

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«МИРЭА – Российский технологический университет»  
(ФГБОУ ВО «РТУ МИРЭА»)

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»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Кутин Андрей Анатольевич

Москва – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	10
1.1 Сборка как технологический процесс в машиностроении .....	10
1.2 Анализ проблем традиционных методов сборки .....	16
1.3 Существующие подходы к повышению эффективности сборки .....	22
1.4 Цифровые технологии в машиностроительном производстве .....	25
1.5 Технологии дополненной реальности: основные понятия и классификация .....	27
1.6 Применение дополненной реальности в производственных и сборочных процессах .....	31
1.7 Выводы по главе 1 .....	37
ГЛАВА 2. МЕТОД ФОРМАЛИЗАЦИИ СБОРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ .....	39
2.1 Описание объекта исследования: сборка узлов аддитивных машин .....	39
2.2 Математическая модель штучно-калькуляционного времени сборки с учетом AR-сопровождения .....	44
2.3 Формализация сборочного чертежа в гиперграфовую структуру .....	48
2.4 Динамический гиперграф с адаптивными весовыми коэффициентами .....	53
2.5 Преобразование гиперграфа в нодовую структуру Unity .....	57
2.6 Оптимизация последовательности сборочных операций .....	60
2.7 Выводы по главе 2 .....	63
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ .....	65
3.1 Объект и методика экспериментального исследования .....	65
3.2 Система фантомных объектов .....	68
3.3 Архитектура программного модуля AR-сопровождения сборки .....	71
3.4 Алгоритм автоматического продвижения по нодовой структуре .....	74
3.5 Алгоритм привязки фантомных объектов к реальному изделию .....	77
3.6 Алгоритм формирования корректирующих подсказок .....	79
3.7 Результаты экспериментального исследования .....	82
3.8 Свойства математической модели .....	89

3.9	Выводы по главе 3 .....	89
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ .....		91
4.1	Методика применения инструмента дополненной реальности для сокращения подготовительно-заключительного времени .....	91
4.2	Этапы методики .....	92
4.3	Алгоритм извлечения сборочной информации из STEP-модели .....	96
4.4	Описание этапов алгоритма.....	98
4.5	Детализация этапов методики на примере экструдера Hydra.....	100
4.6	Сопоставление с результатами других исследователей .....	103
4.7	Промышленная апробация на экструдере Hydra.....	104
4.8	Реализация результатов и внедрение.....	105
4.9	Область применимости и ограничения .....	106
4.10	Выводы по главе 4 .....	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		111
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....		121
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....		124

## ВВЕДЕНИЕ

**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.

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Сборка как технологический процесс в машиностроении

Сборка представляет собой совокупность операций по установке деталей в заданное положение и образованию соединений составных частей изделия [1, 15]. Являясь заключительной стадией производственного цикла, она в значительной мере определяет эксплуатационные характеристики готовой продукции – надежность, долговечность, точность работы механизмов.

Доля сборочных работ в совокупной трудоемкости изготовления машиностроительного изделия зависит от типа производства и конструктивной сложности продукции. По результатам исследований, проведенных отечественными учеными, и производственными данными, в массовом и крупносерийном производстве на сборку приходится 20-30 процентов общей трудоемкости, в серийном – 25-35 процентов, в единичном и мелкосерийном – 35-40 процентов [15, 38, 48]. В отдельных отраслях, например, в приборостроении, этот показатель достигает 40-45 процентов. Столь высокая доля объясняется конструктивной сложностью современных изделий, разнообразием типов соединений и жесткими требованиями к точности сопряжений.

Корсаков В.С. и Новиков М.П. в своих трудах сформулировали принципы проектирования сборочных процессов, которые сохраняют актуальность по сей день [23, 43]. Корсаков выделил основные организационные формы: стационарную сборку, при которой изделие остается на одном рабочем месте, и подвижную, при которой оно перемещается между постами. По степени концентрации операций он различал концентрированную и дифференцированную схемы. Выбор конкретной формы диктуется типом производства, конструктивными особенностями и программой выпуска.

Базров Б.М. [1] в работе «Основы технологии машиностроения» систематизировал методы обеспечения точности при сборке. Он выделил пять методов: полной взаимозаменяемости, неполной (частичной) взаимозаменяемости, групповой взаимозаменяемости (селективная сборка), регулирования и пригонки. Для настоящего исследования особый интерес представляет метод неполной взаимозаменяемости – именно он характерен для мелкосерийного производства, где допуски отдельных звеньев размерной цепи назначаются шире, чем при полной взаимозаменяемости, а требуемая точность замыкающего звена обеспечивается не в ста процентах случаев, а с определенным, заранее рассчитанным процентом риска (рисунок 1.1). Это приводит к необходимости дополнительных проверочных и подгоночных операций, которые увеличивают время сборки.

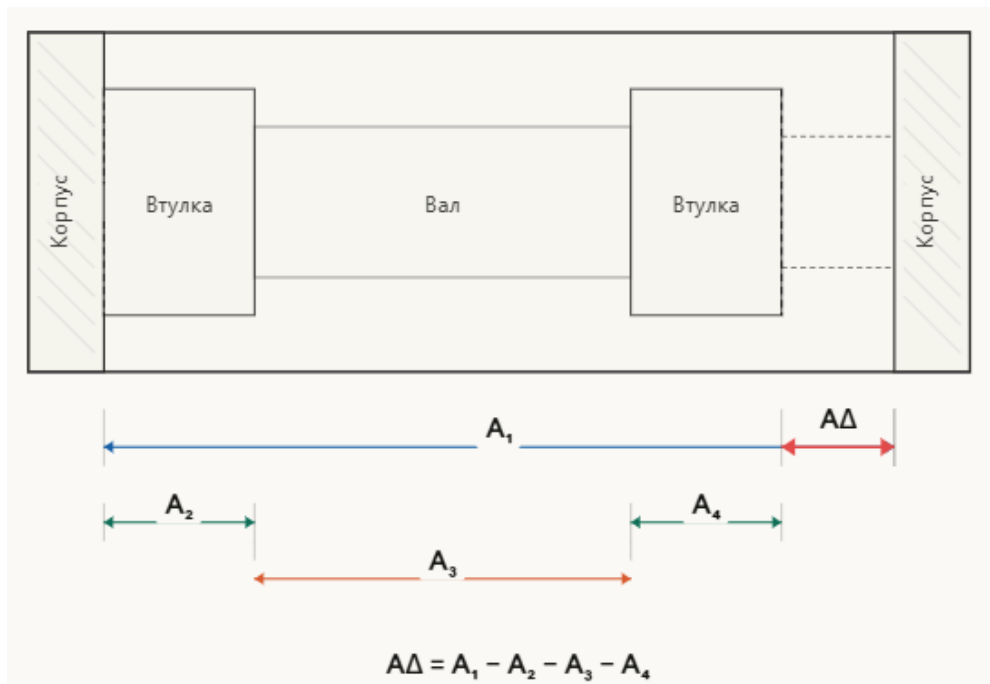


Рис.1.1 – Сборочная размерная цепь

Структура нормы времени на сборочную операцию описывается штучно-калькуляционным временем, которое складывается из нескольких составляющих. Согласно общемашиностроительным нормативам и работам Базрова Б. М. [1, 55], штучно-калькуляционное время включает:

