

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и автоматического управления

**ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ
ПАССАЖИРОПЕРЕВОЗОК**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 481 группы
направления 27.03.03 Системный анализ и управление
факультета компьютерных наук и информационных технологий
Кузьминой Алины Андреевны

Научный руководитель
старший преподаватель

И. А. Люкшин

Заведующий кафедрой
к. ф.-м. н., доцент

И. Е. Тананко

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Работа городского транспорта очень влияет на удобство передвижения населения по городу. Транспортные компании ищут баланс между удобством для пассажиров и своей выгодой. Если пускать автобусы чаще, люди меньше ждут и реже толпятся в салоне. Но тогда растут расходы на топливо и ремонт, и автобусы иногда ездят полупустыми. При планировании маршрутов часто смотрят на среднее количество пассажиров. Но из-за этого не всегда получается учесть, когда людей много, а когда мало. В итоге расписание получается не самым лучшим, появляются очереди или автобусы работают неэффективно. Имитационное моделирование помогает проверить, как будет работать транспорт в разных ситуациях, и найти более удачные решения. Проблема исследования связана с тем, что пассажиропотоки постоянно меняются, и это сложно учитывать при планировании маршрутов.

Для решения подобных задач используются методы математического и имитационного моделирования, которые позволяют исследовать различные варианты работы транспортной системы без вмешательства в реальный процесс перевозок. Поэтому разработка модели пассажироперевозок и исследование её характеристик является актуальной задачей.

Цель бакалаврской работы — разработать имитационную модель системы пассажироперевозок и исследовать её работу для выбора оптимального количества автобусов на маршруте.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. Изучить основные положения теории массового обслуживания;
2. Рассмотреть особенности пассажироперевозок как системы массового обслуживания;
3. Исследовать методы математического и имитационного моделирования;
4. Разработать программу для проведения имитационного моделирования;
5. Провести вычислительные эксперименты;
6. Выполнить сравнение полученных результатов;
7. Определить параметры маршрута, обеспечивающие эффективную работу системы.

Методологические основы имитационного моделирования и теории

массового обслуживания представлены в работах Б. В. Гнеденко [1], С. Карлина [2], Г. П. Климова [3], А. Ф. Терпугова [4].

Практическая значимость бакалаврской работы заключается в возможности использования разработанной модели для оценки эффективности работы пассажироперевозок при различных значениях пассажиропотока и количестве автобусов. Разработанная программа позволяет проводить вычислительные эксперименты и анализировать влияние параметров системы на основные показатели качества обслуживания пассажиров.

Структура и объем работы. Бакалаврская работа состоит из введения, 3 разделов, заключения, списка использованных источников и цифрового носителя в качестве приложения. Общий объем работы — 57 страниц, из них 41 страница — основное содержание, включая 16 рисунков, список использованных источников информации — 20 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Особенности систем пассажироперевозок как систем массового обслуживания» посвящен рассмотрению теоретических основ исследования.

В подразделе 1.1 рассмотрены особенности пассажироперевозок как системы массового обслуживания. Показано, что процесс обслуживания пассажиров может быть представлен в виде системы массового обслуживания [5], в которой пассажиры выступают в роли требования, а транспортные средства являются обслуживающими приборами. Рассмотрены основные элементы системы, а также показатели, характеризующие её работу.

В подраздел 1.2 приведены основные сведения о теории массового обслуживания. Рассмотрены входящие потоки требований, процессы обслуживания и характеристики систем массового обслуживания. Особое внимание уделено многоканальным системам обслуживания с ограниченной очередью [6], так как именно такая модель наиболее близка к рассматриваемой транспортной системе.

В подразделе 1.3 рассмотрены методы моделирования транспортных процессов. Проведён обзор математического и имитационного моделирования. Показаны преимущества использования имитационных моделей при исследовании сложных систем [7], характеристики которых могут изменяться

во времени. Также рассмотрены существующие подходы к моделированию пассажиропотоков и организации движения транспорта.

Второй раздел «Модель системы пассажироперевозок как система массового обслуживания типа $M/M/\kappa/B$ » посвящен разработке математической модели исследуемой системы и рассмотрению программной реализации модели.

