

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 МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АЭРОПОРТА**
АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 481 группы
направления 27.03.03 — Системный анализ и управление
факультета КНиИТ
Горбачёва Алексея Павловича

Научный руководитель

к. ф.-м. н., доцент

И. Е. Тананко

Заведующий кафедрой

к. ф.-м. н., доцент

И. Е. Тананко

Саратов 2022

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Теория массового обслуживания является математической дисциплиной, разделом теории вероятностей, которая посвящена изучению систем с элементами случайности и массовым обслуживанием, а также их составляющих: потоков входящих и исходящих требований, их обслуживанию, длине очереди и длительности ожидания ими обслуживания.

Первоначальной областью применения теории массового обслуживания была телефония, в настоящее время она используется во многих областях экономики, биологии, социологии, демографии и промышленности. Этим списком её практические приложения к различным аспектам деятельности в современном мире не ограничиваются.

Многие процессы в самых разных сферах человеческой деятельности могут быть смоделированы, используя инструментарий теории массового обслуживания. Модели массового обслуживания хорошо подходят для описания процессов функционирования дискретных стохастических систем, а также для их последующего анализа. Затем полученные данные могут быть использованы для оптимизации этих процессов. Аэропорт является одной из таких систем. В этой системе требуется исследование процессов использования общих ресурсов и, как следствие, процессов образования очередей.

Одним из эффективнейших методов исследования подобных систем является имитационное моделирование. Оно подразумевает построение модели рассматриваемой реальной системы с сохранением общей структуры: важных для исследователя элементов и взаимосвязей между ними [1]. Составленная с необходимой для решения конкретной задачи точностью модель позволяет описать рассматриваемую систему и получить ответы на стоящие перед исследователем вопросы.

В данной работе предлагается имитационная модель (ИМ) аэропорта. ИМ была реализована средствами языка программирования Python. Сопоставление полученных характеристик и их анализ могут использоваться для принятия решений по различным вариантам оптимизации с целью увеличения производительности рассматриваемой системы, уменьшения длительностей простоя самолетов, минимизации затрат на деятельность аэропорта.

Цель бакалаврской работы — разработать дискретно-событийную имитационную модель процессов функционирования аэропорта.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. Изучить методы анализа различных сетей массового обслуживания;
2. Изучить принципы дискретно-событийного моделирования;
3. Разработать алгоритм анализа процессов функционирования аэропорта при помощи метода имитационного моделирования;
4. Реализовать разработанный алгоритм;
5. Исследовать процессы функционирования аэропорта при помощи модели.

Методологические основы имитационного моделирования и, в частности, дискретно-событийного имитационного моделирования, а также методы анализа характеристик аэропорта представлены в работах Р. Шеннона [2], В. Кельтона, А. Лоу [3], I. Simaiakis, adv. Н. Balakrishnan [4], А. Jacquillat, А. R. Odoni [5].

Практическая значимость бакалаврской работы. В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была разработана дискретно-событийная имитационная модель процессов функционирования аэропорты. С её помощью можно исследовать характеристики рассматриваемой системы, варьируя различные входные параметры.

Структура и объем работы. Бакалаврская работа состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованных источников и 1 приложения. Общий объем работы — 73 страниц, из них 51 страница — основное содержание, включая 9 рисунков и 2 таблицы, список использованных источников информации — 24 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел «Описание функционирования аэропорта» посвящен описанию рассматриваемой системы.

В подразделе 1.1 делается обзор существующих моделей анализа процессов функционирования аэропорта [5 - 8] и формулируются основные цели моделирования данной системы.

Подраздел 1.2 описывает рассматриваемые процессы, происходящие в системе, а также связи между ними.

Второй раздел «Математическая модель аэропорта» посвящен обзору основных понятий теории массового обслуживания, а именно сетей и систем массового обслуживания в переходном режиме.