– подготовительно-заключительное время ( $T_{пз}$ ), отнесенное к партии изделий: ознакомление с заданием и документацией, подготовка рабочего места,

получение инструмента и приспособлений, настройка и уборка после завершения партии;

– оперативное время ( $T_{оп}$ ), состоящее из основного времени ( $T_{осн}$ ) – непосредственное выполнение соединения, и вспомогательного времени ( $T_{всп}$ ) – установка, базирование и закрепление деталей, перемещение инструмента, контроль;

– время обслуживания рабочего места ( $T_{обс}$ );

– время на отдых и личные потребности ( $T_{отд}$ ).

В условиях единичного и мелкосерийного производства структура штучно-калькуляционного времени существенно отличается от серийного. Подготовительно-заключительное время, приходящееся на одно изделие, многократно возрастает, поскольку партии малы и накладные расходы на подготовку не «размываются» по большому числу единиц продукции (рисунок 1.2). Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А. и Мартынов Э.З. [48] отмечают, что в единичном производстве затраты на подготовительно-заключительное время могут составлять 15-20 процентов от общего времени выполнения операции – существенно больше, чем в серийном и массовом. К этому добавляется высокая доля вспомогательного времени: по данным производственных обследований, оно достигает 25-31 процента от штучно-калькуляционного времени [69, 78, 79].

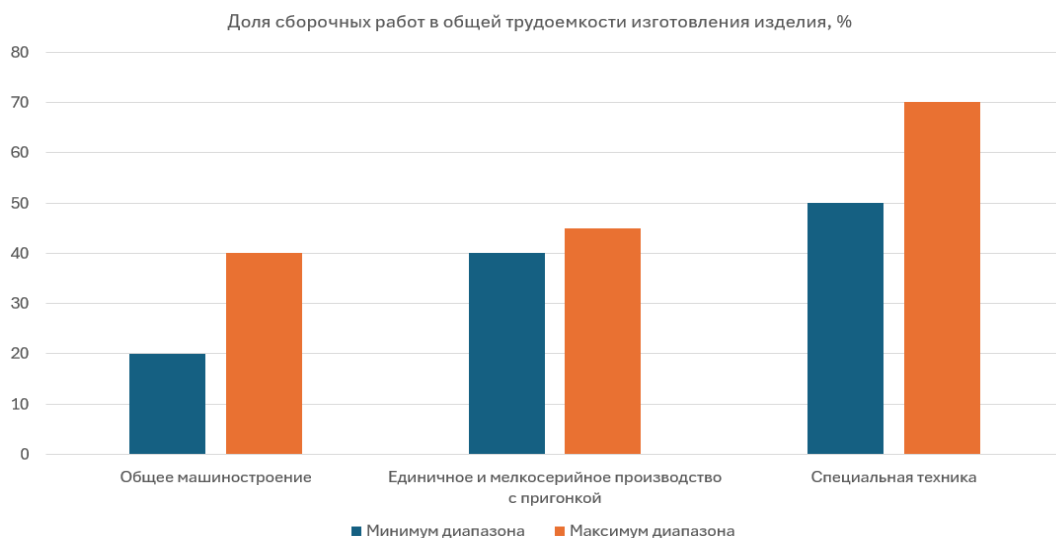


Рис.1.2 – Доля сборочных работ в общей трудоемкости изготовления изделия в зависимости от типа производства и класса изделий

Таким образом, при мелкосерийной ручной сборке подготовительно-заключительное и вспомогательное время в совокупности способны занимать до 40-50 процентов штучно-калькуляционного времени. Это означает, что потенциал сокращения общей трудоемкости следует искать не столько в ускорении самих операций соединения деталей, сколько в оптимизации информационно-организационной составляющей процесса – именно той части, на которую способна повлиять технология дополненной реальности.

Технологический процесс сборки включает подготовительные, собственно сборочные и контрольные операции. Подготовительные операции – комплектование, промывка, пригонка и другие действия, предшествующие соединению деталей. Собственно сборочные операции – установка, базирование, фиксация компонентов и образование соединений. Контрольные операции обеспечивают проверку правильности выполнения и соответствие изделия техническим требованиям.

Гусев А.А. и Вартанов М.В. [7, 14] исследовали вопросы автоматизации сборки и констатировали, что уровень автоматизации сборочных процессов остается существенно ниже уровня автоматизации механической обработки. Причины объективны: разнообразие типов соединений, сложные ориентирующие движения, высокие требования к точности позиционирования, необходимость адаптивного управления. В единичном и мелкосерийном производстве доля ручного труда при сборке, по данным Суслова А.Г. [58], составляет 80-90 процентов, что обусловлено экономической нецелесообразностью создания специализированного оборудования для малых партий.

В таких условиях основным ресурсом повышения эффективности становится совершенствование информационной поддержки оператора: сокращение времени на поиск и интерпретацию документации, на идентификацию деталей, на принятие решений о последовательности действий. Именно эти составляющие формируют подготовительно-заключительное и вспомогательное время и представляют собой главный резерв снижения штучно-калькуляционного времени при мелкосерийной сборке.

Дальский А.М. [55] в справочнике технолога-машиностроителя систематизировал основные виды сборочных соединений: резьбовые, пресовые, заклепочные, сварные, клеевые, паяные и другие. Каждый вид характеризуется определенной трудоемкостью и требованиями к квалификации исполнителя. Для проектирования технологического процесса необходимо учитывать конструктивно-технологические особенности изделия, тип производства и имеющееся оборудование.

Замятин В.К. и Бойцов В.В. [4, 21] внесли значительный вклад в теорию обеспечения точности при сборке. Их работы посвящены расчету сборочных размерных цепей и определению оптимальных методов достижения заданной точности замыкающего звена. Именно при использовании метода неполной взаимозаменяемости – характерного для мелкосерийного производства – расчет размерных цепей приобретает особое значение, поскольку от него зависит объем подгоночных операций и, следовательно, величина подготовительно-заключительного времени.

В зарубежной литературе вопросы проектирования сборочных процессов разрабатывались в рамках методологии Product Design for Manufacture and Assembly (PDMFA), созданной Boothroyd G., Dewhurst P. и Knight W.A. [67]. Методология PDMFA предлагает количественные критерии оценки технологичности конструкции с позиции сборки и позволяет выявить возможности для сокращения числа деталей и упрощения сборочных операций. Nof S.Y., Wilhelm W.E. и Warnecke H.-J. [83] показали, что эффективность сборки определяется не только техническими параметрами оборудования, но и качеством информационного обеспечения процесса, организацией рабочих мест и методами подготовки персонала.