В подразделе 2.1 для описания работы маршрута используется модель многоканальной системы массового обслуживания с ограниченной очередью типа $M/M/\kappa/B$.

Состояние системы описывается числом пассажиров n (от 0 до $\kappa+B$, где κ – число автобусов, B – вместимость очереди на остановке). Интенсивности переходов из состояния в состояние задаются следующим образом:

$$\lambda_n = \begin{cases} \lambda, & 0 \leq n < \kappa + B, \\ 0, & n = \kappa + B, \end{cases} \quad \mu_n = \begin{cases} n\mu, & 1 \leq n \leq \kappa, \\ \kappa\mu, & \kappa < n \leq \kappa + B, \end{cases}$$

где λ – интенсивность прибытия пассажиров, μ – интенсивность обслуживания одним автобусом.

Из этих интенсивностей находятся стационарные вероятности p_n – решения системы уравнений баланса. Они имеют вид:

$$p_n = \begin{cases} p_0 \frac{(\kappa\psi)^n}{n!}, & 0 \leq n \leq \kappa, \\ p_0 \frac{\kappa^\kappa \psi^n}{\kappa!}, & \kappa < n \leq \kappa + B, \end{cases}$$

где $\psi = \frac{\lambda}{\kappa\mu}$ – приведённая интенсивность нагрузки (коэффициент использования системы). Нормировочный множитель p_0 (вероятность того, что в системе нет ни одного пассажира) вычисляется по формуле:

$$p_0^{-1} = \begin{cases} \sum_{n=0}^{\kappa-1} \frac{(\kappa\psi)^n}{n!} + \frac{(\kappa\psi)^\kappa}{\kappa!} \cdot \frac{1 - \psi^{B+1}}{1 - \psi}, & \psi \neq 1, \\ \sum_{n=0}^{\kappa-1} \frac{\kappa^n}{n!} + \frac{\kappa^\kappa}{\kappa!} \cdot (B + 1), & \psi = 1. \end{cases}$$

На основе вероятностей p_n рассчитываются ключевые характеристики

эффективности.

Вероятность отказа (потери пассажира из-за переполнения очереди):

$$p_{loss} = p_{\kappa+B}.$$

Эффективная интенсивность потока, реально поступающего на обслуживание:

$$\lambda_{ef} = \lambda(1 - p_{loss}).$$

Среднее число занятых автобусов:

$$h = \frac{\lambda_{ef}}{\mu}.$$

Математическое ожидание длины очереди (числа ожидающих требований):

$$b = \begin{cases} p_0 \frac{\kappa^\kappa \psi^{\kappa+1}}{\kappa! (1-\psi)^2} [1 - \psi^B - B\psi^B(1-\psi)], & \psi \neq 1, \\ \frac{\kappa^\kappa B(B+1)}{2\kappa!}, & \psi = 1. \end{cases}$$

Используя формулы Литтла, находится среднее время ожидания в очереди и среднее время пребывания требования в системе:

$$w = \frac{b}{\lambda_{ef}}, \quad u = \frac{n}{\lambda_{ef}} = w + \frac{1}{\mu}.$$

При численной реализации для больших κ (более 20) прямое вычисление факториалов приводит к переполнению. Поэтому расчёты ведутся в логарифмической области с использованием функции гамма-логарифма, что обеспечивает устойчивость.

Подраздел 2.2 посвящен описанию дискретно-событийной имитационной модели. Основные объекты модели: пассажир (требование), автобус (канал), остановка (очередь). Типы событий: прибытие пассажира на остановку, прибытие автобуса на остановку (посадка и высадка), уход пассажира из-за превышения максимального времени ожидания. Управление модельным временем осуществляется через список событий, упорядоченный по времени. Модель реализована на языке Python с использованием библиотек NumPy, SciPy, Matplotlib.

Подраздел 2.3 посвящен расчету прибыли за время моделирования. Определяется это как разность между выручкой от перевезённых пассажиров и эксплуатационными расходами на рейсы:

$$\Pi = R - C = p_{\text{ticket}} \cdot N_{\text{serv}} - c_{\text{route}} \cdot N_{\text{trips}},$$

где p_{ticket} – стоимость билета (40 руб.), N_{serv} – число перевезённых пассажиров, c_{route} – затраты на один рейс (500 руб.), N_{trips} – суммарное число рейсов всех автобусов за время моделирования. Для каждого набора параметров проводится несколько прогонов, после чего вычисляется средняя прибыль и её стандартное отклонение.