В подразделе 2.1 приводятся базовые понятия и определения теории массового обслуживания.

В подразделе 2.2 описываются основные понятия, касающиеся сетей систем массового обслуживания [9].

Подраздел 2.3 содержит примеры рассмотрения отдельных процессов функционирования аэропорта в виде систем массового обслуживания в переходном режиме [10]. Делается вывод о необходимости использования подхода дискретно-событийного имитационного моделирования для анализа рассматриваемой системы [11].

Третий раздел «Имитационная модель» посвящен описанию принципов дискретно-событийного имитационного моделирования в целом и построению структуры модели аэропорта.

В подразделе 3.1 приводятся два основных подхода к имитационному моделированию: дискретно-событийный и процессный. Также поясняются особенности построения дискретно-событийных имитационных моделей, а именно описание основных компонентов такого рода моделей, структурных и логических связей между ними (потока управления) и механизма продвижения модельного времени.

В подразделе 3.2 производится установление соответствия между элементами реальной системы и элементами модели. Представлены различные варианты конфигураций аналитической модели аэропорта в виде сети систем массового обслуживания, однако акцент делается на описании дискретно-событийной имитационной модели процессов функционирования аэропорта: её структуры (рисунок 1), поведения и взаимодействия основных её компонентов, таких как требования, очереди, события, модельное время и состояние модели. Описываются свойства этих компонентов. Указываются атрибуты для требований, при помощи которых после окончания симуляции проводится анализ основных характеристик рассматриваемой системы.

Четвертый раздел «Описание программной реализации имитационной модели аэропорта» посвящен формулированию алгоритма построения и анализа модели, а также описанию его реализации.

Подраздел 4.1 содержит формализованную структуру алгоритма предложенной дискретно-событийной имитационной модели. Подраздел описывает как вспомогательные модули (класс *Demand*, содержащий атрибуты тре-

