множества, хранящего до 50 последних значений. Так мы получаем множество средних значений длины очереди за относительно недавний период. Далее мы сравниваем доверительный интервал этого множества с 5% от среднего значения, если он стал больше этого значения – характеристики системы вышли из стационарного состояния, если меньше – то вернулись в стационарное состояние.

Чтобы исследовать зависимости характеристик от параметров, построим эксперимент «Варьирование параметров» на основе нашей модели [26]. В нём варьируемые параметры будут являться параметрами эксперимента: средняя длительность обслуживания, минимальная интенсивность, максимальная интенсивность, время перегрузочного периода, ёмкость накопителя. Функцию будем менять, перекомпилируя модель. Будем задавать минимальное значение, максимальное значение параметров и шаг изменения.

Также будем задавать число репликаций для получения более точных результатов, все ранее упомянутые выходные параметры складываем в множества и высчитываем доверительный интервал для каждой величины. В вариационном эксперименте ещё замеряем число репликаций `numOfNotFailsForIteration`, в которых не случилось ни одной потери. После каждой итерации все получившиеся результаты сохраняем в базу данных.

Для первого эксперимента, в котором мы определяем время начала массовых потерь, нам необходимо добиться вероятности потерь $\pi_n \sim 0.001$. Для этого проведём каждый эксперимент 1000 раз и возьмём наименьшее из значений y_x (t_x соответственно тоже). Таким образом мы получим, что на этот момент времени t_x только в 1 эксперименте из 1000 случилась потеря, все остальные эксперименты на этот момент времени еще продолжали свою работу без единой потери. Проведём подобную серию экспериментов 100 раз, в каждом из них будем брать наименьшее значение y_x (t_x соответственно тоже), и посчитаем в итоге среднее значение и доверительный интервал для величин y_x и t_x .

Для второго эксперимента, в котором мы определяем параметры системы, позволяющие выдержать перегрузочный период, будем варьировать параметры нашей модели, и смотреть выдерживает ли наша система данный характер перегрузки. Проведём 500 экспериментов и, если в 95% из них у нас не случится ни одной потери, то будем считать, что система выдерживает данный характер перегрузки. Чтобы определить необходимое значение параметра L будем варьировать его в больших диапазонах с шагом 1. С помощью параметра `numOfNotFailsForIteration` вычислим процент репликаций без потерь для каждого из значений L , затем выведем все значения процентов на график и аппроксимируем этот график кривой. Значение L , при котором график пересекает прямую 95% и будет искомым.

2.3. Проверка времени первой потери с помощью имитационного эксперимента

Проведём опыт, в котором интенсивность входящего потока будет меняться от значения λ_1 до значения λ_2 линейно. Обозначим $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. Тогда формулу (5) можно записать в таком виде: $y_x = \sqrt{\frac{2*b*L*\Delta\lambda}{T_{\Pi}}} + 1$. Для начала будем варьировать величину $\Delta\lambda$ и измерять y_x .

Отразим здесь результаты, полученная зависимость приведена на рис. 16, данные приведены в приложении в табл. 2.

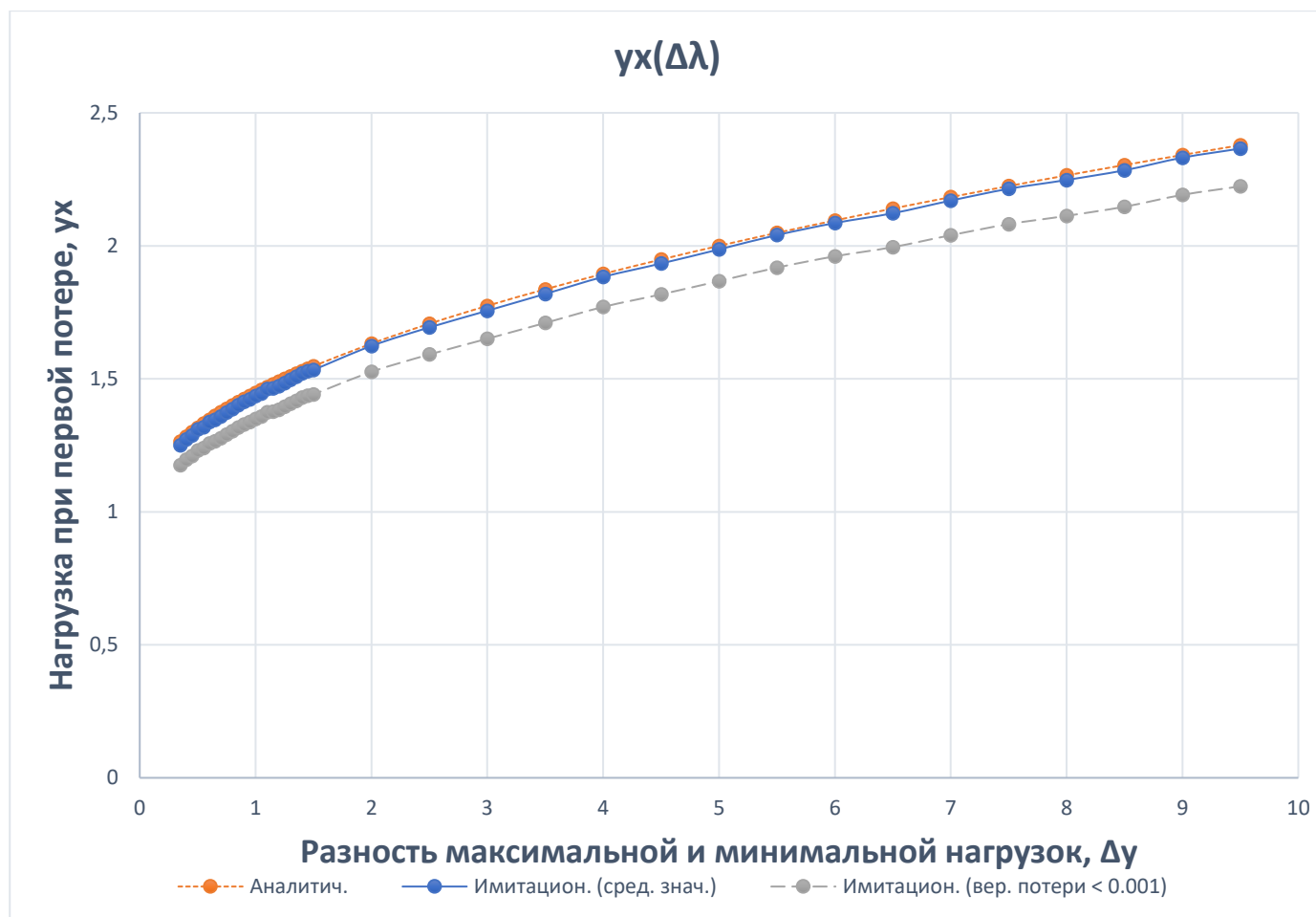


Рис. 16. График зависимости нагрузки при первом отказе от ширины диапазона интенсивностей (линейная функция нагрузки)

Здесь мы видим значения, полученные имитационным методом (длинная пунктирная линия), и значения, полученные аналитическим методом (пунктирная линия). Для имитационного метода мы брали наименьшее из значений нагрузки при первой потере, чтобы соблюсти требование $\pi_n \sim 0.001$. Однако для наглядности на графике также выведены средние значения нагрузок при первой потере y_x (сплошная линия), а не только наименьшие, это посылки для дальнейшего анализа.

Различия в результатах, полученных аналитическим и имитационным методами, различаются вследствие того, что в аналитических расчетах были сделаны некоторые допущения. Одно из них говорит о том, что с момента времени t_0 , когда нагрузка равна 1, первая потеря происходит исходя из усредненных значений времени между поступлением заявок и времени обслуживания заявок. На самом деле, поскольку эти значения принимают случайные величины, то до момента времени t_x могут случаться различные ситуации.

Первая ситуация заключается в том, что в каких-то экспериментах количество поступивших заявок за все время эксперимента может превышать среднюю интенсивность, в каких-то может быть меньше. Из-за этого получается разброс в значениях y_x (и t_x соответственно). Но мы берём наименьшее из всех времени потери, а в аналитических расчетах мы оперировали средними понятиями, и это существенно влияет на получившееся в итоге расхождение.

Вторая ситуация, связанная со стохастичностью процессов поступления и обслуживания заявок, заключается в том, что в какой-то момент времени заявки могут обслуживаться быстрее среднего, и даже быстрее, чем поступать (несмотря на то, что значение интенсивности обслуживания на этом промежутке будет меньше интенсивности поступления заявок $\lambda > \mu$), и тогда ёмкость накопителя может стать равна нулю. И тогда в те моменты, когда интенсивность станет меньше средних величин, заявок будет обслуживаться меньше, но это не компенсируется количеством обслуженных заявок в этот

период, когда интенсивность была высока, а накопитель пуст (в системе не было заявок и они не обслуживались). Соответственно на практике мы должны были бы получить меньшие значения для y_x (и t_x соответственно), из-за подобной стохастичности заявки терялись бы быстрее. На самом деле, такая ситуация случается с крайне малой вероятностью, так что отклонения, создаваемые ей, почти незаметны. Здесь стоит исключить первую ситуацию и сравнивать графики имитационного метода для средних величин с аналитическими. Между ними расхождение составляет меньше 1%. Так что исходя из экспериментов, видно, что это упрощение в аналитической модели влияет крайне незначительно.

Еще одно допущение в аналитических расчётах, которое стоит отметить, было сделано исходя из того, что на момент времени t_0 , когда нагрузка становится равна 1, очередь пуста. В действительности это не так, однако изначально наша система работала под «обычной пользовательской» нагрузкой y_1 , и для величин $y_1 \ll 1$ можно считать, что накопитель пуст (для примера в одноканальной системе массового обслуживания с простейшим потоком поступления заявок при нагрузке $y < 0.75$ средняя длина очереди в системе составляет меньше 3 заявок). Строя модель системы, стоит принять во внимание тот факт, что до момента начала перегрузки в системе, предполагается, что система работает с некоторым запасом по загрузке в обычных условиях. Также следует учесть, что в современных вычислительных системах очереди, принимающие входные запросы, обладают ёмкостью на порядки большей, чем единицы заявок. Здесь также логичнее сравнивать графики имитационного метода для средних величин с аналитическими. И точно таким же образом на практике мы должны были бы получить меньшие значения для y_x (и t_x соответственно), из-за того, что накопитель был не пуст в момент времени t_0 , заявки терялись бы тоже быстрее. Можно заметить, что это допущение также влияет крайне мало, поскольку графики совпадают в пределах погрешности измерений.

Теперь посмотрим, как отличаются экспериментальные от аналитически полученных данных нагрузки при первой потере y_x в зависимости от b – среднего времени обслуживания (рис. 17), данные в табл. 3 в приложении.

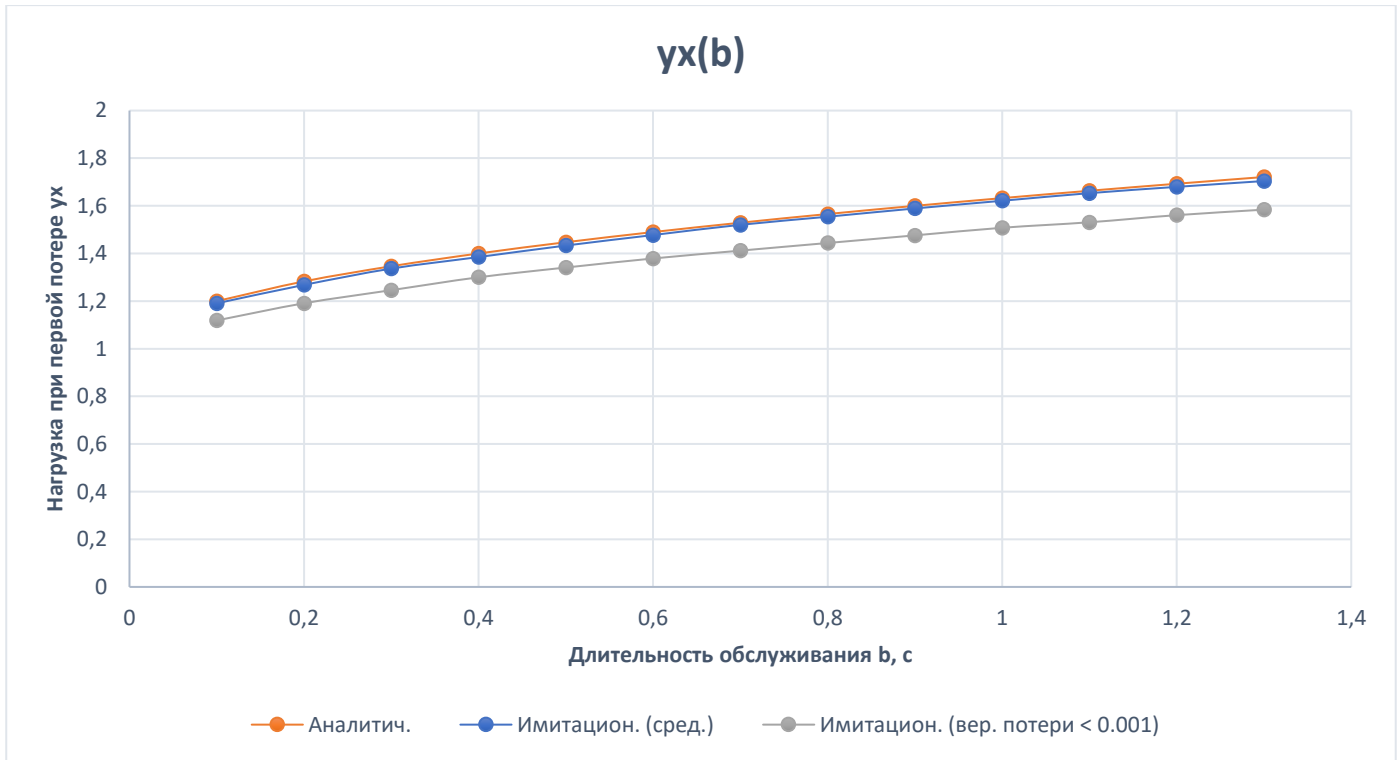


Рис. 17. График зависимости нагрузки при первом отказе от среднего времени обслуживания (линейная функция нагрузки)

Здесь можно провести рассуждения, аналогичные тем, что были при анализе графика зависимости нагрузки при первом отказе в зависимости от ширины диапазона интенсивностей входящего потока.

