

На правах рукописи



ЛИМ АЛЕКСАНДР АЛИКОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ СБОРКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ДОПОЛНЕННОЙ
РЕАЛЬНОСТИ**

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре цифровых и аддитивных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва.

Научный руководитель: **Кутин Андрей Анатольевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры цифровых и аддитивных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва

Официальные оппоненты: **Галиновский Андрей Леонидович**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Семенов Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инновационное машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва

Защита состоится 23 июня 2026 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/lim-aleksandr-alikovich/index.php>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.332.01, к.т.н.



Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Решение научно-технической задачи повышения производительности сборочных процессов в машиностроении с применением современных методов дополненной реальности (AR) является актуальной и значимой для современного производства. Данная работа соответствует перспективному направлению Technet – программы национальной технологической инициативы, нацеленной на развитие передовых технологий и повышение конкурентоспособности отечественного машиностроения на основе цифровой трансформации производства.

Современные машиностроительные предприятия сталкиваются с необходимостью повышения производительности и снижения затрат в условиях растущей конкуренции и требований к качеству продукции. Традиционные методы построения технологических процессов сборки не всегда способны обеспечить необходимый уровень эффективности. Применение AR позволяет значительно сократить штучно-калькуляционное время сборки, прежде всего за счет уменьшения вспомогательного и подготовительно-заключительного времени.

Сборка сложных машиностроительных изделий характеризуется длительным циклом технологического процесса при необходимости обеспечения высокой точности. Это требует от операторов высокого уровня квалификации и строгого соблюдения последовательности операций сборки. Технологии AR позволяют упростить выполнение сложных задач, предоставляя визуальные подсказки и интерактивные инструкции, что значительно сокращает вспомогательное и подготовительно-заключительное время за счет исключения обращений к документации и автоматической визуализации последовательности действий.

AR-технологии предоставляют новые возможности для интерактивного и эффективного обучения, позволяя персоналу быстрее осваивать сложные операции и повышать свою квалификацию. Это особенно важно в условиях, когда требуется быстрое расширение производственных мощностей и привлечение новых работников.

В качестве базового объекта исследования в работе рассматриваются процессы узловой сборки машиностроительных изделий мелкосерийного и единичного производства, характеризующиеся пространственной сложностью сопряжений и значительной долей ручных операций.

В качестве производственного примера исследован процесс сборки функциональных узлов аддитивной машины, включающий операции пространственного позиционирования компонентов, сопряжения направляющих элементов, установки приводов и последующей юстировки. Анализ показал, что именно для данного класса сборочных процессов наибольший эффект достигается за счет активной информационной поддержки оператора и адаптивного управления последовательностью операций, что обосновывает выбор метода сборки с применением инструментов дополненной реальности и формализованного описания процесса.

Степень разработанности проблемы. Значительный вклад в развитие теории и практики сборочных процессов в машиностроении внесли работы отечественных ученых: Корсакова В.С., Новикова М.П., Замятина В.К., Бойцова В.В., Дальского А.М., Сулова А.Г., Базрова Б.М., Гусева А.А., Вартанова М.В. и др. В их трудах сформулированы основные принципы проектирования технологических процессов сборки, разработаны методы обеспечения точности, исследованы вопросы нормирования трудоемкости и автоматизации сборочных операций.

Вопросам разработки и применения технологий дополненной реальности посвящены работы Azuma R.T., Schmalstieg D., Höllerer T., положивших теоретические основы AR-систем. Применение дополненной реальности в производственных и сборочных процессах исследовалось в работах Nee A.Y.C., Ong S.K., Fiorentino M., Uva A.E., Funk M., Henderson S.J., Feiner S., Wang X. и др. Однако большинство указанных исследований сосредоточено на частных случаях внедрения AR-технологий и не предлагает формализованных методик проектирования AR-инструментов, учитывающих специфику технологических процессов машиностроительной сборки.

В современной научно-технической литературе вопросу проектирования сборочных процессов с применением современных методов дополненной реальности уделяется недостаточно внимания.

В этой связи представляется актуальной, имеющей важное научное и практическое значение работа, направленная на повышение эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий на основе применения инструментов дополненной реальности.

Объект исследования – технологический процесс сборки машиностроительных изделий.

Предмет исследования – взаимосвязь составляющих штучно-калькуляционного времени сборки с применением инструмента дополненной реальности в условиях мелкосерийной ручной сборки неполной взаимозаменяемости.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности технологического процесса сборки машиностроительных изделий на основе сокращения штучно-калькуляционного времени путем применения инструмента дополненной реальности в условиях мелкосерийной сборки по методу неполной взаимозаменяемости.

Основные задачи исследования:

1. Анализ литературных источников, посвященных теме повышения производительности сборки машиностроительных изделий с применением цифровых инструментов.

2. Исследование закономерностей и установление связей между составляющими штучно-калькуляционного времени сборки при традиционном методе и при применении инструмента дополненной реальности.

3. Формализация сборочных операций в виде нодовой структуры в системе гиперграфов.

4. Разработка и внедрение методики применения инструмента дополненной реальности для сокращения подготовительно-заключительного времени при

сборке машиностроительных изделий в условиях мелкосерийного производства.

Научная новизна:

1. Установлены временные связи в технологических процессах сборки изделия традиционным способом и с применением инструмента дополненной реальности, позволяющие существенно повысить производительность процесса сборки.

2. Разработан метод формализации сборочных процессов на основе динамических гиперграфов с адаптивным изменением весовых коэффициентов, позволяющий автоматически корректировать последовательность операций в режиме реального времени.

3. Разработана математическая модель процесса сборки машиностроительных изделий с применением инструмента дополненной реальности.

Теоретическая значимость:

1. Установленные временные связи в технологических процессах сборки с применением инструмента дополненной реальности и без, позволяющие количественно оценить его влияние на составляющие штучно-калькуляционного времени.

2. Метод формализации сборочных процессов на основе динамических гиперграфов с адаптивными весовыми коэффициентами.

3. Математическая модель процесса сборки с применением инструмента дополненной реальности.

