

УДК: 330.47

Разработка гибридной имитационной модели сборочного цеха

Д. А. Сковцова^а, Е. Л. Чувильгин^б, А. В. Смирнов^с, Н. О. Романов^д

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный
исследовательский университет),
Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5

E-mail: ^а skvortsova_da@bmstu.ru, ^б chuvilgin.niku@yandex.ru, ^с smiandrei5@gmail.com,
^д nicracer@yandex.ru

Получено 30.01.2023, после доработки — 18.04.2023.

Принято к публикации 10.07.2023.

В представленной работе разработана гибридная имитационная модель сборочного цеха в среде AnyLogic, которая позволяет подбирать оптимальные параметры производственной системы. Для построения гибридной модели использовались подходы, объединяющие дискретно-событийное моделирование и агентное в единую модель с интегрирующим взаимодействием. В рамках данной работы описан механизм функционирования сложной производственной системы, состоящей из нескольких участников-агентов. Каждому агенту соответствует класс, в котором задается определенный набор параметров агента. В имитационной модели были учтены три основные группы операции, выполняющиеся последовательно, определена логика работы с забракованными комплектами. Процесс сборки изделия представляет собой процесс, протекающий в многофазной разомкнутой системе массового обслуживания с ожиданием. Также есть признаки замкнутой системы — потоки брака для повторной обработки. При создании распределительной системы в сегменте окончательного контроля используются законы выполнения заявок в очереди типа FIFO. Для функциональной оценки производственной системы в имитационной модели включены несколько функциональных переменных, описывающих количество готовых изделий, среднее время подготовки изделий, количество и доля брака, результат моделирования для проведения исследований, а также функциональные переменные, в которых будут отображаться расчетные коэффициенты использования. Были проведены серии экспериментов по моделированию с целью изучения влияния поведения агентов системы на общие показатели эффективности производственной системы. В ходе эксперимента было установлено, что на показатель среднего времени подготовки изделия основное влияние оказывают такие параметры, как средняя скорость подачи комплекта заготовки, среднее время выполнения операций. На заданном промежутке ограничений удалось подобрать оптимальный набор параметров, при котором удалось достичь наиболее эффективной работы сборочной линии. Данный эксперимент подтверждает основной принцип агентного моделирования: децентрализованные агенты вносят личный вклад и оказывают влияние на работу всей моделируемой системы в целом. В результате проведенных экспериментов, благодаря подбору оптимального набора параметров, удалось улучшить основные показатели функционирования сборочного цеха, а именно: увеличить показатель производительности на 60 %; снизить показатель средней продолжительности сборки изделия на 38 %.

Ключевые слова: гибридная имитационная модель, методы имитационного моделирования, дискретно-событийное моделирование, агентное моделирование, параметры производственной системы, системы массового обслуживания

UDC: 330.47

Development of a hybrid simulation model of the assembly shop

D. A. Skvortsova^a, E. L. Chuvilgin^b, A. V. Smirnov^c, N. O. Romanov^d

Bauman Moscow State Technical University (National Research University),
5 2nd Bauman st., Moscow, 105005, Russia

E-mail: ^a skvortsova_da@bmstu.ru, ^b chuvilgin.niku@yandex.ru, ^c smiandrei5@gmail.com,
^d nicracer@yandex.ru

*Received 30.01.2023, after completion — 18.04.2023.
Accepted for publication 10.07.2023.*

In the presented work, a hybrid optimal simulation model of an assembly shop in the AnyLogic environment has been developed, which allows you to select the parameters of production systems. To build a hybrid model of the investigative approach, discrete-event modeling and aggressive modeling are combined into a single model with an integrating interaction. Within the framework of this work, a mechanism for the development of a production system consisting of several participants-agents is described. An obvious agent corresponds to a class in which a set of agent parameters is specified. In the simulation model, three main groups of operations performed sequentially were taken into account, and the logic for working with rejected sets was determined. The product assembly process is a process that occurs in a multi-phase open-loop system of redundant service with waiting. There are also signs of a closed system — scrap flows for reprocessing. When creating a distribution system in the segment, it is mandatory to use control over the execution of requests in a FIFO queue. For the functional assessment of the production system, the simulation model includes several functional functions that describe the number of finished products, the average time of preparation of products, the number and percentage of rejects, the simulation result for the study, as well as functional variables in which the calculated utilization factors will be used. A series of modeling experiments were carried out in order to study the behavior of the agents of the system in terms of the overall performance indicators of the production system. During the experiment, it was found that the indicator of the average preparation time of the product is greatly influenced by such parameters as: the average speed of the set of products, the average time to complete operations. At a given limitation interval, we managed to select a set of parameters that managed to achieve the largest possible operation of the assembly line. This experiment implements the basic principle of agent-based modeling — decentralized agents make a personal contribution and affect the operation of the entire simulated system as a whole. As a result of the experiments, thanks to the selection of a large set of parameters, it was possible to achieve high performance indicators of the assembly shop, namely: to increase the productivity indicator by 60 %; reduce the average assembly time of products by 38 %.

Keywords: simulation modeling, simulation modeling methods, discrete-event modeling, agent-based modeling, production system parameters, queuing systems

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2023, vol. 15, no. 5, pp. 1359–1379 (Russian).

1. Введение

В настоящее время имитационное моделирование широко используется практически во всех прикладных и научных областях. В логистике имитационное моделирование является важным инструментом при решении многих задач, начиная с поставки комплектующих на производство, заканчивая расчетом и организацией интегрированной логистической поддержки готового изделия [Kim, Feng, Smith, 2021]. Методология имитационного моделирования наиболее часто используется в проектировании производственных мощностей, а также для расчета параметров технического обслуживания [Hilletofth, Aslam, Hilmola, 2010].

Гибридное моделирование — это подход к моделированию, основанный на объединении системной динамики (System Dynamics, SD), дискретно-событийного моделирования (Discrete-Event Simulation, DES) и/или агентного моделирования (Agent-Based Simulation, ABS) в единую модель. Преимуществом использования гибридного моделирования является возможность использовать различные сочетания методов моделирования для решения задач сравнения результатов, обогащения для улучшения одного метода за счет использования элементов другого и интеграции, которая позволит использовать элементы каждого метода для достижения нового результата. В настоящее время основными областями применения являются здравоохранение [Elbattah, Molloy, 2018], управление цепочками поставок и производством [Feldkamp, Bergmann, Strassburger, 2018].

Основными особенностями дискретно-событийных моделей являются синхронизация событий по времени, сбор и обработка статистических данных, использование генератора случайных чисел для создания событий. Системно-динамическая модель состоит из набора абстрактных элементов: уровни значений для перехода в определенное состояние, скорость этих изменений, функции зависимости скорости и уровней и другие вспомогательные переменные. Поведение децентрализованных элементов системы изучается с помощью агентного моделирования. При этом задаются поведение каждого агента и условия взаимодействия.

На сегодняшний день различают пять видов взаимодействия между методами моделирования, включающими агентное моделирование, дискретно-событийное моделирование и системную динамику [Morgan, Howick, Belton, 2017]:

- 1) параллельное, при котором разрабатываются две или более независимые модели для сравнения результатов или для решения различных аспектов проблемы;
- 2) последовательное: разрабатываются две (или более) модели с использованием различных методов моделирования, при которых они включаются в работу последовательно, т. е. результат работы одной части модели является входными данными для следующей части модели;
- 3) обогащающее, при котором используется один доминирующий метод, дополненный другими (одним или несколькими) методами моделирования [Chahal, Eldabi, 2008];
- 4) взаимодействующее, когда нет доминирующего метода, каждый используемый метод одинаково важен, методы взаимодействуют друг с другом циклически;
- 5) интегрирующее: единая модель, в которой невозможно сказать, где заканчивается один метод и начинается другой.

Также существует и множество других возможных архитектур в дополнение к набору отдельных инкапсулированных моделей, которые сочетают в себе использование DES, SD, ABS и передают информацию между собой.