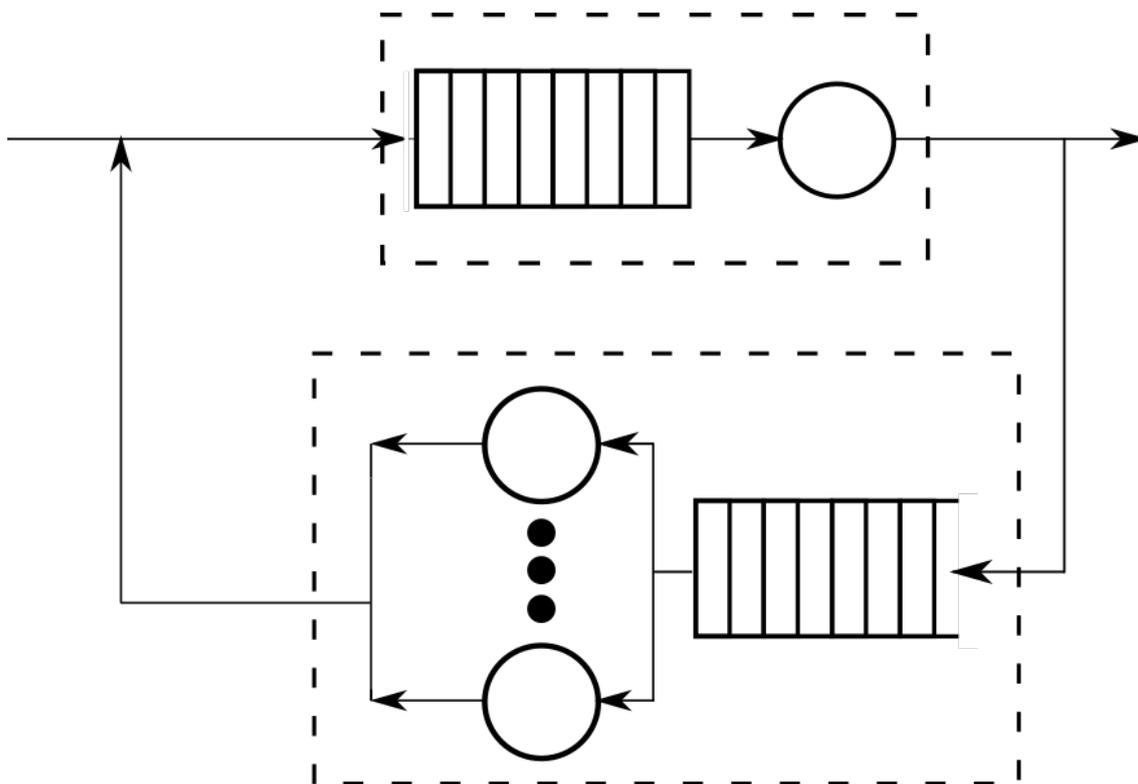


Рисунок 1 – Схема для имитационной модели

бования, и класс *Application*, описывающий интерфейс приложения), так и логику основного модуля — ведущей программы. Кратко, данный алгоритм может быть записан в виде следующей последовательности шагов:

1. **Определение структуры модели.** Происходит обработка входных данных, введённых пользователем:

- $\kappa = (\kappa_1, \kappa_2)$ — вектор числа обслуживающих приборов в системах сети, где κ_i это число обслуживающих приборов в системе S_i ,
- λ_0 — интенсивность входящего в сеть потока,
- σ_0 — среднее квадратическое отклонение среднего поступления требований в сеть,
- $\mu = (\mu_i), i = 1, 2$ — вектор интенсивностей обслуживания требований, где μ_i это интенсивность обслуживания требований в системе S_i ,
- $\sigma = (\sigma_i), i = 1, 2$ — среднее квадратическое отклонение среднего поступления требований в системы сети, где σ_i это среднее квадратическое отклонение для системы S_i ,
- $k = (k_i), i = 1, 2$ — порядок распределения Эрланга для длительностей обслуживания,

- законы распределения, соответственно, для генерации новых требований, обслуживания требований в системе S_1 , обслуживания требований в системе S_2 ,
- t_{max} — максимальное время моделирование.

2. **Определение начального состояния модели.** А именно моментов активации событий и текущего модельного времени. Затем происходит запуск основного цикла симуляции: блоки 3 - 9 повторяются до тех пор, пока текущее модельное время не достигнет максимального модельного времени.
3. **Генерация требования.** Создание объекта класса *Demand*, то есть требования, которое переходит в очередь системы S_1 , определение следующего момента активации генерации.
4. **Начало обслуживания требования системой S_1 .** Поступление находящегося в очереди данной системы требования на обслуживание, определение момента завершения его обслуживания.
5. **Начало обслуживания требования системой S_2 .** Поступление находящегося в очереди данной системы требования на обслуживание, определение момента завершения его обслуживания.
6. **Завершение обслуживания требования системой S_1 .** Требование покидает систему S_1 : если его режимом был взлёт, то оно покидает сеть, если же посадка — то оно переходит в очередь системы S_2 .
7. **Завершение обслуживания требования системой S_2 .** Изменение режима требования с посадки на взлёт, после чего требование покидает систему S_2 и переходит в очередь системы S_1 .
8. **Промежуточные результаты.** Вычисление характеристик сети динамически по следующим выражениям:
 - а) Оценка математического ожидания длительности пребывания требований в системе обслуживания определяется формулой:

$$\tilde{u} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (t_i - t_{p_i})$$

- б) Оценка математического ожидания длительности обслуживания

требований в системе обслуживания определяется формулой:

$$\tilde{v} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (t_i - t_{g_i})$$

- в) Оценка математического ожидания длительности пребывания требований в очереди системы.

$$\tilde{w} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (t_{g_i} - t_{p_i})$$

- г) Оценка стационарного распределения сети:

$$\tilde{p}_k = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{R_k} \tau_i^{(k)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

- д) Оценка математического ожидания числа требований в системе обслуживания:

$$\tilde{n} = \sum_{k=1}^{\infty} k \tilde{p}_k.$$

Здесь K — число обслуженных требований на момент завершения выполнения имитационной модели, T — длительность модельного времени проведения эксперимента с моделью, R_k — число интервалов времени, когда в системе находилось ровно k требований, t_i — момент завершения обслуживания i -го требования, t_{g_i} — момент выбора i -го требования из очереди, t_{p_i} — момент постановки требования в очередь системы.