Практическая значимость работы состоит в разработанной методике применения инструмента дополненной реальности для повышения эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий.

Методы исследования. Решение поставленных задач базируется на применении основ технологии машиностроения при проведении теоретических и экспериментальных исследований. В процессе работы использовались методы теории графов и гиперграфов для формализации сборочных процессов. Это позволило представить последовательность операций в виде математической модели с адаптивными весовыми коэффициентами, которые изменяются в зависимости от выявляемых ошибок. Для определения оптимальной последовательности сборочных операций применялись методы дискретной математики и топологической сортировки, а также модифицированный алгоритм Краскала, адаптированный для работы с гиперграфами.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Факторы и временные связи технологического процесса сборки машиностроительных изделий с учетом применения инструмента AR.

2. Метод формализации сборочных процессов на основе динамических гиперграфов с адаптивным изменением весовых коэффициентов в зависимости от выявляемых ошибок

3. Методика применения инструмента дополненной реальности для повышения эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий

Степень достоверности и обоснованность научных положений и выводов подтверждается корректным применением математического аппарата и инструментов AR, а также результатами расчетов, экспериментального тестирования и практической апробацией результатов работы.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Оптические технологии, материалы и системы», РТУ МИРЭА. Москва, 2022-2024; на национальной научно-технической конференции «Перспективные материалы и технологии», РТУ МИРЭА. Москва, 2024-2025; на международной научно-практической конференции «Компьютерное проектирование в электронике», БГУИР. Минск, 2024; на IX Международном научно-техническом семинаре «Современные технологии сборки», Политех. Москва, 2025; на IX Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении», ИМАШ РАН. Москва, 2025.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.5.6 «Технология машиностроения»:

п. 3 Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения,

п. 10 Цифровые технологические процессы и производства в машиностроении.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 12 научных работах, из них 4 в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, общим объемом 3,09 п.л.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка используемой литературы из 91 наименования. Содержит 125 страниц, в том числе 30 иллюстраций и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы цель и задачи работы, показана ее актуальность, сформулированы научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В Главе 1 проведен анализ структуры штучно-калькуляционного времени сборочных операций, выявлены резервы его сокращения и обоснован выбор дополненной реальности как инструмента, воздействующего на подготовительно-заключительное время.

В первой главе рассматриваются труды российских ученых в области сборочных процессов в машиностроении и анализируются существующие проблемы, препятствующие повышению эффективности производства. Отмечаются работы Варганова М.В., Гусева А.А., Базрова Б.М. и др. Сборка остается одной из наиболее трудоемких операций в технологическом процессе изготовления машиностроительных изделий, на которую в зависимости от сложности конструкции может приходиться от тридцати до пятидесяти процентов общей трудоемкости.

Анализ производственной практики показывает, что традиционные методы технологических процессов сборки, основанные на использовании бумажной документации и визуальных инструкций, характеризуются высокой долей подготовительно-заключительного и вспомогательного времени, что во многом определяется необходимостью постоянного обращения к технологической документации.

Дополнительную проблему представляет обучение персонала выполнению сложных сборочных операций. Традиционные методики предполагают изучение технической документации, просмотр обучающих видеоматериалов и наблюдение за работой опытных специалистов. Однако такой подход требует значительного времени. При этом даже после завершения обучения подготовительно-заключительное время у молодого специалиста остается существенно выше, чем у опытного работника.

В последние годы активно развиваются технологии дополненной и смешанной реальности, которые находят применение в различных отраслях промышленности. Зарубежные исследования (Nee A.Y.C., Ong S.K., Fiorentino M., Funk M., Henderson S.J., Feiner S. и др.) демонстрируют потенциал этих технологий для повышения эффективности производственных процессов. По данным ряда работ, применение AR-систем позволяет сократить время выполнения операций на тридцать-сорок процентов за счет визуализации последовательности действий непосредственно в рабочей зоне оператора. При этом снижается когнитивная нагрузка, поскольку оператору не требуется запоминать сложные последовательности операций или постоянно обращаться к документации.

Анализ существующих работ показывает, что несмотря на значительный интерес к применению технологий дополненной реальности в промышленности, в научно-технической литературе недостаточно работ, посвященных формализованным методикам разработки AR-инструментов для машиностроительной сборки. Большинство публикаций описывает частные случаи применения коммерческих платформ, но не предлагает универсальных подходов к проектированию таких систем с учетом специфики технологических процессов. Отсутствуют также количественные оценки эффективности применения AR-технологий, полученные в условиях, максимально приближенных к реальному производству.

Существующие подходы к повышению эффективности сборки через автоматизацию и роботизацию эффективны для крупносерийного производства, но имеют существенные ограничения при работе с малыми партиями изделий. Высокие затраты на создание специализированного оборудования делают полную автоматизацию экономически нецелесообразной для единичного и мелкосерийного производства. При этом необходимость частой переналадки при смене номенклатуры снижает общую эффективность автоматизированных систем.

Таким образом, существует необходимость в разработке методики применения инструментов дополненной реальности, которая обеспечивала бы автоматизированное формирование AR-приложений на основе анализа сборочной документации и учитывала специфику машиностроительного производства. Такая методика должна включать формализованный подход к представлению сбороч-

ных процессов в виде структуры, пригодной для реализации в среде дополненной реальности, а также механизмы интеллектуальной поддержки оператора при выполнении сборочных операций.

Глава 2 посвящена исследованию формализации сборочного чертежа в гиперграфовую структуру для внедрения в нодовую систему

Был применен метод формализации сборочного чертежа через динамический гиперграф. Модель графа определяется как $G(t)=(V(t), E(t))$, где:

- $V(t)$ – множество узлов, соответствующих этапам сборки.

- $E(t)$ – множество направленных ребер, отражающих зависимости между узлами.

Каждому ребру $e_{ij} \in E(t)$ связывающему узлы v_i и v_j , присваивается вес w_{ij} , который определяет приоритет перехода. При обнаружении ошибки вес модифицируется:

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij} - \alpha \cdot \delta,$$

где:

- α – коэффициент обучения (например, $\alpha = 0,1$),

- δ – индикатор ошибки ($\delta = 1$ при ошибке, $\delta = 0$ иначе).