Groover M.P. в учебнике «Fundamentals of Modern Manufacturing» выделил основные направления совершенствования сборочных процессов [73]: автоматизацию и роботизацию, гибкие сборочные системы, методы бережливого производства и цифровые технологии информационной поддержки операторов.

Последнее направление представляет особый интерес в контексте настоящей работы.

Важным аспектом организации сборочного процесса является выбор последовательности операций. Как отмечается в энциклопедии машиностроения, последовательность определяется конструктивными особенностями изделия, характером соединений и требованиями к точности. Для формализации и оптимизации последовательности традиционно применяются графовые модели: деревья сборки, графы сопряжений, графы предшествования. Применение графовых моделей позволяет автоматизировать планирование сборки, однако классические подходы не предусматривают адаптации плана в реальном времени с учетом действий оператора.

Справочник технолога-машиностроителя [55] классифицирует технологические процессы сборки по нескольким признакам: по степени механизации (ручная, механизированная, автоматизированная, автоматическая), по организационной форме (стационарная, подвижная), по степени концентрации операций (концентрированная, дифференцированная). В единичном и мелкосерийном производстве преобладает стационарная концентрированная сборка, при которой все операции выполняются на одном рабочем месте. Такая форма организации, с одной стороны, упрощает логистику, но с другой – возлагает на оператора высокую информационную нагрузку: он должен самостоятельно определять последовательность действий, подбирать инструмент, контролировать правильность сборки. Все это увеличивает подготовительно-заключительное время и обуславливает потребность в средствах цифровой поддержки.

Проведенный анализ показывает, что сборка остается одним из наиболее трудоемких этапов производства машиностроительных изделий. В условиях единичного и мелкосерийного производства главной проблемой является не столько продолжительность самих операций соединения деталей, сколько непропорционально высокие затраты подготовительно-заключительного и вспомогательного времени. Решение этой проблемы требует новых подходов к

информационной поддержке оператора, основанных на современных цифровых технологиях.

## 1.2 Анализ проблем традиционных методов сборки

**Структура штучно-калькуляционного времени сборочной операции.** Для количественной оценки проблем традиционной сборки и обоснования направления их решения необходимо рассмотреть структуру нормы времени на сборочную операцию. Основным нормативным показателем трудоемкости является штучно-калькуляционное время  $T_{шк}$ , которое определяется по формуле [1, 55]:

$$T_{шк} = T_{шт} + \frac{T_{пз}}{n}, \quad (1.1)$$

где  $T_{шт}$  – штучное время, мин;  $T_{пз}$  – подготовительно-заключительное время на партию, мин;  $n$  – число изделий (сборочных единиц) в партии.

Штучное время, в свою очередь, складывается из оперативного времени и регламентированных перерывов:

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{обс} + T_{отд}, \quad (1.2)$$

где  $T_{оп}$  – оперативное время, мин;  $T_{обс}$  – время обслуживания рабочего места, мин;  $T_{отд}$  – время на отдых и личные надобности, мин. Время обслуживания и отдыха при нормировании сборочных работ, как правило, задается в процентах от оперативного времени, поэтому формула (1.2) часто записывается в виде:

$$T_{шт} = T_{оп} \times \left(1 + \frac{K}{100}\right), \quad (1.3)$$

где  $K = a_{обс} + a_{отд}$  – суммарный коэффициент времени обслуживания и отдыха, % от оперативного времени.

Оперативное время состоит из основного и вспомогательного времени:

$$T_{оп} = T_o + T_в, \quad (1.4)$$

где  $T_o$  – основное (технологическое) время, затрачиваемое непосредственно на выполнение соединений, мин;  $T_b$  – вспомогательное время, включающее установку и снятие деталей, перемещение инструмента, промежуточный контроль, мин.

Следует отметить особенность нормирования слесарно-сборочных работ: в отличие от станочных операций, где основное и вспомогательное время четко разграничены, при нормировании сборки – особенно в мелкосерийном и единичном производстве – оперативное время часто не разделяется на составляющие, а нормируется совместно по расчетным комплексам [1, 55]. Для сборочных работ «штукой» является не деталь, а сборочная единица, поэтому понятие «штучное время» в строгом смысле трактуется как «операционное время» на сборочную единицу (рисунок 1.3).



Рис.1.3 – Структура штучно-калькуляционного времени

Подготовительно-заключительное время  $T_{пз}$  включает: ознакомление с заданием и технологической документацией, изучение сборочного чертежа, получение и подготовку инструмента и приспособлений, настройку рабочей зоны,

а по завершении партии – уборку и сдачу продукции. В мелкосерийном и единичном производстве при  $n = 1$  слагаемое  $T_{пз}/n = T_{пз}$  целиком входит в норму на каждое изделие.

Именно этим обстоятельством определяется ключевое отличие структуры  $T_{шк}$  при различных типах производства. В массовом производстве при  $n \rightarrow \infty$  вклад  $T_{пз}/n$  стремится к нулю, и штучно-калькуляционное время практически совпадает со штучным. В единичном и мелкосерийном производстве ситуация принципиально иная:  $T_{пз}/n$  сопоставимо с  $T_{шт}$  или даже превышает его. По данным Рахимянова Х.М., Красильникова Б.А. и Мартынова Э.З. [48], в единичном производстве подготовительно-заключительное время составляет 15-20 процентов от общего времени выполнения операции.

**Резервы сокращения штучно-калькуляционного времени при мелкосерийной сборке.** Из формулы (1.1) следует, что сокращение  $T_{шк}$  может быть достигнуто по трем направлениям: уменьшение  $T_{шт}$  (за счет сокращения  $T_{оп}$ ,  $T_{обс}$  или  $T_{отд}$ ), уменьшение  $T_{пз}$  или увеличение  $n$ . Увеличение размера партии при единичном и мелкосерийном производстве, как правило, не является доступным инструментом – оно определяется спросом и конструктивными ограничениями. Сокращение  $T_{обс}$  и  $T_{отд}$  жестко регламентировано нормами охраны труда. Следовательно, реальные резервы концентрируются в двух составляющих: оперативном времени  $T_{оп}$  и подготовительно-заключительном времени  $T_{пз}$ .

Анализ оперативного времени показывает, что основное время  $T_o$  определяется физическими параметрами процесса соединения (усилие затяжки, скорость вращения, время полимеризации клея и т. п.) и практически не поддается сокращению без изменения технологии или конструкции. Вспомогательное время  $T_v$  частично может быть уменьшено за счет рациональной компоновки рабочего места, но и здесь возможности ограничены.