Теперь посмотрим, как отличаются экспериментальные от аналитически полученных данных для нагрузки при первой потере y_x в зависимости от T_{Π} – времени перегрузочного периода (рис. 18), данные представлены в табл. 4 приложения.

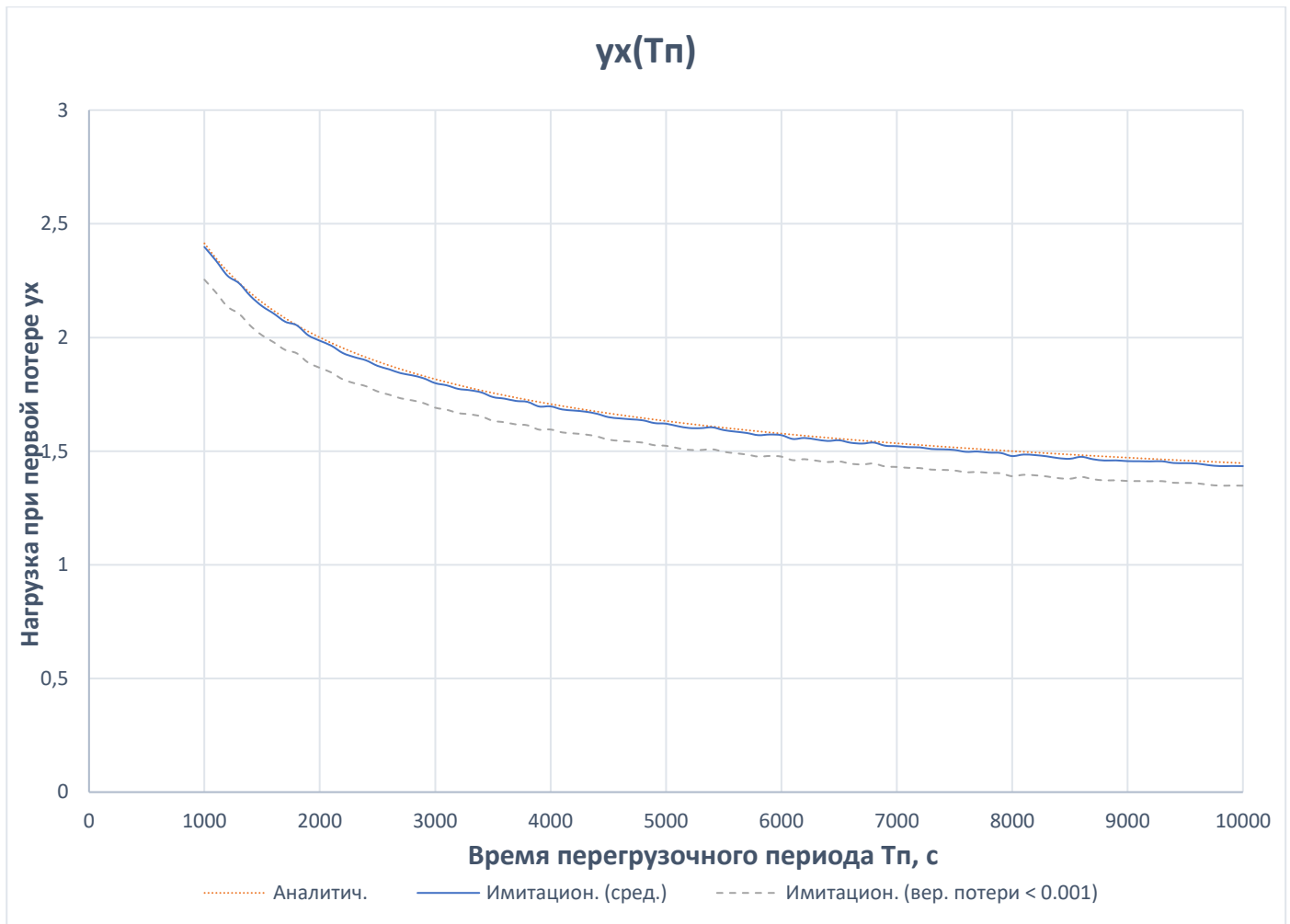


Рис. 18. График зависимости нагрузки при первом отказе от длительности перегрузочного периода (линейная функция нагрузки)

Здесь можно провести рассуждения, аналогичные тем, что были при анализе графика зависимости нагрузки при первом отказе в зависимости от ширины диапазона интенсивностей входящего потока.

Теперь посмотрим, как отличаются экспериментальные от аналитически полученных данных нагрузки при первой потере u_x в зависимости от L — ёмкости накопителя (рис. 19), данные представлены в табл. 5 приложения.

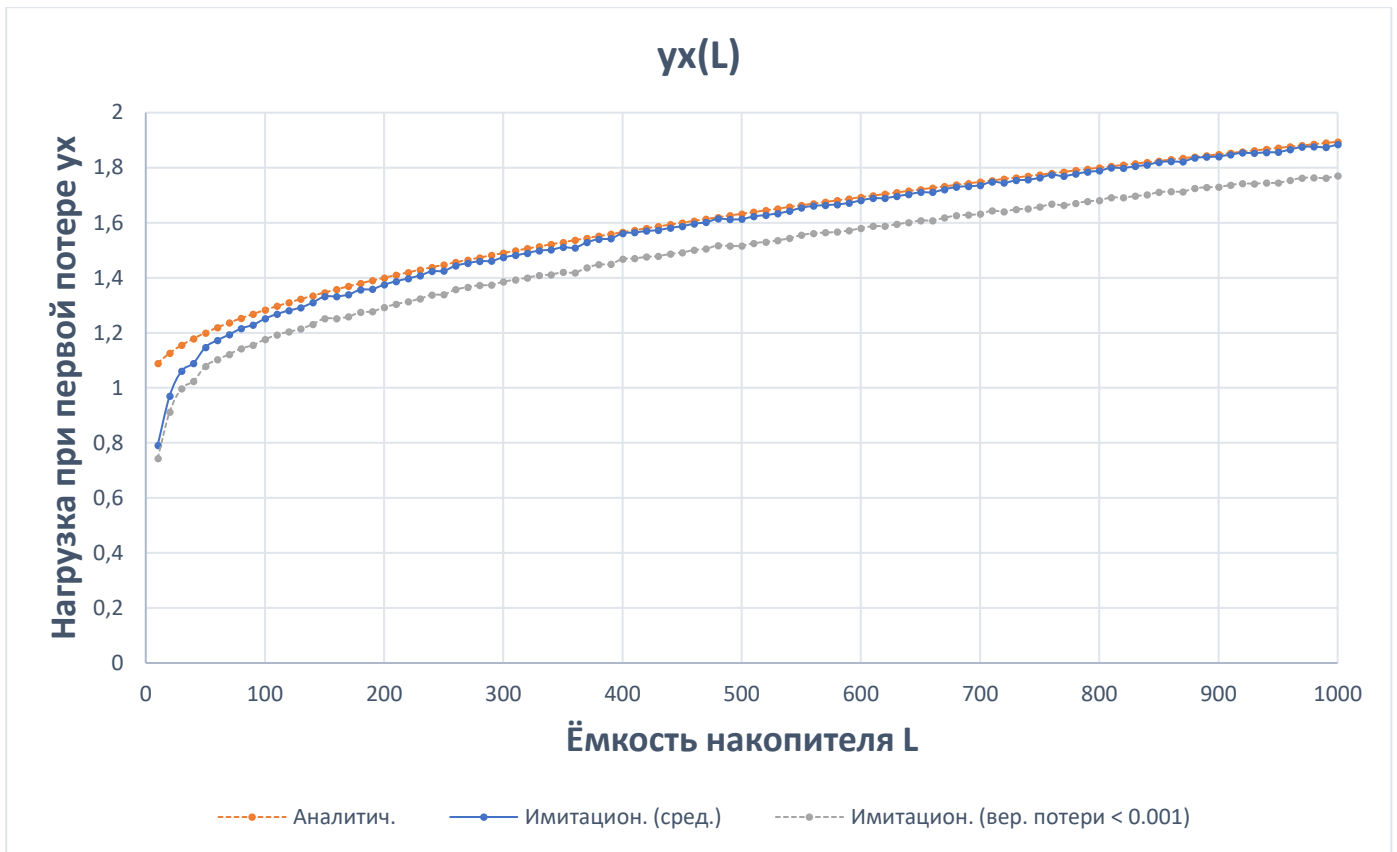


Рис. 19. График зависимости нагрузки при первом отказе от ёмкости накопителя (линейная функция нагрузки)

Здесь можно провести рассуждения, аналогичные тем, что были при анализе графика зависимости нагрузки при первом отказе в зависимости от ширины диапазона интенсивностей входящего потока.

Также здесь можно отметить краевой эффект, о котором шла речь в вышеупомянутых рассуждениях. Действительно, в аналитическом методе было предположение, что на момент времени t_0 , когда нагрузка становится равна 1, очередь пуста. В действительности, из-за стохастичности процесса в этот момент времени в системе будут находиться некоторое число заявок. Как было упомянуто ранее, при больших ёмкостях накопителя это число несравнимо мало и не влияет на время начала массовых потерь. Однако при значениях ёмкостей, сравнимых с этим количеством заявок, запросы к системе начинают теряться намного раньше. Это видно по сильному отклонению графика средних значений u_x , полученных методом имитационного моделирования, от графика

аналитического моделирования для малых значений ёмкости накопителя L . Более того, можно заметить ещё одну интересную особенность. В аналитической модели мы исходили из того, что заявки начинают массово теряться (вероятность потери $\pi_n > 0.001$) только после момента времени t_0 , когда нагрузка становится равна 1. Однако, если значение ёмкости крайне мало, то массовые потери могут проявляться ещё до того, как в системе возникнет перегрузка, ввиду стохастичности процессов поступления и обслуживания заявок.

Возьмём синусоидальную зависимость и проведём для нее имитационное моделирование. Эксперимент будем проводить аналогично линейной зависимости. Здесь мы будем строить график $L(y_x)$ и сравним результаты с аналитически полученными результатами по формуле (7). Результаты представлены на рис. 20 и в табл. 6 приложения.

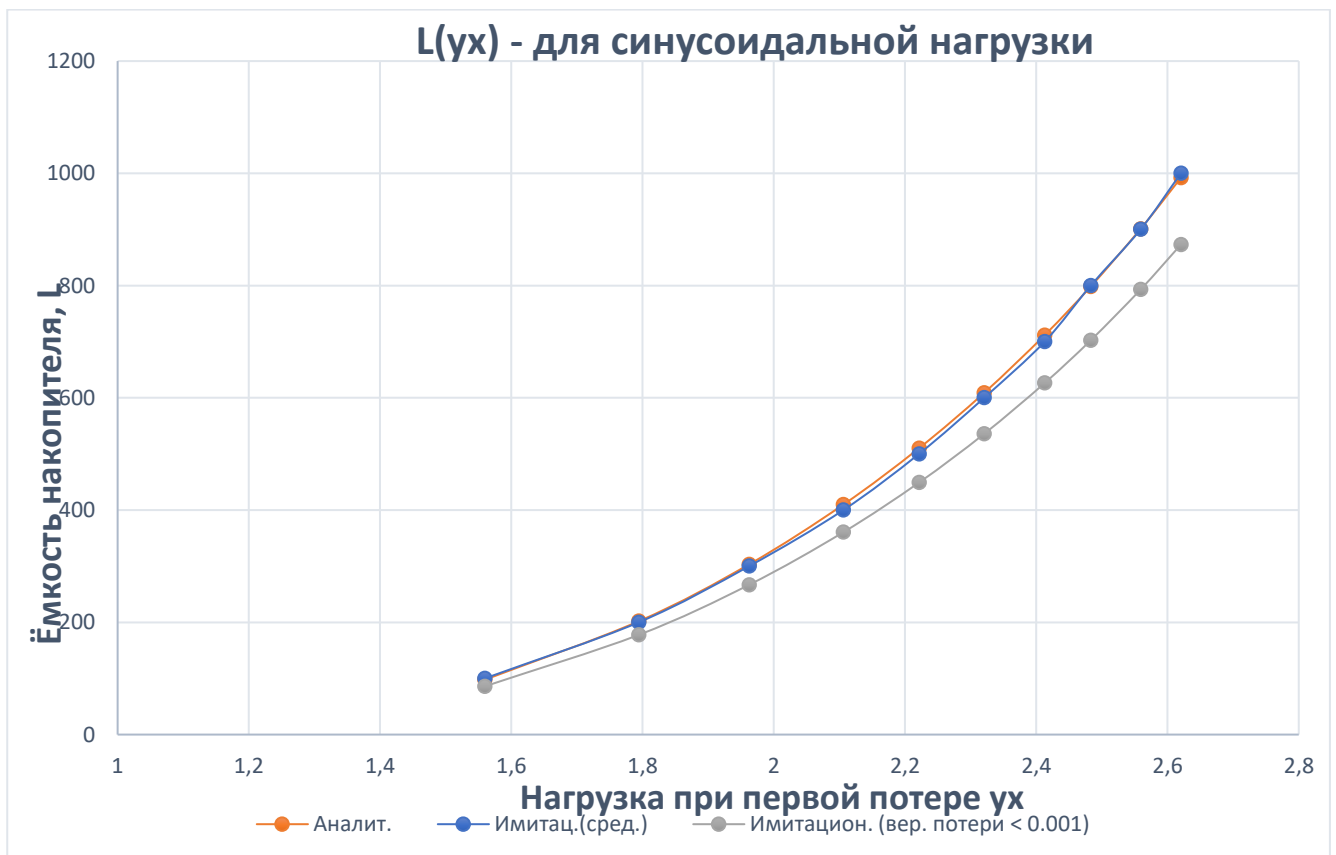


Рис. 20. График зависимости ёмкости при первом отказе от нагрузки при первой потере (синусоидальная функция нагрузки)

Здесь можно провести выводы, аналогичные выводам, сделанным для линейной зависимости.

