

УДК 658.512:004.946

DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-27-34

Имитационное моделирование технологических процессов сборки крупногабаритных изделий с применением виртуальной реальности

И. В. Кудрявцев, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

А. А. Кутин, МИРЭА – Российский технологический университет; Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

А. В. Кислова, МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия

Исследование направлено на решение актуальной проблемы планирования технологической подготовки производства (ТПП) крупногабаритных изделий, для которой характерны высокая неопределенность, взаимозависимость этапов и конкуренция за ресурсы. Традиционные детерминированные методы, основанные на усредненных оценках, часто приводят к срывам сроков и неэффективному использованию мощностей. В статье предлагается подход к оптимизации ТПП, основанный на интеграции имитационного моделирования и технологий виртуальной реальности (VR). Разработана комплексная методика, включающая сбор и анализ данных двумя способами: через структурированные опросы экспертов-практиков и посредством контролируемых экспериментов, в ходе которых участники выполняли задачи технологического проектирования в интерактивной VR-среде. Полученные эмпирические данные о длительностях операций, вероятностях сбоев и логических зависимостях послужили основой для построения детальной имитационной модели в среде AnyLogic. Архитектура модели включает элементы, отвечающие за генерацию заданий, выполнение технологических операций с учетом доступности персонала, реализацию обратных связей для учета вносимых изменений и сбор результирующей статистики. Данная структура позволяет адекватно отражать динамику и стохастичность полного цикла ТПП в рамках принятых допущений. По результатам сеансов моделирования проанализированы временные характеристики процесса, динамика образования и разрешения очередей, а также доля непроизводительных затрат. Результаты демонстрируют значительный положительный эффект от применения VR-инструментов на этапе технологической подготовки, выражающийся в сокращении общего времени цикла, снижении количества ошибок и оптимизации времени ожидания. Это свидетельствует о повышении общей эффективности процесса, надежности планирования и улучшении использования ресурсов. Предложенный подход представляет практическую ценность для машиностроительных предприятий, стремящихся сократить сроки вывода новой продукции на рынок и повысить гибкость производства.

Ключевые слова: технологическая подготовка производства, имитационное моделирование, временные зависимости, виртуальная реальность.

Введение

Технологическая подготовка производства (ТПП) является критически важным этапом, определяющим скорость вывода новых изделий на рынок, их себестоимость и качество. Как отмечается в исследованиях, традиционные методы планирования ТПП, основанные на детерминированных моделях, зачастую не учитывают стохастическую природу процессов, конкуренцию за ресурсы и влияние внешних факторов, что приводит к ошибкам в планировании и неэффективному использованию мощностей [1]. В современных условиях цифровой трансформации промышленности преодоление этих ограничений возможно за счет внедрения комплексных подходов, объединяющих автоматизацию, имитационное моделирование и технологии виртуальной реальности.

Фундаментальным трендом является переход к цифровому производству, где ключевую роль играют автоматизированные системы. Исследования подчеркивают историческую и экономическую необходимость этого перехода [2]. Современные подходы к автоматизированной конструкторско-технологической подготовке в условиях цифрового производства направлены на сквозную интеграцию данных [3]. Важным аспектом становится управление информа-

цией на всем жизненном цикле изделия с помощью цифровых технологий [4], а также создание специализированных автоматизированных рабочих мест (АРМ) для технологов на основе формализованных методик [5]. Ключевым практическим направлением является интеграция систем ТПП в автоматизированные системы проектирования (САПР), что позволяет сократить цикл подготовки нового изделия [6], в том числе в условиях мелкосерийного производства за счет адаптации алгоритмов работы САПР [7].

Для преодоления недостатков традиционного планирования широко применяется имитационное моделирование. Оно позволяет анализировать производственные процессы различных типов машиностроительных производств, учитывая их динамику и стохастичность [8]. Методика определения запаса заказов с учетом времени ТПП, основанная на моделировании, помогает оптимизировать загрузку в многономенклатурном производстве [9]. Высшей формой такого подхода является создание цифровых двойников, которые виртуально воспроизводят не только продукты, но и целые производственно-логистические системы, обеспечивая глубокий анализ и оптимизацию [10]. Цифровые модели и методы их проектирования становятся основным инструментом для решения задач ТПП [11].

Для решения конкретных технологических задач разрабатываются специализированные методы моделирования. К ним относится применение гиперграфов ограничений для проектирования процессов сборки сложных узлов [12], использование сетевых матричных структур для организации конструкторско-технологической подготовки [13], а также структурно-функциональное онтологическое моделирование для формализации знаний о процессе ТПП [14]. Эти подходы находят применение как в общем машиностроении, так и в специфичных отраслях, таких как литейное [15, 16] или инструментальное производство [17], а также в многономенклатурных производствах [18].

Перспективным направлением является интеграция технологий виртуальной и смешанной реальности в процессы ТПП. Исследования демонстрируют, что применение VR позволяет существенно повысить эффективность ТПП за счет оптимизации ключевых процессов и сокращения времени на принятие решений [19]. В области сборки разрабатываются инструменты смешанной и дополненной реальности, которые визуализируют процесс сборки и помогают в точном сопряжении поверхностей деталей [20, 21]. Передовые работы предлагают комбинировать гиперграфовые модели сборочных процессов с системами визуализации в среде смешанной реальности, создавая основу для интеллектуальной поддержки сложных операций [22].