Третий раздел «Практическая часть» посвящен исследованию работы системы при различных параметрах пассажиропотока. Для проведения экспериментов использовалась разработанная программа. Во всех экспериментах анализировалось влияние количества автобусов на основные показатели работы системы. Во всех экспериментах время моделирования составляло 480 минут, вместимость автобуса — 30 пассажиров, стоимость билета — 40 руб., затраты на один рейс — 500 руб.

В подразделе 3.1 описывается первый эксперимент, где рассматривалась ситуация с относительно небольшим количеством пассажиров.

Анализ загрузки автобуса

Распределение загрузки салонов представлено на рисунке 1.

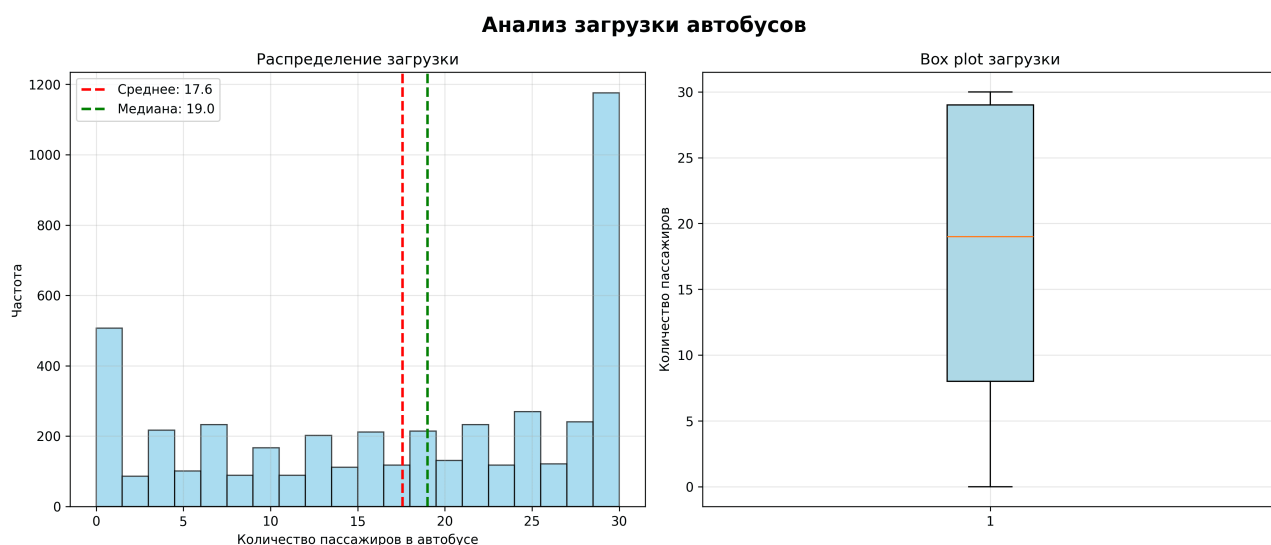


Рисунок 1 – Анализ загрузки автобусов: гистограмма и диаграмма размаха (эксперимент 1)

Гистограмма показывает, что автобусы часто ездят либо пустыми (0 пассажиров), либо полностью заполненными (30 пассажиров). Это связано с тем, что в начале маршрута пассажиров почти нет, а в середине они садятся все сразу. Диаграмма размаха подтверждает высокий разброс значений: основной диапазон значений охватывает примерно 8–29 пассажиров, а медианная линия расположена выше середины ящика.

Несмотря на низкую дисперсию времени отправления ($\sigma = 2.0$ мин), изменчивость пассажиропотока приводит к заметным изменениям загрузки автобусов, что требует внимательного управления интервалами в пиковые зоны маршрута.

Сравнение показателей

На рисунке 2 представлены сводные графики изменения ключевых показателей в зависимости от интенсивности выпуска.