Подготовительно-заключительное время  $T_{пз}$ , напротив, содержит значительный информационный компонент: изучение документации, интерпретация чертежа, идентификация деталей, принятие решений о последовательности действий. Именно эти элементы – типичная «когнитивная»

работа оператора – составляют основную часть  $T_{пз}$  при мелкосерийной сборке и представляют собой главный резерв снижения  $T_{шк}$ .

По данным Henderson S.J. и Feiner S. [74, 75], каждое обращение оператора к документации занимает от 30 секунд до 2 минут, а при сборке сложного изделия таких обращений бывает от 20 до 50 за цикл. Суммарные затраты на работу с документацией могут составлять от 10 до 100 минут на одно изделие. К этому добавляются потери на переключение внимания – эффект, известный в когнитивной науке как «стоимость переключения задач» (task switching cost). Каждое обращение к чертежу сопровождается не только временем чтения, но и затратами на восстановление контекста прерванной операции. По оценкам различных исследователей, суммарные потери на переключение контекста составляют 10-15 процентов штучно-калькуляционного времени.

Hu S.J., Ko J. и Weyand L. [77] экспериментально подтвердили этот тезис: при увеличении числа модификаций изделия растет именно вспомогательное и подготовительно-заключительное время, тогда как основное время операций соединения остается практически неизменным. Данный результат указывает на то, что в условиях высокой номенклатурности главный резерв – не ускорение самих соединительных операций, а оптимизация информационно-подготовительной составляющей.

Дополнительные потери возникают при идентификации деталей. Если компоненты изделия имеют схожий внешний вид или близкие геометрические параметры, оператор вынужден тратить время на их различение и сверку с документацией. В мелкосерийном производстве оператор не успевает запомнить конфигурацию конкретного изделия: к моменту выработки устойчивого навыка партия завершается и начинается новое изделие.

Вариативность компоновки рабочего места увеличивает  $T_{пз}$  дополнительно. При отсутствии стандартизированной организации рабочей зоны оператор тратит время на поиск инструментов и приспособлений. Принципы 5S частично решают эту проблему, но не устраняют потребность в обращении к документации.

Утомление оператора в течение рабочей смены сказывается в первую очередь на информационных составляющих  $T_{пз}$  и  $T_{в}$ : утомленный работник чаще обращается к чертежу, медленнее интерпретирует его, дольше ищет нужные компоненты. По данным исследований, к концу смены производительность снижается на 15-25 процентов.

Таким образом, анализ структуры штучно-калькуляционного времени при мелкосерийной ручной сборке показывает, что подготовительно-заключительное время  $T_{пз}$  и информационная составляющая вспомогательного времени  $T_{в}$  в совокупности представляют собой основной резерв сокращения трудоемкости. Воздействие на эти составляющие является целевой задачей при внедрении средств цифровой поддержки оператора.

**Обучение персонала как фактор увеличения подготовительно-заключительного времени.** Квалификация оператора непосредственно влияет на продолжительность подготовительно-заключительного и вспомогательного времени. Для начинающего сборщика каждая операция сопряжена с повторным изучением документации, поиском аналогий, пробными движениями – фактически, с «микрообучением». Это увеличивает  $T_{пз}$  и  $T_{в}$  в разы по сравнению с показателями опытного работника.

Хие В. [90] показал, что традиционные подходы к обучению не отвечают требованиям современного производства: они длительны, дороги, плохо масштабируются и не адаптируются к индивидуальному темпу обучения. Наиболее эффективен метод интегрированный в рабочий процесс (work-integrated learning), – когда оператор осваивает операции непосредственно в ходе их выполнения при наличии адаптивной информационной поддержки. Такой подход фактически стирает границу между обучением и производственной деятельностью.

Лебедев Л.В., Мнацаканян В.У. и Погонин А.А. [27] отмечают, что зависимость времени выполнения операций от числа повторений носит нелинейный характер и описывается экспоненциальной функцией – классической кривой обучения. С позиции структуры  $T_{шк}$  «быстрая» фаза обучения соответствует сокращению подготовительно-заключительного и вспомогательного

времени: оператор постепенно перестает обращаться к документации и начинает действовать по памяти. Выход кривой на плато означает, что дальнейшие резервы связаны уже с основным временем, которое определяется физическими параметрами процесса и слабо поддается сокращению.

Таким образом, проблема обучения в контексте настоящего исследования может быть переформулирована как проблема повышенного  $T_{пз}$  у начинающих операторов. Решением является не ускорение традиционного обучения, а предоставление информационной поддержки, которая компенсирует отсутствие опыта и позволяет оператору с первых циклов работать с подготовительно-заключительным временем, приближенным к уровню опытного специалиста.

**Сопутствующие потери: ошибки и их влияние на фактическое время сборки.** Помимо увеличения нормируемых составляющих  $T_{шк}$ , недостатки традиционных методов сборки проявляются через ошибочные действия оператора. Ошибки при сборке не являются основным объектом настоящего исследования, однако заслуживают рассмотрения, поскольку их исправление увеличивает фактическое время сборки сверх нормы.

Michalos G., Karagiannis P. и Makris S. [80] классифицировали ошибки при сборке по трем типам: ошибки последовательности, ошибки позиционирования и ошибки комплектации. Все три типа связаны с недостаточной информационной поддержкой оператора: нарушение последовательности возникает при ошибочной интерпретации документации, неточное позиционирование – при отсутствии визуальной обратной связи, путаница с комплектацией – при сходном внешнем виде деталей.

Исправление ошибки требует в среднем 4-6 минут и включает обнаружение, диагностику, частичную разборку и повторную сборку. Это время не предусмотрено нормой штучно-калькуляционного времени и является сверхнормативной потерей. Сокращение числа ошибок рассматривается в настоящей работе не как самостоятельная цель, а как сопутствующий положительный эффект от улучшения информационной поддержки:

своевременная и однозначная подсказка о следующем действии снижает вероятность ошибочных решений.

### **1.3 Существующие подходы к повышению эффективности сборки**

В научной и инженерной практике сформировалось несколько направлений повышения эффективности сборочных процессов. Каждое из них по-разному влияет на составляющие штучно-калькуляционного времени – и именно с этой позиции целесообразно проводить их сравнительный анализ. Для мелкосерийного производства, где доминирует ручная сборка методом неполной взаимозаменяемости, ключевым вопросом является сокращение подготовительно-заключительного и вспомогательного времени, на долю которых, как показано в п. 1.1, приходится до 40-50 процентов штучно-калькуляционного времени.

**Автоматизация и роботизация сборки.** Промышленные роботы и автоматизированные сборочные комплексы позволяют резко сократить оперативное время за счет высокой скорости и повторяемости движений. Подготовительно-заключительное время при этом практически обнуляется для отдельной единицы продукции, поскольку оно распределяется на большой объем партии, а переналадка выполняется один раз. Однако, как отмечают Гусев А.А. и Вартанов М.В., данный подход эффективен лишь при крупносерийном и массовом выпуске [7, 15]. Для единичного и мелкосерийного производства стоимость проектирования и изготовления специализированной оснастки не окупается, а время переналадки при частой смене номенклатуры само по себе становится значимой статьей затрат. Кроме того, автоматизация сложной пространственной сборки с элементами подгонки – характерной чертой неполной взаимозаменяемости – требует дорогостоящих адаптивных систем управления, что дополнительно ограничивает область применения.