Теперь возьмём экспоненциальную зависимость и проведём для нее имитационное моделирование. Эксперимент будем проводить аналогично предыдущим. Здесь мы также будем строить график $L(y_x)$ и сравним результаты с аналитически полученными результатами по формуле (8). Результаты представлены на рис. 21 и в табл. 7 приложения.



Рис. 21. График зависимости ёмкости при первом отказе от нагрузки при первой потере (экспоненциальная функция нагрузки)

Здесь можно провести выводы, аналогичные выводам, сделанным для линейной зависимости. Стоит только отметить, что для экспоненциальной

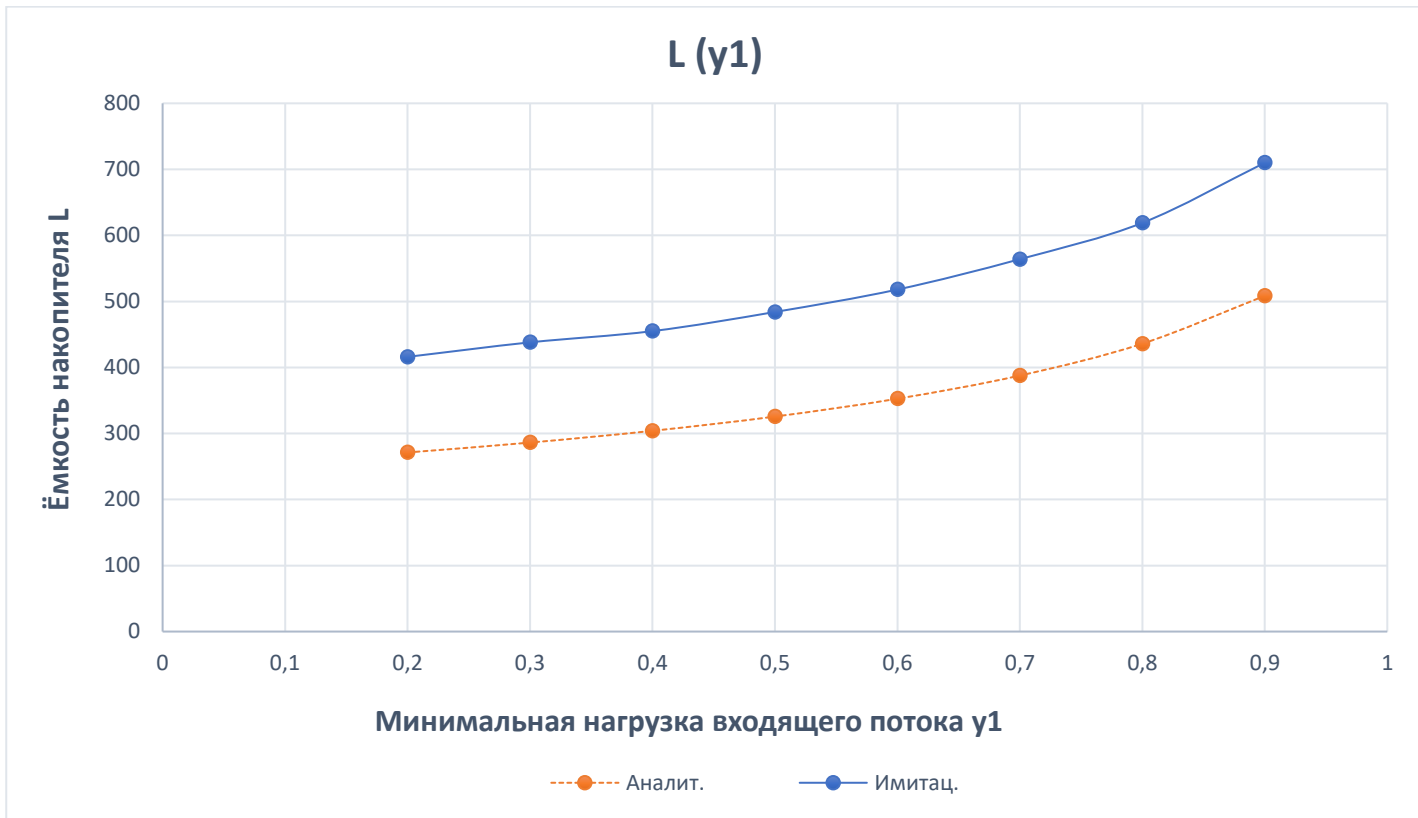


Рис. 23. График зависимости ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной минимальной нагрузкой (синусоидальная функция нагрузки)

Здесь становится крайне большим расхождение результатов аналитического и имитационного моделирования. Это объясняется тем, что в аналитическом методе были сделаны допущения, что потеря случится тогда, когда разность среднего числа поступивших заявок и среднего числа обслуженных заявок составит количество, равное ёмкости накопителя. Однако, в реальности ввиду стохастичности процессов поступления и обслуживания заявок в некоторых экспериментах эта разность может быть много больше среднего, или, наоборот, много меньше. И в экспериментах нам необходим такой накопитель, ёмкость которого будет превышать 95% из этих разностей, имеющих определённый разброс относительно среднего значения (которое рассчитано аналитически).

Несмотря на большую разность графиков, полученных аналитическим и имитационным методом, можно наблюдать интересную особенность, что эти графики ведут себя схожим образом.

Перейдём к вариации параметра максимальной нагрузки y_2 . Полученная зависимость отражена на рис. 24, данные приведены в табл. 9 приложения.

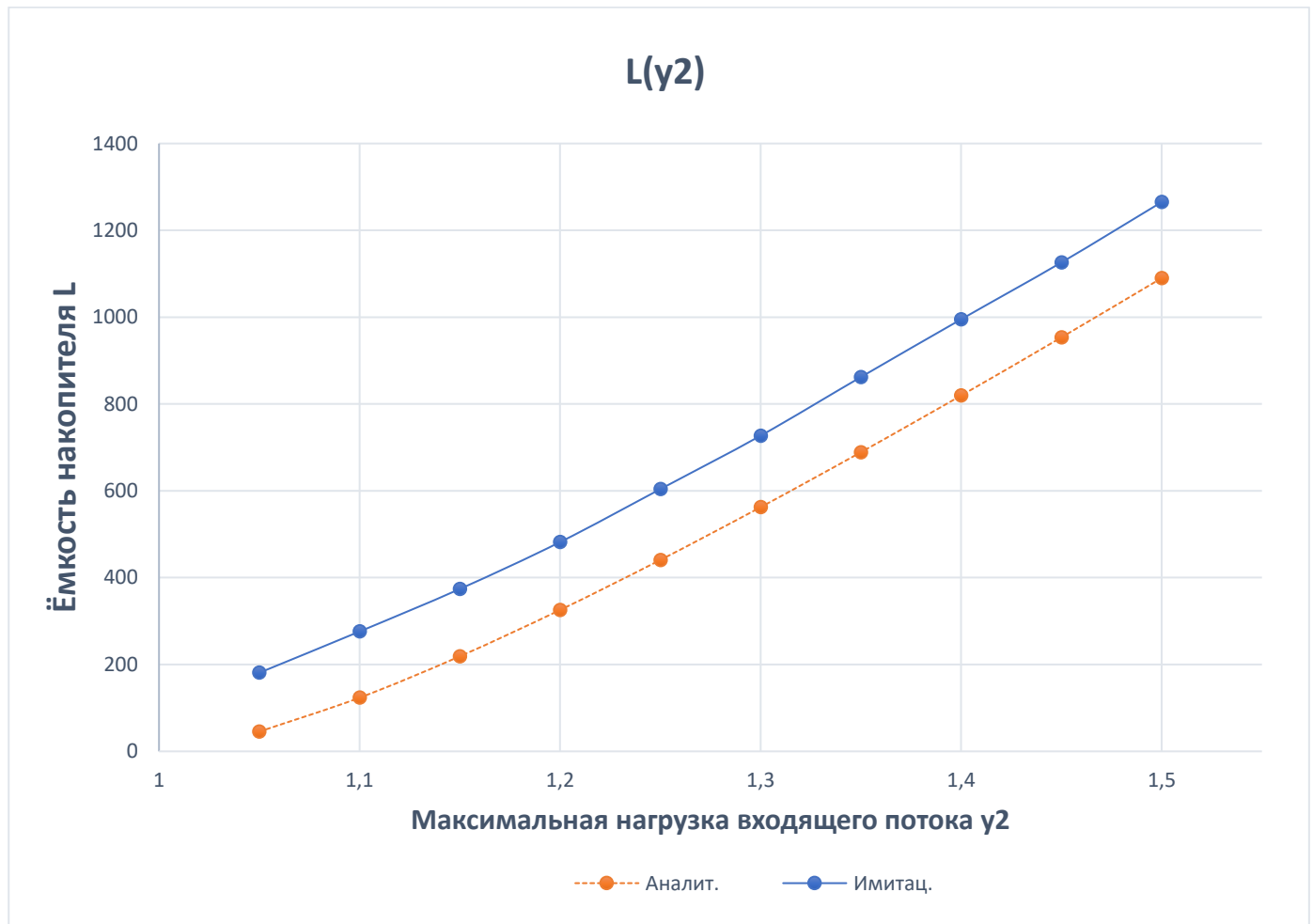


Рис. 24. График зависимости ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной максимальной нагрузкой (синусоидальная функция нагрузки)

Здесь можно провести рассуждения, аналогичные тем, что были при анализе графика зависимости ёмкости накопителя от минимальной нагрузки.

Перейдём к вариации параметра времени перегрузочного периода T_n . Полученная зависимость отражена на рис. 25, данные приведены в табл. 10 приложения.

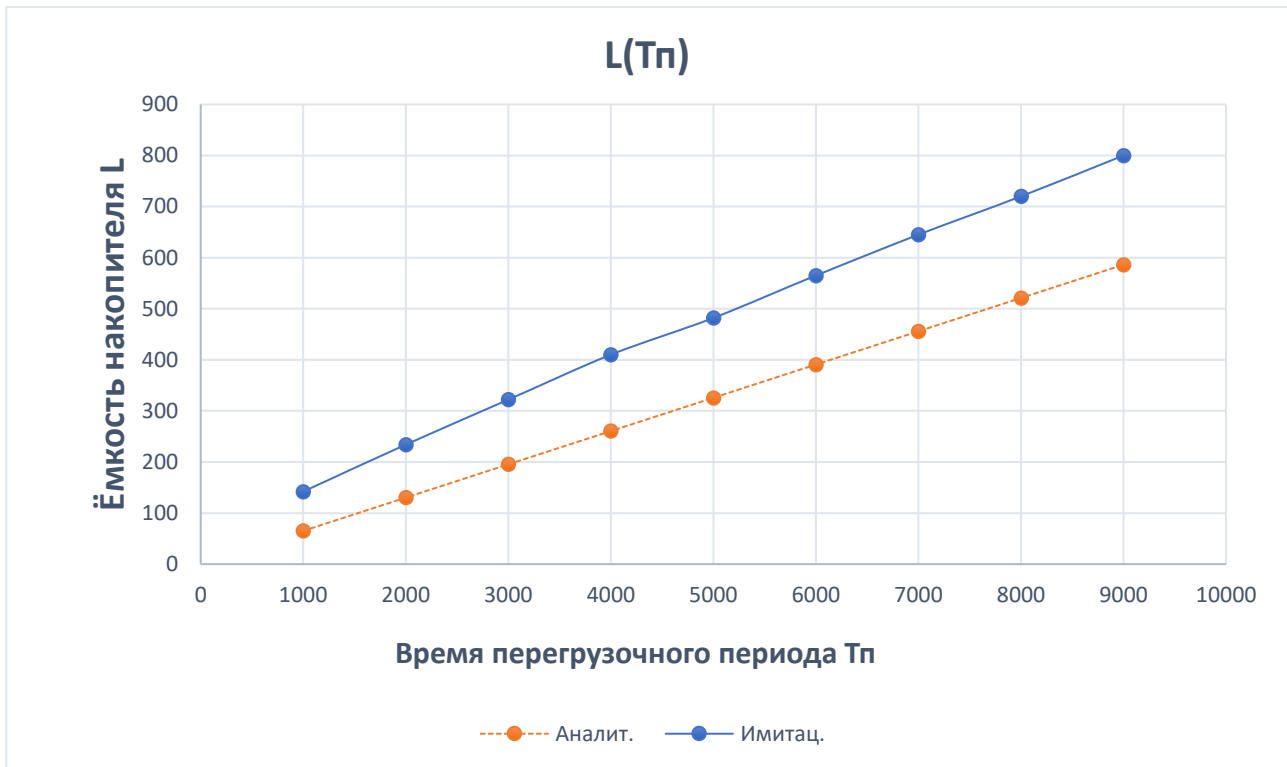


Рис. 25. График зависимости ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданным временем перегрузочного периода (синусоидальная функция нагрузки)

Здесь можно провести рассуждения, аналогичные тем, что были при анализе графика зависимости ёмкости накопителя от минимальной нагрузки.