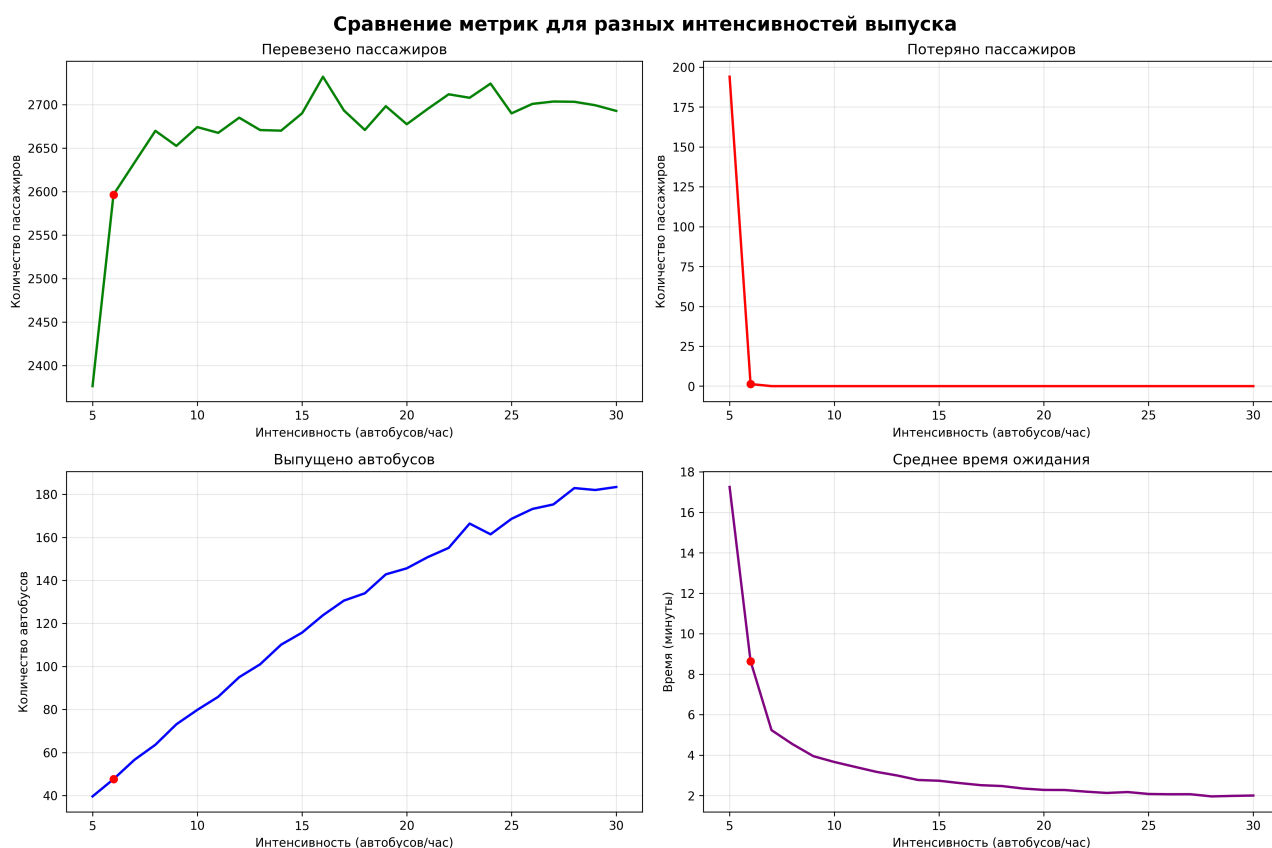


Рисунок 2 – Сравнение показателей для разных интенсивностей выпуска (эксперимент 1)

Ключевые наблюдения:

1. **Перевезено пассажиров:** при 5–10 автобусах в час число перевезённых быстро растёт, а потом остаётся примерно на уровне 2600–2700.

При 6 автобусах перевозится около 2600 пассажиров.