В области производства и логистики процессы обычно моделируются с помощью DES, а вопросы планирования — с использованием SD [Venkateswaran, Son, Jones, 2004; Rabelo et al., 2005; Chen et al., 2019]. Модели типа ABS применяются, как правило, когда нужно учитывать когнитивные или эмоциональные факторы при принятии решений.

Одной из особенностей в моделировании является то, что лишь небольшая часть разработанных и опубликованных моделей фактически используется для обоснования решений на практике. Большинство разработок ограничивается исследованиями и экспериментами. Однако научный интерес к имитационному моделированию, и к гибриднему в частности, в некоторых отраслях приводит со временем и к интересу организаций (например, здравоохранение, где для организации процессов необходимо совмещать особенности социального поведения с использованием ABS и дискретные события и/или системную динамику).

В отечественной научной литературе построение агентных имитационных моделей упоминается как средство для оценки и управления рисками [Дорогин, Песиков, Заикин, 2013]. Также можно встретить применение агентного моделирования для описания поведения агентов при управлении материальными потоками в многоассортиментном производстве [Ивашкин, 2017a]. Стоит отметить, что применение гибридных имитационных моделей ограничивается сферой логистики, оценки экологического состояния объекта и анализа сложных технических систем с точки зрения управления [Дерябин, Мисинева, 2022; Красникова, 2019; Босиков, 2022].

Целью настоящей работы является разработка гибридной имитационной модели работы линии цеха по сборке изделий электротехники в среде объектно ориентированного моделирования AnyLogic, которая будет сочетать в себе элементы дискретно-событийного моделирования и агентного. В рамках данной работы будет описан механизм функционирования сложной производственной системы, состоящей из нескольких участников-агентов. Каждому агенту соответствует класс, в котором задается определенный набор параметров агента. Таким образом, после проведения ряда экспериментов будут подобраны оптимальные параметры производственной системы.

2. Постановка задачи моделирования

Процесс сборки каждого комплекта начинается через случайное время T_i . Выполнению операций предшествует подготовка. Длительность подготовки зависит от качества комплектов, переданных на сборочный участок. Всего различных видов заготовок сборочных единиц — n_1 . Время подготовки подчинено экспоненциальному закону распределения случайных величин. Частота появления различных заготовок комплектов и средние значения времени их подготовки заданы дискретным распределением в таблице 1.

Таблица 1. Дискретное распределение случайных величин значений частоты появления заготовок комплектов и среднего времени подготовки

Наименования параметра	Значения параметров					
Частота появления заготовок	0,05	0,13	0,16	0,22	0,29	0,15
Среднее время подготовки	20	24	31	32	38	35

Для сборки изделия последовательно выполняются n операций со средними временами $T_1, T_2, \dots, T_n$ соответственно. После каждой операции в течение времени $T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{kn}$ следует контроль. Контроль не проходят $q_1, q_2, \dots, q_n$ комплектов соответственно. В рамках разработки имитационной модели были выбраны три основных сборочных операции:

- копирование имиджей,
- настройка комплектов,
- сборка в корпус.

Забракованные сборочные комплекты поступают на пункт окончательного контроля и проходят на нем проверку в течение времени, распределенного по экспоненциальному закону со средним значением T_k . В результате из общего количества не прошедших контроль комплектов q_{n+1} % идут в брак, а оставшиеся $(1 - q_{n+1})$ % комплектов подлежат повторному выполнению операций, после которых они не прошли контроль. Если комплект во второй раз не проходит контроль, он окончательно бракуется.

По итогам разработки модели проводится эксперимент, по результатам которого будет определен набор основных параметров, влияющих на эффективность сборочной линии.

Исходные данные для моделирования процесса работы сборочного цеха по производству изделий электротехники представлены в таблице 2.

Таблица 2. Исходные данные задачи моделирования процесса работы сборочного цеха

$n_1 = 6$	Exponential(T_n) = Exponential(30)	$q_1 = 12\%$	$q_2 = 15$
$n_2 = 3$	Exponential(T_1) = Exponential(30)	$q_3 = 10\%$	$q_4 = 80$
Exponential(T_2) = Exponential(25)		Exponential(T_1) = Exponential(35)	
Exponential(T_{k1}) = Exponential(4)		Exponential(T_{k2}) = Exponential(5)	
Exponential(T_{k3}) = Exponential(15)		Exponential(T_1) = Exponential(30)	

Процесс сборки изделия представляет собой процесс, протекающий в многофазной разомкнутой системе массового обслуживания с ожиданием. Также есть признаки замкнутой системы — потоки брака для повторной обработки. Схема процесса сборки изделия представлена на рис. 1.

Имитационная модель процесса сборки изделий будет включать следующие сегменты:

- 1) исходные данные,
- 2) подготовка заготовки,
- 3) копирование имиджей,
- 4) настройка комплектов,
- 5) сборка в корпус,
- 6) пункт окончательного контроля,
- 7) склад готовых деталей,
- 8) склад бракованных деталей,
- 9) результаты моделирования.

Для моделирования производственных процессов сборки высокотехнологичной продукции был выбран экспоненциальный закон распределения случайной величины. Выбор обусловлен характеристической особенностью моделирования. При моделировании процессов сборки важную роль играют интервалы времени между поступлениями заявок, поэтому предпочтительно использование экспоненциального закона распределения. При использовании данного закона распределения случайных величин малые значения случайной величины обладают большей вероятностью наступления, что позволяет смоделировать ситуации поступления нескольких заявок одновременно. Плотность вероятности экспоненциального распределения $f(x)$ принимает вид кривой, уменьшающейся по экспоненте.

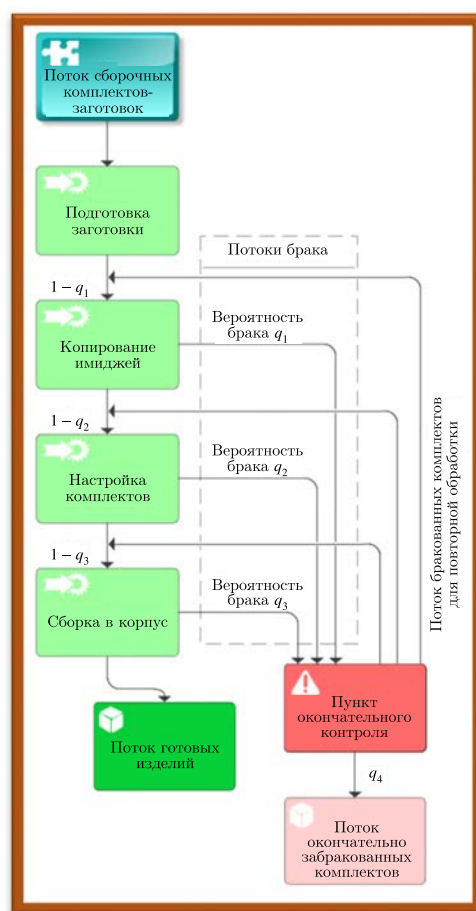


Рис. 1. Схема процесса сборки изделия

Параметр λ задает скорость убывания функции, т. е. чем большее значение принимает данный параметр, тем меньше вероятность наступления большого значения случайной величины x , что позволяет генерировать поток заявок. Формула плотности распределения экспоненциального закона, применяемого в среде AnyLogic, примет вид

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}.$$

При этом значение математического ожидания, задаваемое в параметрах имитационной модели, принимает вид

$$E(x) = \frac{1}{\lambda}.$$

1. Сегмент «Исходные данные» содержит информацию об исходных данных для построения модели. Параметры имитационной модели задаются типом `double`, который представляет собой числа двойной точности с плавающей запятой. Элементы и свойства сегмента «исходные данные» представлены в таблице 3.

2. Сегмент «Подготовка заготовки» предназначен для имитации поступления заготовки комплекта, ожидания в очереди, имитации непосредственно подготовки заготовки и отправки на выполнение первой операции.