Проведём аналогичный эксперимент для линейной зависимости. Здесь будем так же варьировать параметры минимальной нагрузки y_1 (рис. 26, табл. 11 в приложении), максимальной нагрузки y_2 (рис. 27, табл. 12 в приложении) и время перегрузочного периода T_n (рис. 28, табл. 13 в приложении).

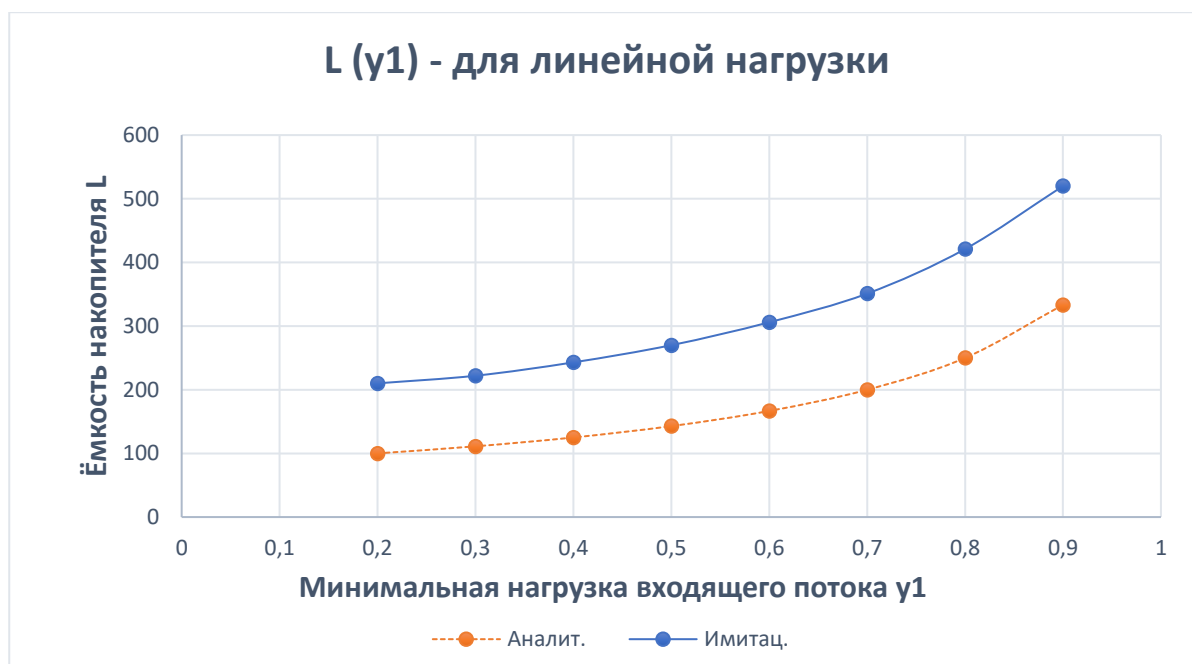


Рис. 26. График зависимости ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной минимальной нагрузкой (линейная функция нагрузки)

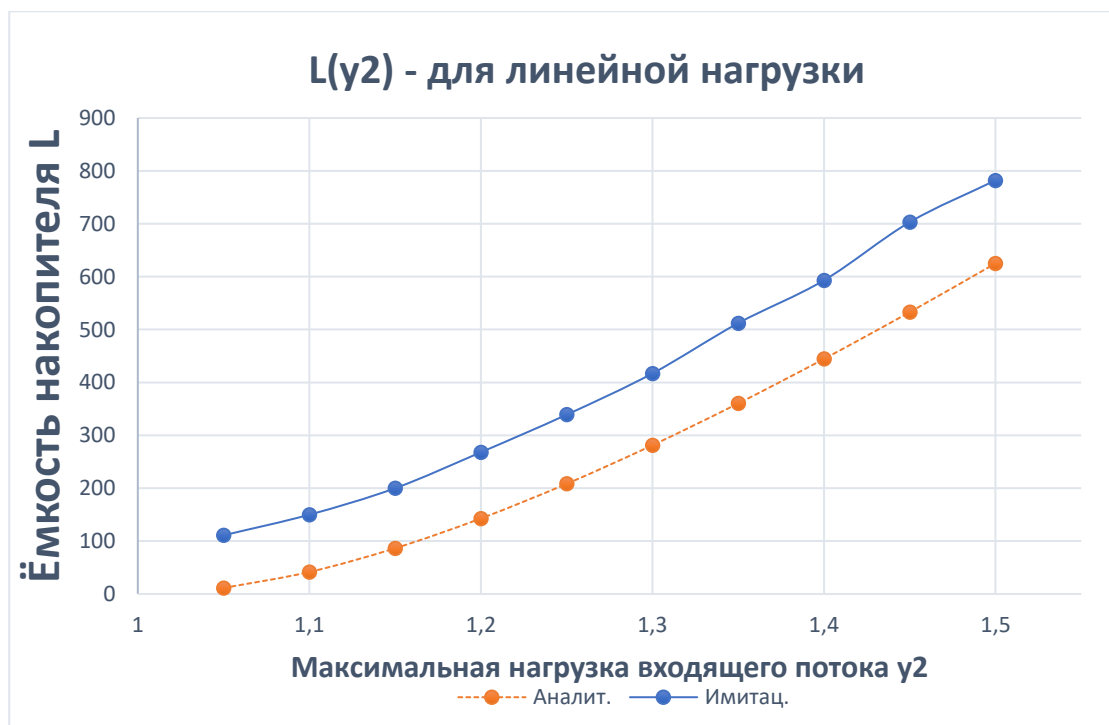


Рис. 27. График зависимости ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной максимальной нагрузкой (линейная функция нагрузки)

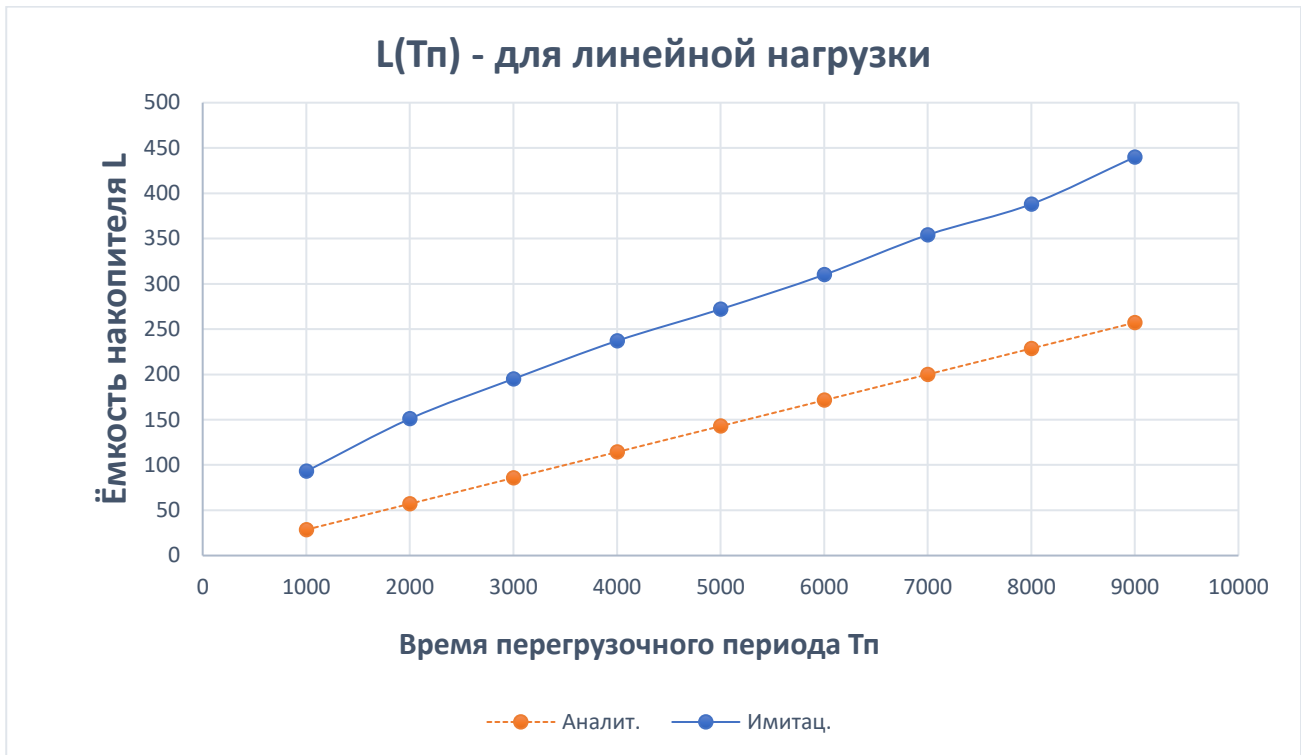


Рис. 28. График зависимости ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданным временем перегрузочного периода (линейная функция нагрузки)

Здесь можно провести рассуждения, аналогичные тем, что были при анализе графиков для синусоидальной функции нагрузки.

Проведём аналогичный эксперимент для экспоненциальной зависимости. Здесь будем так же варьировать параметры минимальной нагрузки y_1 (рис. 29, табл. 14 в приложении), максимальной нагрузки y_2 (рис. 30, табл. 15 в приложении) и время перегрузочного периода T_p (рис. 31, табл. 16 в приложении).

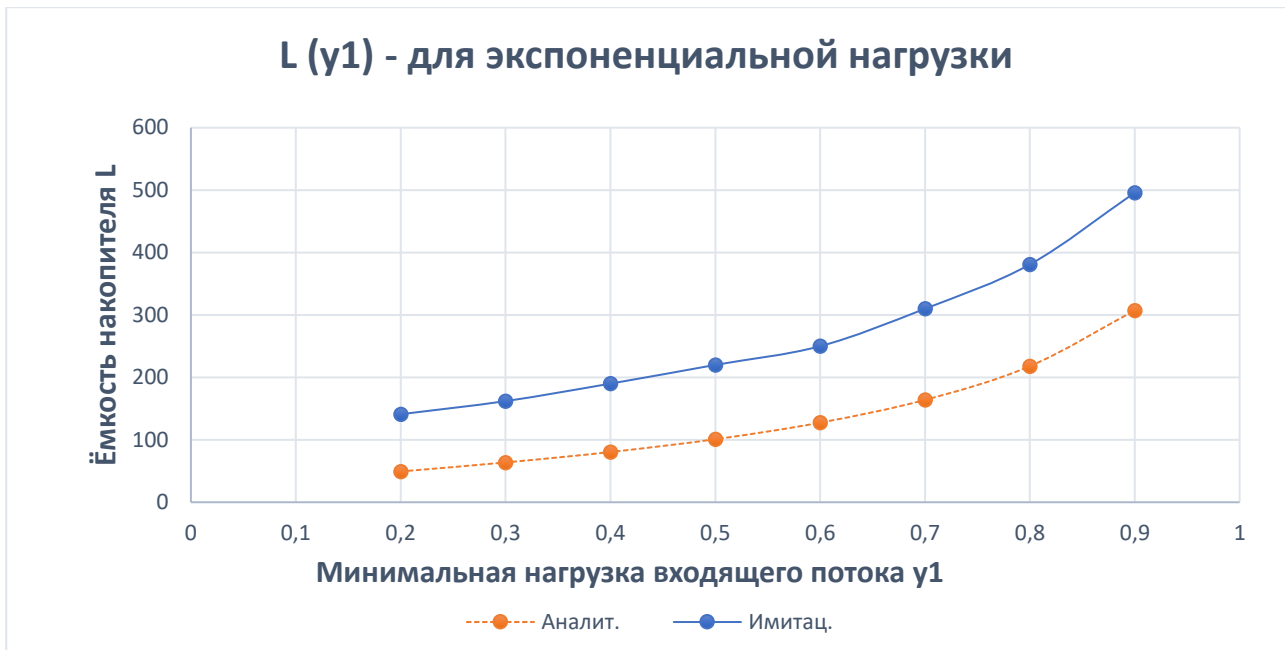


Рис. 29. График зависимости ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной минимальной нагрузкой (экспоненциальная функция нагрузки)

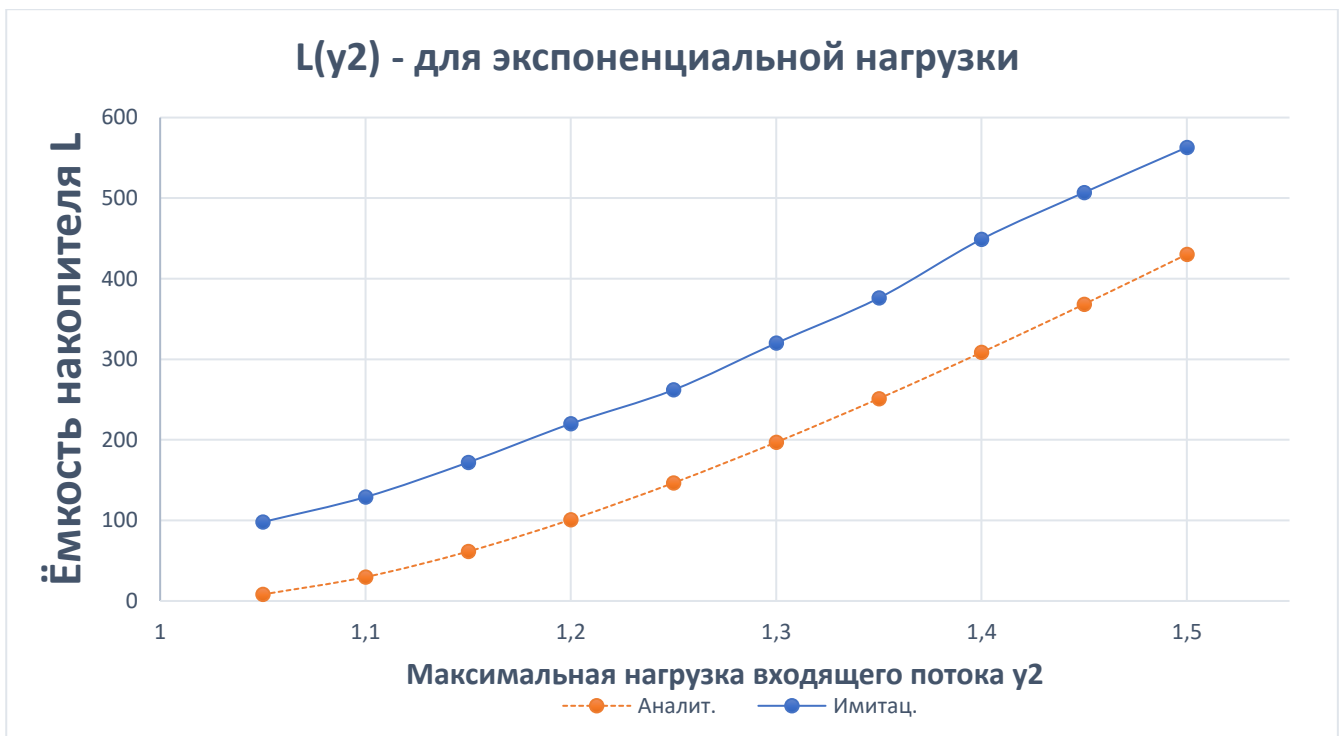


Рис. 30. График зависимости ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной максимальной нагрузкой (экспоненциальная функция нагрузки)