**Совершенствование технологической оснастки.** Специализированные приспособления для базирования, ориентации и фиксации деталей позволяют

сократить вспомогательное время (установка и закрепление заготовки) и повысить точность сопряжений. В контексте штучно-калькуляционного времени основной эффект приходится на компоненту  $T_{всп}$ . Вместе с тем подготовительно-заключительное время этот подход не уменьшает, а нередко увеличивает: оператору требуется найти, установить и настроить приспособление для каждого нового типа изделия. При частой смене номенклатуры, типичной для мелкосерийного производства, затраты на проектирование и изготовление оснастки возрастают непропорционально. Помимо этого, оснастка не решает задачу информационной поддержки оператора – он по-прежнему обращается к документации для определения последовательности действий.

**Стандартизация и унификация.** Принципы стандартизации и унификации конструктивных элементов, разработанные Митрофановым С.П. [40] в рамках групповой технологии, направлены на сокращение номенклатуры деталей и типизацию сборочных операций. Стандартизация косвенно снижает подготовительно-заключительное время: при работе с типовыми узлами оператор тратит меньше усилий на интерпретацию документации и идентификацию компонентов, поскольку повторяющиеся конфигурации становятся привычными. Однако возможности этого подхода ограничены для уникальных изделий единичного производства, конструкция которых задается специфическими функциональными требованиями и не поддается типизации в полной мере.

**Методы бережливого производства.** Lean-подход к организации сборочных процессов нацелен на устранение непроизводительных потерь: лишних перемещений, ожиданий, переделок, избыточных операций. Организация рабочего места по методу 5S, подача компонентов «точно вовремя», визуальное управление – все это положительно влияет на вспомогательное время и, частично, на подготовительно-заключительное (за счет стандартизации рабочей зоны). Тем не менее lean-инструменты не способны кардинально решить проблему информационной перегрузки оператора: даже при идеальной организации рабочего места сборщик вынужден обращаться к технологической документации для уточнения последовательности операций, допусков и моментов затяжки.

Когнитивная нагрузка, связанная с интерпретацией чертежей и принятием решений, остается высокой.

**Цифровое сопровождение сборки.** Наиболее перспективным направлением для мелкосерийного и единичного производства является применение цифровых технологий информационной поддержки оператора: интерактивных электронных инструкций, систем машинного зрения, технологий дополненной и смешанной реальности. Принципиальное отличие этого подхода от рассмотренных выше состоит в том, что он воздействует непосредственно на подготовительно-заключительное время – ту составляющую штучно-калькуляционного времени, которую остальные методы практически не затрагивают.

Механизм сокращения  $T_{пз}$  при цифровом сопровождении можно описать следующим образом. Вместо того чтобы перед каждой операцией обращаться к бумажному чертежу, интерпретировать двумерное изображение, мысленно соотносить его с трехмерной деталью, а затем возвращаться к рабочей зоне, оператор получает визуальную подсказку непосредственно в поле зрения – в виде голограммы, наложенной на реальный объект. Исключаются переключение внимания между документацией и деталью, самостоятельная идентификация компонентов, запоминание последовательности действий. Все это – операции, формирующие подготовительно-заключительное и вспомогательное время, – переходит от оператора к цифровой системе.

Дополнительным преимуществом цифрового сопровождения является адаптивность. В отличие от оснастки, которую необходимо физически заменять при смене номенклатуры, AR-приложение может быть перенастроено программно. Это означает, что при переходе от одного изделия к другому подготовительно-заключительное время ограничивается загрузкой нового сценария, а не проектированием и изготовлением нового приспособления. Для мелкосерийного производства с частой сменой номенклатуры это обстоятельство имеет принципиальное значение.

Сравнительный анализ рассмотренных подходов с позиции их влияния на составляющие штучно-калькуляционного времени позволяет сделать вывод: для

условий мелкосерийной ручной сборки методом неполной взаимозаменяемости наиболее целесообразным является применение цифрового сопровождения на основе технологий дополненной реальности. Этот подход не требует значительных капитальных вложений в оборудование и оснастку, обеспечивает гибкость при смене номенклатуры и, главное, целенаправленно сокращает подготовительно-заключительное время – ту составляющую, которая в мелкосерийном производстве вносит наибольший вклад в штучно-калькуляционное время сборки.

#### **1.4 Цифровые технологии в машиностроительном производстве**

Цифровая трансформация машиностроительного производства, обозначаемая в литературе как Индустрия 4.0, охватывает все этапы жизненного цикла изделия – от проектирования до утилизации. Öztemel E. и Gursev S. [85] провели обширный обзор технологий этого направления и выделили ключевые составляющие: промышленный интернет вещей (IIoT), большие данные и аналитика, облачные вычисления, аддитивное производство, моделирование и симуляция, горизонтальная и вертикальная интеграция систем, кибербезопасность, автономные роботы и дополненная реальность.

Среди перечисленных технологий дополненная реальность занимает особую нишу. В отличие от автоматизации и роботизации, ориентированных на замену человеческого труда, AR-подход направлен на расширение возможностей оператора – он получает дополнительную информацию непосредственно в рабочей зоне, в удобной визуальной форме. С позиции структуры штучно-калькуляционного времени это означает воздействие на подготовительно-заключительное и вспомогательное время: оператору не нужно отвлекаться от изделия, обращаться к бумажной документации, самостоятельно идентифицировать детали – все это берет на себя AR-система.

Трачук А.В. и Линдер Н.В. [62] исследовали влияние технологий Индустрии 4.0 на производительность промышленных компаний и установили, что

наибольший эффект достигается при комплексном внедрении нескольких технологий. При этом дополненная реальность оценена авторами как один из наиболее доступных и быстро внедряемых инструментов, поскольку не требует кардинальной перестройки производственных процессов и может быть интегрирована в существующие технологические системы. Для мелкосерийного производства данное обстоятельство критически важно: предприятие получает возможность сократить  $T_{пз}$  без капитальных вложений в оборудование.

Боровков А.И., Рябов Ю.А. и Кукушкин К.В. [5] рассмотрели концепцию цифровых двойников как ключевого элемента цифровой трансформации. Цифровой двойник изделия – виртуальная модель, содержащая полную информацию о геометрии, материалах, технологии изготовления и эксплуатационных характеристиках. Наличие цифрового двойника создает основу для разработки AR-приложений: трехмерные модели компонентов могут быть непосредственно использованы для визуализации сборочного процесса, что сокращает подготовительно-заключительное время за счет исключения этапа интерпретации двумерных чертежей.