Если w_{ij} опускается ниже порогового значения w_{\min} , ребро e_{ij} временно блокируется, а система активирует корректирующий узел c_k .

Для описания временных связей сборочного процесса каждая вершина гиперграфа v_i рассматривается как технологическая операция, характеризующаяся длительностью выполнения t_i . В общем виде время сборки представляется как

$$\begin{aligned} T_{\text{шк}} &= T_{\text{шт}} + \frac{T_{\text{пз}}}{n} = T_{\text{оп}} + T_{\text{об}} + T_{\text{отд}} + \frac{T_{\text{пз}}}{n} = \\ &= T_o + T_v + T_{\text{об}} + T_{\text{отд}} + \frac{T_{\text{пз}}}{n}, \end{aligned} \quad (1)$$

где T_o – основное время выполнения операций, T_v – вспомогательное время, $T_{\text{об}}$ – время на обслуживание, $T_{\text{отд}}$ – время на отдых, $T_{\text{пз}}$ – подготовительно-заключительное время на деталь, n – число деталей в партии.

Для разработки модели структурирования сборочных чертежей на основе гиперграфов предлагается следующий алгоритм:

1. Анализ сборочного чертежа и выделение основных компонентов (деталей и подборок).

2. Определение взаимосвязей между компонентами.

3. Создание вершин гиперграфа, соответствующих выделенным компонентам.

4. Формирование гиперребер, отражающих функциональные связи между компонентами.

5. Присвоение весов гиперребрам в соответствии с приоритетом сборки.

Математически, процесс создания гиперграфа можно описать следующим образом:

Пусть $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ - множество компонентов изделия. Тогда гиперграф $H = (V, E)$ формируется так, что: $V = C$, $E = \{e_i \mid e_i \subseteq C, e_i \text{ представляет функциональную связь между компонентами}\}$.

Каждому гиперребру e_i присваивается вес w_i , отражающий приоритет сборки соответствующей группы компонентов.

Для формализации гиперграфовой модели сборочного чертежа введем следующие обозначения:

$H = (V, E)$ – гиперграф, представляющий сборочный чертеж $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество вершин, соответствующих компонентам изделия $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ – множество гиперребер, представляющих функциональные связи $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ – множество весов гиперребер.

Определим матрицу инцидентности A размером $n \times m$:

$A = (a_{ij})$, где $a_{ij} = \{1, \text{ если } v_i \in e_j, 0, \text{ в противном случае}\}$.

Введем вектор весов $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$.

Тогда процесс сборки можно представить как последовательность операций, соответствующих гиперребрам, упорядоченным по убыванию их весов.

Пусть $N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ – множество нод в Unity, соответствующих этапам сборки. Определим функцию преобразования $f: E \rightarrow N$, которая каждому гиперребру ставит в соответствие ноду:

$f(e_i) = n_j$, где n_j представляет операцию сборки компонентов из e_i .

Для описания связей между нодами введем матрицу смежности B размером $k \times k$:

$B = (b_{ij})$, где $b_{ij} = \{1, \text{ если между } n_i \text{ и } n_j \text{ существует направленная связь}, 0, \text{ в противном случае}\}$.

Процесс преобразования гиперграфа в нодовую структуру можно описать следующей системой уравнений:

1. $\forall e_i \in E, \exists n_j \in N: f(e_i) = n_j$.

2. $\forall v_i \in V, \exists n_k \in N: g(v_i) = n_k$, где g - функция, сопоставляющая вершинам гиперграфа соответствующие ноды.

3. $\forall e_i, e_j \in E: w_i > w_j \Rightarrow f(e_i) \text{ предшествует } f(e_j) \text{ в нодовой структуре}$.

4. $\sum_{i=1}^m |f(e_i)| = |N| - 1$, где $|f(e_i)|$ - количество нод, созданных для гиперребра e_i .

Для оптимизации последовательности сборки предлагается использовать метод минимального остовного дерева на гиперграфе. Определим функцию стоимости $c(e_i)$ для каждого гиперребра e_i , которая учитывает следующие факторы:

1. Количество компонентов в гиперребре: $|e_i|$

2. Сложность сборки компонентов: $s(e_i)$

3. Время выполнения операции: $t(e_i)$

$$c(e_i) = \alpha|e_i| + \beta s(e_i) + \gamma t(e_i),$$

где α, β, γ - весовые коэффициенты, определяемые экспериментально.

Задача оптимизации сводится к нахождению такого подмножества гиперребер $E^* \subseteq E$, что:

1. $\cup (e_i \in E^*) e_i = V$.

2. $\sum (e_i \in E^*) c(e_i) \rightarrow \min$.

Для решения этой задачи предлагается использовать модифицированный алгоритм Краскала для гиперграфов:

1. Отсортировать гиперребра по возрастанию стоимости $c(e_i)$
2. Инициализировать пустое множество E^*
3. Для каждого гиперребра e_i в отсортированном списке: а. Если $e_i \cup E^*$ не образует цикл, то добавить e_i в E^*
4. Повторять шаг 3, пока все вершины не будут включены в E^*

Полученное множество E^* определяет оптимальную последовательность сборки.

В работе был разработан корректирующий алгоритм, который адаптируется и показывает необходимое количество визуальных подсказок в зависимости от частоты совершенных ошибок оператором (Рис. 1). Данный процесс делится на 3 этапа:

1. Сбор данных: AR-гарнитура фиксирует положение компонентов в пространстве.

2. Сравнение с эталоном: для каждого узла v_i вычисляется степень отклонения d_i :

$$d_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \|x_k^{real} - x_k^{model}\|,$$

где x_k – координаты k -го компонента, N – количество контрольных точек.

3. Принятие решения:

Если $d_i > d_{threshold}$, система генерирует корректирующий узел s_k (Таблица 1). Граф модифицируется: $V(t+1)=V(t) \cup \{s_k\}$, $E(t+1)=E(t) \cup \{e_{ik}, e_{kj}\}$.