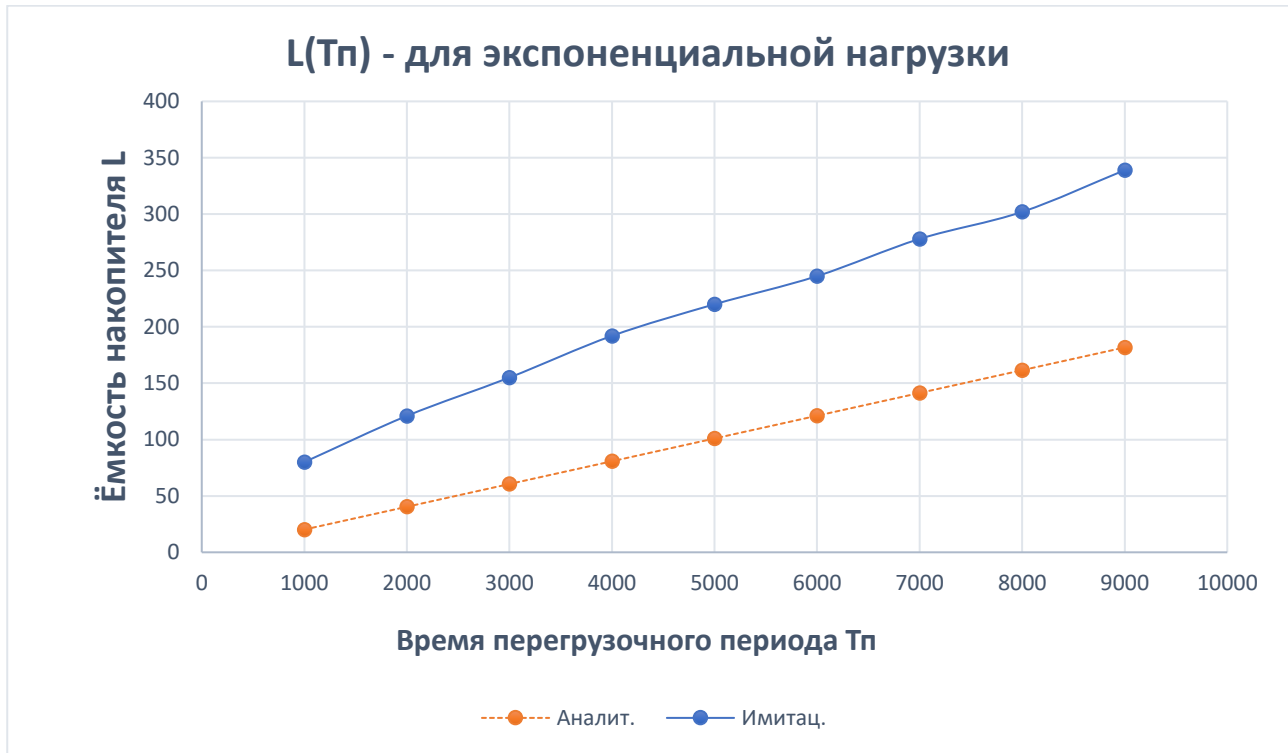


Рис. 31. График зависимости ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданным временем перегрузочного периода (экспоненциальная функция нагрузки)

Здесь можно провести рассуждения, аналогичные тем, что были при анализе графиков для синусоидальной функции нагрузки.

2.5. Выводы

Вывод: В данной главе был выведен аналитический метод для расчёта таких характеристик, как время начала массовых потерь (вероятность потери $\pi_n > 0.001$), а также параметров системы, способных выдержать заданный характер нагрузки. Также были выведены конкретные соотношения для случаев линейно-, экспоненциально-, а также синусоидально-возрастающей нагрузки. Метод имитационного моделирования позволяет более точно по сравнению с аналитическим методом рассчитать значения необходимых величин [27].

Однако на получение результата этим методом часто становится необходимо затрачивать большое количество времени [28]. Это может быть непозволительно в системах, в которых необходимо быстро принимать решения на основе полученных результатов [29]. Становится необходимым выбирать между точностью результатов и скоростью их получения [30]. После проведения экспериментов были проанализированы все допущения, сделанные в рамках аналитической модели и произведён анализ, какие отклонения даёт каждое из принятых допущений.

Раздел 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

3.1. Целевая архитектура блока управления

Применим полученные аналитический и имитационный методы на практике и оценим время получения результата каждым из этих методов [31]. Для этого реализуем программно контроллер, целью которого является предсказание параметров системы, способной выдержать заданную нестационарную нагрузку (рис. 32).

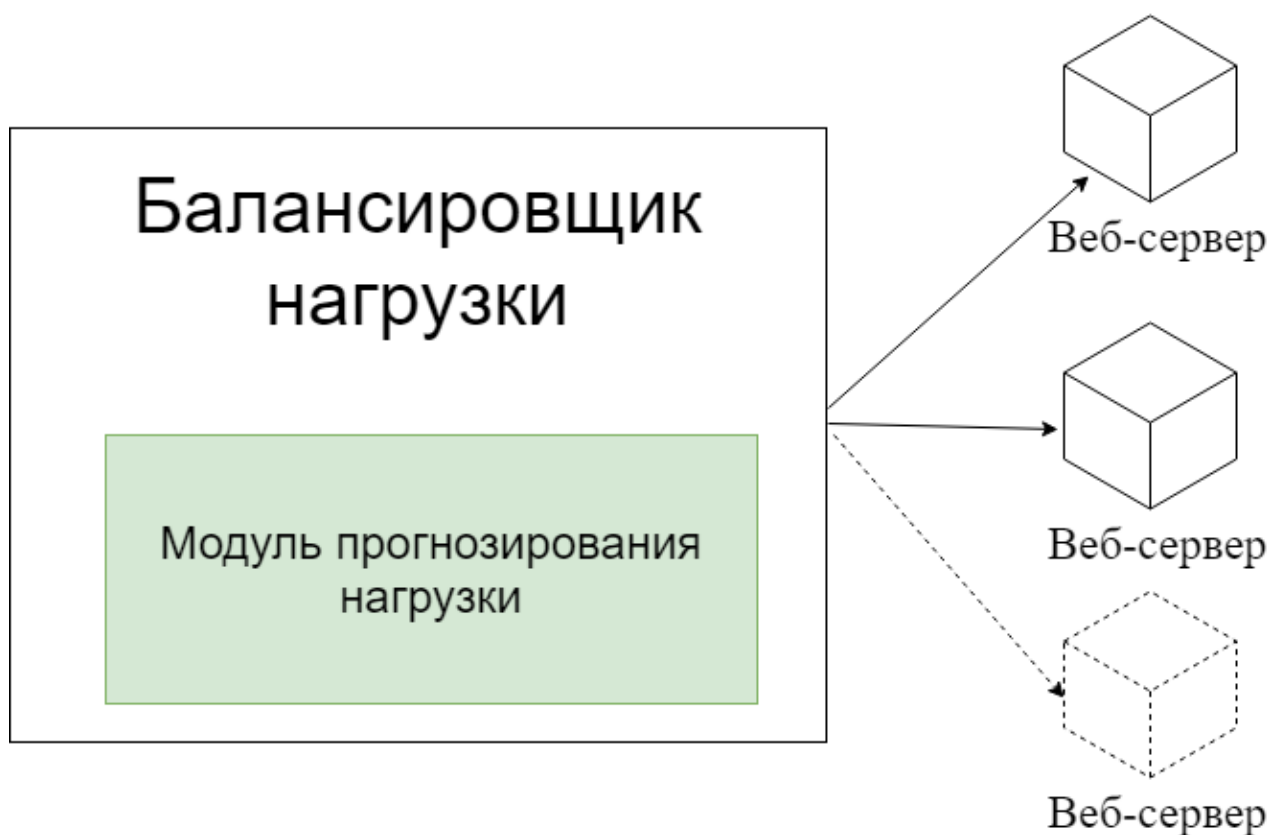


Рис. 32. Схематичное изображение модуля прогнозирования нагрузки в системе

Входными параметрами программного модуля будут являться минимальная и максимальная интенсивности входного потока λ_1 и λ_2 соответственно, а также характер зависимости и время перегрузочного периода $T_{\text{п}}$. В тех случаях, когда нагрузка начинает расти, значение максимальной интенсивности, а также время перегрузочного периода можно взять из

статистических данных по нагрузке, создаваемой пользователями, за прошлые периоды или же предположить потенциальные значения, взяв их с некоторым запасом [2]. Рассмотрим несколько случаев, когда график интенсивности поступающих запросов меняется линейным, синусоидальным и экспоненциальным образом.

3.2. Выбор инструмента для разработки

Для реализации контроллера был выбран язык программирования Python 3, а также SimPy – Python фреймворк для разработки событийно-ориентированных моделей дискретного времени [32]. Отличительная особенность SimPy – это организованная система прерывания процессов, которая использует генераторы языка Python [33]. С помощью этих генераторов можно прерывать выполнение функции, при этом после этого возможно вернуться и выполнить оставшуюся часть программы [34]. Также важнейшим фактором выбора SimPy для написания программной реализации контроллера является лёгкость портирования программного кода на Java из модели, реализованной в AnyLogic [35]. Большинство использованных при моделировании функций имеют аналоги в языке программирования Python, и можно переиспользовать программный код, используя синтаксические конструкции, специфичные для языка Python [36].

Процесс создания модели в SimPy представляет собой следующий алгоритм [37]:

1. Инициализация среды моделирования.
2. Создание необходимых событий дискретного времени.
3. Интеграция с модельной средой событий, которые были созданы.
4. Запуск модели и дальнейший анализ результатов.

3.3. Постановка экспериментов

Реализация аналитического метода на языке программирования Python будет заключаться в вычислении формулы, полученной для каждого характера

зависимости. Напишем три файла с реализациями для линейного, экспоненциального и логарифмического типов зависимостей входного потока. Аргументами каждого файла будут являться значения вышеупомянутых параметров, указываемых в следующем порядке: минимальная интенсивность, максимальная интенсивность, время перегрузки, среднее время обслуживания. Результатом выполнения программы будет являться рассчитанное значение ёмкости накопителя в системе, способной выдержать заданную нагрузку.

Замерим время выполнения программы с помощью функции `time` и посмотрим результаты.

Результаты времени выполнения для линейной зависимости:

```
$ time python analytics-linear.py 0.7 1.2 5000 1  
Capacity is: 200.0
```

```
real    0m0,096s  
user    0m0,000s  
sys     0m0,015s
```

Результаты времени выполнения для синусоидальной зависимости:

```
$ time python analytics-sinus.py 0.7 1.2 5000 1  
Capacity is: 387.74
```

```
real    0m0,131s  
user    0m0,000s  
sys     0m0,031s
```

Результаты времени выполнения для экспоненциальной зависимости:

```
$ time python analytics-exponential.py 0.7 1.2 5000 1  
Capacity is: 93.06
```

```
real    0m0,106s
user    0m0,000s
sys     0m0,031s
```

Теперь реализуем метод имитационного моделирования с помощью фреймворка SimPy. При этом алгоритм этой программы будет идентичен алгоритму, реализованному при написании модели в среде моделирования AnyLogic. Точно так же для каждого значения предельно допустимой ёмкости будем проводить 500 экспериментов и будем варьировать это значение, пока 95% $\pm 1\%$ проведенных экспериментов не дадут успешный результат (при данных параметрах и нагрузке не случится ни одной потери в системе). Аргументы у данной программы будут точно такие же, как и у программы для расчета аналитическим методом, и ещё одним аргументом будет число, соответствующее номеру функции: 1 – линейный, 2 – синусоидальный, 3 – экспоненциальный. Таким же образом, как и для аналитического метода с помощью функции time замерим время расчёта этого значения и посмотрим результаты.

Результаты времени выполнения для линейной зависимости:

```
$ time python imitate.py 0.7 1.2 5000 1 1
Chosen function: 1 - linear
Capacity is: 243.44
```

```
real    13m16,231s
user    2m31,615s
sys     10m14,125s
```

Результаты времени выполнения для синусоидальной зависимости:

```
$ time python imitate.py 0.7 1.2 5000 1 2
Chosen function: 2 - sinus
```

Capacity is: 554.21

```
real    28m12,542s
user    3m24,541s
sys     23m5,921s
```

Результаты времени выполнения для экспоненциальной зависимости:

```
$ time python imitate.py 0.7 1.2 5000 1 3
Chosen function: 3 - exponential
Capacity is: 134.72
```

```
real    8m54,931s
user    1m54,956s
sys     6m13,759s
```

3.4. Анализ полученных данных

Как мы видим, расчет значения по одной формуле аналитическим методом происходит за доли секунды, что и требовалось ожидать.