Проведенный анализ литературы показывает, что современная ТПП эволюционирует в сторону создания интегрированных цифровых сред. Основу составляют автоматизированные системы и базы знаний. Над этой основой надстраиваются инструменты имитационного моделирования и цифровые двойники для анализа и оптимизации. Наиболее интерактивным слоем в этой системе становятся технологии VR/AR, обеспечивающие интуитивное взаимодействие человека с цифровыми моделями на этапах проектирования, планирования и отладки. Таким образом, наиболее перспективным направлением представляется разработка комплексных методик, обеспечивающих синергетическую интеграцию перечисленных технологий для сквозной поддержки жизненного цикла изделия.

Целью данного исследования является количественная оценка повышения эффективности технологической подготовки производства крупногабаритных изделий при использовании инструментов виртуальной реальности на основе метода имитационного моделирования.

Методика построения имитационной модели и установление временных связей ТПП

Для создания адекватной имитационной модели необходим надежный эмпирический базис. В работе предложена комплексная методика, сочетающая два источника данных.

Структурированные опросы экспертов-практиков. Для верификации данных экспериментов

и учета факторов было проведено анкетирование опытных технологов, начальников бюро ТПП и конструкторов. Эксперты оценили типичные, минимальные и максимальные длительности этапов, вероятности рискованных событий и влияние ресурсных ограничений (табл. 1).

Собранные данные были статистически обработаны. Для каждого типа этапа ТПП были определены средние значения величин длительности прохождения. На основе анализа временных связей были формализованы логические правила взаимодействия этапов и вероятности возникновения сбоя.

Контролируемые эксперименты в виртуальной среде. Участники эксперимента выполняли роли технологов в лабораторной среде, оснащенной необходимым ПО и оборудованием. Были разработаны учебно-производственные кейсы разной сложности. В ходе экспериментов варьировалось качество входных данных (чертежи с наличием и отсутствием ошибок), номенклатура изделий (отличия в форме, размерах, количестве узлов).

Фиксировались точные временные метки начала и окончания этапов, простои, время устранения ошибок и длительность. Данные о нормировании и внедрении разработанных технологических процессов собирались методом экспертной оценки специалистом с учетом специфики внедрения VR-процессов.

По окончании экспериментов была сформирована таблица данных о временных показателях ТПП с использованием среды виртуальной реальности (табл. 2).

Разработка и верификация модели в Any Logic

На основе полученных данных была разработана имитационная модель в среде AnyLogic (рис. 1). В качестве агентов на вход модели подаются 20 заданий в виде конструкторской документации на технологическое проектирование изделий различной номенклатуры. В модели не учитываются затраты времени на конструкторскую и организационную подготовку, а производится сравнение времени пребывания задания в рамках технологической подготовки производства с использованием VR-инструмента и без него.

Для создания данной модели были задействованы следующие элементы моделирования в среде AnyLogic:

блоки source, на которые задаются основные временные параметры, присваиваемые агентам-заданиям в заданном порядке из подгружаемого файла таблицы в формате .xlsx;

элемент события event, который останавливает процесс симуляции по достижению контрольной временной отметки, заданной величиной фонда времени;

переменные величины количества агентов-заданий, персонала, информации о задержках в очередях, номеров агентов, а также фонда времени, задаваемые также с помощью соответствующих значений из файла таблицы;

файл внешних данных *excelFile*, содержащий ключевые значения переменных, заданные в виде таблицы данных в формате *.xlsx*;

блоки *sink*, позволяющие собирать информацию по завершении прохождения агентами-заданиями всех блоков этапов ТПП, содержит в себе следующие формулы и методы, необходимые для построения графиков и анализа информации:

```
agent.General_time =
time() - agent.time;
General_time.add(agent.i,
agent.General_time);
General_error.add(agent.i,
agent.error);
General_queue_time.add (agent.i,
agent.General_queue_time);
```

блоки *service*, являющиеся аналогами основных этапов технологической подготовки производства изделий на предприятии, включают в себя данные о времени, которое затрачивает агент-задание при прохождении конкретного этапа; включает следующие методы:

на входе в блок

```
agent.queue_time = time();
q_queue = q_queue + 1;
Middle_queue.add(time(), q_queue);
```

на выходе из блока

```
agent.General_queue_time =
agent.General_queue_time + time() -
agent.queue_time;
q_queue = q_queue - 1;
Middle_queue.add(time(), q_queue);
```

блоки информации о персонале *производственно-го предприятия Personal*, включающие в себя данные о кадрах, задействованных непосредственно в цепочке этапов процесса ТПП;

блоки условий *Select Output*, отвечающие за обратные связи между различными этапами технологической подготовки производства в связи с обстоятельствами (наличие ошибок в задании, возникающих на предыдущих этапах разработки, внесение изменений в связи с оптимизацией технологических процессов изготовления изделия, изменения рабочих условий и др.).