2. **Потеряно пассажиров:** когда автобусов мало (5 в час), теряется около 200 человек. При 6 автобусах потери падают почти до нуля и дальше не растут.
3. **Выпущено автобусов:** линейная зависимость, в точке оптимума выпущено около 48 автобусов за смену.
4. **Среднее время ожидания:** снижается с ≈ 17 мин (при 5 авт/час) до ≈ 8.5 мин (при 6 авт/час). При дальнейшем увеличении интенсивности время ожидания продолжает снижаться до ≈ 2 мин, однако дальнейшее снижение уже не даёт заметной пользы.

Пассажиропоток по остановкам

На рисунке 3 показана детализация потоков по остановкам маршрута при оптимальной интенсивности.

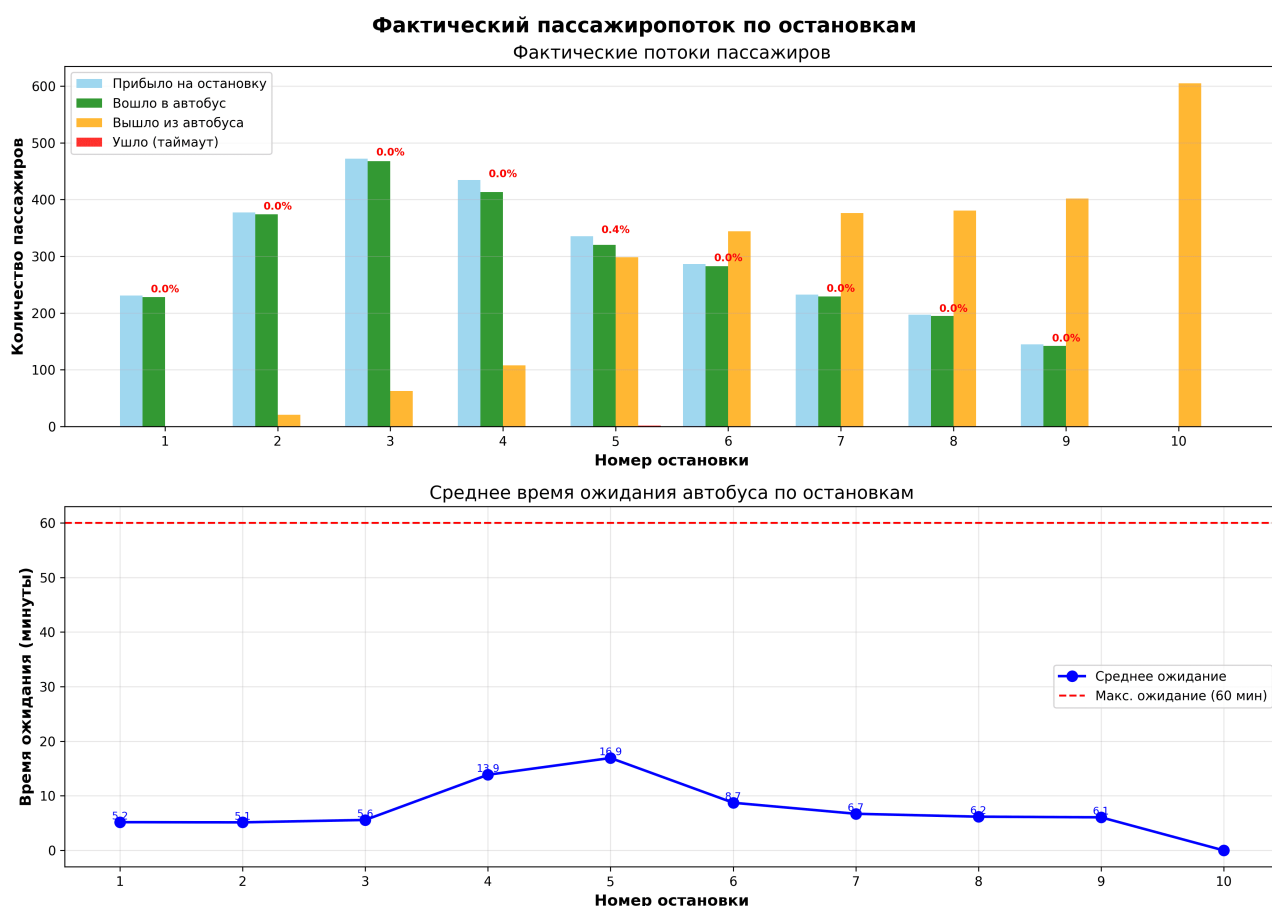


Рисунок 3 – Фактический пассажиропоток по остановкам и среднее время ожидания (эксперимент 1)

Ключевые наблюдения:

- **Баланс потоков:** на большинство остановок (1–4, 6–9) количество при-

бывших пассажиров полностью совпадает с количеством вошедших в салон, что указывает на отсутствие дефицита мест.