Таблица 1. Пример матрицы-переходов

Текущий узел	Целевой узел	Вес	Статус
V3	V4	0.8	Активно
V3	C1	0.5	Резерв

При ошибке система переключается на резервное ребро e_{31} , перенаправляя оператора к s_1 .

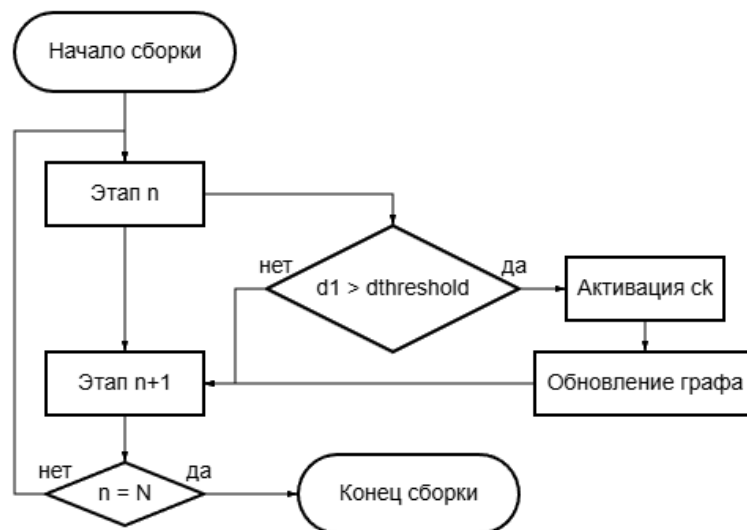


Рис. 1. Блок-схема процесса адаптации

Частотность ошибок формализуется в матрице наблюдений M , где M_{kl} – количество случаев ошибки типа k на этапе l . На основе M система корректирует веса ребер:

$$w_{ij} = w_{ij} - \beta \cdot M_{kl},$$

где β – коэффициент адаптации ($\beta = 0,05$).

В результате исследования разработан метод формализации сборочных процессов на основе теории динамических гиперграфов, который позволяет представить последовательность операций в виде математической модели, пригодной для реализации в среде дополненной реальности. Предложенный подход основан на представлении сборочного чертежа в виде структуры, где вершины соответствуют компонентам изделия, а гиперребра отражают функциональные связи между ними. Каждому гиперребру присваивается весовой коэффициент, определяющий приоритет выполнения соответствующей операции, при этом веса динамически изменяются на основе анализа возникающих ошибок. Разработан специализированный алгоритм автоматизированного преобразования гиперграфовой модели в нодовую структуру Unity на основе топологической сортировки, а также модифицированный алгоритм Краскала для гиперграфов, позволяющий найти оптимальную последовательность сборочных операций с учетом всех ограничений и зависимостей. Предложенное математическое описание включает формализацию условий блокировки проблемных переходов и активации корректирующих действий, что обеспечивает автоматическую адаптацию системы к уровню квалификации конкретного оператора.

В Главе 3 были проведены экспериментальные исследования влияния внедрения инструмента дополненной реальности и гиперграфовой структуры сборочных узлов на составляющие штучно-калькуляционного времени сборки.

Для апробации результатов исследования была собрана установка, включающая 3 основных компонента: аппаратное обеспечение, программное обеспечение, рабочая зона с компонентами сборки (Рис. 2).

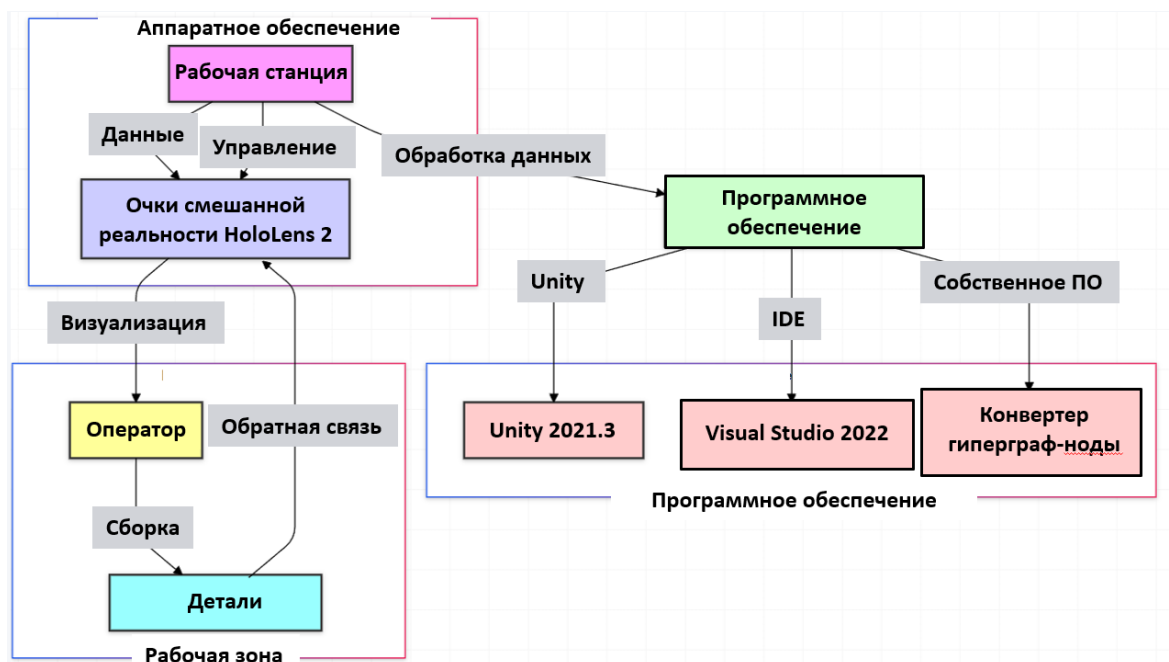


Рис. 2. Схема установки для проведения эксперимента

Формализованный метод создания гиперграфов из сборочного чертежа был применен на экспериментальной установке и реализована система фантомных объектов для визуальной помощи сборщика (Рис. 3).