9. **Переход к следующему моменту времени.** Текущее модельное время изменяется на ближайший момент активации какого-либо события.

В подразделе 4.2 описан интерфейс программы (рисунок 2), разработанный для облегчения использования конечным пользователем данной программы анализа системы.

Подраздел 4.3 содержит описание модулей программы и таблицы используемых идентификаторов. Программа состоит из трёх модулей:

Demand.py — модуль, описывающий требование и его атрибуты.

cool_window.py — модуль, описывающий интерфейс основного окна про-

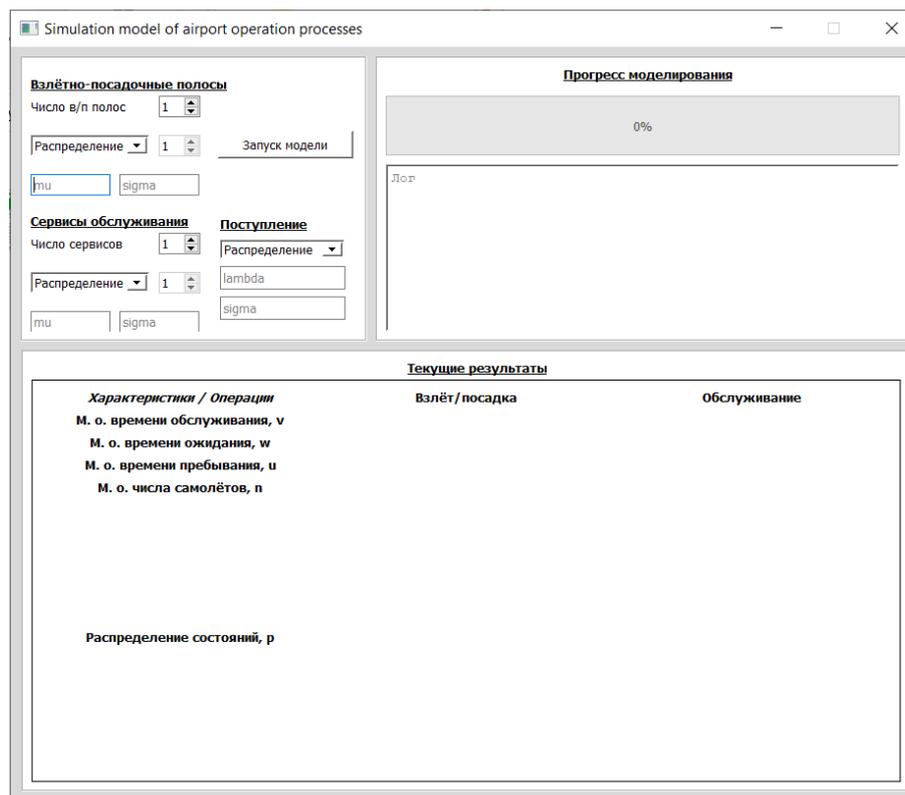


Рисунок 2 – Основное окно программы

граммы.

main.py — модуль, осуществляющий процесс моделирования, определяющий поведение элементов системы и производящий анализ полученных результатов.

Пятый раздел «Результаты проведения экспериментов с имитационной моделью аэропорта» описывает три примера использования разработанной модели.