3. Сегменты «Копирование имиджей», «Настройка комплектов» и «Сборка в корпус» предназначены для имитации выполнения соответствующей операции, включающей следующие основные этапы:

Таблица 3. Элементы и свойства сегмента «Исходные данные»

Элементы и их свойства					
Параметр			Параметр		
Имя	Тип	Значение по умолчанию	Имя	Тип	Значение по умолчанию
T_n	double	50	T_{k1}	double	4
T_1	double	40	T_{k2}	double	5
T_2	double	35	T_{k3}	double	15
T_3	double	40	T_k	double	8
q_1	double	0,15	врМод	double	480
q_2	double	0,20	колПрог	double	16 641
q_3	double	0,12			
q_4	double	0,80			

- ожидание в очереди,
- непосредственно выполнение операции,
- контроль качества,
- отправка на пункт окончательного контроля в случае брака,
- прием на повторное выполнение операции и контроль.

На этапе копирования имиджей осуществляется групповое копирование программного обеспечения. Элементы и свойства сегмента «Копирование имиджей» представлены в таблице 4.

Таблица 4. Элементы и свойства сегмента «Копирование имиджей»

Объект	Свойства	Значения
queue	Имя	очОп1
	Тип заявки	Detail
	Максимальная вместимость	Да
delay	Имя	выпОп1
	Тип заявки	Detail
	Тип	Определенное время
	Время задержки	$\text{exponential}\left(\frac{1}{T_1}\right)$
	Вместимость	1
queue1	Имя	очКонОп1
	Тип заявки	Detail
	Максимальная вместимость	Да
delay1	Имя	конОп11
	Тип заявки	Detail
	Тип	Определенное время
	Время задержки	$\text{exponential}\left(\frac{1}{T_{k1}}\right)$
	Вместимость	1
	Действия при выходе	entity.n=1;
selectOutput	Имя	конОп12
	Тип заявки	Detail
	Выход true выбирается	Заданной вероятностью
	Вероятность	$1 - q_1$

На этапе второй операции осуществляется настройка комплектов. Элементы и свойства сегмента «Настройка комплектов» представлены в таблице 5.

Таблица 5. Элементы и свойства сегмента «Настройка комплектов»

Объект	Свойства	Значения
queue	Имя	очОп2
	Тип заявки	Detail
	Максимальная вместимость	Да
delay	Имя	выпОп2
	Тип заявки	Detail
	Тип	Определенное время
	Время задержки	$\text{exponential}\left(\frac{1}{T_2}\right)$
	Вместимость	1
queue1	Имя	очКонОп2
	Тип заявки	Detail
	Максимальная вместимость	Установите флажок
delay1	Имя	конОп21
	Тип заявки	Detail
	Тип	Определенное время
	Время задержки	$\text{exponential}\left(\frac{1}{T_{k2}}\right)$
	Вместимость	1
	Действия при выходе	entity.n=2;
selectOutput	Имя	конОп22
	Тип заявки	Detail
	Выход true выбирается	Заданной вероятностью
	Вероятность	$1 - q_2$

На следующем этапе производится сборка в корпус. Элементы и свойства сегмента «Сборка в корпус» представлены в таблице 6.

В соответствии с логикой процесса сборки комплектов после выполнения каждой из трех операций в случае брака надо отправить забракованный комплект на пункт окончательного контроля. С последнего получить и отправить комплекты на повторное выполнение тех операций, после которых они были забракованы. Кроме того, собранные изделия необходимо передать на склад готовых изделий. Таким образом, для связи с активным объектом Main потребуются семь портов ($3 + 3 + 1 = 7$). Необходимо создать экземпляр нового типа агента Control.

На рис. 2 показана схема соединения портов модели в сегменте «Пункт окончательного контроля». Для определения движения заявок-комплектов и логики работы с браком в модели необходимо аналогичным образом соединить порты сегментов «Копирование имиджей», «Настройка комплектов», «Сборка в корпус».

В первой области просмотра (рис. 3) размещены объекты первых пяти сегментов, во второй — сегменты «Пункт окончательного контроля», «Склад готовых деталей» и «Склад бракованных деталей».

Распределительную систему в построении имитационной модели представим в виде многоканальной системы обслуживания. При создании распределительной системы в сегменте окончательного контроля используются законы выполнения заявок в очереди типа FIFO. Элементы и свойства сегмента «Пункт окончательного контроля» представлены в таблице 7.

Для функциональной оценки производственной системы в имитационной модели в сегмент «Склад готовых изделий» включены три функциональные переменные («готИзделия»,

Таблица 6. Элементы и свойства сегмента «Сборка в корпус»

Объект	Свойства	Значения
queue	Имя Тип заявки Максимальная вместимость	очОп3 Detail Да
delay	Имя Тип заявки Тип Время задержки Вместимость	выпОп3 Detail Определенное время $\text{exponential}\left(\frac{1}{T_3}\right)$ 1
queue1	Имя Тип заявки Максимальная вместимость	очКонОп3 Detail Да
delay1	Имя Тип заявки Тип Время задержки Вместимость Действия при выходе	конОп31 Detail Определенное время $\text{exponential}\left(\frac{1}{T_{k3}}\right)$ 1 entity.n=3;
selectOutput	Имя Тип заявки Выход true выбирается Вероятность	конОп32 Detail Заданной вероятностью $1 - q_3$

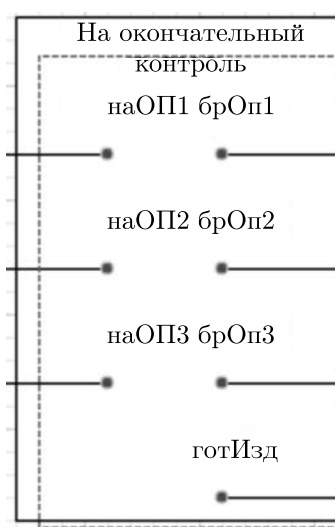


Рис. 2. Схема соединения портов модели в сегменте «Пункт окончательного контроля»

«срВрПодгИзд», «доляГотИзд»), а в сегмент «Склад бракованных комплектов» — две функциональные переменные («бражКомпл» и «доляБрКомпл»).

Также необходимо включить в модель сегмент с результатами моделирования для проведения исследований. В сегмент включены четыре функциональные переменные, в которых будут отображаться расчетные коэффициенты использования.

Время подготовки заготовки и время выполнения операций считаются в минутах. Принято, что одна единица моделирования равна 1 мин. Необходимо рассчитать количество прогонов,

Таблица 7. Элементы и свойства сегмента «Пункт окончательного контроля»

Объект	Свойства	Значения
selectOutput	Имя Тип заявки Выход true выбирается Условие	окКон1 Detail При выполнении условия $entity.a < 2$
queue	Имя Тип заявки Максимальная вместимость	очКон Detail Установите флажок
delay	Имя Тип заявки Тип Время задержки Вместимость	окКон2 Detail Определенное время $exponential\left(\frac{1}{main.T_k}\right)$ 1
selectOutput	Имя Тип заявки Выход true выбирается Вероятность Действия при выходе (true)	окКон3 Detail Заданной вероятностью $1 - main.q_4$ $entity.a = 2$
selectOutput5	Имя Тип заявки Использовать: Условие 1 Условие 2 Условие 3	распределитель Detail Условия $entity.n == 1$ $entity.n == 2$ $entity.n == 3$

которые нужно выполнить в каждом наблюдении. При этом примем относительное количество готовых изделий как ожидаемую вероятность. Для расчета необходимого количества прогонов можно воспользоваться теоремой Лапласа (частный случай центральной предельной теоремы), суть которой состоит в том, что при больших значениях числа реализаций N биномиальное распределение достаточно хорошо согласуется с нормальным распределением. Максимальное значение N принимает при вероятности $p = 0,5$. Поскольку она заранее не известна, то расчет необходимо провести для худшего случая:

$$N = t_a^2 \cdot \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2} \approx 16\,641.$$

Зафиксируем конечное время моделирования и добавим в модель. Имитационная модель, отражающая работу сборочного производства, представлена из двух рабочих областей — «Цех» и «Пункт окончательного контроля». Работа имитационной модели сборочного цеха представлена на рис. 2.