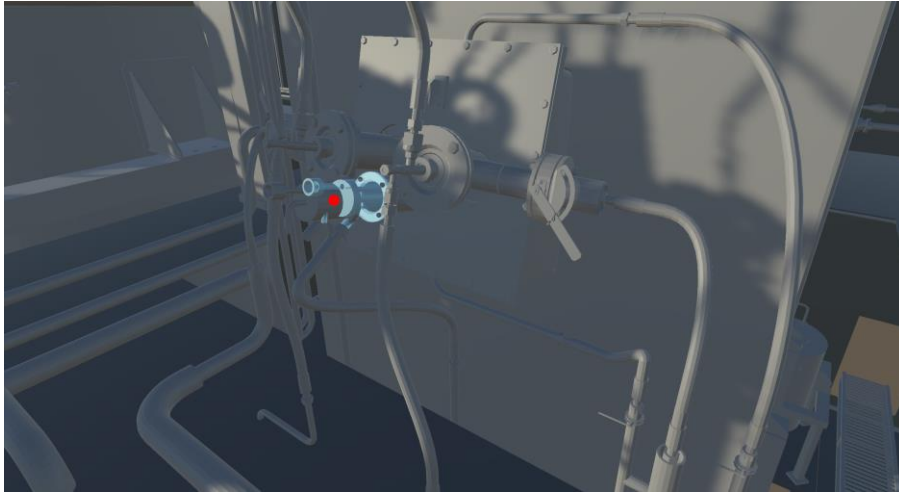


Рис. 3. Система визуального сопровождения объекта-фантома

Ключевым элементом предложенного подхода является система фантомных объектов, обеспечивающая точное позиционирование компонентов в пространстве. Для каждого физического компонента создается виртуальный "фантом", определяющий его целевое положение. Состояние системы в момент времени t описывается набором переменных: $H(t) \in \{0,1\}$ – индикатор нахождения объекта в руке оператора, $P(t) \in \{0,1\}$ – индикатор контакта с фантомом, $x(t) \in \mathbb{R}^3$ – текущая позиция объекта, $q(t) \in SO(3)$ – текущая ориентация объекта.

Динамика системы определяется условием возврата к фантому $C_r(t) = \neg H(t) \wedge P(t)$, которое активируется при отпускании объекта в зоне фантома. Позиция объекта обновляется согласно уравнению:

$$x(t+\Delta t) = H(t) \cdot x_h(t) + [C_r(t) \wedge D(x(t), x_p)] \cdot x_p + [-(H(t) \vee (C_r(t) \wedge D(x(t), x_p)))] \cdot x(t),$$

где $D(x(t), x_p) = \|x(t) - x_p\| \geq \varepsilon$ – условие превышения порогового расстояния $\varepsilon = 0.01$ м.

Корректность ориентации определяется сопоставлением текущего кватерниона $q(t)$ с целевым q_p : система классифицирует ориентацию как верную ($O = 1$) или неверную ($O = 0$) и визуально информирует оператора о необходимости поворота при сопряжении поверхностей деталей (Рис. 4).

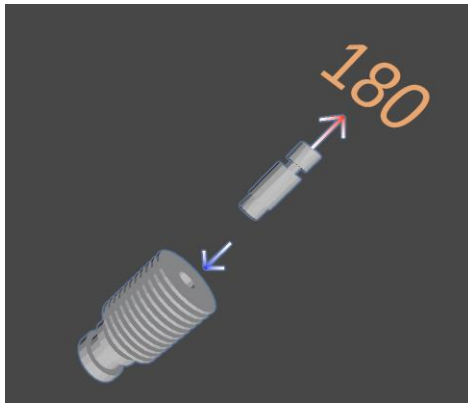


Рис. 4. Визуализация индикатора корректности ориентации компонента относительно заданной оси сопряжения

Интеграция гиперграфовой модели с динамической системой осуществляется через сопоставление каждой ноде p_i набора параметров фантома $\Phi_i = (x_{pi}, q_{pi})$. Последовательность активации фантомов определяется топологической сортировкой гиперграфа с учетом весовых коэффициентов. Операция считается завершенной при одновременном выполнении двух условий: $\|x(t) - x_p\| < \varepsilon$ и $O(t) = 1$, где ε – допуск по позиции, $O(t)$ – бинарный признак корректности ориентации.

Экспериментальная апробация проводилась с участием 10 операторов различной квалификации. Результаты показали сокращение среднего времени сборки с 68.7 до 42.3 минут (улучшение на 38.4%), снижение количества ошибок с 3.8 до 1.2 на одну сборку (улучшение на 68.4%) и сокращение времени обучения с 21 до 5 дней.

Анализ кривых обучения выявил экспоненциальную сходимость к оптимальному времени выполнения операций $T(n) = T_{\text{опт}} + (T_0 - T_{\text{опт}}) \cdot e^{-\lambda n}$, где коэффициент скорости обучения $\lambda = 0.42$ для AR-системы существенно превышает $\lambda = 0.18$ для традиционного метода.

Математический анализ подтверждает важные свойства модели. Детерминированность гарантирует единственность следующего состояния для любой конфигурации системы. Доказана сходимость к целевому положению при выполнении условий возврата. Непротиворечивость обеспечивается приоритетом ручного управления над автоматическим позиционированием.

Предложенная модель демонстрирует возможность эффективной интеграции формальных методов описания сборочных процессов с современными технологиями визуализации. Ключевым преимуществом является автоматическая адаптация параметров системы под уровень квалификации оператора через анализ истории выполнения операций.

В ходе экспериментальных исследований установлены количественные зависимости времени выполнения сборочных операций от применения инструмента дополненной реальности и квалификации операторов.