1. Параметры генерации требований следующие: длительности интервалов между поступающими требованиями имеют экспоненциальное распределение, интенсивность поступления $\lambda_0 = 1$, среднее квадратическое отклонение $\sigma_0 = 0$.

Параметры для систем сети определены соответствующим образом для каждой из систем:

- а) Длительности обслуживания имеют распределение Эрланга порядка k , $k = 2$, число обслуживающих приборов $\kappa = 1$, интенсивность обслуживания $\mu = 6$, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 0$.
- б) Длительности обслуживания имеют экспоненциальное распределе-

ние ($k = 1$), число обслуживающих приборов $\kappa = 5$, интенсивность обслуживания каждого прибора $\mu = 2$, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 0$.

Результаты моделирования приведены на рисунке 3.

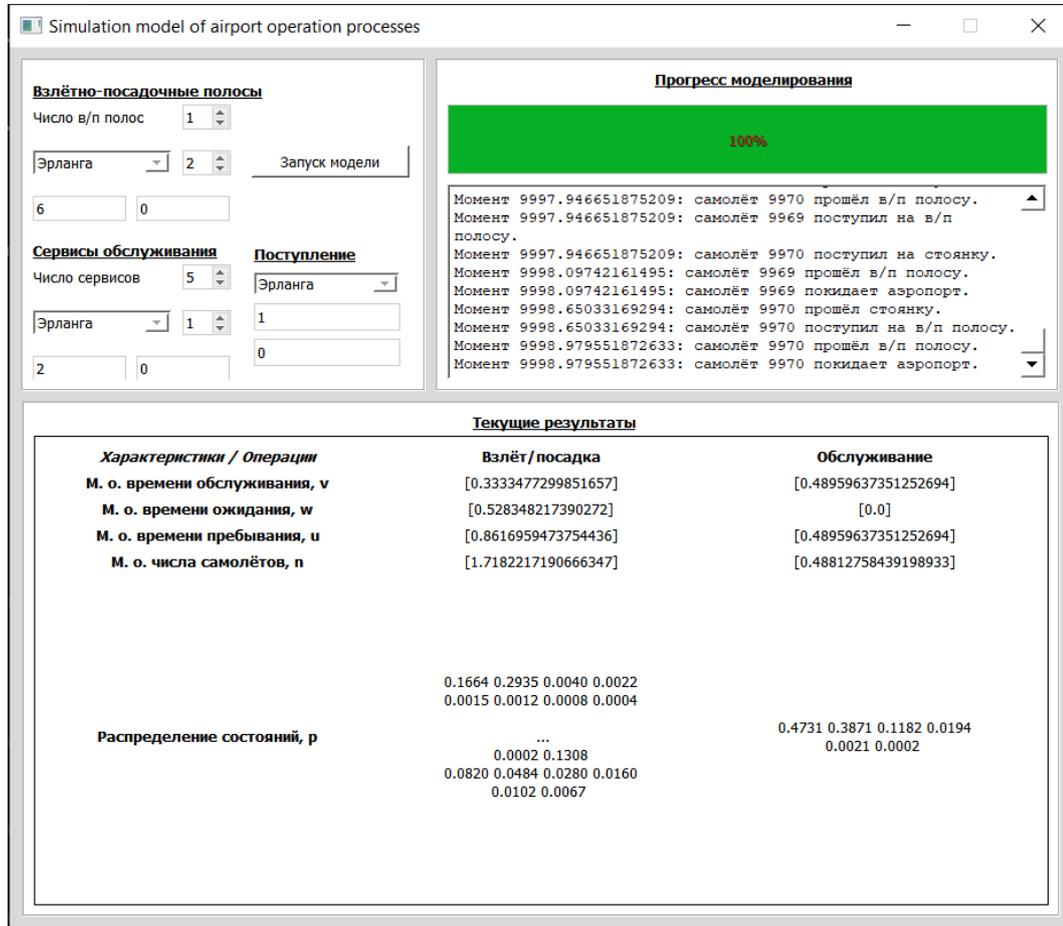


Рисунок 3 – Результаты эксперимента 1

2. Параметры генерации требований следующие: длительности интервалов между поступающими требованиями являются фиксированной величиной, интенсивность поступления $\lambda_0 = 2$, среднее квадратическое отклонение $\sigma_0 = 0$.

