

УДК 658.514.07

DOI: 10.22213/2410-9304-2026-2-80-89

Оперативное управление производством деталей с длительным циклом на основе имитационной модели AnyLogic

И. В. Ершова, доктор экономических наук, профессор, Уральский федеральный университет им. первого президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

А. А. Тотьмянин, аспирант, Уральский федеральный университет им. первого президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

В статье рассмотрен вопрос создания имитационной модели части производственного участка механической обработки работающего в условиях опытно-серийного производства, где производство серийных деталей совмещено с обработкой разовых опытных деталей. Имитационная модель построена с помощью программного продукта AnyLogic. В качестве агентов выбраны 3 типа деталей: две серийные детали с длительным производственным циклом (более месяца) и опытно-конструкторские работы, условно объединенные в один агент «опытные детали».

В архитектуре модели был использован циклический подход с целью более точно отобразить технологические процессы изготовления серийных деталей с длительным циклом производства. Применение циклического подхода, в отличие от линейного, позволяет учесть возврат деталей на обработку, например, в цикле «механообработка – термообработка – механообработка». В модели предусмотрены блоки создания очередей на обработку перед каждой единицей оборудования. Очередь появляется при рассинхронизации трудоемкости обработки, запускаемой партии и перерывов в обработке серийных деталей при оперативном запуске опытных деталей.

Первичная информация о поступлении заготовок, времени их прибытия и количества задается с помощью таблицы excel. Изменение первичных данных в таблице позволяет моделировать различные производственные ситуации.

Описан процесс создания модели, подготовки данных и возможных индикаторов производственного процесса для принятия управленческих решений.

Представлено сравнение циклического и линейного подходов для создания имитационных моделей и показано преимущество циклического подхода для деталей с длительным циклом и повторяющейся обработкой.

Предложенная модель позволяет имитировать процесс запуска деталей в обработку с учетом необходимого критерия: загрузки оборудования или длительности производственного цикла.

Ключевые слова: опытно-серийное производство, имитационное моделирование, оперативное управление производством; системы поддержки управленческих решений.

Введение

Машиностроительное производство под воздействием тенденций кастомизации и гибкости становится системой со смешанной моделью оперативного-календарного управления [1]. Оперативное управление участком в среде опытно-серийного производства [2] сопряжено с необходимостью учитывать большое количество как внутренних, так и внешних ограничений, а объединение двух управляющих систем опытного и серийного производства создает конфликт очередности запуска на уровне оборудования участка.

Применение имитационного моделирования позволяет повысить прогнозирование производственных систем и дает возможность проведения оптимизационных экспериментов с целью повышения качества принимаемых управленче-

ских решений. При этом чем сложнее производственная система, тем больше требуется элементов для описания процессов, протекающих в системе.

Актуальность применения цифровых подходов к описанию и дальнейшему управлению производственными процессами приводит к необходимости анализа методов, используемых для построения моделей различных типов производств [3].

Большое количество работ посвящено применению имитационного моделирования с использованием программного продукта AnyLogic. В основном авторы рассматривают моделирование логистических процессов, управление транспортной инфраструктурой и запасами [4].

Разработка моделей для производственных предприятий, как правило, ограничивается

поточными производством с линейным протеканием технологических процессов (целлюлозно-бумажное производство [5], добыча и транспортировка ресурсов, транспортные системы [6, 7]).

Есть ряд интересных работ по управлению производственными процессами в машиностроении. Например, в работе [8] приведен пример использования имитационной модели в технологической подготовке с целью анализа принятых решений.

В работе [9] была предложена имитационная модель работы сборочного цеха, в которой были совмещены два типа моделирования. Для описания внутренней логики поведения агента использовалось дискретно-событийное моделирование.

Стоит отметить, что часто имитационные модели производственных систем ограничиваются линейной структурой и не включают в себя логические элементы, так же отсутствует описание переходных процессов, связанных с состоянием обрабатываемой детали.

Подобные элементы или структура модели позволяет имитировать сложные циклические технологические процессы присущие изделиям опытно-серийного производства.

Частично такой подход использован в работе [10], где очередность обработки определяется приоритетом детали и наличием свободной единицы оборудования.

При этом широко описаны подходы использования данных элементов в информационных системах [11] или транспортных системах [12], [13], где имеется цикличность процессов и проверки состояния агента.

Отход от линейной логики построения модели часто связан с самими процессами. В работе [14] описывается работа пограничного перехода, где проверки агента направляют в различную цепочку событий.

Кроме этого, отсутствие общепринятого на производстве нормирования операций, заставляет длительность прохождения закладывать через различные законы распределения.

Современная тенденция внедрения MES-систем не исключает параллельного использования автономных имитационных моделей. В работе [15] проведен анализ существующих MES-систем и дана их стоимостная оценка внедрения.

На основе анализа функциональных возможностей и цены российских MES-систем выбрана MES-система Zenith SPPS, затраты на внедрение которой составляют около 16

млн руб. При этом для внедрения системы требуется обеспечение оборудования необходимыми датчиками, что повышает стоимость внедрения.

В работе [16] авторами была предложена имитационная модель изготовления серийных деталей с длительным циклом производства с линейной архитектурой. Апробации модели показали, что ее архитектура не позволяет полностью симитировать сменное задание, состоящее из деталей различной стадии обработки, а также корректно ввести в сменное задание опытные детали, требующие отработки технологического процесса.

Целью данного исследования является разработка циклического подхода к созданию имитационной модели участка механической обработки опытно-серийного производства.

Материалы и методы

Описание объекта исследования

Объем и номенклатура работы участка станков с ЧПУ формируется исходя из требований по серийным деталям сборочного цеха и сварочных участков. Кроме серийного дефицита, существуют дефицитные ведомости по каждой отдельной тематике опытно-конструкторских работ (ОКР).

Основная механическая обработка происходит на двух станках с ЧПУ St1680 и St600. Технологический процесс изготовления серийных деталей имеет ярко выраженные три цикла «St1680→Слесарная обработка→ St600→ Слесарная обработка → Термообработка», после чего деталь подвергается окончательной слесарной обработке, моется и передается на контроль.

На том же оборудовании St1680 и St600 происходит отработка и дальнейшее изготовление деталей ОКР. Процентное соотношение деталей ОКР и серийных деталей относительно годового плана составляет 20 % для St 1680 и 9 % для St 600.

Детали под обработку подаются с заготовительного участка партиями от 15 до 40штук. Они в свою очередь комплектуются технологическими паспортами и образцами для термообработки.

После каждой фрезерной операции необходима слесарная обработка для очистки базовой технологической поверхности от заусенцев.

Первичная термообработка – наиболее длительный процесс, так как требует комплектации деталей по партиям и ожидания результатов механических испытаний. После подтверждения свойств металла деталь переходит на пескост-

руйную обработку с целью подготовки поверхности к механической обработке на станках с ЧПУ. Следующие стадии термообработки выполняются при более низкой температуре и не требуют подтверждения механических свойств, но требуют партионности в четыре детали, обусловленной применяемой оснасткой.

После выполнения всех операций на оборудовании детали проходят окончательную слесарную обработку, моются и переходят на стадию технического контроля параметров (КИМ, ОТК).

Длительность цикла изготовления детали можно разложить на составляющие:

$$T_i = \sum T_{H_{стан}} + \sum T_{H_{слес}} + \sum T_{терм} + \sum T_{контр} + \sum T_{прол},$$

где T_i – длительность цикла обработки серийной i -й детали; $\sum T_{H_{стан}}$ – сумма норм станочной обработки; $\sum T_{H_{слес}}$ – сумма норм слесарной обработки; $\sum T_{терм}$ – время, затрачиваемое на термообработку детали; $\sum T_{контр}$ – время, затраченное на технический контроль детали; $\sum T_{прол}$ – время, затраченное на ожидание выполнения операций, время пролеживания.

Выделим основные проблемы оперативного управления процессом производства деталей длительного цикла К5 и К6 при использовании имеющихся механизмов планирования:

- длительный цикл производства и большое количество переходов усложняет планирование, что приводит к срывам сроков сдачи деталей;
- различные по времени операции (как в механической обработке, так и в термообработке) приводят к дисбалансу работы оборудования и сложности в планировании загрузки;
- в процессе обработки на разных стадиях участвует одно и то же оборудование, что приводит к необходимости расставления приоритетов относительно всего процесса изготовления деталей;
- сложность прогнозирования влияния запуска деталей ОКР на данном оборудовании на сроки выпуска серийных деталей;
- необходимость расчета минимального допустимого количества деталей в цехе для обеспечения бесперебойной работы оборудования и ритмичности выпуска деталей;

– детали К5 и К6 применяются в сборке совместно, что требует синхронизации их выпуска;

– технологические процессы деталей К5 и К6 отличаются по количеству и длительности операций, что требует дополнительных корректирующих действий с целью сохранения ритмичности выпуска;

– сложность оценки рисков выхода из строя оборудования или болезни рабочего;

– сложность расчета необходимых ресурсов вследствие брака или поломки оборудования.

Используемые инструменты

Имитационная модель построена с помощью программного продукта AnyLogic. Преимущества применения пакета AnyLogic для создания дискретно-событийных моделей подробно описана в [17]. Применение палитры (инструментов) для моделирования процессов более подробно описано в [18].

Агенты модели

В имитируемой системе существуют три вида деталей, движущихся в системе: детали К5, детали К6 и детали ОКР. Соответственно, каждая из видов данных деталей будет агентом со своими характеристиками, описанными в свойствах агента.

Так как агент проходит многократно через один и тот же блок Service (имитирующий оборудование), требуется внутренняя переменная (компонента «Параметра»), которая бы изменялась с каждым проходом и позволяла бы выбирать соответствующую длительность операции.

Задача описания длительности обработки в каждом проходе блока Service может быть решена за счет внешнего файла типа excel или внутренней компоненты tableFunction, в которой будет заведена информация об операции и длительности ее изготовления.

После описания агента переходим к блокам, моделирующим создание агентов в цепочке событий. Данный процесс соответствует поступлению заготовок на участок. Создание агентов происходит через блок Source. На рис. 1 их четыре. Они соответствуют созданию агентов серийных деталей К5 и К6 и опытных деталей К7 для St 1680 и К8 для St 600.

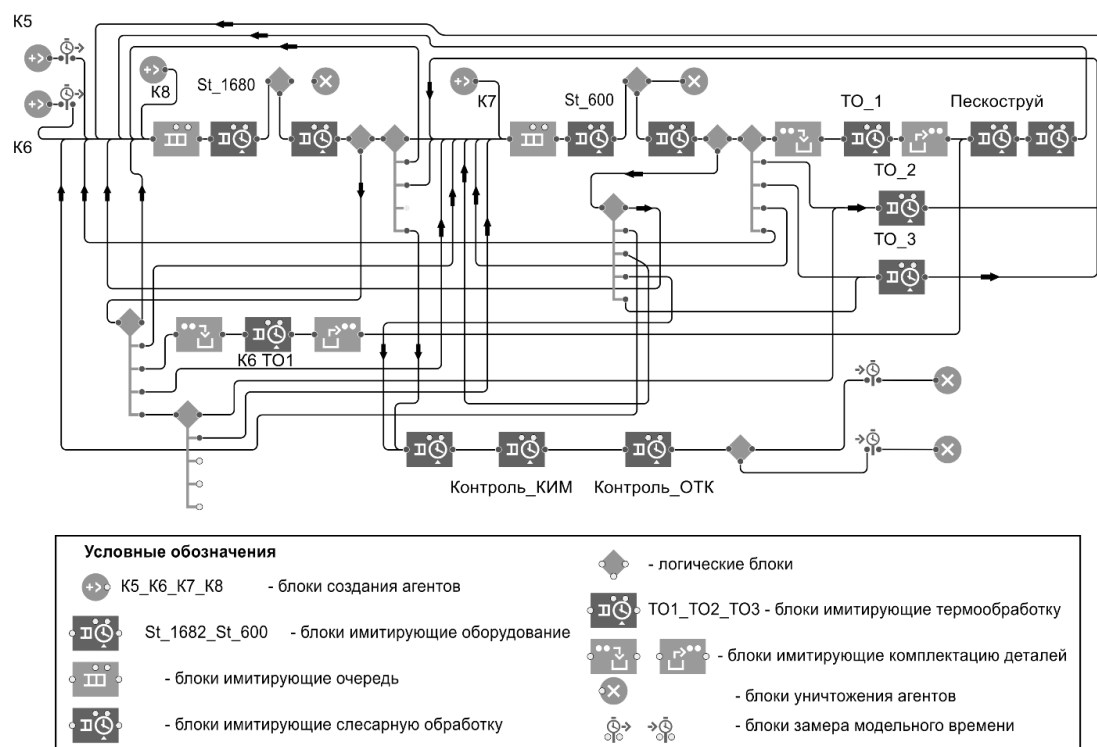


Рис. 1. Общий вид имитационной модели

Fig. 1. General view of the simulation model

Информация о поступлении заготовок в цех состоит из времени прибытия и количества поступивших заготовок. Данная информация будет изменяться с целью выявления реакции системы, поэтому ввод этих данных происходит через таблицу excel.

Результатом работы модели являются сроки выпуска деталей и длительность цикла изготовления, как параметр, определяющий эффективность настройки системы. Для этого используются блоки замера модельного времени, которые подобно секундомеру отслеживают прохождение агентом требуемого участка.

Ресурсы и оборудование

Вся модель строится вокруг двух единиц оборудования, которые участвуют в процессе обработки. Блоки Service St_1680 и St_600 имеют соответствующие закрепленные ресурсы с внутренним расписанием. Такой подход позволяет при необходимости изменять рабочее расписание оборудования и выводить его загрузку.

Участвующие в изготовлении детали процессы, связанные со слесарной, пескоструйной и термической обработкой, имеют аналогичные ограничения в рабочем расписании и количестве выделенных ресурсов. При необходимости есть возможность задать расписание доступно-

сти ресурса. Такой вариант позволяет учитывать загрузку, к примеру, участка технического контроля, задействованного в смежных процессах.

Блоки имитации очереди перед оборудованием являются важным элементом имитационной модели, так как реальные управленческие воздействия на систему происходят посредством формирования сменного задания из деталей, ожидающих обработки или подходящих к этой стадии.

Допущения

При создании имитационной модели были приняты определенные допущения, позволяющие использовать данную модель для исследования работы производственной системы.

1. Запуск деталей ОКР происходит по данным сделанного сменного задания, но длительность формируется не за счет различной длительности изготовления детали, а за счет разного количества агентов одной длительности. То есть если деталь изготавливалась 36 часов, то генератор агентов создаст 36 агентов длительностью один час. При этом остается возможность изменения кривой распределения длительности выполнения операции, что дает вариабельность процесса по времени. При этом модель дает разрывать процесс обработки детали ОКР посередине процесса. Что

имеет за собой реальную возможность остановить отработочную деталь и запустить в работу серийную.

2. Процесс выхода модели на рабочий режим происходит со временем, что отличается от реальной системы, где на каждом этапе обработки деталей уже существует определенный задел по деталям.

Запуск имитационной модели

Для запуска имитационной модели, созданной с учетом множества ограничений производственной системы, требуется:

- график запуска деталей К5 и К6 (соответствует передаче деталей по накладным);

- график запуска деталей ОКР на станках St 1680 St 600 (соответствует сменным заданиям);
- графики доступности рабочих ресурсов, участвующих в изготовлении (графики работы операторов станков ЧПУ, график работы слесарного участка и участка КИМ, ОТК).

Процесс запуска и получение данных работы модели сведем в инфографику.

Результаты

На рис. 2 представлена инфографика работы имитационной модели. На основании входных данных модель, с учетом всех описанных ограничений и алгоритмов, формирует выходные данные. Рассмотрим более подробно каждый показатель.

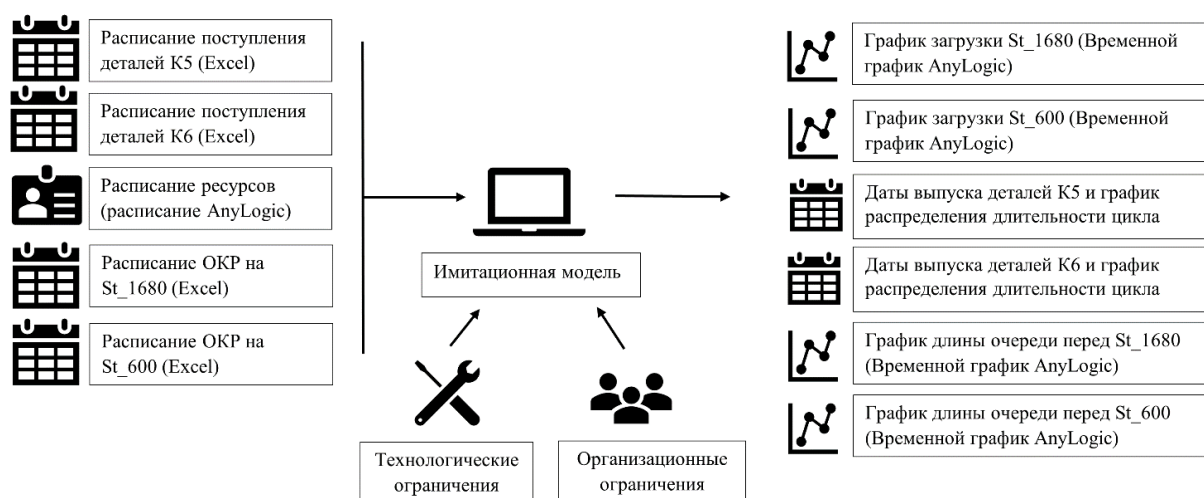


Рис. 2. Инфографика работы имитационной модели

Fig. 2. Infographics of the simulation model

Графики загрузки оборудования St_1680 и St_600. Этот массив данных позволяет оценить экономическую эффективность принятых управленческих решений. В контексте описанной системы и рассмотрения длительности цикла как ключевого показателя оборудование должно быть недогружено, чтобы приходящие серийные детали без пролеживания попадали в работу. Но с точки зрения экономической эффективности необходимо увеличивать коэффициент загрузки.

Даты выпуска деталей К5 и К6 и графики распределения вероятности длительности цикла изготовления. Среда AnyLogic позволяет построить гистограммы распределения вероятности длительности цикла по деталям К5 и К6.

Наиболее вероятное время изготовления детали К5 – 48 дней, для детали К6 – 52 дня. Как было описано ранее, количество операций в де-

тали К6 больше, что приводит к более длительному процессу изготовления. Расчет длительности цикла приведен в (1), как ключевой показатель работы системы. Целью оптимизации может быть $\sum T_{\text{пол}} \rightarrow \min$, что позволит сократить общую длительность цикла T_i , а значит, сократить межоперационные запасы.

График длины очереди перед оборудованием. Ключевым элементом данной модели является блок, формирующий очередь перед оборудованием. В данном блоке скапливаются агенты различных стадий обработки, а также детали ОКР, ожидающие запуска.

Формируемые данные в этом блоке позволяют создавать график длины очереди (рис. 3) перед оборудованием, который является опережающим графиком коэффициента загрузки оборудования, а следовательно, имеет влияние как на экономические показатели, так и на длительность цикла изготовления серийных деталей.

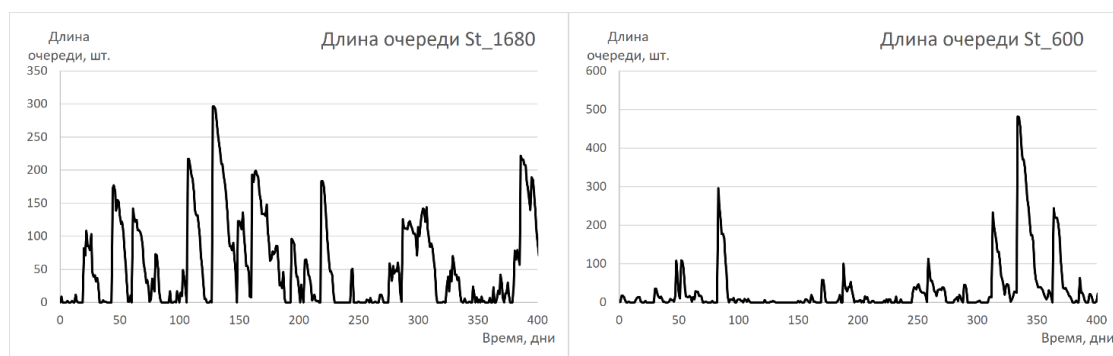


Рис. 3. График длины очереди перед оборудованием

Fig. 3. Graph of the queue length in front of the equipment

Обсуждение

Разработанная имитационная модель, собранная по циклической схеме, более точно отображает процессы, чем линейная модель. Сравнительный анализ моделей приведен в табл. 1. Ключевым узлом модели являются буферы перед оборудованием, которые позволяют имитировать процессы формирования сменного задания, а также отслеживать длину очереди. Выходные данные модели помогают оценить результаты принятых управленческих решений

с точки зрения ритмичности работы и экономической эффективности.

Модель с такой архитектурой имеет большее количество элементов и требует большего времени на создание. Обратной стороной является большая точность в имитации процессов, происходящих на реальном участке, корреляция между результатами работы модели и реальной системы, а значит возможностью прогнозирования результатов работы на длительном промежутке времени.

Таблица 1. Сравнение подходов к процессу моделирования участка

Table 1. Comparison of approaches to the site modeling process

Подход	Линейный	Циклический
Агент модели	Заготовка	Заготовка с заданными внутренними параметрами длительности изготовления
Сложность создания модели	Низкая	Высокая, требует программирования
Порядок запуска деталей на оборудования	Хаотичный, связан с процессами прихода агента к имитирующему блоку	Порядок, изменяемый в рамках блока очереди (FIFO, LIFO). Есть возможность описания приоритетов запуска
Задание технологического процесса	Через отдельную ветку. Каждая ветка отображает свой ТП изготовления детали	Ветки технологического процесса вплетены через логические узлы
Задание норм изготовления	Через описания длительности процесса внутри каждого блока Service	Через описания агента. Детали К5 и К6 имеют разные длительности обработки на каждой из операции
Изменение технологического процесса в отработанной ИМ	Просто. Через изменение последовательности или количества блоков ИМ	Сложно. Через изменение описания агента или изменение логических элементов
Исследование процесса формирования очереди перед оборудованием, как элемента СППУР	Невозможно в связи с хаотичностью запуска агента на оборудовании	Возможно. Через формирование графика очереди перед оборудованием и графическим представлением состава очереди
Запуск дополнительных деталей с коротким циклом обработки	Через формирование дополнительных цепочек блоков Service	Через ввод дополнительных блоков Source и логических элементов
Архитектура модели	На развертывании технологического процесса в линейную цепочку событий	Центральным звеном является буфер перед оборудованием
Применение в оперативном управлении производством	Создание ИМ с целью оптимизации запуска деталей с коротким циклом изготовления. Оптимизация по загрузке или размеру партии деталей. Поиск и расшивка узких мест работы группы оборудования. Распределение загрузки между станками с целью оптимизации и снижения простоев	Создание ИМ с целью проверки влияния управленческих решений на процесс изготовления деталей длительным циклом изготовления. Анализ процессов работы сложной организационно-технической системы Необходимость выявления возможностей запуска дополнительных деталей на оборудовании, занятом в производстве деталей с длительным циклом изготовления

Принятые решения по построению модели по циклической схеме позволяют снять данные по изменению длины очереди перед оборудованием, прогнозировать поступления деталей на оборудование с промежуточных этапов обработки, как следствие, более точно планировать работу оборудования.

Такой инструмент позволяет производить перераспределение работ по опытным деталям в соответствии с графиком длины очереди, сформированным серийными деталями, производить отработку деталей с минимальным влиянием на сроки изготовления серийных деталей.

В табл. 2 представлено сравнение длительности производственного цикла статистических показателей работы реальной системы (время нахождения детали на участке замерялось по разнице входящих и исходящих накладных) и работы имитационной модели по фактическим срокам запуска.

Таблица 2. Статистика по длительности изготовления деталей К5 и К6 в днях

Table. 2. Statistics on the production time for K5 and K6 parts in days

Показатель	Фактические показатели по деталям		Имитационная модель	
	К5	К6	К5	К6
Среднее	57,6	60,2	56,27	59
Стандартная ошибка	1,63	2,033	1,71	1,489
Медиана	57	61	51	57
Стандартное отклонение	20,1	23,18	17,11	14,89

В целом модель достоверно описываетхождение деталей на участке. Погрешность или отхождения результатов работы модели от реальной системы вызваны не только допущениями, которые были описаны выше, но и отсутствием аврального режима работы в случае срыва сроков, присущего стилю работы реальной производственной системы (отражается в различии минимальных значений длительности цикла изготовления деталей).

При использовании инструментов оптимизации запуска за счет изменения расписания была сокращена длительность производственного цикла для детали К5 до 42 дней, для детали К6 до 45,7 дня. При этом сократилось время сверхурочной работы на 8,5 %.

Заключение

Оперативное управление в среде опытно-серийного производства требует учета большого количества как технологических, так и организационных ограничений. Сложность представленной имитационной модели (рис. 1) гово-

рит об объеме информации, необходимой лицу, принимающему решения для управления сложной организационно-технической системой.

Выбор циклического подхода в архитектуре создания модели вызван особенностью технологического процесса с тремя ярко выраженными итерациями, а также необходимостью встраивания в модель двух не аналогичных, но похожих технологических процессов, а также механизма отработки опытных деталей. Сведенные в сравнительную таблицу различия подходов моделирования позволяют провести предварительный анализ работы проектируемой системы и выбрать подход в соответствии с поставленными целями в проектировании имитационной модели.

Более сложные процессы производственной системы требуют проработки допущений, принятых в процессе создания модели, которые имеют значительное влияние как на цели создания модели, так и на результаты работы модели.

Интеграция информационных систем в производственную среду позволяет уйти от прогнозирования на основании экспертного подхода к подходу, позволяющему учитывать большое количество ограничений и неопределенности организационно-технических систем.

Дальнейшие исследования направлены:

- на доработку имитационной модели с целью ввода межоперационных заделов для сокращения времени выхода модели в «режим»;
- исследование влияния объема незавершенного производства на простой оборудования и длительность цикла производства серийных деталей при изменяющемся объеме деталей ОКР.

Библиографические ссылки

1. Коновалова Г. И. Концепция и методология разработки цифровой платформы оперативного планирования производства на машиностроительном предприятии // Организатор производства. 2024. Т. 32, № 1. С. 16–26. DOI 10.36622/1810-4894.2024.66.24.002. EDN FGMQR.
2. Сажаев А. В. Проблемы опытно-серийного производства при изготовлении сложных технических изделий // Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей LVI Международной научно-практической конференции, Пенза, 15 мая 2022 года. Пенза : Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г. Ю.), 2022. С. 143–148. EDN NFAYFS.
3. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств / С. Н. Григорьев, В. А. Долгов, П. А. Никищечкин и др. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2022. № 3 (142). С. 84–99. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-84-99>.

4. Применение программ Anylogic, Anylogistix и Loginom для оптимизации управления запасами на производстве / В. И. Ренжина, М. С. Свистун, Л. И. Цакаева, Г. В. Заходякин // Успехи в химии и химической технологии. 2023. Т. 37, № 17(279). С. 91–93. EDN ODDVQC

5. Моделирование применения роботоманипуляторов для оптимизации упаковочной линии ЦБК в программной среде Anylogic / С. Л. Горобченко, Д. А. Ковалев, В. А. Соколова [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 3. С. 637–640. DOI 10.24412/2071-6168-2024-3-637-638. EDN DWBMLM.

6. Абдуллаева К. Р., Цыгута А. Н., Головацкая Л. И. Имитационное моделирование сложных транспортных систем в среде Anylogic // Глобальные тенденции в экономических и социокультурных аспектах стран Прикаспия. Коридор Север-Юг в системе развития мировых отношений : материалы VI Международного круглого стола (конференции), Астрахань, 11 октября 2024 года. Астрахань : ИП Сорокин Р. В., 2024. С. 141–144. EDN JTNXHM.

7. Агафонов О. А., Афонина Н. Б., Ахмедиев А. С. Построение модели конвейерного транспорта в Anylogic // Современные прикладные исследования : материалы шестой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции : в 2 т. Шахты, 16–18 марта 2022 года. Т. 1. Новочеркасск : Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова, 2022. С. 227–232. EDNDPXPDW.

8. Порфирьев К. Е., Яраева М. Н. Имитационная модель процесса сборки изделия для оценки и планирования производств // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2024. Т. 11, № 2. С. 49–55. DOI 10.24892/RIJE/20240208. EDN WBSMVL.

9. Разработка гибридной имитационной модели сборочного цеха / Д. А. Скворцова, Е. Л. Чувильгин, А. В. Смирнов, Н. О. Романов // Компьютерные исследования и моделирование. 2023. Т. 15, № 5. С. 1359–1379. DOI 10.20537/2076-7633-2023-15-5-1359-1379. EDN WJGDZB

10. Бурдо Г. Б., Семенов Н. А. Автоматизированное составление оперативных планов для механообработывающих подразделений мелкосерийного машиностроения // Программные продукты и системы. 2025. Т. 38, № 2. С. 305–314. Doi: 10.15827/0236-235X.150.305-314.

11. Сенкевич Л. Б., Сабитов М. А. Имитационное моделирование и оптимизация работы параллельного сервера с отказами в среде AnyLogic // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Т. 8, № 1 (29). С. 126–143. DOI 10.21684/2411-7978-2022-8-1-126-143. EDN-QYAMQH.

12. Псеровская Е. Д., Шерстобитова О. Б., Басманов Д. А. Исследование возможностей использования инструмента имитационного моделирования An-

yLogic в организации работы контрейлерного терминала // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2023. № 4(60). С. 71–83. DOI 10.20291/2079-0392-2023-4-71-83. EDNVEUZDU.

13. Мелехина Т. Л., Кочетков А. А. Анализ пассажиропотока транспортнопересадочного узла «Ростokino» в цифровой среде имитационного моделирования AnyLogic // Проблемы теории и практики управления. 2024. № 7-8. С. 114–127. EDN HCECQX.

14. Ольховик О. В., Плотко И. С. Создание имитационной модели пограничного перехода в инструментальной среде Anylogic // Цифровые инструменты обеспечения устойчивого развития экономики и образования: новые подходы и актуальные проблемы : сборник научных трудов IV-й Национальной научно-практической конференции (с международным участием), Орел, 23 апреля 2025 года. Орел : Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, 2025. С. 248–257.

15. Ткаченко И. В., Анисимова О. С. Повышение качества планирования на цеховом уровне с использованием информационных систем нового класса // Московский экономический журнал. 2025. № 3 С. 74–91. DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_3_66.

16. Ершова И. В., Клюев А. В., Тотьмянин А. А. Применение цифровых имитационных моделей для организации машиностроительного производства // Умные технологии в современном мире : материалы VI Всероссийской научно-практической конференции, Южно-Уральский государственный университет, Высшая школа экономики и управления, 22–23 ноября 2023 года. Челябинск : Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), 2024. С. 46–51. EDN XPSEKD.

17. Хроль Е. В., Уварова А. Г., Кужильный А. В. Разработка имитационных моделей с помощью AnyLogic // Современные инновации, системы и технологии. 2023. Т. 3, № 4. С. 119–130. DOI 10.47813/2782-2818-2023-3-4-0119-0130. EDN UYVFEM.

18. Шевченко А. М. Обзор возможностей имитационного моделирования для оптимизации работы морского порта в среде AnyLogic: алгоритм разработки // Computational Nanotechnology. 2025. Т. 12, № 2. С. 82–97. DOI 10.33693/2313-223X-2025-12-2-82-97. EDN QSQYPQ.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024660607 Российская Федерация. Имитационная модель работы участка станков с ЧПУ по изготовлению деталей с длительным циклом производства: № 2024619463: заявл. 02.05.2024: опубл. 08.05.2024 / А. А. Тотьмянин. EDN CXSIXG.

References

1. Konovalova G.I. [Concept and methodology for developing a digital platform for operational production planning at a mechanical engineering enterprise]. Production organizer. 2024. Vol. 32, no. 1. Pp. 16-26 (in Russ.). DOI 10.36622/1810-4894.2024.66.24.002. EDN FGMQUR.

2. Sazhaev A.V. *Problemy opytно-serijnogo proizvodstva pri izgotovlenii slozhnyh tekhnicheskikh izdelij* [Problems of pilot series production in the manufacture of complex technical products]. *Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovacii : sbornik statej LVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Penza, 15 maya 2022 goda* [Proc. Fundamental and applied scientific research: current issues, achievements and innovations: collection of articles from the LVI International scientific and practical conference, Penza, May 15, 2022]. Penza: Science and Education (IP Gulyaev G.Yu.), 2022. Pp. 143-148 (in Russ.). EDN NFAYFS.
3. Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., et al. [Simulation Modeling of Production Processes of Various Types of Mechanical Engineering Industries]. *Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2022, no. 3, pp. 84-99 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-84-99>.
4. Renzhina V.I., Svistun M.S., Tsakaeva L.I., Zakhodyakin G.V. [Application of Anylogic, Anylogistix, and Loginom Software for Optimizing Inventory Management in Production]. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2023. Vol. 37, no. 17. Pp. 91-93 (in Russ.). EDN ODDVQC.
5. Gorobchenko S.L., Kovalev D.A., Sokolova V.A. [et al.] [Modeling the use of robotic manipulators to optimize the packaging line of a pulp and paper mill in the Anylogic software environment]. *Bulletin of Tula State University. Technical sciences*. 2024. No. 3. Pp. 637-640 (in Russ.). DOI 10.24412/2071-6168-2024-3-637-638. EDN DWBMLM.
6. Abdullaeva K.R., Tsyguta A.N., Golovatskaya L.I. *Imitacionnoe modelirovanie slozhnyh transportnyh sistem v srede Anylogic* [Simulation modeling of complex transport systems in the Anylogic environment]. *Global'nye tendencii v ekonomicheskikh i sociokul'turnykh aspektah stran Prikaspiya. Koridor Sever-YUG v sisteme razvitiya mirovyh otnoshenij : materialy VI Mezhdunarodnogo kruglogo stola (konferencii), Astrahan', 11 oktyabrya 2024 goda* [Global trends in economic and socio-cultural aspects of the Caspian countries. The North-South Corridor in the System of Development of World Relations: Proceedings of the VI International Round Table (Conference), Astrakhan, October 11, 2024]. Astrakhan: IP Sorokin R.V., 2024. Pp. 141-144 (in Russ.). EDN JJTNXM.
7. Agafonov O.A., Afonina N.B., Akhmediyev A.S. *Postroenie modeli konvejernogo transporta v Anylogic* [Construction of a conveyor transport model in Anylogic]. *Sovremennye prikladnye issledovaniya : materialy shestoj Vserossijskoj (nacional'noj) nauchno-prakticheskoy konferencii : v 2 t. SHAhty, 16-18 marta 2022 goda. T. 1* [Proc. Modern applied research: Proceedings of the Sixth All-Russian (National) Scientific and Practical Conference. In 2 vol., Shakhty, March 16-18, 2022. Vol. 1]. Novocherkassk: South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platov, 2022. Pp. 227-232 (in Russ.). EDN DPXPDW.
8. Porfiryev K.E., Yardaeva M.N. [Simulation Model of the Product Assembly Process for Production Assessment and Planning]. *Mechanical Engineering: Online Electronic Scientific Journal*. 2024. Vol. 11, no. 2. Pp. 49-55 (in Russ.). DOI 10.24892/RIJIE/20240208. – EDN WBSMVL
9. Skvortsova D.A., Chuvilgin E.L., Smirnov A.V., Romanov N.O. [Development of a Hybrid Simulation Model of an Assembly Shop]. *Computer Research and Modeling*. 2023. Vol. 15, no. 5. Pp. 1359-1379 (in Russ.). DOI 10.20537/2076-7633-2023-15-5-1359-1379. EDN WJGDZB
10. Burdo G.B., Semenov N.A. [Automated compilation of operational plans for machining departments of small-scale mechanical engineering]. *Software products and systems*. 2025. Vol. 38, no. 2. Pp. 305-314 (in Russ.). Doi: 10.15827/0236-235X.150.305-314.
11. Senkevich L.B., Sabitov M.A. [Simulation modeling and optimization of a parallel server with failures in the AnyLogic environment]. *Bulletin of Tyumen State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy*. 2022. Vol. 8, no. 1(29). Pp. 126-143 (in Russ.). DOI 10.21684/2411-7978-2022-8-1-126-143. EDN QYAMQH.
12. Pserovskaya E.D., Sherstobitova O.B., Basmanov D.A. [Study of the Possibilities of Using the AnyLogic Simulation Tool in Organizing the Operation of a Piggyback Terminal]. *Bulletin of the Ural State Transport University*. 2023. No. 4. Pp. 71-83. DOI 10.20291/2079-0392-2023-4-71-83. EDN VEUZDU.
13. Melekhina T.L., Kochetkov A.A. [Analysis of passenger flow at the Rostokino transport hub in the AnyLogic digital simulation environment]. *Problems of Management Theory and Practice*. 2024. No. 7-8. Pp. 114-127 (in Russ.). EDN HCECQX.
14. Olkhovik O.V., Plotko I.S. *Sozdanie imitacionnoj modeli pogranichnogo perekhoda v instrumental'noj srede Anylogic* [Creation of a border crossing simulation model in the Anylogic tool environment]. *Cifrovye instrumenty obespecheniya ustojchivogo razvitiya ekonomiki i obrazovaniya: novye podhody i aktual'nye problemy : sbornik nauchnyh trudov IV-j Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem), Orel, 23 aprelya 2025 goda* [Digital tools for ensuring sustainable development of the economy and education: new approaches and current problems: collection of scientific papers of the IV-th National Scientific and Practical Conference (with international participation), Orel, April 23, 2025]. Orel: Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 2025. Pp. 248-257 (in Russ.).
15. Tkachenko I.V., Anisimova O.S. [Improving the quality of planning at the shop floor level using a new class of information systems]. *Moscow Economic Journal*. 2025. No. 3. Pp. 74-91 (in Russ.). DOI: 10.55186/2413046X_2025_10_3_66.
16. Ershova I.V., Klyuev A.V., Totmyanin A.A. [Application of digital simulation models for organizing mechanical engineering production]. [Smart technologies in the modern world: Proceedings of the VI All-Russian scientific and practical conference, South Ural State