Анализ временных затрат показал, что штучно-калькуляционное время сборки $T_{\text{шк}}$ при внедрении AR-сопровождения изменяется неравномерно по составляющим. Основное время T_0 , определяемое физическими параметрами процесса соединения, практически не зависит от способа информационной поддержки оператора. Время обслуживания $T_{\text{об}}$ и время на отдых $T_{\text{отд}}$ регламентированы нормативами и также остаются неизменными. Существенному сокращению подвергаются $T_{\text{пз}}$ и $T_{\text{в}}$. Время обслуживания и отдыха не показало значимого изменения. Для количественного описания эффекта введены коэффициенты сокращения φ и ω :

$$T_{\text{шк}} = T_0 + T_{\text{в}}\varphi + T_{\text{об}} + T_{\text{отд}} + \frac{T_{\text{пз}}\omega}{n} \quad (2)$$

где $\varphi \in (0; 1]$ – коэффициент сокращения вспомогательного времени при AR-сопровождении; $\omega \in (0; 1]$ – коэффициент сокращения подготовительно-заключительного времени при AR-сопровождении; при $\varphi = 1$ и $\omega = 1$ формула совпадает со стандартной (традиционный метод без AR).

Экспериментальные данные позволили определить значения этих коэффициентов. При традиционном методе сборки подготовительно-заключительное время при единичной партии ($n = 1$) составило $T_{пз} = 21,5 \pm 4,2$ мин, при использовании AR-системы – $4,3 \pm 1,1$ мин, что соответствует $\omega = 0,20$. Вспомогательное время сократилось с $T_{в} = 5,8 \pm 1,3$ мин до $1,2 \pm 0,4$ мин, что дает $\varphi = 0,21$. Основное время уменьшилось с $T_{о} = 38,2 \pm 3,1$ мин до $32,7 \pm 2,4$ мин (на 14,4%). Время обслуживания и отдыха составило 3–4 мин и не показало статистически значимого различия между методами.

Таким образом, наибольший вклад в сокращение $T_{шк}$ вносит уменьшение подготовительно-заключительного времени ($\omega = 0,20$, сокращение в 5 раз) и вспомогательного времени ($\varphi = 0,21$, сокращение в 4,8 раза), тогда как основное время сокращается лишь на 14,4%. Это подтверждает, что основной резерв повышения эффективности мелкосерийной сборки лежит в оптимизации информационно-подготовительной составляющей процесса.

Установлена зависимость времени выполнения операции от номера повторения для операторов различной квалификации (Рис. 5). Для новичков ($K < 3$) кривая обучения описывается выражением:

$$T(n) = T_{\text{опт}} + (T_0 - T_{\text{опт}})e^{-\lambda n}, \quad (3)$$

где $T_0 = 95,3$ мин – время первой сборки; $T_{\text{опт}} = 52,1$ мин – оптимальное время опытного оператора; $\lambda = 0,42$ – коэффициент скорости обучения для AR-метода; n – номер повторения.

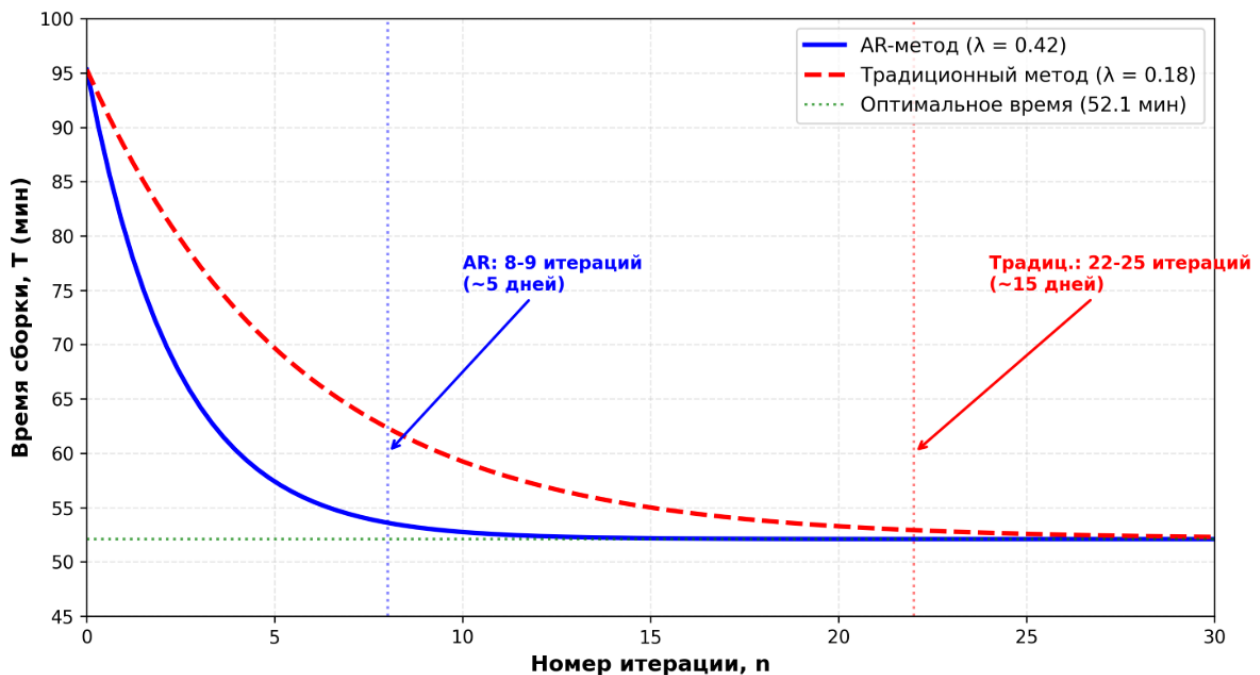


Рис. 5. Кривая времени обучения операторов при сборке экструдера

Для традиционного метода $\lambda_{\text{традиц}} = 0,18$, что в 2,3 раза ниже. Это означает, что новичок с AR-системой достигает производительности опытного оператора после $n = 8-9$ повторений (примерно 5 рабочих дней), тогда как при традиционном обучении требуется $n = 22-25$ повторений (около 15 рабочих дней).

Зависимость времени операции от квалификации оператора K описывается гиперболической функцией:

$$T(K) = T_{min} + \frac{A}{K+B}, \quad (4)$$

где $T_{min} = 39,5$ мин – минимальное время для экспертов ($K = 10$); $A = 295$ – коэффициент; $B = 1,2$ – смещение.

При использовании AR-системы параметр A снижается до $A_{AR} = 180$, что свидетельствует о меньшей зависимости времени от квалификации – система эффективно компенсирует недостаток опыта.