Параметры для систем сети определены соответствующим образом для каждой из систем:

- а) Длительности обслуживания имеют распределение Эрланга порядка k , $k = 10$, число обслуживающих приборов $\kappa = 1$, интенсивность обслуживания $\mu = 3$, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 0$.
- б) Длительности обслуживания имеют нормальное распределение, чис-

ло обслуживающих приборов $\kappa = 3$, интенсивность обслуживания каждого прибора $\mu = 4$, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 0.5$.

Результаты моделирования приведены на рисунке 4.

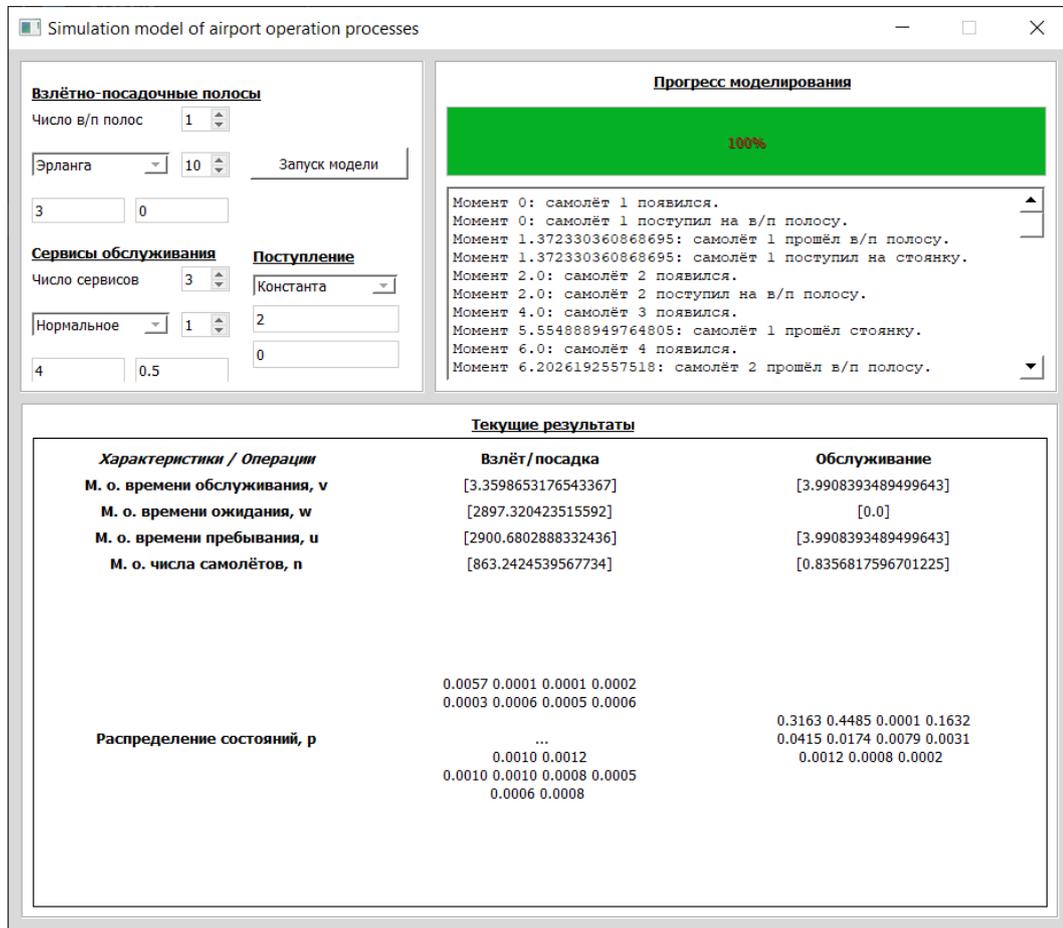


Рисунок 4 – Результаты эксперимента 2

3. Параметры генерации требований следующие: длительности интервалов между поступающими требованиями имеют экспоненциальное распределение, интенсивность поступления $\lambda_0 = 2$, среднее квадратическое отклонение $\sigma_0 = 0$.