Таким образом, разработанная гибридная модель сборочного цеха соответствует комбинации дискретно-событийного моделирования и агентного, так как есть сочетание синхронизирующих изменений со сбором итоговой статистики о состоянии системы и разделение производственной системы на динамически взаимодействующих по определенным правилам агентов.

3. Результат моделирования

Необходимо провести серию экспериментов по моделированию с целью изучения влияния поведения агентов системы на общие показатели эффективности производственной системы.

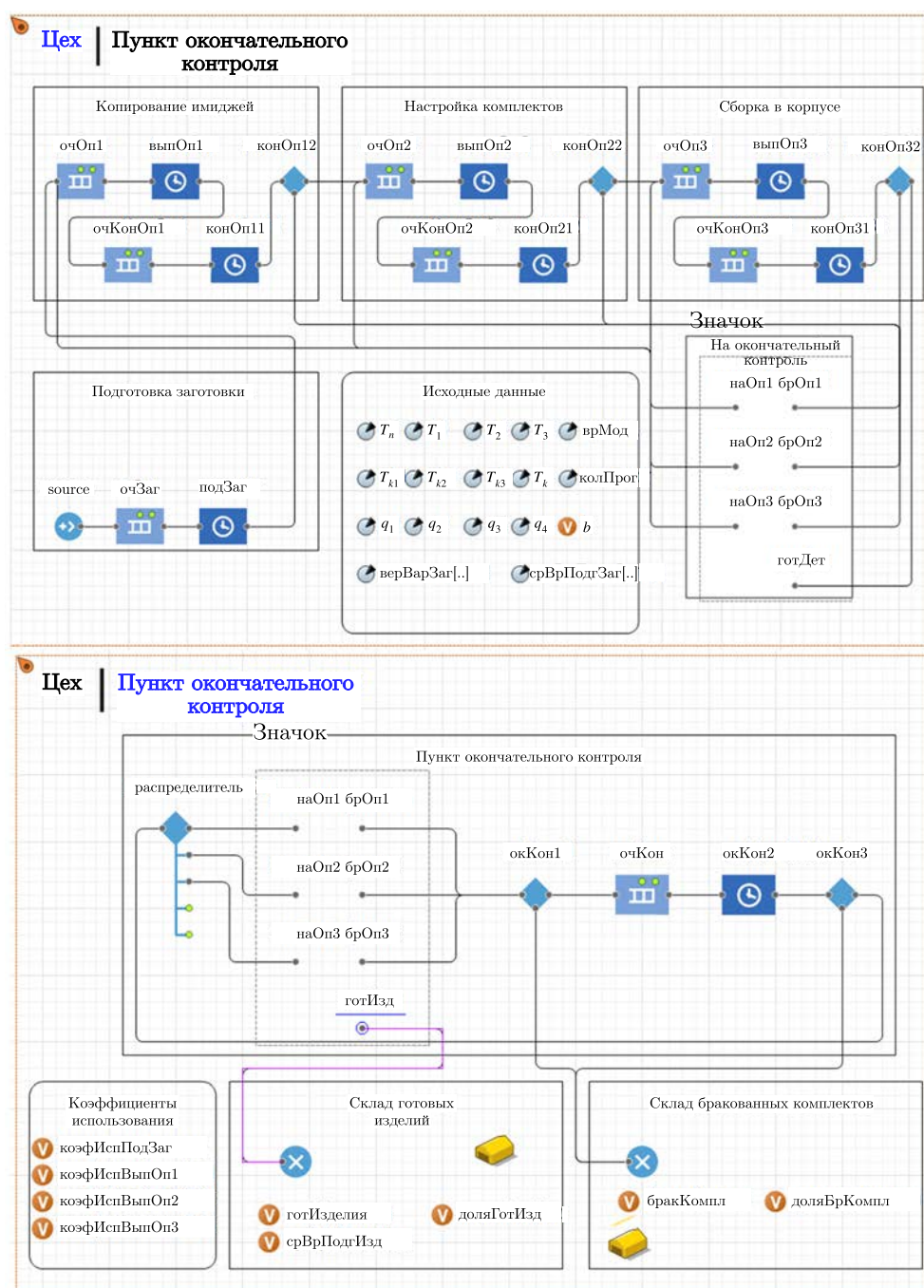


Рис. 3. Рабочая область имитационной модели сборочной системы

Основной целью данной серии экспериментов является выделение ключевых факторов, влияющих на эффективность производственной системы. В экспериментах 2–4 изменялись параметры длительности операций и времени поступления комплектов.

В рамках эксперимента были предложены следующие задачи для анализа:

- определить степень влияния изменения различных экспериментальных параметров на изменение ключевых показателей производительности сборочной линии;

- подобрать оптимальный набор параметров сборочной линии исходя из заданных ограничений.

Во встроенных библиотеках среды имитационного моделирования Anylogic существуют несколько методов совершенствования построенных моделей: среди основных выделяются эксперимент и оптимизация. В оптимизационных имитационных моделях необходимо наличие целевого параметра.

Для переменных параметров модели были заданы следующие ограничения.

1. Время подачи очередной заготовки для подготовки: $0,5 \cdot T_n < T_n < 1,7 \cdot T_n$.
2. Время выполнения групп операций 1: $0,5 \cdot T_1 < T_1 < 1,5 \cdot T_1$.
3. Время выполнения групп операций 2: $0,5 \cdot T_2 < T_2 < 1,5 \cdot T_2$.
4. Время выполнения групп операций 3: $0,5 \cdot T_3 < T_3 < 1,5 \cdot T_3$.
5. Вероятность брака после группы операции 1, 2, 3: $0,5 \cdot \{q_1 \dots q_n\} < \{q_1 \dots q_n\} < 1,4 \cdot \{q_1 \dots q_n\}$.
6. Набор различных средних времен подготовки заготовки в зависимости от типа: $0,7 \times \{T_{n1} \dots T_{nm}\} < \{T_{n1} \dots T_{nm}\} < 1,2 \cdot \{T_{n1} \dots T_{nm}\}$.

Основными критериями при проведении экспериментов являются снижение среднего времени цикла сборки одного изделия и повышение среднего количества готовых изделий за смену. Важными параметрами будут также являться процент забракованных деталей и вероятности возникновения очередей. Вероятности возникновения очередей указывают на возможные простои оборудования на группах операций или же, наоборот, на перегрузку операций. Критерии эффективности и ожидаемые цели от моделирования представлены в таблице 8.

Таблица 8. Выбранные критерии эффективности модели сборочной линии в рамках эксперимента

Критерий эффективности	Обозначение	Цель
Вероятность возникновения очереди на сборочной линии на этапе подготовки заготовки	коэфИспПодЗаг	Получить загрузку, близкую 1, но меньше 1
Вероятность возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций 1	коэфИспВыпОп1	Получить загрузку, близкую 1, но меньше 1
Вероятность возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций 2	коэфИспВыпОп2	Получить загрузку, близкую 1, но меньше 1
Вероятность возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций 3	коэфИспВыпОп3	Получить загрузку, близкую 1, но меньше 1
Среднее количество готовых изделий за смену	готИзделия	Получить наибольшее значение
Относительное значение количества готовых изделий от общего числа	доляГотИзд	Получить наибольшее значение
Среднее количество забракованных изделий за смену	бракКомпл	Получить наименьшее значение
Относительное значение количества забракованных изделий от общего числа	доляБрКомпл	Получить наименьшее значение
Среднее время цикла сборки одного изделия	срВрПодгИзд	Получить наименьшее значение

В рамках исследования необходимо провести серию из шести экспериментов: с переменным параметром времени подачи заготовки, с переменным параметром среднего времени выполнения группы операций 1, 2, 3, с переменным параметром значения вероятностей брака после

выполнения групп операций 1, 2, 3, с переменным параметром значения набора различных средних времен подготовки заготовки в зависимости от типа. Остальные значения параметров, таких как время контроля качества после группы операций 1, 2 и 3; время проверки забракованной заготовки на пункте окончательного контроля; вероятность брака после группы операций 1, 2 и 3; вероятность невозвращения изделия на конвейер после прохождения пункта окончательного контроля, не изменяются во времени (таблица 9).

Таблица 9. Значения параметров, неизменяемых в процессе экспериментов

Наименование параметров	Значения неизменяемых параметров в экспериментах
Время контроля качества после группы операций 1 (T_{k_1})	4
Время контроля качества после группы операций 2 (T_{k_2})	5
Время контроля качества после группы операций 3 (T_{k_3})	15
Время проверки забракованной заготовки на пункте окончательного контроля (T_k)	8
Вероятность брака после группы операций 1 (q_1)	0,12
Вероятность брака после группы операций 2 (q_2)	0,18
Вероятность брака после группы операций 3 (q_3)	0,15
Вероятность невозвращения изделия на конвейер после прохождения пункта окончательного контроля (q_4)	0,8

В качестве переменного параметра для первой серии экспериментов было выбрано время подачи заготовки. Для получения наглядной зависимости между средним временем сборки изделия и временем подачи заготовки было проведено моделирование с использованием десяти различных значений времени подачи заготовки T_n . Для второго, третьего и четвертого эксперимента переменными параметрами были время выполнения групп операций 1, 2, 3. Значения остальных параметров приведены в таблице 10.

Таблица 10. Значения изменяемых параметров для проведения экспериментов 1, 2, 3, 4

Наименование параметров	Значение параметров для экспериментов 1, 2, 3, 4			
	1	2	3	4
Время подачи очередной заготовки для подготовки (T_n)	60, 55, 50, 40, 35, 33, 32, 30, 25, 20	30	30	30
Время выполнения групп операций 1 (T_1)	30	45, 40, 35, 30, 28, 26, 25, 22, 20, 15	28	28
Время выполнения групп операций 2 (T_2)	30	30	45, 40, 35, 30, 28, 26, 25, 22, 20, 15	30
Время выполнения групп операций 3 (T_3)	35	35	35	45, 40, 35, 30, 28, 26, 25, 22, 20, 15

На рис. 4 представлены результаты моделирования зависимости времени сборки изделия и времени подачи заготовки. Очевидно, что сокращение времени подачи заготовки приводит

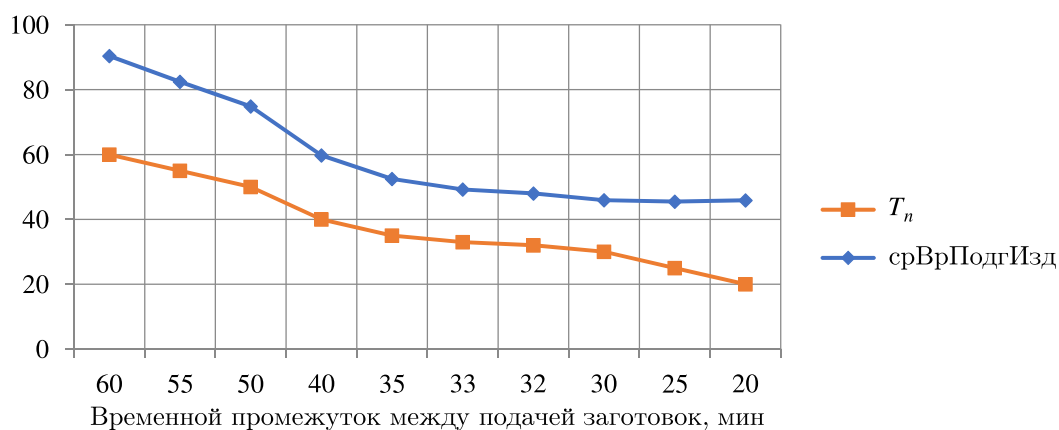


Рис. 4. Зависимость среднего времени сборки изделия от времени подачи заготовки

к уменьшению времени сборки изделия. Однако только при росте значений $\text{срВрПодгИзд} > 35$ наблюдается рост количества собранных изделий с 50 до 90 шт.

Из графика на рис. 5 видно, что пиковым полезным значением времени подачи заготовки является время $T_n = 30$ мин. Это подтверждает рис. 5 — график зависимости величины вероятности возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций 1.

Зависимость величины вероятности возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций 1

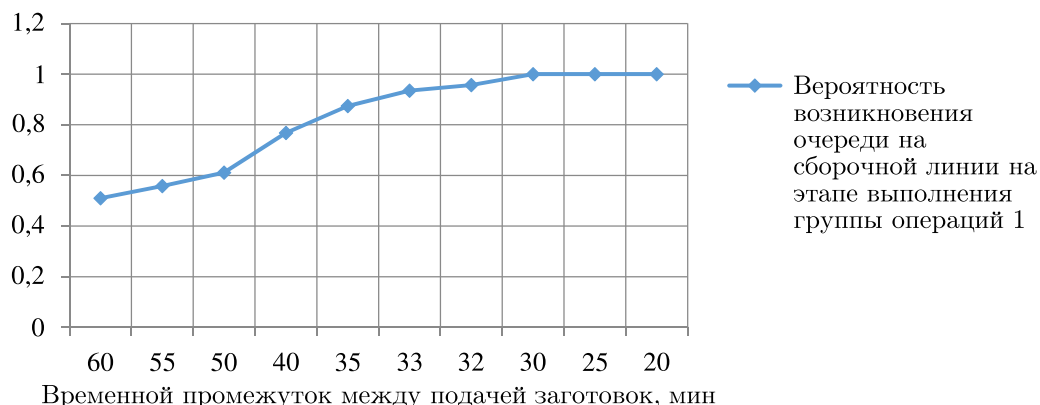


Рис. 5. График зависимости величины вероятности возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций 1

При значении $T_n = 30$ достигается пиковое значение загрузки на этапе выполнения группы операций 1 (коэффициент вероятности возникновения очереди стремится к 1). Это означает, что дальнейшее уменьшение параметра T_n не приведет к дальнейшему уменьшению времени сборки изделия, что подтверждается на рис. 4. Оптимальность выбранного значения также подтверждается графиком на рис. 6, отражающим зависимость величины вероятности возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций подготовки заготовки от времени подачи заготовки.

В ходе серии опытов 2–4 были исследованы зависимости между величинами времени выполнения групп операций 1–3 (T_1 , T_2 , T_3) и средним временем сборки изделия. В результате эксперимента были выбраны оптимальные параметры значений времен выполнения групп операций при заданных ограничениях.



Рис. 6. Зависимость величины вероятности возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций подготовки заготовки от времени подачи заготовки

В качестве переменного параметра для второй серии опытов было выбрано время выполнения групп операций 1 (T_1). Эксперимент показал, что оптимальным значением времени выполнения групп операций 1 является $T_1 = 28$. Из графика зависимости на рис. 7 видно, что T_1 продолжает влиять на изменение СрВрПодгИзд до $T_1 = 28$.