Рассчитаем время с доверительной вероятностью 95%.

Расчёт ёмкости накопителя методом имитационного моделирования выполняется на порядки дольше, здесь речь идет о минутах и о десятках минут.

Сравним время нахождения параметра аналитическим методом и методом имитационного моделирования в табл. 1.

Таблица 1

Времена нахождения допустимой ёмкости различными методами для различных типов нагрузок

Вид зависимости	Метод моделирования	Аналитический	Имитационный	Улучшение показателя $\left(\frac{\text{Имитац.}}{\text{Аналит.}}\right)$
Линейный		0.096 ± 0.003 с	796 ± 5 с	8292
Синусоидальный		0.131 ± 0.004 с	1692 ± 8 с	12916
Экспоненциальный		0.106 ± 0.003 с	543 ± 4 с	5123

3.5. Выводы

Как мы видим, аналитический метод позволяет предсказывать критический параметр системы за намного меньшее время. Это может быть крайне важно, если время принятия решения о масштабировании методом имитационного моделирования сопоставимо с временем, когда запросы начнут теряться [38]. Недостатком аналитического метода по сравнению с имитационным является его меньшая точность при большом количестве допущений, сделанных в модели [39].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы получены следующие результаты.

1. Для систем с очередями и с нестационарным входным потоком заявок был получен аналитический метод расчёта времени начала массовых потерь, а также параметров системы, способных выдерживать определённый характер перегрузки.
2. Рассчитаны соотношения для частных функций входного потока – линейно-возрастающая, экспоненциальная, синусоидальная.
3. Методом имитационного моделирования проверены полученные соотношения. Для времени начала массовых потерь аналитическая и имитационная модель имеют расхождение до 7%. При этом результаты являются достоверными при накопителях ёмкостью 100 и более, при интенсивности входящего потока заявок, создающего нагрузку меньше 0.75.
4. Для определения параметров системы, способных выдержать период перегрузки, значения, получаемые методами аналитического и имитационного моделирования, имеют расхождения от 30% до 50%, однако эти зависимости имеют схожий характер.
5. Реализован программно модуль контроллера динамического управления вычислительными ресурсами, прогнозирующий время начала массовых потерь при данной конфигурации. Результат работы контроллера основан на вычислениях аналитическим, а также имитационным методом.
6. Оценено время получения результата контроллером для обоих методов. Для аналитического метода получение результата составляет порядка 0.1 с, для имитационного – порядка 10 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
2. Богатырев В. А., Богатырев С. В., Голубев И. Ю. Оптимизация структуры и процесса перераспределения заданий между кластерами вычислительной системы // Автоматика и вычислительная техника. 2012. № 3. С. 73-81.
3. Жмылёв С.А., Киреев В.Ю., Мартычук И.Г., Алиев Т.И. Исследование систем с нестационарными процессами // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание [Электронный ресурс]. - Режим доступа: ссылка на страницу с тезисом, своб. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/7622/7622.pdf> (дата обращения: 15.05.2018).
4. Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 348 с.
5. Жмылёв С.А., Савин А.А., Алиев Т.И. Исследование времени до начала потерь в системах с очередями // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание [Электронный ресурс]. - Режим доступа: ссылка на страницу с тезисом, своб. URL: <http://openbooks.ifmo.ru/ru/file/7625/7625.pdf> (дата обращения: 21.05.2018).
6. Хорошевский, В.Г. Распределённые вычислительные системы с программируемой структурой // Вестник ГОУ ВПО «СибГУТИ». - Новосибирск: Изд-во ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2010. – № 2. – С. 3-41.
7. Алиев Т.И. Основы проектирования систем - Санкт-Петербург: СПб: Университет ИТМО, 2015. – 120 с.
8. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления. — СПб.: Профессия, 2003. — 752 с.
9. Кингман Дж. Пуассоновские процессы. — М.: МЦНМО, 2007. — 136 с.
10. Бабишин В. Д., Давыдов А.Н. Метод оперативного анализа нестационарных случайных процессов на основе разложения исследуемой

- функции в интеграл Фурье // Прикладная информатика. – 2011. – №6(36). С. 49–55.
11. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Нестационарные системы автоматического управления: анализ, синтез и оптимизация. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 632 с.
 12. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е. Статистическая радиофизика и оптика. Случайные колебания и волны в линейных системах. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 426 с.
 13. Weiss, George H. Encyclopedia of Statistical Sciences: 1. 2006. – doi:10.1002/0471667196.ess2180.pub2.
 14. Guttorp, Peter; Thorarinsdottir, Thordis L. What Happened to Discrete Chaos, the Quenouille Process, and the Sharp Markov Property? 2012. – doi:10.1111/j.1751-5823.2012.00181.x
 15. Amengual, P and Toral, Truels R., or Survival of the Weakest. // Computing in Science and Engineering. – 2006 – №8(5), С. 88-95.
 16. Edmonds, B and Hales, D. Computational simulation as theoretical experiment. // Journal of Mathematical Sociology. – 2005 – №29(3), С. 209-232.
 17. Ивченко Г.И., Каштанов В.А., Коваленко И.Н. Теория массового обслуживания. — Учебное пособие для вузов. — М.: Высшая школа, 1982. — 256 с.
 18. Чернова Н. И. Теория вероятностей. — Учебное пособие. — Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2007. — 160 с.
 19. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — 10-е изд., стер.. — М.: Academia, 2005. — 576 с.
 20. Cover, Thomas M. Elements of Information Theory. — John Wiley and Sons, 2006. — 254 с.
 21. Ахтямов А. М., Теория вероятностей. — М.: Физматлит, 2009. — 496 с.
 22. Булинский А. В., Ширяев, А. Н. Теория случайных процессов. – М.: Физматлит, 2005. – 408 с.

23. Баврин И. И., Высшая математика (Часть 2 «Элементы теории вероятностей и математической статистики»). – М.: Высшая школа, 2005. – 160 с.
24. Гмурман В. Е., Теория вероятностей и математическая статистик»: Учеб. пособие — 12-е изд., перераб.– М.: Высшее образование, 2006. – 479 с.
25. Гмурман В. Е., Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учеб. пособие — 11-е изд., перераб. — М.: Высшее образование, 2006. – 404 с.
26. Гнеденко, Б. В. Курс теории вероятностей, 8-е изд., испр. и доп. —М.: Едиториал УРСС, 2005.— 448 с.
27. Ефимов А.В., Поспелов А.Е. и др. 4 часть // Сборник задач по математике для втузов. — 3-е изд., перераб. и дополн.. — М.: «Физматлит», 2003. — Т. 4. — 432 с.
28. Коршунов, Д.А., Чернова, Н.И. Сборник задач и упражнений по математической статистике: Учебное пособие. — 2-е изд., испр. — Новосибирск: Изд-во Института математики, 2004. — 128 с.
29. Кремер Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для ВУЗов. — 2-е издание. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. — 479 с.
30. Соколенко А. И., «Высшая математика», учебник. М.:Академия, 2002.
31. Хамитов, Г. П., Ведерникова, Т. И. Вероятности и статистики. – Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2006 (Иркутск). – 270 с.
32. Шейнин О. Б. Теория вероятностей. Исторический очерк. – Берлин: NG Ferlag, 2005 – 329 с.
33. Kingman J. The first Erlang century—and the next. // Queueing Systems. – 2009 – №63(1-4): С. 3-12.
34. Chen L.H., Röllin A., et al. Approximating dependent rare events. // Bernoulli. – 2013 – №19(4): С.1243-1267.
35. Gillam, Lee. Cloud Computing: Principles, Systems and Applications. — L.: Springer, 2010. — 379 с.

36. Одом У. Компьютерные сети. Первый шаг = Computer Networking: First-step / Пер. В. Гусев. — СПб.: «Вильямс», 2006. — 432 с.
37. Таненбаум Э, Уэзеролл Д. Компьютерные сети. — 5-е изд. — СПб.: Питер, 2012. — 960 с.:
38. Sen, Rathindra P. Operations Research: Algorithms And Applications. — New Delhi: PHI Learning, 2010. — 518 с.
39. Little, J. D. C. Little's Law as Viewed on Its 50th Anniversary. // Operations Research. — 2011 — №59(3): с. 536–549. — doi:10.1287/opre.1110.0940.
40. Eilon, Samuel. A Simpler Proof of $L = \lambda W$. // Operations Research. — 1969 — №17(5): с. 915–917. — doi:10.1287/opre.17.5.915
41. Семенов Ю. А. Протоколы Internet. — 2-е изд., стереотип.. — М.: Горячая линия – Телеком, 2005.
42. Паркер Т., Сиян К. TCP/IP. Для профессионалов. — 3-е изд.. — СПб.: Питер, 2004. — 859 с.
43. Горбань, И.И. Теория гиперслучайных явлений. — Киев: ИПММС НАН Украины, 2007. — 184 с.
44. Ширяев А.Н. Вероятность. — М.: МЦНМО, 2007. — 968 с.
45. Виноградов И.М.. Математическая энциклопедия. — М.: «Советская энциклопедия», 1979. — 1104 с.
46. Феллер В. Глава XI. Целочисленные величины. Производящие функции, 2-е изд. — М.: Мир, 1964. — С. 270—272.
47. Лесин В.В., Лисовец Ю.П. Основы методов оптимизации. — Москва: Лань, 2016 — 341 с.
48. Максимей И.В. Математическое моделирование больших систем. Минск: Вышэйшая школа, 2007. — 120 с.
49. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. — М.: Наука, 2007. — 528 с.
50. Павловский Ю.Н. Имитационные модели и системы. — М.: Фазис, 2008. — 144 с.

51. Срочко В.А. Итерационные методы решения задач оптимального управления. М.: ФМЛ. 2009. – 160 с.
52. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. Учебное пособие, 2-е издание – М.: Высш. шк. , 2005. – 544 с
53. А. В. Аргучинцев, В. А. Дыхта, В. А. Срочко. Оптимальное управление: нелокальные условия, вычислительные методы и вариационный принцип максимума. // Изв. вузов. Матем. – 2009, № 1: с. 3–43.
54. Шикин Е.В., Чхартишвили А.Г. Математические методы и модели в управлении –М.: Дело 2009. — 440 с
55. Абляев С.В., Пушкарёв Н.Н. Управление человеческими ресурсами на основе компьютерных технологий / Под ред. Н.Ф. Пушкарева. – М: Финансы и статистика, 2009. – 176 с.
56. Ивасенко А.Г., Гридасов А.Ю., Павленко В.А. Информационные технологии в экономике и управлении. – М.: КНОРУС, 2007. – 160 с.
57. В.В. Трофимов. Информационные системы и технологии в экономике и управлении. – М.: Высшее образование, 2009. – 480 с.
58. Г.А. Титоренко. Автоматизированные информационные технологии в экономике. – М.: Компьютер, ЮНИТП, 2007. – 400 с.
59. Савин А.А., Жмылёв С.А. Исследование времени до начала потерь в системах с очередями // XLVII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО (Санкт-Петербург, 30 января – 2 февраля 2018 г.)
60. Савин А.А., Жмылёв С.А. Исследование времени до начала потерь в системах с очередями // VII Конгресс молодых ученых (Санкт-Петербург, 17-20 апреля 2018 г.)

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 2

Значения нагрузки при первой потере в зависимости от максимальной и минимальной интенсивностей, рассчитанные экспериментально и аналитически для линейной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере y_x	Доверительный интервал y_x	Аналитически рассчитанное y_x
0.95	1.3	1	5000	500	4298	64	1.251	0.004	1.265
0.95	1.35	1	5000	500	4034	58	1.273	0.005	1.283
0.9	1.35	1	5000	500	4306	56	1.287	0.005	1.300
0.85	1.35	1	5000	500	4604	52	1.310	0.005	1.316
0.95	1.5	1	5000	500	3352	50	1.319	0.006	1.332
0.9	1.5	1	5000	500	3647	42	1.338	0.005	1.346
0.85	1.5	1	5000	500	3815	47	1.346	0.006	1.361
0.8	1.5	1	5000	500	3993	36	1.359	0.005	1.374
0.75	1.5	1	5000	500	4155	41	1.373	0.006	1.387
0.7	1.5	1	5000	500	4292	33	1.387	0.005	1.400
0.65	1.5	1	5000	500	4417	34	1.401	0.006	1.412
0.6	1.5	1	5000	500	4521	30	1.414	0.005	1.424
0.55	1.5	1	5000	500	4595	31	1.423	0.006	1.436
0.5	1.5	1	5000	500	4677	29	1.435	0.006	1.447
0.5	1.55	1	5000	500	4501	30	1.445	0.006	1.458
0.5	1.6	1	5000	500	4372	32	1.462	0.007	1.469
0.5	1.65	1	5000	500	4195	26	1.465	0.006	1.480
0.5	1.7	1	5000	500	4050	30	1.472	0.007	1.490
0.5	1.75	1	5000	500	3938	27	1.485	0.007	1.500
0.5	1.8	1	5000	500	3836	25	1.497	0.006	1.510
0.5	1.85	1	5000	500	3733	26	1.508	0.007	1.520
0.5	1.9	1	5000	500	3646	24	1.521	0.007	1.529
0.5	1.95	1	5000	500	3547	24	1.529	0.007	1.539
0.5	2	1	5000	500	3446	20	1.534	0.006	1.548
0.5	2.5	1	5000	500	2809	17	1.624	0.007	1.632
0.5	3	1	5000	500	2387	16	1.693	0.008	1.707
0.5	3.5	1	5000	500	2093	14	1.756	0.008	1.775
0.5	4	1	5000	500	1885	13	1.819	0.009	1.837
0.5	4.5	1	5000	500	1729	12	1.883	0.009	1.894
0.5	5	1	5000	500	1593	11	1.934	0.010	1.949
0.5	5.5	1	5000	500	1487	10	1.987	0.010	2.000
0.5	6	1	5000	500	1400	9	2.041	0.010	2.049