Анализ вариативности времени выполнения показал, что стандартное отклонение σ для традиционного метода составляет $\sigma_{традиц} = 15,3$ мин (22,3 % от среднего), тогда как для AR-метода $\sigma_{AR} = 5,0$ мин (11,8 % от среднего). Снижение вариативности в 1,9 раза указывает на более стабильное выполнение операций при использовании AR-сопровождения.

Корреляционный анализ выявил сильную отрицательную связь между количеством использований AR-системы и временем выполнения операции (коэффициент корреляции Пирсона $r = -0,87$, $p < 0,001$). Для традиционного метода эта связь слабее ($r = -0,64$), что подтверждает более эффективное обучение с AR.

Установлена временная зависимость снижения количества ошибок:

$$E(t) = E_{min} + (E_0 - E_{min})e^{-\mu t}, \quad (5)$$

где $E_0 = 4,2$ – среднее количество ошибок в первые дни работы; $E_{min} = 1,0$ – минимальное количество ошибок для опытных операторов; $\mu = 0,15$ день⁻¹ – коэффициент снижения ошибок для AR-метода; t – время работы в днях.

Для традиционного метода $\mu_{традиц} = 0,06$ день⁻¹, что в 2,5 раза ниже.

Дисперсионный анализ (ANOVA) подтвердил статистическую значимость влияния фактора применения AR ($F = 127,3$, $p < 0,001$) и квалификации оператора ($F = 48,7$, $p < 0,001$) на время выполнения операций. Взаимодействие факторов также оказалось значимым ($F = 15,2$, $p = 0,003$), что указывает на то, что эффект от AR различается для операторов разной квалификации.

Построенная регрессионная модель объясняет 89,4 % вариации времени выполнения операций ($R^2 = 0,894$), что свидетельствует о высокой предсказательной способности выявленных зависимостей.

Финальная апробация исследования реализована применением разработанной методики на промышленном образце экструдера Hydra аддитивной установки INTED MAP.

В ходе экспериментального исследования были получены результаты, проведенных с участием десяти операторов различной квалификации для проверки эффективности разработанной системы AR-сопровождения на базе устройства Microsoft HoloLens 2 с реализованным механизмом фантомных объектов. Экспериментально подтверждено существенное сокращение времени выполнения сборочных операций с шестидесяти девяти до сорока двух минут, что соответствует повышению производительности на тридцать восемь процентов, а также снижение количества ошибок с четырех до одной на каждую сборку, что составляет улучшение почти на семьдесят процентов. Установлено значительное ускорение процесса обучения новых операторов с трех недель до пяти дней, что более чем

в четыре раза быстрее традиционного метода, при этом анализ динамики освоения операций выявил экспоненциальный характер снижения времени выполнения с коэффициентом скорости обучения в два с половиной раза выше при использовании AR-системы. Дисперсионный и корреляционный анализ подтвердили статистическую значимость влияния фактора применения AR-инструмента на все исследуемые показатели, а система фантомного позиционирования продемонстрировала обеспечение точности установки компонентов в пределах одного сантиметра по координатам и одного градуса по ориентации, что полностью удовлетворяет требованиям к сборке рассматриваемого класса изделий.

Глава 4 посвящена разработке методики повышения эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий на основе применения инструментов дополненной реальности и представлен алгоритмом в виде блок-схемы.

Промышленный образец экструдера Hydra был оцифрован в системе САПР, где каждый его компонент был разнесен на отдельные узлы сборки и детали (Рис. 6), которые в дальнейшем с помощью алгоритма формализации были представлены в гиперграфовом виде и на его основе создана нодовая структура для визуального сопровождения сборщика.

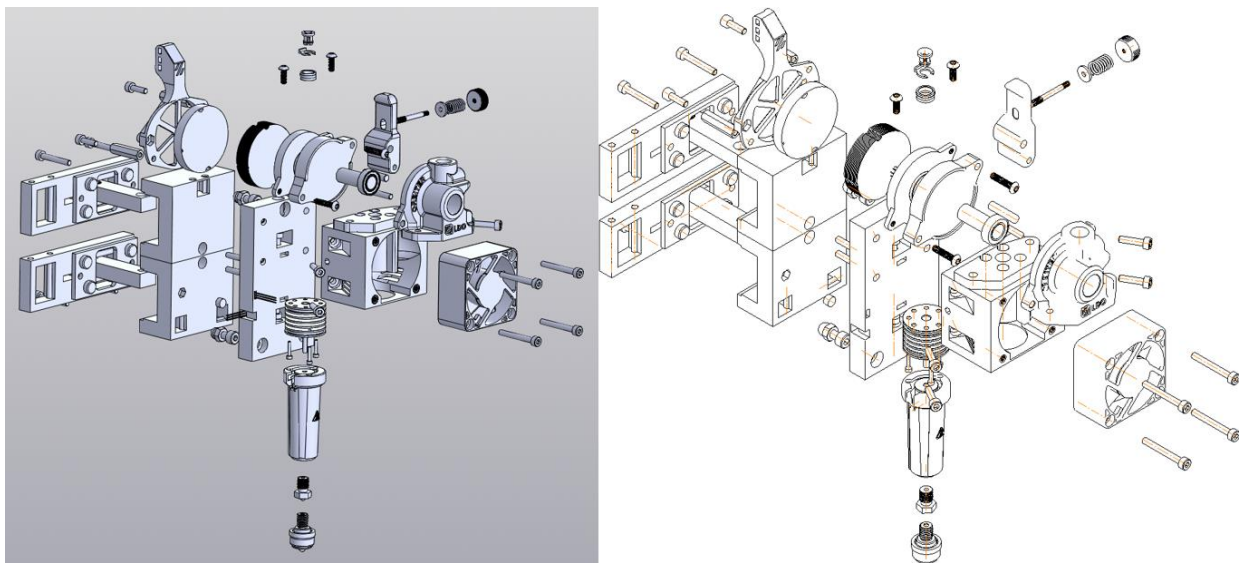


Рис. 6. 3D-модель сборки экструдера Hydra

Методика повышения эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий с применением AR-инструментов представлена в виде последовательного алгоритма (Рис. 7).