Параметры для систем сети определены соответствующим образом для каждой из систем:

- Длительности обслуживания имеют стандартное нормальное распределение, число обслуживающих приборов $\kappa = 1$, интенсивность обслуживания $\mu = 0$, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 1$.
- Длительности обслуживания имеют экспоненциальное распределение ($k = 1$), число обслуживающих приборов $\kappa = 5$, интенсивность

обслуживания каждого прибора $\mu = 2$, среднее квадратическое отклонение $\sigma = 0$.

Результаты моделирования приведены на рисунке 5.

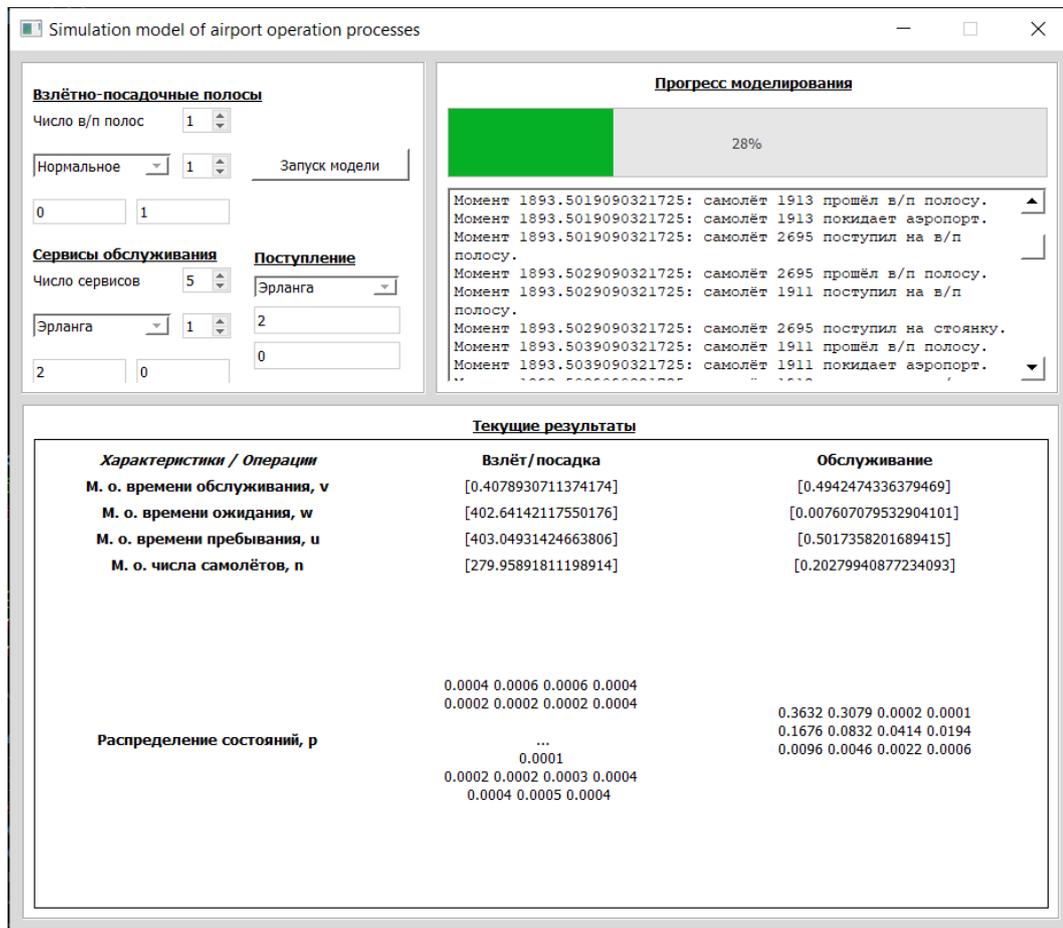


Рисунок 5 – Результаты эксперимента 3

На основе данных экспериментов делается вывод о том, что разработанная модель применима для анализа сетей массового обслуживания общего вида определённой топологии с варьируемыми параметрами: законами распределения длительностей обслуживания и интервалов между поступлением требований в сеть, интенсивностями обслуживания и поступления, средними квадратическим отклонением и количеством обслуживающих приборов в системах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной бакалаврской работе была рассмотрена реальная система — аэропорт — с точки зрения парадигмы теории массового обслуживания.

Была предложена имитационная модель, описывающая процессы функционирования аэропорта.

Модель была построена на основе аналитической модели данной системы, представляющей собой открытую однородную сеть систем массового обслуживания общего вида.

Был описан алгоритм для построения модели, приведена его реализация и подробное описание. Реализация была осуществлена при помощи средств языка программирования Python. Для данной программы был также разработан графический интерфейс пользователя при помощи библиотеки PyQt5 и среды Qt Designer.

Программа позволяет исследователю варьировать параметры исследуемой сети и получать результаты симуляции. Таким образом, с её помощью имеется возможность проводить расчёты необходимых характеристик функционирования аэропорта в определённых исследователем конфигурациях этой системы.