University Russian University, Higher School of Economics and Management, November 22–23, 2023]. Chelyabinsk: South Ural State University (National Research University), 2024. Pp. 46-51 (in Russ.). EDN XPSEKD.

17. Khrol E.V., Uvarova A.G., Kuzhilny A.V. [Development of Simulation Models Using AnyLogic]. Modern Innovations, Systems, and Technologies. 2023. Vol. 3, no. 4. Pp. 119-130 (in Russ.). DOI 10.47813/2782-2818-2023-3-4-0119-0130. EDN UYV-FEM.

18. Shevchenko A.M. [Review of simulation modeling capabilities for optimizing seaport operations in the AnyLogic environment: development algorithm]. Computational Nanotechnology. 2025. Vol. 12, no. 2. Pp. 82-

97 (in Russ.). DOI 10.33693/2313-223X-2025-12-2-82-97. EDN QSQYPQ.

19. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2024660607 Rossijskaya Federaciya. Imitacionnaya model' raboty uchastka stankov s CHPU po izgotovleniyu detalej s dlitel'nym ciklom proizvodstva* [Certificate of state registration of computer program No. 2024660607 Russian Federation. Simulation model of the operation of a CNC machine section for the manufacture of parts with a long production cycle: No. 2024619463]; declared. 02.05.2024; published. 08.05.2024 / A. A. Totmyanin (in Russ.). EDN CXSIXG.

* * *

Operational Management of Long-cycle Production Parts Based on the AnyLogic Simulation Model

I. V. Ershova, DSc in Economics, Professor, Ural Federal University named after the first president of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

A. A. Totmyanin, Post-graduate, Ural Federal University named after the first president of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

The article examines the construction of a simulation model for a portion of a machining production area operating in a pilot production environment, where batch production is combined with the processing of one-off pilot parts. The simulation model was built using AnyLogic software. Three types of parts were selected as agents: two batch parts with long production cycles (over a month) and experimental design work, conventionally combined into a single "pilot parts" agent.

The model architecture utilized a cyclical approach to reflect the manufacturing processes of batch parts with long production cycles more accurately. The use of a cyclical approach, as opposed to a linear one, allows for the parts returned for the machining, for example, in the "machining - heat treatment - machining" cycle to be taken into account. The model includes blocks for creating processing queues in front of each piece of equipment. A queue is created when the processing intensity, the batch being launched, and interruptions in the processing of batch parts during the rapid launch of pilot parts desynchronize.

Primary information on the receipt of workpieces, their arrival time, and quantities is entered using an Excel spreadsheet. Modifying the primary data in the spreadsheet allows for the simulation of various production situations.

The process of model construction, data preparation, and potential production process indicators for management decision-making are described.

A comparison of cyclical and linear approaches for constructing simulation models is presented, demonstrating the advantage of the cyclical approach for parts with long cycle times and repetitive processing.

The proposed model allows for the simulation of the process of launching parts into processing, taking into account the required criteria: equipment load or production cycle duration.

Keywords: pilot production, simulation modeling, operational production management; management decision support systems.

Получено: 02.02.26

Образец цитирования

Ershova I. V., Totmyanin A. A. Оперативное управление производством деталей с длительным циклом на основе имитационной модели AnyLogic // Интеллектуальные системы в производстве. 2026. Т. 24, № 2. С. 80–89. DOI: 10.22213/2410-9304-2026-2-80-89.

For Citation

Ershova I.V., Totmyanin A.A. [Operational Management of Long-cycle Production Parts Based on the AnyLogicSimulation Model]. *Intellektual'nyesistemy v proizvodstve*. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 80-89. DOI: 10.22213/2410-9304-2026-2-80-89.