- **Перегрузки на отдельных остановках:** на остановке 5 зафиксированы минимальные потери в размере 0.4% . Это связано с тем, что именно на этом участке (после пика посадки на 3-й остановке) автобусы подходят с высокой загрузкой, и часть пассажиров не успевает войти.
- **Время ожидания:** среднее время ожидания имеет локальный максимум на 5-й остановке (≈ 16.9 мин) и 4-й остановке (≈ 13.9 мин). Все значения находятся в пределах допустимого лимита (60 мин), однако рост времени ожидания в середине маршрута свидетельствует о скопление пассажиров, не вместившихся в предыдущие салоны.
- **Высадка:** объем высадки (оранжевые столбцы) закономерно возрастает к конечным остановкам, достигая пика на 10-й остановке.

Зависимость прибыли от интенсивности выпуска

На рисунке 4 представлена зависимость суммарной прибыли транспортного предприятия от интенсивности выпуска автобусов.

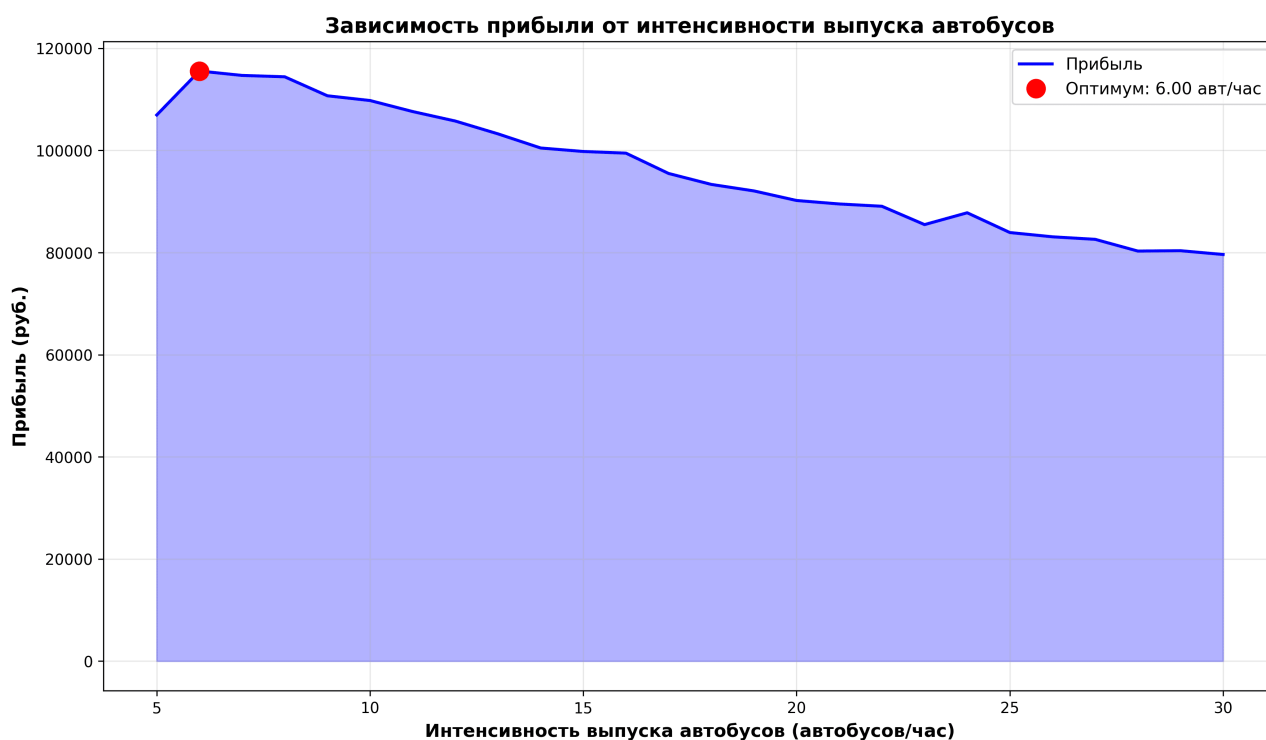


Рисунок 4 – Зависимость прибыли от интенсивности выпуска автобусов (эксперимент 1)

На графике видно, что наибольшая прибыль достигается при 6 автобусах в час (интервал около 10 минут) и составляет примерно 115 000 рублей. Если автобусов меньше, прибыль ниже из-за потерь пассажиров. Если больше – прибыль тоже падает, потому что растут затраты на рейсы.

Вывод по первому эксперименту

Оптимальная интенсивность выпуска составила 6 автобусов в час. Прибыль достигла 115 тыс. руб., потери пассажиров не превысили 0,4%, среднее время ожидания на загруженных остановках – около 17 минут.

В подразделе 3.2 описывается второй эксперимент, где интенсивность поступления пассажиров была увеличена в середине пути. Сценарий с выраженными пиками посадки на остановках 4 – 6. Оптимум достигнут при интенсивности 11 автобусов в час. Прибыль составила 102 тыс. руб., максимальные потери на пиковой остановке – 6,3%, среднее время ожидания – 8 минут.

В подразделе 3.3 описывается третий эксперимент, где рассматривалась ситуация с высокой интенсивностью поступления пассажиров в начале. Даже при максимальной рассмотренной интенсивности 25 автобусов в час потери на остановках 3 – 4 достигли 80%, прибыль составила всего 75 тыс. руб., что указывает на необходимость увеличения вместимости или изменения схемы движения.

В подразделе 3.4 описывается четвертый эксперимент, где рассматривалась ситуация с умеренным изменением интенсивности посадки и высадки. Оптимальная интенсивность выпуска – 11 автобусов в час, прибыль – 115 тыс. руб., загрузка автобусов – 62%, потери менее 5%, максимальное время ожидания – 12 минут.

Полученные результаты подтвердили возможность использования разработанной модели для выбора рационального количества автобусов и оценки эффективности организации пассажирских перевозок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе была разработана и исследована имитационная модель системы пассажироперевозок, позволяющая подобрать оптимальное количество автобусов на маршруте с учётом экономических показателей и качества обслуживания пассажиров.

На основании разработанной модели была создана программа для имитационного моделирования системы пассажироперевозок и была проведена серия экспериментов для четырёх различных сценариев пассажиропотока, по результатам которых были сделаны основные выводы.

В дальнейшем модель можно улучшить. Например, можно разрешить автобусам пропускать некоторые остановки или добавить несколько маршрутов сразу. Также можно использовать методы машинного обучения, чтобы предсказывать, сколько людей приедет, по прошлым данным. Если настроить модель под реальные городские маршруты, то её можно будет использовать для планирования расписаний.

Основные источники информации:

1. Гнеденко, Б. В. Введение в теорию массового обслуживания / Б. В. Гнеденко. — Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2014. — 76 с.
2. Карлин, С. Основы теории случайных процессов / С. Карлин. — М.: Мир, 1971. — 536 с.
3. Климов, Г. П. Теория массового обслуживания / Г. П. Климов. — М: Издательство Московского университета, 2011. — 312 с.
4. Терпугов, А. Ф. Теория массового обслуживания / А. А. Назаров, А. Ф. Терпугов, — Томск: Изд-во НТЛ, 2010. — 228 с.
5. Митрофанов, Ю. И. Анализ сетей массового обслуживания: Учебное пособие / Ю. И. Митрофанов. — Саратов: Издательство «Научная книга», 2005. — 175 с.
6. Шувалов, В. П. Обеспечение показателей надежности телекоммуникационных систем и сетей / В. П. Шувалов. — М.: Горячая линия - Телеком, 2015. — 168 с.
7. Качанова, Л. С. Модели системы массового обслуживания / Л. С. Качанова. // Агроинженерия. — 2009. — №. 8-1. — С. 75-78.