Таблица 1. Временные показатели этапов технологической подготовки производства, полученные методом экспертной оценки

Table 1. Time indicators of technological preparation of production stages obtained by expert assessment method

№	Анализ исходных данных и обработка на технологичность, часы / Analysis of initial data and manufacturability processing, hours	Разработка технологической схемы сборки, часы / Development of assembly flow diagram, hours	Разработка технологического маршрута, сборки, часы / Development of assembly process route, hours	Разработка технологических операций, часы / Development of process operations, hours	Нормирование технологического процесса, часы / Standardization of the technological process, hours	Оформление технологической документации, часы / Preparation of technological documentation, hours	Организация производства и рабочих мест, часы / Organization of production and workplaces, hours	Внедрение разработанных технологических процессов и отладка всего технологического комплекса, часы / Implementation of developed technological processes and debugging of the entire technological complex, hours	Обучение персонала, часы / Personnel training, hours
1	8,33	8,56	25,44	31,9	3,15	14,3	17,55	58,14	10,2
2	11,2	5,9	28,32	48	4,56	12	11,77	50,4	9,04
3	14,28	9,36	19,72	44,46	4,52	9,9	18,56	33,9	8,34
4	9,81	7,2	13,68	41,44	3,6	18,88	16,35	54,06	4,28
5	13,8	8,8	26,4	28,86	4,44	9,63	16,35	32,7	5,9
6	9,9	8,96	25,44	31,2	4,76	15,4	10,08	39,55	5,7
7	8,26	8,72	19,08	41,4	3,3	16,65	14,04	59,67	7,84
8	10,26	5,95	15,82	39,6	4,56	18,4	14,3	38,08	4,52
9	7,49	5,85	21,42	28,35	3,48	9,28	9,36	51,98	6,36
10	7,7	9,28	18,87	29,97	3,15	16,95	18,24	31,61	5,25
11	14,4	8,88	26,16	41,04	4,68	10,8	14,28	54,29	5,35
12	11,7	5,45	23	39,24	3,33	16,24	17,6	27,10	8,8
13	10,9	5,25	24,2	26,75	3,15	13,78	16,24	47,15	6,72
14	11,9	5,75	27,12	37,76	3,27	15,6	14,04	29,7	6,78
15	6,54	9,28	13,08	45,63	3,27	14,3	14,95	61,2	8,4
16	12,54	6,36	18,88	28,25	4,48	9,6	15,4	43,68	6,84
17	7,98	6,96	28,56	36,89	4,76	14,7	11,9	44,84	4,72
18	9,72	5,75	16,66	35,97	3,15	16,1	18,72	61,6	6,84
19	11,24	8,64	23,54	42,55	3,39	15,96	18,56	55,46	7,49
20	7,77	6,01	25,2	28,89	4,76	16,8	11,9	25,2	7,35

Таблица 2. Временные показатели этапов технологической подготовки производства, полученные в результате экспериментов, проводимых с использованием VR-инструмента

Table 2. Time indicators of technological preparation of production stages obtained from experiments using a VR-tool

№	Анализ исходных данных и обработка на технологичность, часы / Analysis of initial data and manufacturability processing, hours	Разработка технологической схемы сборки, часы / Development of assembly flow diagram, hours	Разработка технологического маршрута сборки, часы / Development of assembly process route, hours	Разработка технологических операций, часы / Development of process operations, hours	Нормирование технологического процесса, часы / Standardization of the technological process, hours	Оформление технологической документации, часы / Preparation of technological documentation, hours	Организация производства и рабочих мест, часы / Organization of production and workplaces, hours	Внедрение разработанных технологических процессов и отладка всего технологического комплекса, часы / Implementation of developed technological processes and debugging of the entire technological complex, hours	Обучение персонала, часы / Personnel training, hours
1	8,92	6,46	21,74	27,49	3,26	8,14	8,61	43,81	3,42
2	10,51	5,54	11,72	32,62	2,3	14,56	8,99	41,76	4,44
3	10,5	5,68	14,51	29,87	3,88	8,98	9,72	23,61	4,61
4	10,85	4,23	14,53	39,39	3,62	14,74	11,18	45,18	3,49
5	8,24	6,94	11,83	27,45	2,77	10,2	10,7	42,45	4,1
6	5,5	6,15	15,93	26,89	2,5	8,39	10,32	42,15	6,05
7	10,46	7,87	21,53	36,83	2,29	10,42	15,09	53,8	5,82
8	9,77	7,33	21,53	37,97	3,58	9,35	10,98	39,53	6,26
9	6,48	4,69	20,23	35,1	3,92	13,67	14,06	31,5	5,17
10	10,9	5,96	18,49	27,59	2,62	7,96	14,98	32,1	3,8
11	8,53	7,81	12,6	38,94	2,11	12,7	12,59	43,3	5,13
12	5,49	7,04	12,32	26,72	2,91	14,48	7,41	53,9	5,84
13	6,22	7,46	20,19	26,75	3,59	12,33	12,75	41,04	4,01
14	10,53	4,18	18,72	31,7	2,39	8,43	7,41	49,61	3,15
15	10,03	4,23	14,59	24,93	3,47	13,56	15,74	43,23	5,96
16	6,17	7,49	21,37	27,35	2,25	10,19	7,99	51,5	5,97
17	7,59	7,7	19,96	38,47	2,3	9,82	7,75	48,81	4,86
18	11,13	7,05	16,51	33,42	2,92	11,39	14,26	28,6	7,84
19	9,36	5,97	14,76	25,29	2,39	13,82	8,88	48,1	6,47
20	6,96	5,07	17,33	24,63	2,7	9,19	11,97	46,5	3,1