Этот алгоритм формализует сборочный процесс в виде структурированной AR-модели и обеспечивает автоматическое формирование AR-приложения на основе исходной документации. В результате внедрения методики оператор получает адаптивную интерактивную поддержку, а система непрерывно подстраивается под навыки пользователя.



Рис. 7. Алгоритм реализации методики сборки с применением AR

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе решена научно-техническая задача повышения эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий с использованием инструмента дополненной реальности, что позволило существенно сократить время выполнения сборочных операций и уменьшить количество ошибок сборщика.

2. На основе установленных связей времени сборки изделия традиционным способом и с применением инструмента дополненной реальности разработан метод формализации сборочных процессов на основе динамических гиперграфов с адаптивным изменением весовых коэффициентов в зависимости от выявляемых ошибок, позволяющий автоматически корректировать последовательность операций в режиме реального времени.

3. Предложены алгоритмы и математическая модель автоматического преобразования гиперграфовой структуры в узловую модель AR и модифицированный алгоритм оптимизации (алгоритм Краскала для гиперграфов) для определения оптимальной последовательности сборки.

4. Экспериментально подтвержден существенный эффект от применения AR-инструмента. При сборке экструдера FDM-системы время операций сократилось в среднем с 68,7 до 42,3 минуты (улучшение на 38,4 %), число ошибок – с 3,8 до 1,2 на сборку (снижение на 68,4 %), а длительность обучения новых операторов – с 21 до 5 рабочих дней.

5. Установлено, что AR-сопровождение ускоряет процесс обучения операторов: скорость обучения (коэффициент λ) повысилась до 0,42 вместо 0,18 в традиционном случае. Новичок с AR-дополнением достигает уровня опытного сотрудника примерно за 8–9 сборок (около 5 дней), тогда как при традиционном обучении – за 22–25 повторений (15 дней). Кроме того, применение AR-системы снизило зависимость времени сборки от квалификации: параметр модели А уменьшился с 295 до 180, что свидетельствует о более слабом влиянии опыта оператора на производительность.

6. Предложенная модель демонстрирует высокую стабильность результатов: стандартное отклонение времени сборки при AR-сопровождении оказалось в 1,9 раза меньше, чем при традиционном методе (5,0 мин против 15,3 мин). Это свидетельствует о более предсказуемом и равномерном выполнении операций.

7. Качественными эффектами применения AR стали снижение когнитивной нагрузки на оператора, упрощение освоения новых операций и повышение общей надежности сборочного процесса. Полученные результаты внедрены в производство и учебный процесс, что подтверждает практическую ценность разработанной методики.

Приложение включает материалы, не вошедшие в основные разделы работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. **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. (0.75 п.л./ 0.5 п.л.).

2. **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. (0.62 п.л./ 0.35 п.л.).

3. **Лим А.А.**, Кутин А.А. Гиперграфовый подход к моделированию сборочных процессов: синтез с узловыми системами и имплементация в среде смешанной реальности // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2025. № 2(73). С. 80-89. (1.25 п.л./ 0.7 п.л.).

4. **Лим А.А.** Динамические графы зависимостей для AR-сопровождения сборки FDM экструдеров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2025. № 5. С. 39-43. (0.62 п.л.).

5. **Лим А.А.**, Зуев В.В., Баранова Н.С. Дополненная реальность в технологиях сборки // Оптические технологии, материалы и системы («Оптотех–2022»): сборник докладов конференции, Москва, 5 декабря 2022 г. 2022. С. 342-344. (0.37 п.л./ 0.2 п.л.).

6. **Лим А.А.**, Кудрявцев И.В., Кутин А.А. Инновационные подходы в технологии сборки // Оптические технологии, материалы и системы

(«Оптотех–2023»): сборник докладов Международной научно-технической конференции, Москва, 11 декабря 2023 г. 2023. С. 330-334. (0.62 п.л./ 0.37 п.л.).

7. **Лим А.А.**, Кутин А.А. Повышение эффективности сборки машиностроительных изделий с применением инструментов MR // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024): сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА, Москва, 12 апреля 2024 г. 2024. С. 216-219. (0.5 п.л./ 0.3 п.л.).

8. **Лим А.А.**, Кутин А.А. Перспективы применения технологий смешанной реальности в сборочных процессах на примере очков HoloLens 2 // Компьютерное проектирование в электронике, Минск, 28 ноября 2024 г. 2024. С. 123-125. (0.37 п.л./ 0.2 п.л.).

9. **Лим А.А.**, Кутин А.А., Кузнецова К.Д. Особенности этапов сборочных процессов экструдеров FDM 3D-принтеров // Оптические технологии, материалы и системы («Оптотех–2024»): сборник Международной научно-технической конференции, Москва, 2 декабря 2024 г. 2024. С. 295-301. (0.87 п.л./ 0.5 п.л.).

10. **Лим А.А.**, Кутин А.А. Разработка гиперграфа для моделирования сборочных процессов для применения в среде смешанной реальности // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2025): сборник докладов Национальной научно-технической конференции с международным участием, Москва, 07 апреля 2025 г. 2025. С. 305-310. (0.75 п.л./ 0.4 п.л.).

11. **Лим А.А.**, Кудрявцев И.В. Повышение эффективности сборочных процессов с применением инструмента виртуальной и дополненной реальности // Современные технологии сборки: доклады IX Международного научно-технического семинара, Москва, 16 октября 2025 г. 2025. С. 78-86. (1.12 п.л./ 0.7 п.л.).

12. **Лим А.А.**, Кудрявцев И.В., Кутин А.А. Повышение эффективности процесса ввода в эксплуатацию оборудования за счет организации рабочего пространства с применением технологий виртуальной реальности // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: доклады IX Международной научной конференции, Москва, 13 ноября 2025 г. 2025. (0.25 п.л./ 0.1 п.л.)

Научное издание

Лим Александр Аликович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ СБОРКИ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ
НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ ДОПОЛНЕННОЙ
РЕАЛЬНОСТИ**

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук