

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ УПАКОВОЧНОЙ ЛИНИИ

Ю.В. Цымай¹, М.В. Кардакова², Э.Г. Железнов³, С.В. Колесниченко⁴

ФГБОУ ВО СПбГМТУ, Россия, Санкт-Петербург, ¹m-walua@yandex.ru

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова», Россия, Санкт-Петербург,

²m.v.kardakova@ya.ru, ³eduardz76@mail.ru, ⁴serjkop@yandex.com

Аннотация. Описаны принцип работы виртуального стенда для анализа систем массового обслуживания и вариативные эксперименты, позволяющие изучить и оценить работу системы на примере автоматизированного упаковочного конвейера. Результаты исследования используются в учебном процессе. Тренажер реализован в консольном исполнении с дальнейшей модификацией в полноценную интерфейсную обучающую программу.

Ключевые слова: имитационная модель, дискретно-событийное моделирование, система массового обслуживания, коэффициент загрузки, очередь, выходной поток.

VIRTUAL LABORATORY STAND FOR STUDYING THE DYNAMICS OF QUEUING SYSTEM USING THE EXAMPLE OF PACKAGING LINE

Yu.V. Tsymai¹, M.V. Kardakova², E.G. Zheleznov³, S.V. Kolesnichenko⁴

Saint Petersburg State Maritime Technical University, Russia, Saint Petersburg, ¹m-walua@yandex.ru

²m.v.kardakova@ya.ru, ³eduardz76@mail.ru, ⁴serjkop@yandex.com

Abstract. The principle of operation of a virtual stand for analyzing the parameters of queuing systems and variable experiments are described, allowing us to study and evaluate the operation of the system using the example of an automated packaging conveyor. The research results are used in the educational process. The simulator is implemented in a console version with further modification into a full-fledged interface training program.

Keywords: Simulation model, discrete event modelling, queuing system, load factor, queue, output stream.

Для цитирования: Цымай Ю.В., Кардакова М.В., Железнов Э.Г., Колесниченко С.В. Виртуальный лабораторный стенд для изучения динамики системы массового обслуживания на примере упаковочной линии // Математические методы в технологиях и технике. 2025. № 11. С. 25-30.

Введение. В современных образовательных процессах при изучении методов имитационного моделирования необходима наглядность работы автоматизированных систем с множественными параметрами для оценки производительности систем. Одним из распространённых способов повышения эффективности производственных линий является использование систем массового обслуживания, которые позволяют эффективно управлять очередями и процессами, происходящими на конвейерах. Системы массового обслуживания применяются для оптимизации процессов, связанных с упаковкой продукции, обработкой, сортировкой и обеспечивают автоматизированное выполнение рутинных задач.

В качестве виртуального лабораторного стенда предлагается имитационная модель автоматизированной линии для упаковки мелких деталей, основанная на алгоритмах функционирования системы массового обслуживания. Упаковка мелких деталей требует точной синхронизации подачи материалов, высокой скорости и стабильности операций, минимизации простоев и отказов оборудования, гибкость для адаптации к изменениям объемов выпускаемой продукции. Модель используется для оценки и прогнозирования времени ожидания, загрузки упаковочных станций и общей производительности линии в зависимости от различных параметров и сценариев.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Анализ существующих методов и инструментов для имитационного моделирования конвейерных систем и их применение к специфике упаковочного процесса.

2. Разработка и настройка имитационной модели с учётом потоков материалов и параметров оборудования.

3. Проведение серии экспериментов на основе модели, для оценки времени выполнения операций, эффективности обслуживания и влияния различных параметров на общую производительность.

4. Анализ полученных данных и выработка рекомендаций для оптимизации работы упаковочной линии.

1. Методы и инструменты для имитационного моделирования. Для разработки и исследования имитационной модели упаковочной линии обычно используется дискретно-событийное моделирование, так как оно позволяет точно отслеживать события в конкретные моменты времени (например, подачу партии гвоздей или завершение упаковки) [2]. SimPy и AnyLogic представляют собой популярные инструменты для моделирования производственных процессов. При этом SimPy используется для моделирования событий в Python, что делает его удобным для исследований в академических целях, а AnyLogic позволяет осуществлять визуально ориентированное имитационное моделирование, что полезно при представлении модели в виде схем [3].

2. Постановка задачи и описание системы. Модель системы массового обслуживания разрабатывается для упаковочной линии, на которой за каждую минуту должно обрабатываться 1000 упаковок, при этом в каждой упаковке содержится 50 мелких деталей. Таким образом, упаковочная линия должна справляться с потоком в 50000 деталей в минуту. Основной задачей модели является определение оптимального количества конвейеров и оценка работы системы в течение 8-часовой смены (480 минут). Каждая партия деталей поступает на конвейер, где они группируются, упаковываются и направляются к следующему этапу.

Цель моделирования – обеспечить стабильную работу линии, способной обрабатывать 1000 упаковок (по 50 деталей в каждой) за минуту, что эквивалентно упаковке 50 000 деталей в минуту.

Ключевые параметры описания линии описаны ниже.

1. Скорость подачи деталей – требуется достижение целевого уровня подачи в 50000 деталей в минуту, чтобы выполнить задачу по упаковке.

2. Количество необходимых конвейеров – расчет оптимального числа конвейеров, необходимых для достижения производительности 1000 упаковок в минуту.

3. Продолжительность работы – расчет производительности системы за 8-часовую смену (480 минут), с учетом равномерной подачи материала.

Основные допущения и ограничения модели следующие.

1. Равномерная подача материала – предполагается, что детали поступают на конвейер с постоянной интенсивностью, соответствующей необходимому объему.

2. Постоянная скорость упаковки – каждая упаковочная станция работает с одинаковой средней скоростью.

3. Отсутствие простоев – исключаются поломки или задержки, чтобы сосредоточиться на пропускной способности.

Эти допущения позволяют оценить, сколько конвейеров потребуется для выполнения требуемого объема работы в рамках 8-часовой смены. На рисунке 1

представлена структурная схема автоматизированной упаковочной линии, лежащая в основе программной модели.



Рис. 1. Структурная схема автоматизированной упаковочной линии

Имитационная модель упаковочной линии состоит из следующих ключевых компонентов.

1. Конвейеры: каждый конвейер представляет собой отдельную линию, по которой детали поступают на упаковочные станции. Модель позволяет варьировать количество конвейеров и определяет их оптимальное число для обработки заданного потока.

2. Упаковочные станции: эти станции принимают детали с конвейеров, группируют их и направляют к выходу системы. Каждая упаковочная станция характеризуется средней скоростью упаковки, которая постоянная в базовой модели.

3. Очереди перед упаковочными станциями: при превышении входящего потока детали накапливаются в очереди. Очереди позволяют управлять интенсивностью загрузки и оценивать время ожидания, что важно для анализа пропускной способности системы.

3. Разработка алгоритма работы упаковочной линии.

1. Инициализация системы. В начале моделирования определяется количество конвейеров и упаковочных станций. Устанавливаются параметры интенсивности потока гвоздей и скорости упаковки.

2. Подача деталей на конвейер: детали поступают на конвейеры с постоянной интенсивностью, соответствующей требуемому объёму. Система распределяет поток равномерно по каждому конвейеру в зависимости от их числа.

3. Группировка и упаковка деталей: на каждом конвейере детали поступают на упаковочные станции, где они группируются. Упаковка осуществляется с заданной скоростью, что позволяет контролировать время обработки.

4. Очереди и обработка очередей: при перегрузке упаковочных станций детали попадают в очередь. Система моделирует накопление очереди и время ожидания, что позволяет оценить вероятность простоев и накопления запасов.

5. Завершение рабочего дня: модель анализирует работу системы в течение 8-часовой смены, фиксируя данные о количестве обработанных упаковок, времени ожидания в очередях и загрузке упаковочных станций.

4. Программная реализация модели. Для реализации имитационной модели системы массового обслуживания на языке Python с использованием библиотеки SimPy создан скрипт, который выполняет следующие функции:

1. Инициализация параметров:

- устанавливаются базовые параметры модели (количество конвейеров, количество упаковочных станций, размер одной упаковки, время симуляции, среднее время на одну упаковку, а также средний интервал между поступлением партий деталей);
- определяются счетчики для сбора статистики (общее количество упаковок, общее время ожидания и общее время загрузки упаковочных станций).

2. Описание процессов:

- поступление деталей (реализуется процесс подачи деталей, где время между поступлением партий моделируется с использованием экспоненциального распределения, поток заявок распределяется на упаковочные станции через конвейеры);
- работа конвейеров (каждый конвейер моделируется как ресурс, управляющий очередностью поступления партий на упаковочные станции, время ожидания перед началом упаковки записывается для дальнейшего анализа);
- упаковка деталей (каждая партия обрабатывается на упаковочной станции за фиксированное время, соответствующее скорости работы станции).

3. Сбор данных:

Во время симуляции фиксируются ключевые показатели (общее количество реализованных упаковок, среднее время ожидания партий перед упаковкой, коэффициент загрузки упаковочных станций, как отношение времени работы станций к общему времени симуляции).

4. Алгоритм работы модели:

- на каждом этапе симуляции партии поступают на конвейеры, ожидают своей очереди и затем направляются на упаковочные станции;
- в случае перегрузки конвейеров или упаковочных станций фиксируется накопление очереди, а также оценивается влияние перегрузок на среднее время ожидания.

5. Проведение симуляции:

- средний интервал между поступлением партий регулируется параметром `arrival_rate`, позволяя моделировать разные сценарии нагрузки;
- система запускается на полный 8-часовой рабочий цикл, что соответствует 480 минутам моделирования.

6. Результаты моделирования (рис. 2):

- общее количество упакованных пачек;
- среднее время ожидания в очереди перед упаковкой;
- коэффициент загрузки упаковочных станций.

Общее количество упакованных пачек: 47829

Среднее время ожидания: 0,0000 мин.

Коэффициент загрузки упаковочных станций, %: 99,64

Рис. 2. Пример вывода результатов моделирования

Предложенный виртуальный стенд позволяет оценить эффективность работы упаковочной линии при заданных параметрах и выявить возможные узкие места, такие как перегрузка конвейеров или упаковочных станций. На основе полученных данных можно в рамках учебного процесса провести эксперименты, изменяя ключевые параметры системы, например, количество конвейеров или интенсивность подачи гвоздей, чтобы определить оптимальные условия работы упаковочной линии. Каждый эксперимент может быть направлен на анализ влияния одного из ключевых параметров на производительность, время ожидания или загрузку системы.

Для оценки эффективности использованы следующие ключевые метрики (рис. 3):

- производительность системы – общее количество обработанных (упакованных) пачек за смену;
- среднее время ожидания в очереди – длительность времени, которое партии проводят в очереди перед обслуживанием;
- коэффициент загрузки упаковочных станций – степень загруженности оборудования, выраженная как отношение времени его работы к общему времени моделирования;
- устойчивость системы – способность системы поддерживать стабильную работу при увеличении нагрузки без резкого роста времени ожидания и потери производительности.

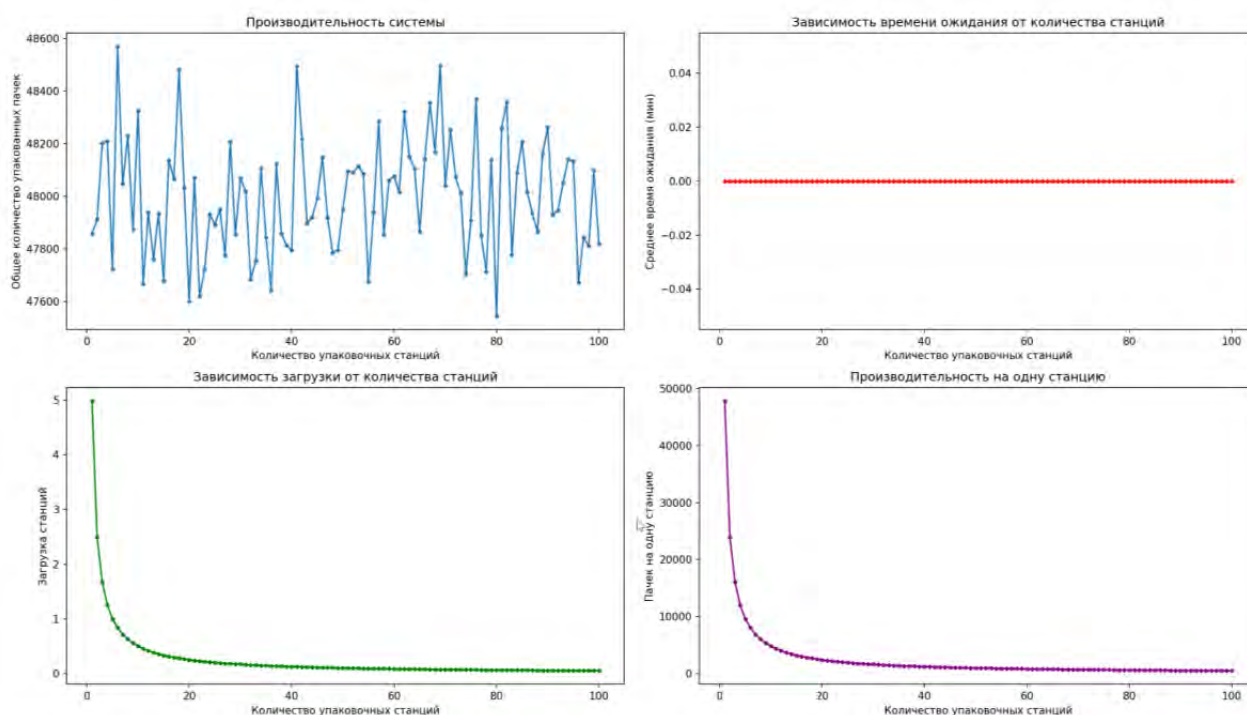


Рис. 3. Результаты экспериментов

График "Производительность системы" показывает, что увеличение количества упаковочных станций минимально влияет на производительность после достижения определенного уровня. График "Зависимость времени ожидания от количества станций" подтверждает нулевое среднее время ожидания, что свидетельствует о высокой эффективности системы. График "Зависимость загрузки от количества станций" демонстрирует экспоненциальное снижение загрузки оборудования при увеличении числа станций. График "Производительность на одну станцию" указывает, что производительность на одну станцию значительно уменьшается при увеличении их количества, что подтверждает перераспределение нагрузки.

Заключение. В рамках выполненного исследования создан виртуальный учебный тренажер для анализа систем массового обслуживания на примере автоматизированной упаковочной линии. Проведён ряд экспериментов для анализа влияния различных параметров на производительность системы, что позволит в дальнейшем сформировать ряд типовых лабораторных работ по дисциплинам, связанным с имитационным моделированием. В настоящее время осуществляются работы по созданию пользовательского интерфейса и адаптация программного продукта к различным операционным системам.

Библиографический список

1. Цымай Ю.В., Кардакова М.В., Железнов Э.Г., Комиссаров П.В. Разработка имитационной модели многокомпонентной технической системы с определенными параметрами // Региональная информатика и информационная безопасность. Сборник трудов. СПб: СПОИСУ, 2021. Вып. 10. С. 210-214 .
2. Цымай Ю.В., Железнов Э.Г., Комиссаров П.В. Исследование эргатических систем управления // Современные наукоемкие технологии. М: Изд-во ООО ИД «Академия Естествознания». 2021. № 4. С. 37-41.
3. Абрамова И.Г. Имитационное моделирование организации производственных процессов машиностроительных предприятий в инструментальной среде Tecnomatix Plant Simulation. Самара: Самарский университет, 2013. 120 с.
4. Долгова Е.В., Никитаева А.А. Имитационное моделирование бизнес-процессов промышленных компаний в условиях Индустрии 4.0 // Экономика и управление. 2023. Т. 29. № 4. С. 45-53.
5. Tsymai Yu.V. et all. Modeling the operating range of the fire safety system response parameters on board // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). 2020, pp. 434-437.