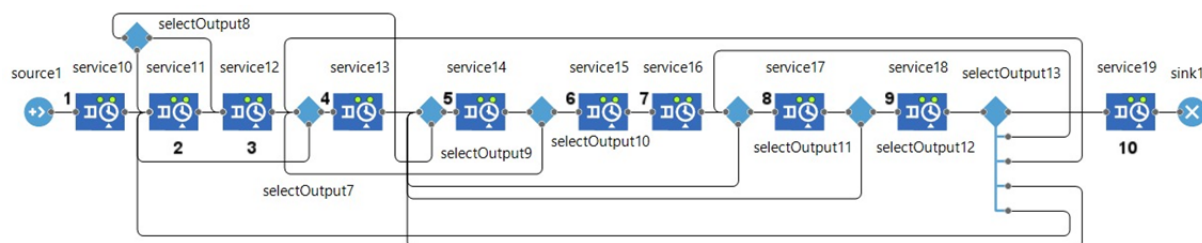


Рис. 1. Схема имитационной модели ТПП в среде AnyLogic: 1 – разработка конструкторской документации; 2 – анализ исходных данных и обработка на технологичность; 3 – разработка технологической схемы сборки; 4 – разработка технологического маршрута сборки; 5 – разработка технологических операций; 6 – нормирование технологического процесса; 7 – оформление технологической документации; 8 – организация производства и рабочих мест; 9 – внедрение разработанных технологических процессов и отладка всего технологического комплекса; 10 – обучение персонала

Fig. 1. Schematic diagram of the TPP simulation model in the AnyLogic environment: 1 - development of design documentation; 2 - analysis of initial data and manufacturability processing; 3 - development of assembly flow diagram; 4 - development of assembly process route; 5 - development of process operations; 6 - standardization of the technological process; 7 - preparation of technological documentation; 8 - organization of production and workplaces; 9 - implementation of developed technological processes and debugging of the entire technological complex; 10 - personnel training

Каждый агент-задание сохраняет в себе набор данных о времени прохождения этапов, условия активации обратных связей, коэффициентах отработки заданий в разных условиях, количестве отработанных циклов, времени простоя в очереди, общее затрачиваемое время на прохождение всей цепочки этапов ТПП и другие значения для полного анализа и синтеза графических данных в виде переменных.

Модель прошла этапы верификации (проверка корректности логики) и валидации (проверка адек-

ватности реальному процессу) с привлечением экспертов.

Результаты моделирования

По результатам работы модели были построены графики, на которых представлено распределение агентов в системе в зависимости от времени их нахождения в цикле технологической подготовки производства.

Среднее время нахождения агента в системе при использовании VR сократилось на 41 час, что со-

ставляет 19 % от времени, затрачиваемого на ТПП без инструмента VR, а количество ошибок при прохождении системы уменьшилось на 39 % (см. рис. 2)

Среднее количество агентов в очереди сократилось на 20 % (см. рис. 3).

Среднее время агента в очереди снизилось на 6,5 часов, что составило порядка 40 % от затрат вре-

мени в очереди агентов, обрабатывающихся без использования VR (см. рис. 4).

Вместе с тем доля времени агентов в модели сократилась при использовании VR с 11 % от общего времени обработки в модели до 9 % по сравнению с заданиями, проходящими обработку без использования VR.

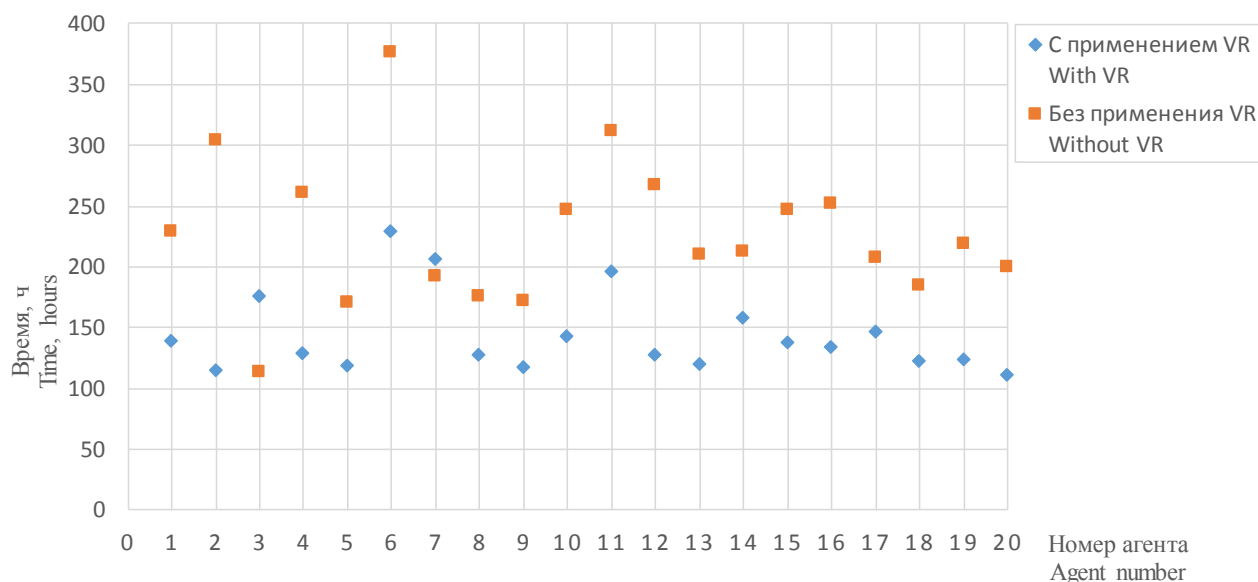


Рис. 2. График времени, затрачиваемого агентами на прохождение модели

Fig. 2. Graph of the time spent by agents to complete the model

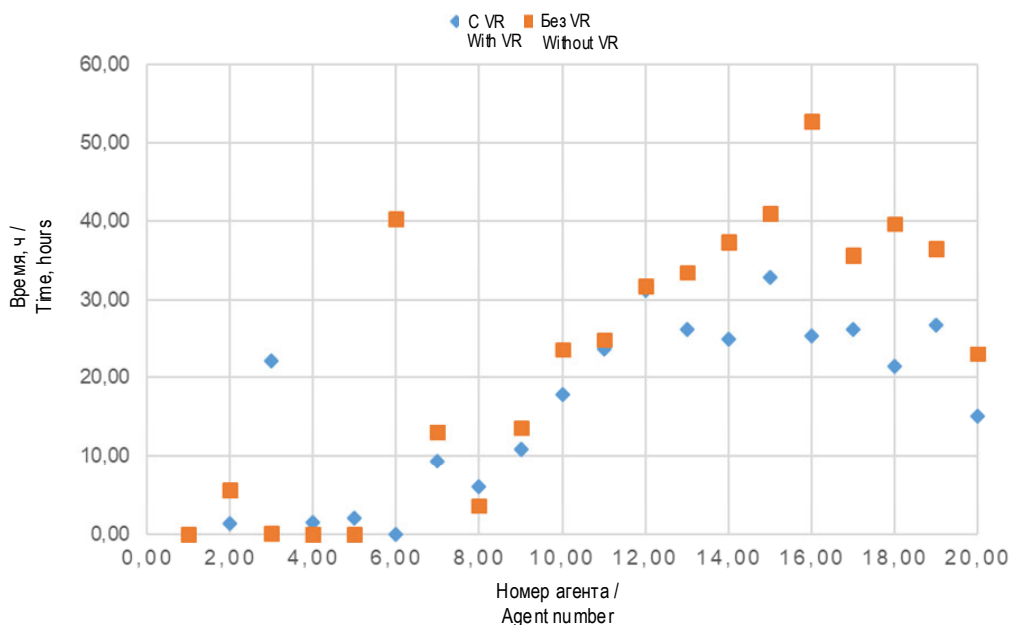


Рис. 3. График времени, затрачиваемого агентами в очереди, при отработке системы

Fig. 3. Graph of the time spent by agents in the queue during system execution

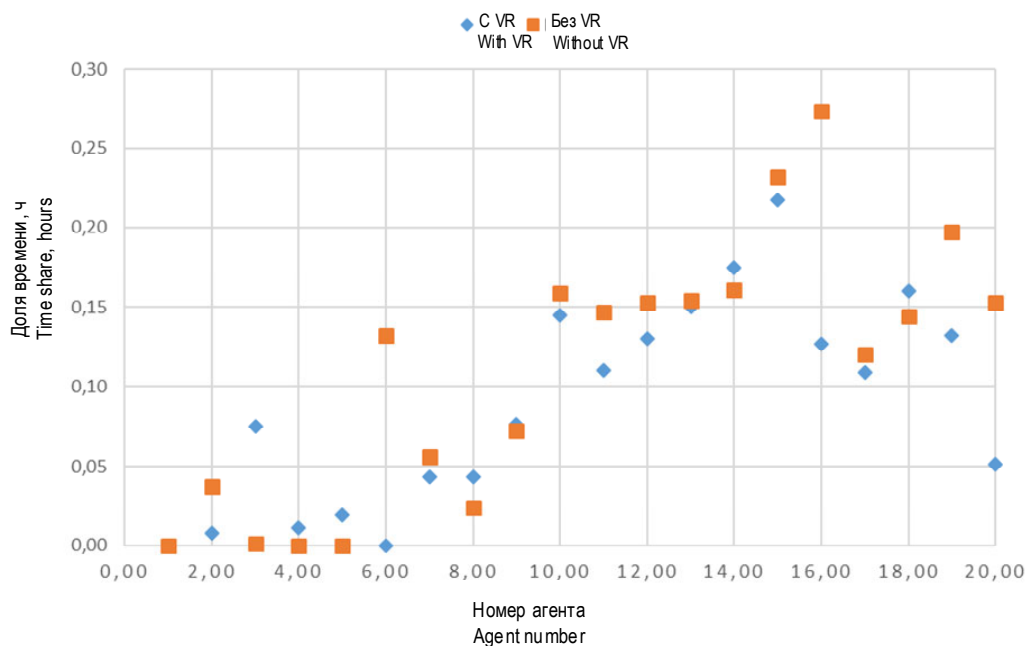


Рис. 4. График отношения времени, затрачиваемого агентом на отстаивании в очередях, к времени, затрачиваемому на прохождение всей модели

Fig. 4. Graph of the ratio of time spent by an agent waiting in queues to the time spent completing the entire model

Выводы

Интеграция имитационного моделирования и технологий виртуальной реальности при ТПП крупногабаритных изделий позволяет существенно повысить эффективность процесса проектирования. Предложенная методика комбинирования данных контролируемых экспериментов и экспертных оценок позволяет создать имитационную модель, отражающую сложную динамику временных связей между этапами ТПП.

Анализ данных показал сокращение общего времени выполнения задания на 19 %, количества ошибок – на 39 % и уменьшение времени ожидания в очередях на 40 %. Представленные результаты свидетельствуют о существенном ускорении прохождения этапов ТПП и оптимизации использования ресурсов.

Таким образом, внедрение VR-технологий оказывает значительное воздействие на оптимизацию процессов технологической подготовки производства, позволяя не только сократить продолжительность цикла подготовки, но и повысить качество процессов за счет минимизации ошибок и простоев. Это делает VR перспективным инструментом для повышения эффективности организации производства, улучшения качества процесса ТПП и ускорения вывода продукции на рынок.

Библиографические ссылки

1. Савицкий В. В. О необходимости совершенствования документооборота в технологической подготовке металлообрабатывающего производства // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2024. № 1 (148). С. 86–109.

2. Албагачиев А. Ю., Краско А. С., Радайкин Д. А. Необходимость применения автоматизированных систем в 21 веке. Предпосылки появления цифрового производства // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. № 2. С. 62–74.

3. Автоматизированная конструкторско-технологическая подготовка в условиях цифрового производства / К. П. Помпеев, О. С. Тимофеева, Е. И. Яблочников, Е. Е. Волосатова // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 1. С. 7–15.

4. Бурлаченко О. В., Оганесян О. В. Цифровая технология выбора и трансформации информации для управления и поддержки жизненного цикла изделия // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 3 (756). С. 3–13.

5. Создание автоматизированных рабочих мест на основе формализованной методики проектирования технологических процессов машиностроительных предприятий / Г. С. Жетесова [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4-1 (50). С. 214–223.

6. Ваганов Т. Р., Муравьев В. В. Интеграция технологической подготовки производства в автоматизированные системы проектирования // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 4. С. 50–58. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-20-58

7. Кордюков А. В., Савченков М. И., Чернова А. А. Адаптация алгоритма работы системы автоматизированного проектирования технологического процесса для выполнения технологической подготовки в условиях мелкосерийного и единичного производства // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 3. С. 26–32. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-3-26-32

8. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств / С. Н. Григорьев, В. А. Долгов, П. А. Никишечкин [и др.] // Вестник МГТУ имени Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2022. № 3 (142). С. 84–99.

9. Шагин А. Д. Методика определения запуска первоочередных заказов в многономенклатурном механообработывающем производстве с учетом времени технологической подготовки производства // Вестник МГТУ «Станкин». 2020. № 1 (52). С. 33–37.

10. Современные подходы к построению цифровых двойников продуктов, процессов и систем, включая производственно-логистические системы машиностроительных предприятий / В. А. Долгов, П. А. Никишечкин, С. С. Ивагин [и др.] // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2023. № 2. С. 88–96.

11. Богинский А. И., Чурсин А. А. Цифровые модели для оптимизации производственно-технологических процессов // Вестник машиностроения. 2020. № 2. С. 63–67.

12. Лушкин А. А., Круглов П. В., Болотина И. А. Совершенствование методического обеспечения для проектирования технологического процесса узловой сборки летательных аппаратов на основе применения гиперграфов ограничений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. № 11 (764). С. 45–52.

13. Сергеев С. В., Луценко А. В., Веретенников С. А. Использование сетевых матричных структур для конструкторско-технологической подготовки производства // Сварочное производство. 2021. № 5. С. 56–60.

14. Структурно-функциональное представление платформы онтологического моделирования процесса технологической подготовки производства / Рад. Г. Бильданов, Е. В. Сельцов, Раф. Г. Бильданов, С. Н. Ларин // Автоматизация в промышленности. 2023. № 5. С. 44–48.

15. Шайхутдинова И. И., Гайнцева Е. С. Применение информационных технологий в литейном производстве // Литейное производство. 2024. № 1. С. 31–36.

16. Нуралиев Ф. А. оғлы, Иванов И. А. Цифровые технологии в литейном производстве // Литейное производство. 2020. № 8. С. 20–22.

17. Корюхин В. Л., Шиляев С. А., Щенятский А. В. Исследование и разработка рекомендаций по совершенствованию технологии изготовления и подготовки к эксплуатации твердосплавного режущего инструмента // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 90–100. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-90-100

18. Решетникова Е. П., Бочкарев П. Ю. Инновационный подход к разработке технологических процессов изготовления изделий в многономенклатурном производстве // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2021. № 2 (56). С. 35–46.

19. Кудрявцев И. В., Кутин А. А. Повышение эффективности технологической подготовки производства машиностроительных изделий с использованием технологий виртуальной реальности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2025. Т. 27, № 3-2 (125). С. 382–388. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-382-388. EDN UXRWYQ

20. Лим А. А., Кудрявцев И. В., Кутин А. А. Разработка инструмента смешанной реальности для реализации процесса сопряжения поверхностей деталей при сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2024. № 7. С. 294–298. DOI: 10.36652/0202-3350-2024-25-7-294-298

21. Лим А. А., Кутин А. А., Пирогов В. В. Разработка инструмента дополненной реальности для визуальной поддержки сборочных процессов в машиностроении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2023. № 10. С. 435–440. DOI: 10.36652/0202-3350-2023-24-10-435-440. EDN HHZGC

22. Лим А. А., Кутин А. А. Гиперграфовый подход к моделированию сборочных процессов: синтез с нодовыми системами и имплементация в среде смешанной реаль-

ности // Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 2(73). С. 80–89. EDN REPEIA

References

1. Savitsky V.V. (2024) [On the Need to Improve Document Flow in Technological Preparation of Metalworking Production]. *Vestnik MGTU imeni N. E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, no. 1 (148), pp. 86-109 (in Russ.).

2. Albagachiev A.Yu., Krasko A.S., Radaykin D.A. (2023) [The Need to Use Automated Systems in the 21st Century. Prerequisites for the Emergence of Digital Production]. *Kuznechno-Shtampovoye Proizvodstvo. Obrabotka Materialov Davleniem*, no. 2, pp. 62-74 (in Russ.).

3. Pompeev K.P., Timofeeva O.S., Yablochnikov E.I., Volosatova E.E. (2023) [Automated Design and Technological Preparation in the Context of Digital Production]. *Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Priborostroenie*, vol. 66, no. 1, pp. 7-15 (in Russ.).

4. Burlachenko O.V., Oganeyan O.V. (2023) [Digital Technology for Selecting and Transforming Information for Managing and Supporting the Product Life Cycle]. *Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Mashinostroenie*, no. 3 (756), pp. 3-13 (in Russ.).

5. Zhetesova G.S. [et al.] (2020) [Creation of Automated Workplaces Based on a Formalized Methodology for Designing Technological Processes of Mechanical Engineering Enterprises]. *Morskije Intellektual'nye Tekhnologii*, no. 4-1 (50), pp. 214-223 (in Russ.).

6. Vagapov T.R., Muravyov V.V. (2023) [Integration of Technological Preparation of Production into Automated Design Systems]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 26, no. 4, pp. 50-58. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-4-20-58 (in Russ.).

7. Kordyukov A.V., Savchenkov M.I., Chernova A.A. (2023) [Adaptation of the Algorithm of the Automated Design System for the Technological Process for Performing Technological Preparation in the Conditions of Small-Batch and Single-Piece Production]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 26, no. 3, pp. 26-32. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-3-26-32 (in Russ.).

8. Grigoriev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A. [et al.] [Simulation Modeling of Production Processes of Various Types of Mechanical Engineering Production]. *Vestnik MGTU imeni N. E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, no. 3 (142), pp. 84-99 (in Russ.).

9. Shashin A.D. (2020) [Methodology for Determining the Launch of Priority Orders in a Multi-Product Mechanical Engineering Production Taking into Account the Time of Technological Preparation of Production]. *Vestnik MGTU "Stankin"*, no. 1 (52), pp. 33-37 (in Russ.).

10. Dolgov V.A., Nikishechkin P.A., Ivashin S.S. [et al.] [Modern Approaches to Building Digital Twins of Products, Processes, and Systems, Including Production and Logistics Systems of Mechanical Engineering Enterprises]. *Problemy Mashinostroeniya i Avtomatizacii*, no. 2, pp. 88-96 (in Russ.).

11. Boginsky A.I., Chursin A.A. (2020) [Digital Models for Optimizing Production and Technological Processes]. *Vestnik Mashinostroeniya*, no. 2, pp. 63-67 (in Russ.).

12. Lushkin A.A., Kруглов P.V., Болотина I.A. (2023) [Improving Methodological Support for Designing the Technological Process of Aircraft Assembly Based on the Application of Constraint Hypergraphs]. *Bulletin Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Mashinostroenie*, no. 11 (764), p. 45-52 (in Russ.).