0.5	6.5	1	5000	500	1321	8	2.086	0.010	2.095
0.5	7	1	5000	500	1248	9	2.123	0.011	2.140
0.5	7.5	1	5000	500	1193	8	2.170	0.012	2.183
0.5	8	1	5000	500	1143	7	2.214	0.011	2.225
0.5	8.5	1	5000	500	1092	6	2.248	0.010	2.265
0.5	9	1	5000	500	1049	7	2.284	0.012	2.304
0.5	9.5	1	5000	500	1018	6	2.332	0.011	2.342
0.5	10	1	5000	500	982	6	2.366	0.012	2.378

Таблица 3

Значения нагрузки при первой потере в зависимости от среднего времени обслуживания, рассчитанные экспериментально и аналитически для линейной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере y_x	Доверительный интервал y_x	Аналитически рассчитанное y_x
0.5	2.5	0.1	5000	500	1727	11	1.191	0.004	1.200
0.5	2.5	0.2	5000	500	1920	12	1.268	0.005	1.283
0.5	2.5	0.3	5000	500	2091	13	1.337	0.005	1.346
0.5	2.5	0.4	5000	500	2213	14	1.385	0.006	1.400
0.5	2.5	0.5	5000	500	2333	15	1.433	0.006	1.447
0.5	2.5	0.6	5000	500	2443	16	1.477	0.006	1.490
0.5	2.5	0.7	5000	500	2551	16	1.520	0.006	1.529
0.5	2.5	0.8	5000	500	2636	16	1.554	0.007	1.566
0.5	2.5	0.9	5000	500	2723	19	1.589	0.008	1.600
0.5	2.5	1	5000	500	2803	19	1.621	0.008	1.632
0.5	2.5	1.1	5000	500	2883	19	1.653	0.008	1.663
0.5	2.5	1.2	5000	500	2949	23	1.680	0.009	1.693
0.5	2.5	1.3	5000	500	3010	21	1.704	0.009	1.721

Таблица 4

Значения нагрузки при первой потере в зависимости от длительности перегрузочного периода, рассчитанные экспериментально и аналитически для линейной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при перво	Доверительный интервал y_x	Аналитически рассчитанное y_x
--------------------------	-------------------------	--------------------------------	-----------------------------------	------------------------	---------------	------------------------------	--------------------	------------------------------	---------------------------------

					отказ а тх, с		й потер е ух		
0.5	2.5	1	1000	500	950	6	2.398	0.010	2.414
0.5	2.5	1	1100	500	1011	6	2.338	0.011	2.348
0.5	2.5	1	1200	500	1063	7	2.272	0.011	2.291
0.5	2.5	1	1300	500	1130	7	2.239	0.011	2.240
0.5	2.5	1	1400	500	1177	6	2.182	0.009	2.195
0.5	2.5	1	1500	500	1228	9	2.138	0.012	2.155
0.5	2.5	1	1600	500	1284	9	2.105	0.011	2.118
0.5	2.5	1	1700	500	1334	9	2.069	0.011	2.085
0.5	2.5	1	1800	500	1398	10	2.054	0.011	2.054
0.5	2.5	1	1900	500	1434	10	2.010	0.010	2.026
0.5	2.5	1	2000	500	1486	9	1.986	0.009	2.000
0.5	2.5	1	2100	500	1537	10	1.964	0.009	1.976
0.5	2.5	1	2200	500	1575	9	1.931	0.008	1.953
0.5	2.5	1	2300	500	1626	12	1.913	0.010	1.933
0.5	2.5	1	2400	500	1679	11	1.900	0.009	1.913
0.5	2.5	1	2500	500	1719	10	1.875	0.008	1.894
0.5	2.5	1	2600	500	1768	12	1.860	0.009	1.877
0.5	2.5	1	2700	500	1813	12	1.843	0.009	1.861
0.5	2.5	1	2800	500	1867	12	1.833	0.009	1.845
0.5	2.5	1	2900	500	1915	12	1.820	0.009	1.830
0.5	2.5	1	3000	500	1949	13	1.799	0.009	1.816
0.5	2.5	1	3100	500	1999	13	1.789	0.009	1.803
0.5	2.5	1	3200	500	2038	13	1.774	0.008	1.791
0.5	2.5	1	3300	500	2092	14	1.768	0.008	1.778
0.5	2.5	1	3400	500	2139	14	1.758	0.008	1.767
0.5	2.5	1	3500	500	2166	13	1.738	0.007	1.756
0.5	2.5	1	3600	500	2216	16	1.731	0.009	1.745
0.5	2.5	1	3700	500	2259	15	1.721	0.008	1.735
0.5	2.5	1	3800	500	2312	16	1.717	0.008	1.725
0.5	2.5	1	3900	500	2333	14	1.696	0.007	1.716
0.5	2.5	1	4000	500	2394	16	1.697	0.008	1.707
0.5	2.5	1	4100	500	2426	14	1.683	0.007	1.698
0.5	2.5	1	4200	500	2475	16	1.679	0.008	1.690
0.5	2.5	1	4300	500	2524	17	1.674	0.008	1.682
0.5	2.5	1	4400	500	2562	19	1.665	0.009	1.674
0.5	2.5	1	4500	500	2587	17	1.650	0.008	1.667
0.5	2.5	1	4600	500	2631	18	1.644	0.008	1.659
0.5	2.5	1	4700	500	2679	19	1.640	0.008	1.652
0.5	2.5	1	4800	500	2725	18	1.636	0.007	1.645
0.5	2.5	1	4900	500	2752	16	1.623	0.007	1.639
0.5	2.5	1	5000	500	2802	20	1.621	0.008	1.632
0.5	2.5	1	5100	500	2831	18	1.610	0.007	1.626
0.5	2.5	1	5200	500	2865	16	1.602	0.006	1.620
0.5	2.5	1	5300	500	2918	21	1.601	0.008	1.614
0.5	2.5	1	5400	500	2983	18	1.605	0.007	1.609

0.5	2.5	1	5500	500	3005	18	1.593	0.007	1.603
0.5	2.5	1	5600	500	3040	21	1.586	0.008	1.598
0.5	2.5	1	5700	500	3077	22	1.580	0.008	1.592
0.5	2.5	1	5800	500	3104	21	1.570	0.007	1.587
0.5	2.5	1	5900	500	3166	24	1.573	0.008	1.582
0.5	2.5	1	6000	500	3211	21	1.570	0.007	1.577
0.5	2.5	1	6100	500	3213	21	1.554	0.007	1.573
0.5	2.5	1	6200	500	3280	23	1.558	0.007	1.568
0.5	2.5	1	6300	500	3312	21	1.551	0.007	1.563
0.5	2.5	1	6400	500	3343	21	1.545	0.006	1.559
0.5	2.5	1	6500	500	3405	25	1.548	0.008	1.555
0.5	2.5	1	6600	500	3422	22	1.537	0.007	1.550
0.5	2.5	1	6700	500	3461	23	1.533	0.007	1.546
0.5	2.5	1	6800	500	3528	22	1.538	0.007	1.542
0.5	2.5	1	6900	500	3532	22	1.524	0.006	1.538
0.5	2.5	1	7000	500	3576	23	1.522	0.007	1.535
0.5	2.5	1	7100	500	3612	25	1.518	0.007	1.531
0.5	2.5	1	7200	500	3660	25	1.517	0.007	1.527
0.5	2.5	1	7300	500	3684	25	1.509	0.007	1.523
0.5	2.5	1	7400	500	3730	27	1.508	0.007	1.520
0.5	2.5	1	7500	500	3769	24	1.505	0.006	1.516
0.5	2.5	1	7600	500	3789	26	1.497	0.007	1.513
0.5	2.5	1	7700	500	3843	25	1.498	0.006	1.510
0.5	2.5	1	7800	500	3875	27	1.494	0.007	1.506
0.5	2.5	1	7900	500	3918	27	1.492	0.007	1.503
0.5	2.5	1	8000	500	3913	25	1.478	0.006	1.500
0.5	2.5	1	8100	500	3990	26	1.485	0.007	1.497
0.5	2.5	1	8200	500	4028	27	1.483	0.007	1.494
0.5	2.5	1	8300	500	4055	31	1.477	0.007	1.491
0.5	2.5	1	8400	500	4071	27	1.469	0.006	1.488
0.5	2.5	1	8500	500	4107	29	1.466	0.007	1.485
0.5	2.5	1	8600	500	4193	31	1.475	0.007	1.482
0.5	2.5	1	8700	500	4195	24	1.464	0.006	1.479
0.5	2.5	1	8800	500	4219	30	1.459	0.007	1.477
0.5	2.5	1	8900	500	4269	30	1.459	0.007	1.474
0.5	2.5	1	9000	500	4302	28	1.456	0.006	1.471
0.5	2.5	1	9100	500	4348	29	1.456	0.006	1.469
0.5	2.5	1	9200	500	4393	27	1.455	0.006	1.466
0.5	2.5	1	9300	500	4442	29	1.455	0.006	1.464
0.5	2.5	1	9400	500	4454	26	1.448	0.006	1.461
0.5	2.5	1	9500	500	4499	31	1.447	0.007	1.459
0.5	2.5	1	9600	500	4538	33	1.445	0.007	1.456
0.5	2.5	1	9700	500	4551	30	1.438	0.006	1.454
0.5	2.5	1	9800	500	4578	31	1.434	0.006	1.452
0.5	2.5	1	9900	500	4626	33	1.435	0.007	1.449
0.5	2.5	1	10000	500	4670	31	1.434	0.006	1.447

Таблица 5

Значения нагрузки при первой потере в зависимости от ёмкости накопителя, рассчитанные экспериментально и аналитически для линейной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере y_x	Доверительный интервал y_x	Аналитически рассчитанное y_x
0.5	2.5	1	5000	10	728	45	0.791	0.018	1.089
0.5	2.5	1	5000	20	1175	44	0.970	0.018	1.126
0.5	2.5	1	5000	30	1403	41	1.061	0.016	1.155
0.5	2.5	1	5000	40	1474	40	1.089	0.016	1.179
0.5	2.5	1	5000	50	1619	32	1.147	0.013	1.200
0.5	2.5	1	5000	60	1683	29	1.173	0.012	1.219
0.5	2.5	1	5000	70	1733	30	1.193	0.012	1.237
0.5	2.5	1	5000	80	1790	32	1.216	0.013	1.253
0.5	2.5	1	5000	90	1822	29	1.229	0.012	1.268
0.5	2.5	1	5000	100	1878	33	1.251	0.013	1.283
0.5	2.5	1	5000	110	1920	25	1.268	0.010	1.297
0.5	2.5	1	5000	120	1952	25	1.281	0.010	1.310
0.5	2.5	1	5000	130	1979	26	1.292	0.010	1.322
0.5	2.5	1	5000	140	2025	22	1.310	0.009	1.335
0.5	2.5	1	5000	150	2080	26	1.332	0.010	1.346
0.5	2.5	1	5000	160	2080	23	1.332	0.009	1.358
0.5	2.5	1	5000	170	2097	23	1.339	0.009	1.369
0.5	2.5	1	5000	180	2141	24	1.356	0.009	1.379
0.5	2.5	1	5000	190	2147	22	1.359	0.009	1.390
0.5	2.5	1	5000	200	2187	24	1.375	0.010	1.400
0.5	2.5	1	5000	210	2218	24	1.387	0.010	1.410
0.5	2.5	1	5000	220	2244	22	1.397	0.009	1.420
0.5	2.5	1	5000	230	2270	22	1.408	0.009	1.429
0.5	2.5	1	5000	240	2309	22	1.424	0.009	1.438
0.5	2.5	1	5000	250	2312	21	1.425	0.008	1.447
0.5	2.5	1	5000	260	2360	23	1.444	0.009	1.456
0.5	2.5	1	5000	270	2382	22	1.453	0.009	1.465
0.5	2.5	1	5000	280	2401	22	1.460	0.009	1.473
0.5	2.5	1	5000	290	2403	23	1.461	0.009	1.482
0.5	2.5	1	5000	300	2436	20	1.474	0.008	1.490
0.5	2.5	1	5000	310	2454	18	1.482	0.007	1.498
0.5	2.5	1	5000	320	2474	22	1.489	0.009	1.506
0.5	2.5	1	5000	330	2497	19	1.499	0.008	1.514
0.5	2.5	1	5000	340	2505	20	1.502	0.008	1.522
0.5	2.5	1	5000	350	2527	21	1.511	0.008	1.529
0.5	2.5	1	5000	360	2523	22	1.509	0.009	1.537