Основные источники информации:

1. Mason, F. Transient behaviour in some queueing systems related to an emergency service. / F. Mason, T. Bassetto. — 2004. — 10 с.
2. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем — искусство и наука. / Р. Шеннон. - М.: Издательство «Мир», 1978. — 210 с.
3. Кельтон В. Имитационное моделирование. / В. Кельтон, А. Лоу. - СПб.: Питер: Киев: Издательская группа BHV, 2004. — 847 с.
4. Simaiakis, I. Analysis, modeling and control of the airport departure process. / I. Simaiakis, adv. H. Balakrishnan. — PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Aeronautics and Astronautics, 2013. — 313 p.
5. Jacquillat, A Endogenous control of service rates in stochastic and dynamic queueing models of airport congestion. / A. Jacquillat, A. R. Odoni. // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2015. — Т. 73. — с. 133-151.
6. Bertsimas D. Models and Algorithms for Transient Queuing Congestion at Airports. / D. Bertsimas, M. D. Peterson, A. R. Odoni. // Management Science. — 1992. — Т. 41, № 8. — с. 1279 – 1295.
7. Jawab, F. Queuing model for improving airport passengers treatment process. / F. Jawab, M. Khachani, K. Akoudad, I. Moufad, Y. Frichi, N. Laaraj, K. Zehmed. // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. — 2018. — 13 с.

8. Marianov, V. Location Models for Airline Hubs Behaving as M/D/c Queues. / V. Marianov, D. Serra. // Computers Operations Research. — 2003. — T. 30, № 7. — с. 983 - 1003.
9. Kelly, F. Stochastic Networks. / F. Kelly, E Yudovina. — Cambridge University Press, 2014. — 222 p.
10. Adeke, P. T. Modelling of queuing process at airport check-in system: a case study of Manchester and Leeds-Bradford airports. / P. T. Adeke. // Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH). — 2018. — T. 37, № 1. — с. 35 – 43.
11. Tripathi, S. Time-Dependent Analysis Of Queueing Systems. / S. K. Tripathi, A. Duda. // INFOR: Information Systems and Operational Research. — 1986 — T. 24, № 3. — с. 199-220.