13. Sergeev S.V., Lutsenko A.V., Veretennikov S.A. (2021) [Using Network Matrix Structures for Design and Technological Preparation of Production]. *Svarochnoe Proizvodstvo*, no. 5, pp. 56-60 (in Russ.).

14. Bildanov Rad.G., Seltsov E.V., Bildanov Raf.G., Larin S.N. (2023) [Structural and Functional Representation of the Platform for Ontological Modeling of the Process of Technological Preparation of Production]. *Avtomatizatsiya v Promyshlennosti*, no. 5, pp. 44-48 (in Russ.).

15. Shaikhutdinova I.I., Gaintseva E.S. (2024) [Application of Information Technologies in Foundry Production]. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 1, pp. 31-36 (in Russ.).

16. Nuraliev F.A. ogly, Ivanov I.A. (2020) [Digital technologies in foundry production]. *Litejnoe Proizvodstvo*, no. 8, pp. 20-22 (in Russ.).

17. Koryukhin V.L., Shilyaev S.A., Shchenyatsky A.V. (2024) [Research and development of recommendations for improving the technology of manufacturing and preparation for operation of carbide cutting tools]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 90-100. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-90-100 (in Russ.).

18. Reshetnikova E.P., Bochkarev P.Yu. (2021) [Innovative approach to the development of technological processes for the manufacture of products in multi-product production]. *Vektor Nauki Tol'yatinskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, no. 2 (56), pp. 35-46 (in Russ.).

19. Kudryavtsev I.V., Kutin A.A. (2025) [Improving the Efficiency of Technological Preparation for the Production of Mechanical Engineering Products Using Virtual Reality Technologies]. *Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Centra Rossijskoj Akademii Nauk*, vol. 27, no. 3-2 (125), pp. 382-388. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3 (2)-382-388. EDN UXRWYQ (in Russ.).

20. Lim A.A., Kudryavtsev I.V., Kutin A.A. (2024) [Development of a Mixed Reality Tool for the Implementation of the Process of Mating Part Surfaces during Assembly]. *Sbornik v Mashinostroenii, Priborostroenii*, no. 7, pp. 294-298. DOI: 10.36652/0202-3350-2024-25-7-294-298 (in Russ.).

21. Lim A.A., Kutin A.A., Pirogov V.V. (2023) [Development of an augmented reality tool for visual support of assembly processes in mechanical engineering]. *Sbornik v Mashinostroenii, Priborostroenii*, no. 10, pp. 435-440. DOI: 10.36652/0202-3350-2023-24-10-435-440. EDN HIHZGC (in Russ.).

22. Lim A.A., Kutin A.A. (2025) [Hypergraph approach to modeling assembly processes: synthesis with node systems and implementation in a mixed reality environment]. *Vestnik MGTU "Stankin"*, no. 2 (73), pp. 80-89. EDN REPEIA (in Russ.).

Simulation Modeling of Large-Scale Product Assembly Processes Using Virtual Reality

I.V. Kudryavtsev, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

A.A. Kutin, MIREA - Russian Technological University; Moscow State Technological University "STANKIN", Moscow, Russia

A.V. Kislova, MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russia

The study focuses on solving the current problem of planning the technological preparation of production (TPP) for large-scale products, that is characterized by high uncertainty, interdependence of stages, and competition for resources. Traditional deterministic methods, based on averaged estimates, often lead to schedule overruns and inefficient use of production capacity. The article proposes an approach to TPP optimization based on the integration of simulation modeling and virtual reality (VR) technologies. A comprehensive methodology has been developed, involving data collection and analysis by means of two methods: structured surveys of expert practitioners and controlled experiments in which participants performed technological design tasks in an interactive VR environment. The obtained empirical data on operation durations, failure probabilities, and logical dependencies served as the basis for building a detailed simulation model in the AnyLogic environment. The model architecture includes elements responsible for generating tasks, performing technological operations considering personnel availability, implementing feedback loops to account for design changes, and collecting resulting statistics. This structure allows for adequate reflection of the dynamics and stochasticity of the full TPP cycle within the adopted assumptions. The results of the simulation sessions were implemented to analyze the process time characteristics, the dynamics of queue formation and resolution, and the share of non-productive costs. The results demonstrate a significant positive effect from the use of VR tools at the technological preparation stage, expressed in the reduction of the total cycle time, decrease in the number of errors, and optimization of waiting time. This indicates an increase in the overall process efficiency, planning reliability, and improvement of resource utilization. The proposed approach has practical value for machine-building enterprises seeking to reduce time-to-market for new products and increase production flexibility.

Keywords: technological preparation of production, simulation modeling, time dependence, virtual reality.

Получено 18.12.2025

Образец цитирования

Кудрявцев И. В., Кутин А. А., Кислова А. В. Имитационное моделирование технологических процессов сборки крупногабаритных изделий с применением виртуальной реальности // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2026. Т. 29, № 1. С. 27–34. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-27-34

For Citation

Kudryavtsev I.V., Kutin A.A., Kislova A.V. (2026) [Simulation Modeling of Large-Scale Product Assembly Processes Using Virtual Reality]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 29, no. 1, pp. 27-34. DOI: 10.22213/2413-1172-2026-1-27-34 (in Russ.).