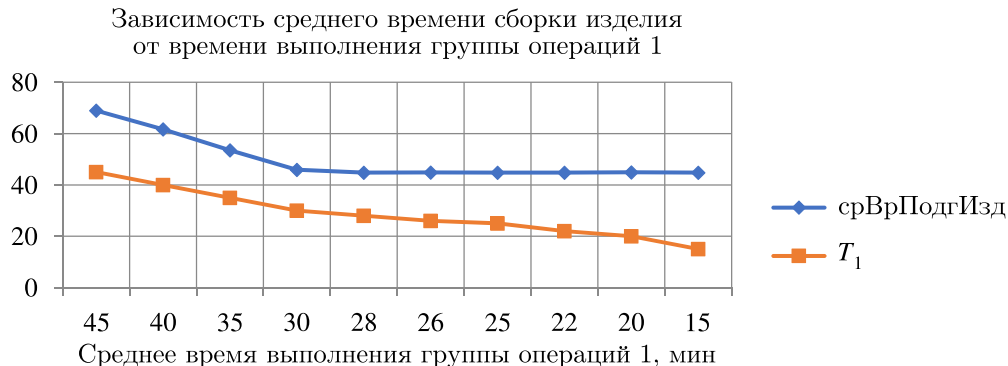


Рис. 7. Зависимость среднего времени сборки изделия от времени выполнения группы операций 1

При $T_1 = 28$ вероятность возникновения очереди на этапе выполнения первой группы операций уменьшается, а на этапе выполнения групп операций 2 обеспечивается высокая загрузка оборудования без простоев.

В качестве переменного параметра для третьей серии опытов было выбрано время выполнения групп операций 2 (T_2).

Эксперимент показал, что оптимальным значением времени выполнения групп операций 1 является $T_2 = 30$. Из графика зависимости на рис. 8 видно, что T_1 продолжает влиять на изменение СрВрПодгИзд до $T_2 = 30$.

В данном случае оптимальным является базовое значение T_2 . При $T_2 = 30$ вероятности возникновения очереди на этапе выполнения второй и третьей групп операций близки к 1, что означает возможность работы с низким уровнем простоя и эффективной загруженности.

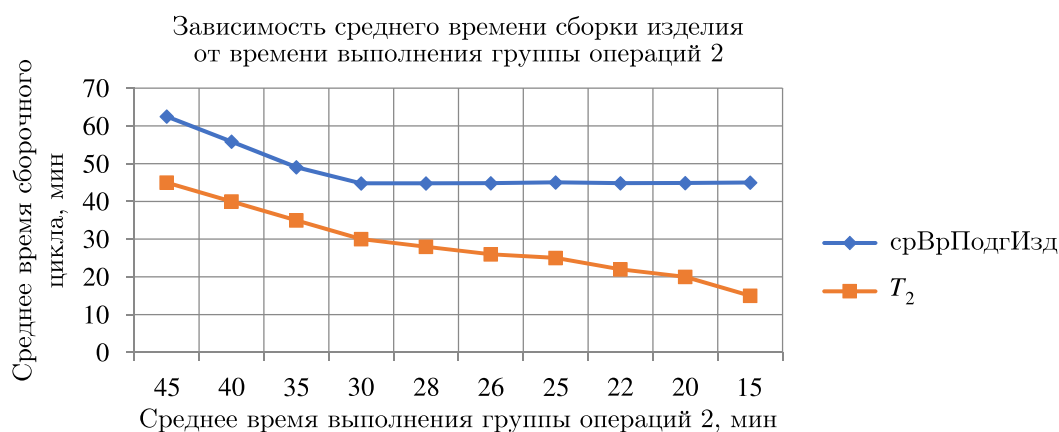


Рис. 8. Зависимость среднего времени сборки изделия от времени выполнения группы операций 2

В качестве переменного параметра для четвертой серии опытов было выбрано время выполнения групп операций 3 (T_3).

Эксперимент показал, что оптимальным значением времени выполнения групп операций 3 является $T_3 = 30$. Из графика зависимости на рис. 8 видно, что T_3 продолжает влиять на изменение СрВрПодгИзд до $T_3 = 35$. В данном случае оптимальным является базовое значение T_3 .

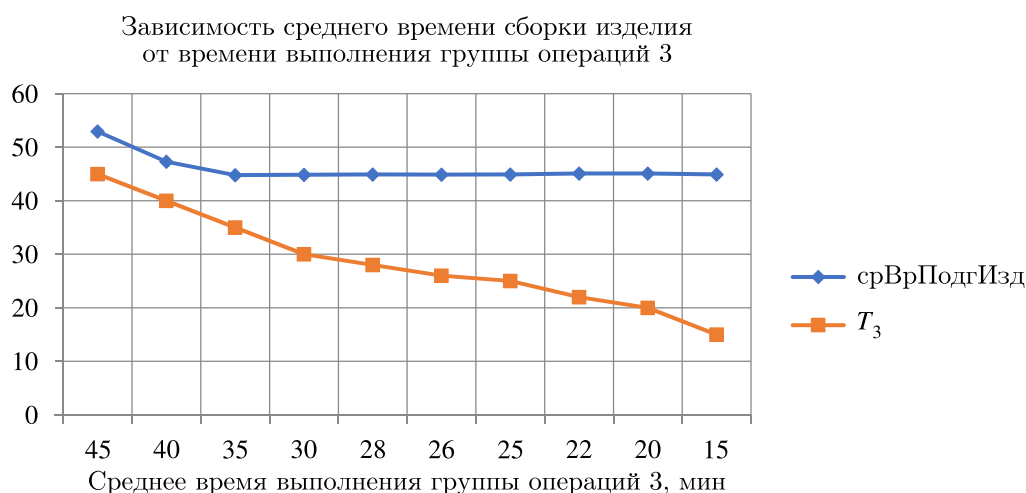


Рис. 9. Зависимость среднего времени сборки изделия от времени выполнения группы операций 3

При $T_3 = 35$ вероятность возникновения очереди на этапе выполнения второй и третьей групп операций близка к 1, что означает возможность малоперебойной работы и эффективной загрузки.

В качестве переменного параметра для пятой, шестой и седьмой серии опытов были выбраны значения вероятностей брака после выполнения групп операций 1, 2, 3 (таблица 11). В соответствии с условием предельные значения вероятности брака могут варьироваться в пределах 50 % от базовых значений.

Эксперимент показал, что значениями вероятностей брака, при которых достигается наименьшее значение СрВрПодгИзд, являются $q_1 = 6\%$, $q_2 = 9\%$, $q_3 = 7,5\%$. Эти значения на 50 % меньше базовых показателей. В ходе эксперимента доказана прямая зависимость между сокращением бракованных деталей и средним временем сборочного цикла одного изделия (рис. 10) на данном отрезке значений.

Таблица 11. Значения изменяемых параметров для проведения экспериментов 5, 6, 7

Наименование параметров	Значения параметров в экспериментах 5, 6, 7
Вероятность брака после группы операций 1 (q_1)	0,17, 0,16, 0,14, 0,13, 0,12, 0,11, 0,10, 0,08, 0,07, 0,06
Вероятность брака после группы операций 2 (q_2)	0,25, 0,23, 0,21, 0,20, 0,18, 0,16, 0,14, 0,13, 0,11, 0,09
Вероятность брака после группы операций 3 (q_3)	0,21, 0,20, 0,18, 0,17, 0,15, 0,14, 0,12, 0,11, 0,09, 0,08