0.5	2.5	1	5000	370	2571	21	1.528	0.008	1.544
0.5	2.5	1	5000	380	2601	22	1.541	0.009	1.551
0.5	2.5	1	5000	390	2605	20	1.542	0.008	1.559
0.5	2.5	1	5000	400	2654	17	1.562	0.007	1.566
0.5	2.5	1	5000	410	2661	20	1.564	0.008	1.573
0.5	2.5	1	5000	420	2675	18	1.570	0.007	1.580
0.5	2.5	1	5000	430	2683	21	1.573	0.008	1.587
0.5	2.5	1	5000	440	2704	20	1.582	0.008	1.593
0.5	2.5	1	5000	450	2718	20	1.587	0.008	1.600
0.5	2.5	1	5000	460	2741	20	1.596	0.008	1.607
0.5	2.5	1	5000	470	2754	18	1.601	0.007	1.613
0.5	2.5	1	5000	480	2786	18	1.614	0.007	1.620
0.5	2.5	1	5000	490	2780	20	1.612	0.008	1.626
0.5	2.5	1	5000	500	2783	17	1.613	0.007	1.632
0.5	2.5	1	5000	510	2807	19	1.623	0.008	1.639
0.5	2.5	1	5000	520	2820	19	1.628	0.008	1.645
0.5	2.5	1	5000	530	2834	18	1.634	0.007	1.651
0.5	2.5	1	5000	540	2856	19	1.642	0.008	1.657
0.5	2.5	1	5000	550	2886	19	1.655	0.008	1.663
0.5	2.5	1	5000	560	2902	20	1.661	0.008	1.669
0.5	2.5	1	5000	570	2910	19	1.664	0.008	1.675
0.5	2.5	1	5000	580	2916	17	1.666	0.007	1.681
0.5	2.5	1	5000	590	2930	19	1.672	0.008	1.687
0.5	2.5	1	5000	600	2953	19	1.681	0.007	1.693
0.5	2.5	1	5000	610	2972	19	1.689	0.007	1.699
0.5	2.5	1	5000	620	2973	19	1.689	0.008	1.704
0.5	2.5	1	5000	630	2991	16	1.696	0.006	1.710
0.5	2.5	1	5000	640	3008	19	1.703	0.007	1.716
0.5	2.5	1	5000	650	3027	18	1.711	0.007	1.721
0.5	2.5	1	5000	660	3027	20	1.711	0.008	1.727
0.5	2.5	1	5000	670	3053	20	1.721	0.008	1.732
0.5	2.5	1	5000	680	3075	18	1.730	0.007	1.738
0.5	2.5	1	5000	690	3081	17	1.733	0.007	1.743
0.5	2.5	1	5000	700	3090	15	1.736	0.006	1.748
0.5	2.5	1	5000	710	3122	18	1.749	0.007	1.754
0.5	2.5	1	5000	720	3113	18	1.745	0.007	1.759
0.5	2.5	1	5000	730	3135	18	1.754	0.007	1.764
0.5	2.5	1	5000	740	3141	19	1.756	0.008	1.769
0.5	2.5	1	5000	750	3158	17	1.763	0.007	1.775
0.5	2.5	1	5000	760	3186	18	1.774	0.007	1.780
0.5	2.5	1	5000	770	3174	16	1.769	0.007	1.785
0.5	2.5	1	5000	780	3193	18	1.777	0.007	1.790
0.5	2.5	1	5000	790	3212	16	1.785	0.006	1.795
0.5	2.5	1	5000	800	3222	18	1.789	0.007	1.800
0.5	2.5	1	5000	810	3250	16	1.800	0.006	1.805
0.5	2.5	1	5000	820	3248	16	1.799	0.006	1.810
0.5	2.5	1	5000	830	3264	18	1.805	0.007	1.815
0.5	2.5	1	5000	840	3275	16	1.810	0.006	1.820

0.5	2.5	1	5000	850	3300	16	1.820	0.006	1.825
0.5	2.5	1	5000	860	3307	16	1.823	0.006	1.829
0.5	2.5	1	5000	870	3306	18	1.822	0.007	1.834
0.5	2.5	1	5000	880	3338	15	1.835	0.006	1.839
0.5	2.5	1	5000	890	3347	17	1.839	0.007	1.844
0.5	2.5	1	5000	900	3352	17	1.841	0.007	1.849
0.5	2.5	1	5000	910	3369	15	1.848	0.006	1.853
0.5	2.5	1	5000	920	3385	16	1.854	0.006	1.858
0.5	2.5	1	5000	930	3382	16	1.853	0.006	1.863
0.5	2.5	1	5000	940	3390	19	1.856	0.008	1.867
0.5	2.5	1	5000	950	3392	16	1.857	0.006	1.872
0.5	2.5	1	5000	960	3415	19	1.866	0.007	1.876
0.5	2.5	1	5000	970	3438	16	1.875	0.006	1.881
0.5	2.5	1	5000	980	3441	18	1.876	0.007	1.885
0.5	2.5	1	5000	990	3437	15	1.875	0.006	1.890
0.5	2.5	1	5000	1000	3460	15	1.884	0.006	1.894

Таблица 6

Значения нагрузки при первой потере в зависимости от ёмкости накопителя, рассчитанные экспериментально и аналитически для синусоидальной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере y_x	Доверительный интервал y_x	Аналитически рассчитанное y_x
0.5	3.2	1	5000	100	552	8	1.56	0.01	98
0.5	3.2	1	5000	200	696	7	1.79	0.01	202
0.5	3.2	1	5000	300	808	8	1.96	0.01	303
0.5	3.2	1	5000	400	909	8	2.11	0.01	410
0.5	3.2	1	5000	500	995	6	2.22	0.01	510
0.5	3.2	1	5000	600	1074	7	2.32	0.01	609
0.5	3.2	1	5000	700	1150	6	2.41	0.01	712
0.5	3.2	1	5000	800	1212	7	2.48	0.01	798
0.5	3.2	1	5000	900	1282	7	2.56	0.01	901
0.5	3.2	1	5000	1000	1342	7	2.62	0.01	992

Таблица 7

Значения нагрузки при первой потере в зависимости от ёмкости накопителя, рассчитанные экспериментально и аналитически для экспоненциальной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере y_x	Доверительный интервал y_x	Аналитически рассчитанное y_x
0.5	3.2	1	5000	100	2464	27	1.25	0.01	72
0.5	3.2	1	5000	200	2775	20	1.40	0.01	172
0.5	3.2	1	5000	300	3005	19	1.53	0.01	279
0.5	3.2	1	5000	400	3177	16	1.63	0.01	378
0.5	3.2	1	5000	500	3316	16	1.71	0.01	471
0.5	3.2	1	5000	600	3446	16	1.80	0.01	569
0.5	3.2	1	5000	700	3577	15	1.89	0.01	680
0.5	3.2	1	5000	800	3683	12	1.96	0.01	777
0.5	3.2	1	5000	900	3785	12	2.04	0.01	879
0.5	3.2	1	5000	1000	3886	13	2.12	0.01	988

Таблица 8

Значения ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной минимальной нагрузкой для синусоидальной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере y_x	Доверительный интервал y_x	Аналитически рассчитанное y_x
0.2	1.2	1	5000	416	3376	164	1.05	0.05	271.2
0.3	1.2	1	5000	438	3338	179	1.08	0.05	286.2
0.4	1.2	1	5000	455	3472	55	1.06	0.02	304.0
0.5	1.2	1	5000	484	0	0	0.00	0.00	325.6
0.6	1.2	1	5000	518	3869	0	0.99	0.00	352.6
0.7	1.2	1	5000	564	3750	536	1.04	0.12	387.7
0.8	1.2	1	5000	619	4168	407	1.00	0.09	436.0
0.9	1.2	1	5000	710	3491	0	1.14	0.00	508.5

Таблица 9

Значения ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной максимальной нагрузкой для синусоидальной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере u_x	Доверительный интервал u_x	Аналитически рассчитанное u_x
0.5	1.05	1	5000	181	3160	172	1.00	0.02	45.5
0.5	1.1	1	5000	276	3373	100	1.01	0.02	123.6
0.5	1.15	1	5000	374	3419	119	1.04	0.03	218.8
0.5	1.2	1	5000	482	0	0	0.00	0.00	325.6
0.5	1.25	1	5000	604	3625	96	1.07	0.03	440.8
0.5	1.3	1	5000	727	3722	65	1.07	0.02	562.3
0.5	1.35	1	5000	862	3775	80	1.09	0.03	688.9
0.5	1.4	1	5000	995	3899	69	1.07	0.03	819.5
0.5	1.45	1	5000	1126	3902	124	1.10	0.05	953.4
0.5	1.5	1	5000	1265	3914	87	1.13	0.04	1090.0

Таблица 10

Значения ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной временем перегрузочного периода для синусоидальной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере u_x	Доверительный интервал u_x	Аналитически рассчитанное u_x
0.5	1.2	1	1000	142	703	29	1.05	0.04	65.1
0.5	1.2	1	2000	234	1380	74	1.07	0.04	130.3
0.5	1.2	1	3000	322	2086	114	1.06	0.05	195.4
0.5	1.2	1	4000	410	2736	318	1.08	0.10	260.5
0.5	1.2	1	5000	482	0	0	0.00	0.00	325.6
0.5	1.2	1	6000	565	4204	185	1.06	0.04	390.8
0.5	1.2	1	7000	645	5006	121	1.04	0.02	455.9
0.5	1.2	1	8000	720	5691	401	1.05	0.07	521.0
0.5	1.2	1	9000	800	6504	235	1.03	0.04	586.1

Таблица 11

Значения ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной минимальной нагрузкой для линейной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере u_x	Доверительный интервал u_x	Аналитически рассчитанное u_x
0.2	1.2	1	5000	210	2946	115	1.02	0.05	100
0.3	1.2	1	5000	222	3009	189	1.02	0.07	111
0.4	1.2	1	5000	243	3125	125	1.00	0.04	125
0.5	1.2	1	5000	270	3245	171	0.99	0.05	143
0.6	1.2	1	5000	306	3041	200	1.07	0.05	167
0.7	1.2	1	5000	351	3506	384	1.00	0.08	200
0.8	1.2	1	5000	421	3599	256	1.02	0.04	250
0.9	1.2	1	5000	520	3849	362	1.04	0.04	333

Таблица 12

Значения ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной максимальной нагрузкой для линейной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере u_x	Доверительный интервал u_x	Аналитически рассчитанное u_x
0.5	1.05	1	5000	111	2938	102	0.95	0.02	11
0.5	1.1	1	5000	150	2779	101	1.03	0.02	42
0.5	1.15	1	5000	200	2974	161	1.03	0.04	87
0.5	1.2	1	5000	268	3223	175	1.00	0.05	143
0.5	1.25	1	5000	339	3273	189	1.02	0.06	208
0.5	1.3	1	5000	417	3371	308	1.02	0.10	281
0.5	1.35	1	5000	512	3401	204	1.04	0.07	360
0.5	1.4	1	5000	593	3431	109	1.06	0.04	444
0.5	1.45	1	5000	703	3517	112	1.06	0.04	533
0.5	1.5	1	5000	782	3553	106	1.08	0.04	625

Таблица 13

Значения ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной временем перегрузочного периода для линейной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первом потере u_x	Доверительный интервал u_x	Аналитически рассчитанное u_x
0.5	1.2	1	1000	93	639	62	1.01	0.09	29
0.5	1.2	1	2000	151	1232	35	1.04	0.02	57
0.5	1.2	1	3000	195	1920	161	1.00	0.07	86
0.5	1.2	1	4000	237	2752	135	0.94	0.05	114
0.5	1.2	1	5000	272	3021	202	1.05	0.06	143
0.5	1.2	1	6000	310	3913	294	0.99	0.07	171
0.5	1.2	1	7000	354	4290	314	1.04	0.06	200
0.5	1.2	1	8000	388	4847	368	1.05	0.06	229
0.5	1.2	1	9000	440	5509	371	1.04	0.06	257

Таблица 14

Значения ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной минимальной нагрузкой для экспоненциальной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первом потере u_x	Доверительный интервал u_x	Аналитически рассчитанное u_x
0.2	1.2	1	5000	141	2755	138	1.00	0.10	49
0.3	1.2	1	5000	162	2808	180	1.01	0.10	64
0.4	1.2	1	5000	190	2901	134	1.01	0.06	80
0.5	1.2	1	5000	220	3095	338	0.98	0.11	101
0.6	1.2	1	5000	250	2975	842	1.06	0.25	128
0.7	1.2	1	5000	310	3199	163	1.03	0.04	164
0.8	1.2	1	5000	381	3611	249	1.00	0.04	218
0.9	1.2	1	5000	496	4001	902	1.01	0.10	307

Таблица 15

Значения ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной максимальной нагрузкой для экспоненциальной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере y_x	Доверительный интервал y_x	Аналитически рассчитанное y_x
0.5	1.05	1	5000	98	2624	121	1.01	0.03	8
0.5	1.1	1	5000	129	2814	124	1.00	0.04	30
0.5	1.15	1	5000	172	2976	170	0.98	0.06	61
0.5	1.2	1	5000	220	3095	338	0.98	0.11	101
0.5	1.25	1	5000	262	2957	310	1.06	0.12	147
0.5	1.3	1	5000	320	3163	236	1.01	0.09	197
0.5	1.35	1	5000	376	3203	158	1.02	0.06	251
0.5	1.4	1	5000	449	3428	266	0.96	0.11	309
0.5	1.45	1	5000	507	3337	166	1.02	0.07	368
0.5	1.5	1	5000	563	3246	114	1.08	0.05	430

Таблица 16

Значения ёмкости накопителя, необходимой чтобы выдержать поток с заданной временем перегрузочного периода для экспоненциальной зависимости

Начальная нагрузка y_1	Конечная нагрузка y_2	Среднее время обслуживания b	Длительность перегрузки T_p , с	Ёмкость накопителя L	Время первого отказа t_x , с	Доверительный интервал t_x	Нагрузка при первой потере y_x	Доверительный интервал y_x	Аналитически рассчитанное y_x
0.5	1.2	1	1000	80	608	47	0.99	0.08	20
0.5	1.2	1	2000	121	1154	66	1.05	0.06	40
0.5	1.2	1	3000	155	1865	140	0.97	0.08	61
0.5	1.2	1	4000	192	2341	93	1.03	0.04	81
0.5	1.2	1	5000	220	3095	338	0.98	0.11	101
0.5	1.2	1	6000	245	3433	97	1.06	0.03	121
0.5	1.2	1	7000	278	4215	139	1.00	0.03	141
0.5	1.2	1	8000	302	4765	194	1.02	0.04	162
0.5	1.2	1	9000	339	5314	236	1.02	0.05	182