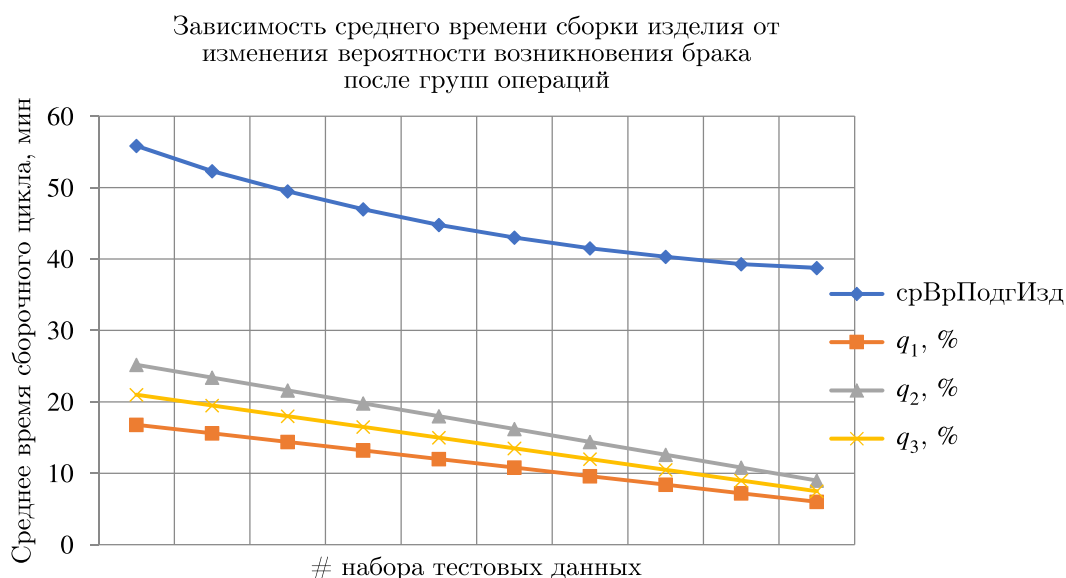


Рис. 10. Зависимость среднего времени сборки изделия от изменения вероятности возникновения брака после групп операций

На графике зависимости вероятности возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций 3 от изменения вероятности возникновения брака после групп операций 1, 2, 3 (рис. 11) видно, что при выбранных минимальных значениях вероятностей брака значение коэффициента возникновения очереди на этапе выполнения группы операций 3 стремится к 1, что означает снижение темпов роста эффективности производственного процесса из-за возможных очередей при последующем уменьшении значений вероятностей брака.

В качестве переменного параметра для шестой серии опытов был выбран набор различных средних времен подготовки заготовки в зависимости от типа. В соответствии с условием предельные значения средних времен подготовки заготовки в наборах могут варьироваться в пределах 30 % от базовых значений.

Эксперимент показал, что набором значений средних времен подготовки заготовки, при котором было достигнуто наименьшее значение среднего времени цикла сборки одного изделия (38,57), является набор {9,4; 13,16; 17,86; 24,44; 22,56; 20,68}. Значения в наборе на 6 % меньше значений в базовом наборе. Однако, исходя из графика зависимости среднего времени сборки изделия от времени выполнения подготовки заготовок в зависимости от их типов (рис. 12), нельзя утверждать о наличии зависимости между величинами при выбранных оптимальных значениях других величин, полученных в предыдущих экспериментах.

Полученное значение носит стохастический характер. Однако в рамках данного эксперимента оно является оптимальным.

В ходе эксперимента было установлено, что на показатель среднего времени подготовки изделия основное влияние оказывают такие параметры, как средняя скорость подачи комплекта заготовки, среднее время выполнения операций. На заданном промежутке ограничений удалось

Зависимость вероятности возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций 3 от изменения вероятности возникновения брака после групп операций 1, 2, 3

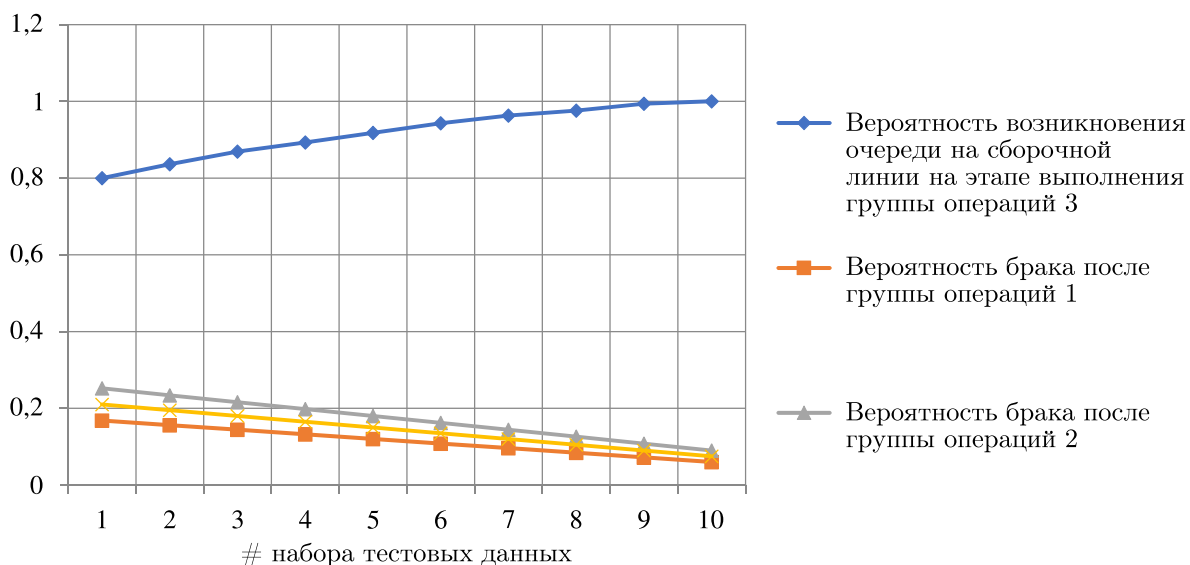


Рис. 11. Зависимость вероятности возникновения очереди на сборочной линии на этапе выполнения группы операций 3 от изменения вероятности возникновения брака после групп операций 1, 2, 3

Зависимость среднего времени сборки изделия от времени выполнения подготовки заготовок в зависимости от их типов

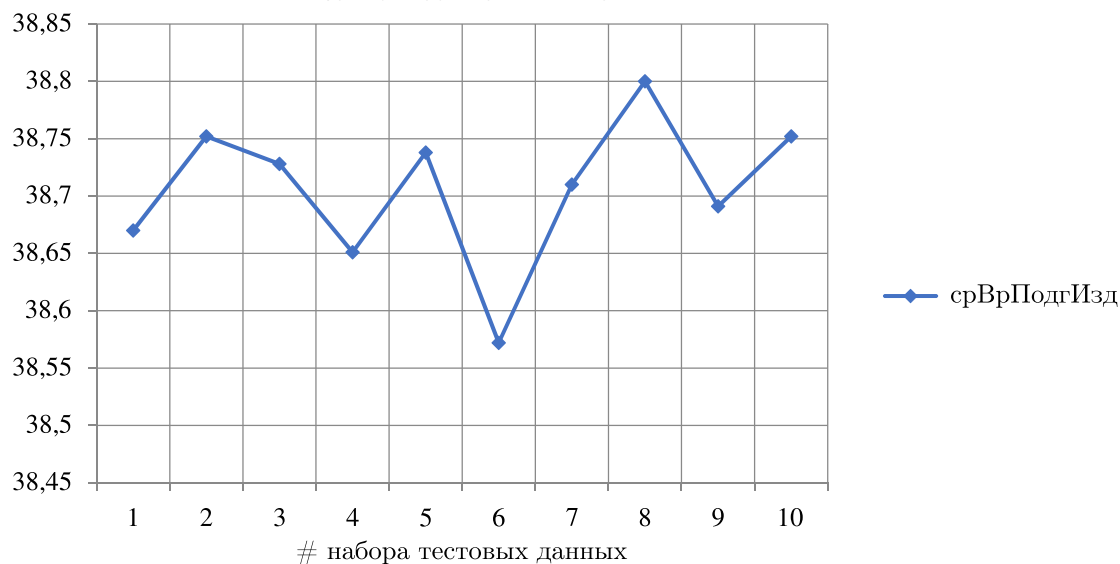


Рис. 12. Зависимость среднего времени сборки изделия от времени выполнения подготовки заготовок в зависимости от их типов

подобрать оптимальный набор параметров, при котором удалось достичь наиболее эффективной работы сборочной линии. Данный эксперимент подтверждает основной принцип агентного моделирования: децентрализованные агенты вносят личный вклад и оказывают влияние на работу всей моделируемой системы в целом.

4. Заключение

В настоящее время одним из наиболее эффективных инструментов для решения практических задач, в которых необходимы построение модели системы и проведение расчета ее основных показателей, является методика имитационного моделирования. Сущность имитационного моделирования состоит в построении для исследуемого процесса совокупности моделирующих его алгоритмов, сохраняющих логическую структуру процесса, последовательность чередования во времени всех составляющих его явлений, их взаимосвязь и взаимовлияние.

Агентное моделирование, как подвид имитационного моделирования, — это метод, который изучает поведение децентрализованных агентов и то, как такое поведение определяет поведение всей системы в целом. Так как объектом исследования является гибкая производственная система, для моделирования было выбрано именно агентное моделирование. Также был проведен сравнительный анализ современных средств моделирования, по результатам которого была выбрана среда моделирования AnyLogic.

Для формирования концепции модели были подготовлены исходные данные с описанием параметров системы, были заданы численные значения, создана диаграмма состояний в виде схемы потока процессов. Далее модель была разработана с помощью математических и интерактивных возможностей среды AnyLogic. По результатам разработки модели составлено подробное описание процессов.

Также были сформированы условия эксперимента и выработаны критерии эффективности модели. В рамках эксперимента были рассмотрены следующие задачи:

- определить степень влияния изменения различных экспериментальных параметров на изменение ключевых показателей производительности сборочной линии;
- подобрать оптимальный набор параметров сборочной линии исходя из заданных ограничений.

Была также разработана логика эксперимента, сформированы основные условия проведения моделирования. Были разработаны и представлены наборы тестовых данных для проведения эксперимента.

Для решения поставленных задач была проведена серия экспериментов, по результатам которых был подобран набор оптимальных параметров для моделирования при заданных ограничениях для повышения эффективности сборочной линии, а также было наглядно продемонстрировано влияние поведения отдельных агентов на поведение всей системы в целом. В ходе проведения эксперимента удалось снизить среднее время цикла сборки одного изделия на ~36 %, повысить значение среднего количества изделий за смену на ~37 %, а также эффективно повысить загруженность сборочной линии и снизить количество бракованных деталей.

Таким образом, была разработана гибридная модель сложной сборочной линии в среде AnyLogic. В результате проведенного эксперимента, благодаря подбору оптимального набора параметров, удалось улучшить основные показатели функционирования сборочного цеха, а именно:

- увеличить показатель производительности на 60 %;
- снизить показатель средней продолжительности сборки изделия на 38 %.

В работе были выделены основные факторы, влияющие на показатели эффективности сборочной системы, проанализировано их влияние на достижение количественного результата в зависимости от комбинаций выбранных параметров.

Список литературы (References)

- Босиков И. И.* Разработка метода анализа и гибридного имитационного моделирования сложных технических систем переменной структуры // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. — 2022. — № 1 (105). — С. 25–40.
- Bosikov I. I.* Razrabotka metoda analiza i gibridnogo imitacionnogo modelirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem peremennoy struktury [Development of the method of analysis and hybrid simulation modeling of complex technical systems of variable structure] // Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo centra RAN [News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS]. — 2022. — Vol. 1 (105). — P. 25–40 (in Russian).
- Дерябин С. А., Мисинева Е. В.* Построение гибридной имитационной модели экологического состояния горнопромышленного региона на основе мультиагентного подхода // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2022. — № 4. — С. 169–181.
- Deryabin S. A., Misineva E. V.* Postroenie gibridnoy imitacionnoy modeli ekologicheskogo sostoyaniya gornopromyshlennogo regiona na osnove mul'tiagentnogo podhoda [Hybrid simulation modeling of ecological state of a mining region using a multi-agent approach] // Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. — 2022. — No. 4. — P. 169–181 (in Russian).
- Дорогин А. В., Песиков Э. Б., Заикин О.* Оценка и управление рисками производственных систем на основе агентного моделирования // Проблемы управления безопасностью сложных систем: труды XXI Международной конференции / под ред. Н. И. Архиповой, В. В. Кульбы. — 2013. — С. 430–434.
- Dorogin A. V., Pesikov E. B., Zaikin O.* Ocenka i upravlenie riskami proizvodstvennykh sistem na osnove agentnogo modelirovaniya [Assessment and risk management of production systems based on agent-based modeling] // Problemy upravleniya bezopasnost'yu slozhnykh sistem: trudy XXI Mezhdunarodnoy konferencii / pod red. N. I. Arhipovoj, V. V. Kul'by. — 2013. — P. 430–434 (in Russian).
- Ивашкин Ю. А.* Агентные технологии и мультиагентное моделирование производственных и маркетинговых систем // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК «ЛЭРЭП-11-2017»): сборник научных трудов по материалам XI Международной научно-практической конференции. — 2017а. — С. 19–28.
- Ivashkin Yu. A.* Agentnye tekhnologii i mul'tiagentnoe modelirovanie proizvodstvennykh i marketingovykh sistem [Agent technologies and multi-agent modeling of production and marketing systems] // Logistika i ekonomika resursoenergosberezheniya v promyshlennosti (MNPk "LEREP-11-2017"): sbornik nauchnykh trudov po materialam XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. — 2017a. — P. 19–28 (in Russian).
- Ивашкин Ю. А.* Агентные технологии моделирования больших систем АПК // Хранение и переработка сельхозсырья. — 2017б. — № 4. — С. 53–56.
- Ivashkin Yu. A.* Agentnye tekhnologii modelirovaniya bol'shih sistem APK [Agent-based technologies for modeling large agricultural systems] // Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ya. — 2017b. — No. 4. — P. 53–56 (in Russian).
- Красникова К. В.* Моделирование транспортно-пересадочных узлов с использованием гибридных имитационных моделей // Политранспортные системы: материалы X Международной научно-технической конференции. — 2019. — С. 438–440.
- Krasnikova K. V.* Modelirovanie transportno-peresadochnykh uzlov s ispol'zovaniem gibridnykh imitacionnykh modelej [Modeling of transport hubs using hybrid simulation models] // Politransportnye sistemy: materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii. — 2019. — P. 438–440 (in Russian).
- Chahal K., Eldabi T.* Applicability of hybrid simulation to different modes of governance in UK healthcare // 2008 Winter Simulation Conference. — IEEE, 2008. — P. 1469–1477.
- Chen Q., Beauchesne E., Arnaudeau F., Dahoo P.-R., Meis C.* Modeling of mechanical behavior in additive manufacturing at part scale // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1391. — 012010. — <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1391/1/012010/pdf> (accessed: 18.01.2023).
- Elbattah M., Molloy O.* Designing care pathways using simulation modeling and machine learning // Proceedings of the 2018 Winter Simulation. — IEEE, 2018. — P. 1452–1463. — <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8632360> (accessed: 18.01.2023).
- Feldkamp N., Bergmann S., Strassburger S.* Combining data farming and data envelopment analysis for measuring productive efficiency in manufacturing simulations // Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference. — IEEE, 2018. — P. 1440–1451. — <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8632300> (accessed: 18.01.2023).

- Hilletoft P., Aslam O., Hilmola P.* Multi-agent based supply chain management: case study of requisites // *International Journal of Networking and Virtual Organisations*. — 2010. — Vol. 7, No. 2/3. — P. 184–206.
- Kim S., Feng B., Smith K., eds.* Network generation for simulation of multimodal logistics systems // *Proceedings of the 2021 Winter Simulation Conference*. — IEEE, 2021. — <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9715497> (accessed: 18.01.2023).
- Morgan J. S., Howick S., Belton V.* A toolkit of designs for mixing discrete event simulation and system dynamics // *European Journal of Operational Research*. — 2017. — Vol. 257, No. 3. — P. 907–918.
- Rabelo L., Helal M., Jones A., Min H.-S.* Enterprise simulation: a hybrid system approach // *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. — 2005. — Vol. 18. — P. 498–508.
- Venkateswaran J., Son Y.-J., Jones A.* Hierarchical production planning using a hybrid system dynamic-discrete event simulation architecture // *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*. — 2004. — Vol. 2. — P. 1094–1102.