Choi S.S., Jung K. и Noh S.D. [68] проанализировали применение виртуальной реальности в обрабатывающей промышленности: виртуальное прототипирование, обучение персонала, виртуальная сборка и планирование производства. Авторы отмечают, что переход от виртуальной к дополненной реальности позволяет сохранить преимущества виртуализации (интерактивность, наглядность) и одновременно обеспечить работу с реальными физическими объектами – что критически важно для сборочных процессов, где оператор непосредственно манипулирует деталями.

В контексте отечественной промышленности Старостина В.А., Воробьев В.В. и Юрковская Г.И. [57] исследовали перспективы внедрения AR на машиностроительных предприятиях (рисунок 1.4). Наибольшим потенциалом, по их оценке, обладают области технического обслуживания, обучения персонала и сопровождения сборочных операций. Авторы подчеркивают значимость AR-технологий для обеспечения технологического суверенитета в условиях

ограниченного доступа к зарубежным системам автоматизации – ситуация, в которой отечественные предприятия вынуждены искать альтернативные пути повышения эффективности производства.



Рис.1.4 – Технологическая среда Индустрии 4.0

## 1.5 Технологии дополненной реальности: основные понятия и классификация

Дополненная реальность (Augmented Reality, AR) – технология, обеспечивающая совмещение виртуальных объектов с изображением реального

мира в реальном времени. Классическое определение, предложенное Azuma R.T. [66] в 1997 году, выделяет три ключевых признака AR-системы: совмещение реальных и виртуальных объектов в реальной среде, интерактивность в реальном времени и трехмерная регистрация – согласование координат виртуальных объектов с реальным пространством. Это определение позволяет отграничить AR от виртуальной реальности (VR), в которой пользователь полностью погружен в искусственную среду, и от смешанной реальности (MR), где виртуальные и реальные объекты могут взаимодействовать друг с другом.

Schmalstieg D. и Höllerer T. [87] развили теоретические основы AR и предложили классификацию по нескольким признакам. По типу устройства отображения различают: оптические прозрачные дисплеи (optical see-through) – к ним относятся очки Microsoft HoloLens и Magic Leap, наложение виртуальных объектов осуществляется через полупрозрачные оптические элементы; видеопрозрачные дисплеи (video see-through) – смартфоны и планшеты, где изображение с камеры совмещается с виртуальными объектами на экране; проекционные системы – изображение формируется непосредственно на реальных поверхностях рабочей зоны.

По методу трекинга AR-системы подразделяются на маркерные (используют специальные визуальные метки для определения положения и ориентации виртуальных объектов), безмаркерные (анализируют естественные особенности окружающей среды с помощью алгоритмов компьютерного зрения и инерциальных датчиков) и гибридные (сочетают оба подхода).

Для применения в сборочных процессах наибольший интерес представляют нашлемные системы (Head-Mounted Displays, HMD) с оптическим прозрачным дисплеем. Их принципиальное преимущество – свобода рук оператора: он может манипулировать деталями и инструментом, одновременно получая визуальные подсказки. С позиции сокращения подготовительно-заключительного времени это означает, что обращение к документации полностью исключается из рабочего цикла – информация отображается в поле зрения без прерывания операции.

Одна из ключевых задач при применении AR в сборке – распознавание трехмерных объектов и определение их пространственного положения (рисунок 1.5). Современные AR-системы строят карту глубины окружающего пространства и идентифицируют объекты путем сравнения с эталонными моделями. Это позволяет системе определять текущее состояние сборки и автоматически переходить к следующему шагу инструкции – по существу, взять на себя функцию контроля последовательности, которая при традиционном методе выполняется оператором и входит в подготовительно-заключительное время.

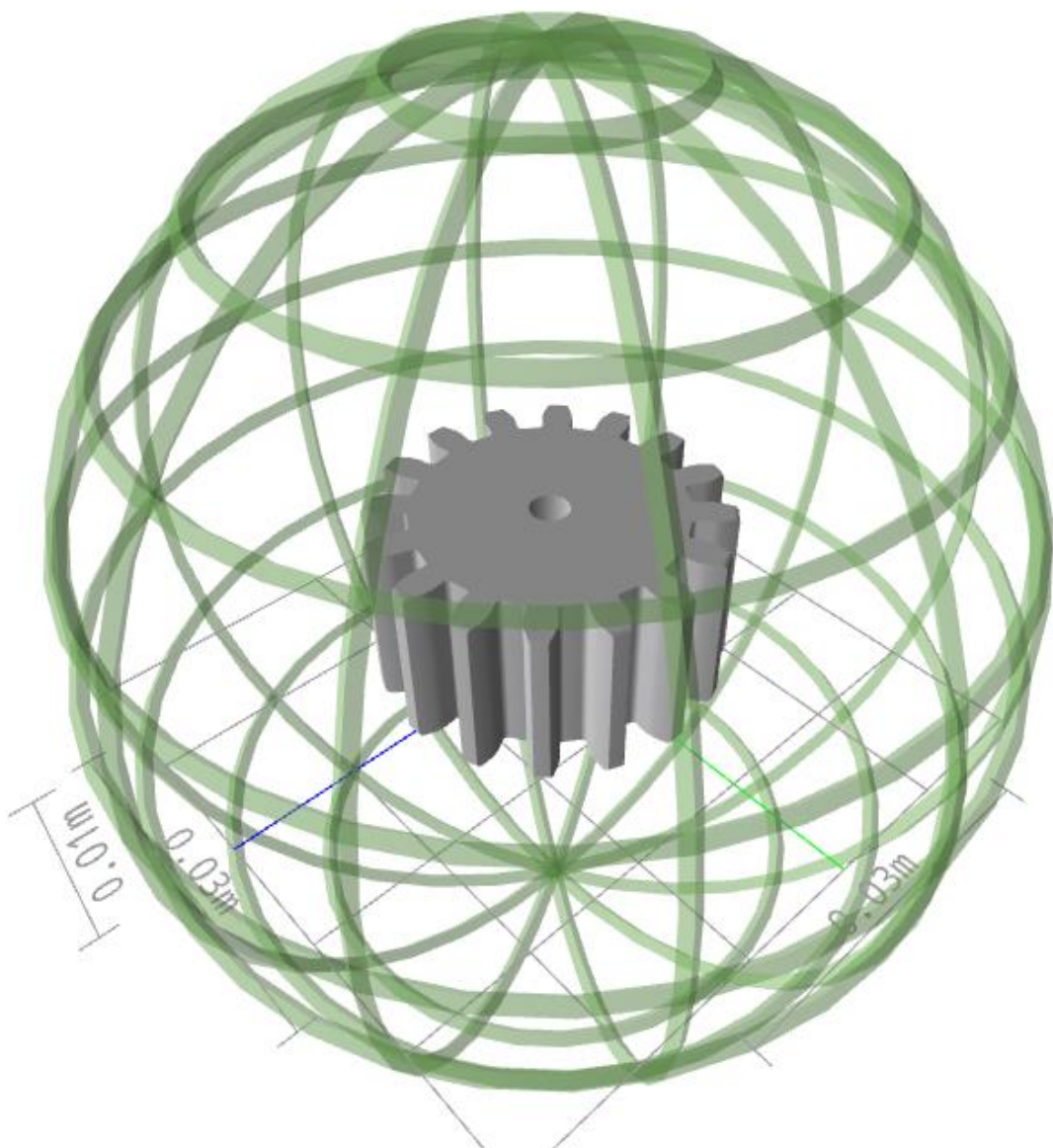


Рис.1.5 – Оптическое распознавание 3D-объекта в среде AR

Программной платформой для разработки AR-приложений в данной работе выбрана среда Unity в сочетании с пакетом Mixed Reality Toolkit (MRTK). Unity

обеспечивает кроссплатформенность, развитый инструментарий для работы с трехмерной графикой и систему визуального программирования на основе нодовых структур – последнее обстоятельство имеет непосредственное отношение к методу формализации сборочных процессов, разработанному в главе 2. MRTK предоставляет готовые компоненты для взаимодействия через жесты, голос и взгляд.

Точность пространственной регистрации определяет применимость AR в конкретных сборочных операциях. Для Microsoft HoloLens 2 точность привязки составляет порядка 1-2 сантиметров при работе в пределах одного помещения, что достаточно для большинства сборочных операций мелкосерийного производства. Для операций с более жесткими допусками (например, юстировка оптических элементов) могут применяться дополнительные методы калибровки с использованием маркеров.

Эргономика AR-устройства – существенный фактор при длительной работе. Microsoft HoloLens 2 имеет массу 566 г, поле зрения 52° по диагонали и разрешение 2048×1080 пикселей на каждый глаз. Данные характеристики обеспечивают приемлемый комфорт при работе длительностью до 2-3 часов без перерыва. Для полносменной эксплуатации необходимы перерывы, которые, однако, совпадают с регламентированным временем Тотд и не увеличивают штучно-калькуляционное время сверх нормы.

Взаимодействие оператора с AR-системой реализуется по нескольким каналам: отслеживание положения рук и распознавание жестов, голосовые команды, отслеживание направления взгляда. Многомодальное взаимодействие позволяет оператору управлять системой без прерывания выполняемой операции. По сравнению с планшетными решениями, требующими освобождения рук для работы с экраном, наשלемые системы исключают дополнительные затраты вспомогательного времени на переход «руки на детали – руки на экран – руки на детали» (таблица 1.1).

Таблица 1.1 Сравнение типов AR-устройств по применимости в сборочных процессах

<b>Тип устройства</b>	HDM, оптический прозрачный	HDM, оптический видео-прозрачный	Планшет/смартфон	Проекционная система
<b>Пример</b>	Microsoft HoloLens 2	Meta Quest 3	Samsung, iPad	Проектор + камера глубины
<b>Свобода рук</b>	Полная	Полная	Требует одной руки	Полная
<b>Поле зрения</b>	52°	110°	Экран устройства	Зона проекции
<b>Точность регистрации</b>	1-2 см	1-3 см	1-5 см	2-10 мм (в плоскости)
<b>Влияние на <math>T_{пз}</math></b>	Существенно снижает время Документация полностью заменена	Существенно снижает время Документация полностью заменена	Частично снижает время Документация заменена, но требует одну руку для удержания	Частично снижает время Документация только на поверхности
<b>Влияние на <math>T_{в}</math></b>	Существенно снижает время Руки полностью освобождены	Снижает время Руки полностью освобождены, но возможно искажение через камеру	Увеличивает время Одна рука всегда занята. Требуется переключение	Снижает время Руки полностью освобождены, но нет объемной проекции

## 1.6 Применение дополненной реальности в производственных и сборочных процессах

Применение технологий дополненной реальности в производственных процессах является предметом активных исследований. В настоящем разделе представлен обзор наиболее значимых работ, систематизированный по двум направлениям: экспериментальные исследования влияния AR на составляющие

штучно-калькуляционного времени и математические модели формализации сборочных процессов.

**Экспериментальные исследования влияния AR на время сборки.** Nee A.Y.C. и Ong S.K. [82] провели систематический анализ применения AR в производственных процессах и выделили основные области: проектирование, планирование, обработка и сборка, контроль качества, техническое обслуживание, обучение. Авторы показали, что наибольший потенциал AR имеет в сборке и техническом обслуживании – операциях, где визуальная поддержка оператора позволяет сократить подготовительно-заключительное и вспомогательное время за счет исключения обращений к бумажной документации.

Fiorentino M. и Uva A.E. [71] исследовали влияние AR-инструкций на выполнение сборочных операций средней сложности. Серия экспериментов с операторами различной квалификации показала сокращение времени сборки на 25-35 процентов по сравнению с бумажными инструкциями. С позиции структуры  $T_{шк}$  этот результат объясним: AR-инструкции исключают этапы поиска информации в документации и интерпретации двумерного чертежа, составляющие основу  $T_{пз}$ . Характерно, что наибольший эффект наблюдался у неопытных операторов – то есть именно у тех, для кого подготовительно-заключительное время максимально.

Funk M. [72] разработал подходы к проекционному AR-сопровождению на рабочих местах ручной сборки. Контурные подсказки, проецируемые на рабочую поверхность, обеспечивали наибольшее снижение когнитивной нагрузки. Однако проекционные системы не обеспечивают трехмерную визуализацию, необходимую для пространственно сложных сопряжений, и не освобождают оператора от необходимости самостоятельно определять глубину установки – что сохраняет часть  $T_{пз}$ , связанную с пространственной ориентацией.

Henderson S.J. и Feiner S. [74, 75] провели масштабное экспериментальное исследование AR-очков при техническом обслуживании военной техники. Сравнивались три условия: бумажные инструкции, AR со статическими подсказками и AR с динамическими подсказками. Динамические подсказки обеспечили сокращение времени на 47 процентов. Авторы отдельно измерили

время локализации – поиск нужного элемента на изделии – и показали, что именно оно сокращается наиболее существенно. В терминах структуры Тшк это воздействие на  $T_b$  (поиск и идентификация) и на  $T_{пз}$  (интерпретация инструкции).

Wang X. [89] исследовал применение смешанной реальности в инженерном и строительном проектировании. Хотя работы непосредственно не связаны с машиностроительной сборкой, предложенные подходы к пространственной визуализации применимы при разработке AR-инструментов – в частности, для визуализации пространственных сопряжений при методе неполной взаимозаменяемости.

Egger J. и Masood T. [69] в систематическом обзоре 67 публикаций выявили устойчивые тенденции: рост интереса к нашиваемым дисплеям, интеграция AR с машинным обучением для адаптации к пользователю, расширение области применения. Авторы отметили, что большинство исследований фиксирует сокращение общего времени операции, однако лишь немногие дифференцируют эффект по составляющим нормы времени – что затрудняет понимание механизма повышения эффективности.

Palmarini R., Erkoyuncu J.A. и Roy R. [86] систематизировали функции AR-систем в техническом обслуживании (57 публикаций): визуализация скрытых элементов, пошаговые инструкции, отображение параметров в реальном времени, удаленная поддержка эксперта. Авторы констатировали: несмотря на убедительные лабораторные результаты, реальных промышленных внедрений мало – причина в недостатке методических разработок по проектированию AR-систем для конкретных производственных условий.

**Адаптивная поддержка оператора и интеграция с производственными системами.** Отдельное направление – системы адаптивной поддержки. В отличие от статических AR-инструкций, адаптивные системы анализируют действия оператора в реальном времени и корректируют объем информации в зависимости от квалификации. Опытному оператору – минимум подсказок, чтобы не увеличивать Топ избыточной визуализацией; новичку – подробные пошаговые

инструкции. С позиции  $T_{шк}$  адаптивность означает автоматическую оптимизацию баланса между сокращением  $T_{пз}$  и сохранением  $T_{оп}$ .

Интеграция AR с системами управления производством (MES, ERP) обеспечивает двустороннюю связь: AR-система получает актуальную информацию о задании и комплектации, а данные о выполнении операций – фактическое время, число отклонений – передаются для мониторинга. Это позволяет накапливать статистику по составляющим  $T_{шк}$  и использовать ее для дальнейшей оптимизации.

Алгоритмы компьютерного зрения в сочетании с AR обеспечивают автоматическое распознавание компонентов и определение текущего этапа сборки – продвижение по инструкции без ручного подтверждения. Тем самым часть вспомогательного времени (подтверждение завершения этапа) переводится из ручных действий в автоматический режим.

Совокупность рассмотренных подходов – адаптивное управление объемом AR-инструкций, автоматическая фиксация переходов средствами компьютерного зрения и интеграция с MES/ERP – формирует замкнутый контур оптимизации штучно-калькуляционного времени, однако в существующих работах эти направления развиваются изолированно, без единой формализованной модели, связывающей параметры AR-сопровождения с составляющими  $T_{шк}$  и позволяющей количественно оценить вклад каждого механизма в сокращение времени сборки.

**Экономическая эффективность и ограничения.** Основной фактор экономического эффекта от AR – сокращение  $T_{шк}$  и, как следствие, увеличение пропускной способности сборочного участка. Дополнительные источники экономии: сокращение затрат на обучение (work-integrated learning) и снижение текучести кадров за счет упрощения работы. Срок окупаемости AR-системы, по оценкам различных авторов, составляет от 6 до 18 месяцев.

Ограничения: техническое – узкое поле зрения AR-очков, зависимость трекинга от освещения, необходимость подготовки 3D-моделей; организационные – изменение рабочих процессов, сопротивление персонала, потребность в специалистах для AR-контента. Преодоление этих ограничений требует

методических подходов к внедрению, учитывающих специфику производства, – на это направлена методика, предлагаемая в настоящей работе.

На рисунке 1.6 представлен пример AR-визуализации: трехмерное разнесенное представление компонентов и циклограмма с временными параметрами. Циклограмма позволяет оператору видеть текущий шаг в контексте всей последовательности – что сокращает  $T_{пз}$  за счет исключения необходимости запоминать структуру процесса.

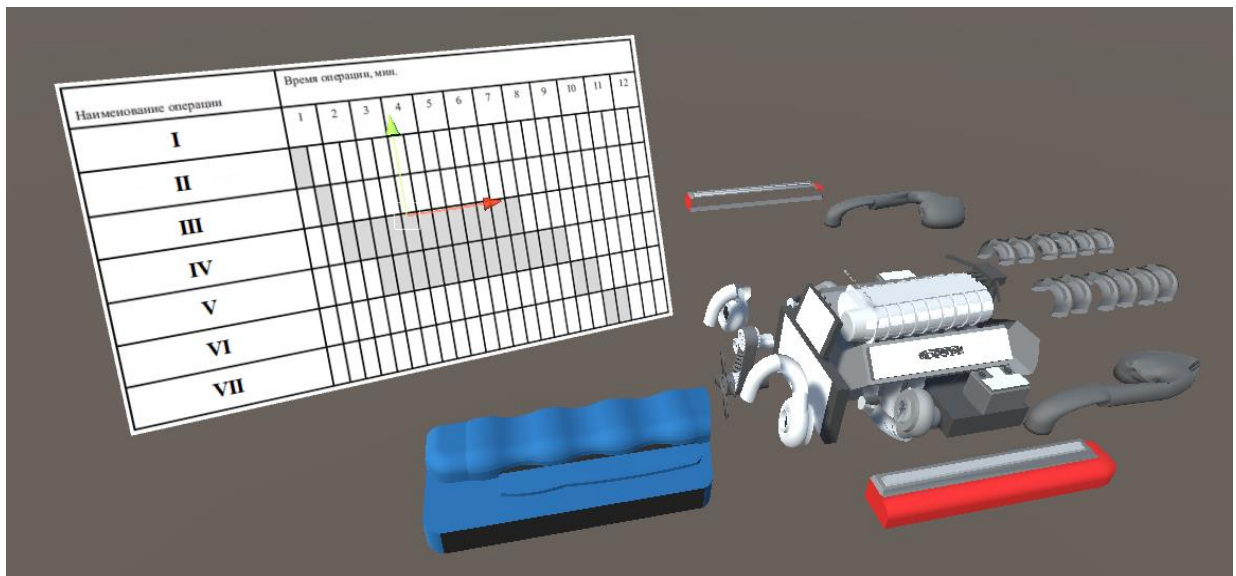


Рис.1.6 – AR-визуализация сборочного процесса с циклограммой операций и трехмерной моделью узла

Помимо визуализации общей последовательности операций, AR-системы обеспечивают пооперационное сопровождение сборки посредством фантомных объектов – полупрозрачных трехмерных голограмм, отображаемых в точном целевом положении компонента. Фантомный объект показывает оператору, куда и в какой ориентации должна быть установлена деталь, заменяя тем самым процесс мысленного пространственного преобразования, который при работе с бумажным чертежом выполняется оператором самостоятельно и занимает значительную часть подготовительно-заключительного времени.

На рисунках 1.7 и 1.8 – фантомный объект, указывающий целевое положение компонента, и текстовые подсказки с наименованием детали и действием. Система фантомных объектов передает AR-системе функцию, ранее входившую в  $T_{пз}$ :

интерпретацию двумерного чертежа и мысленное преобразование в трехмерный образ.

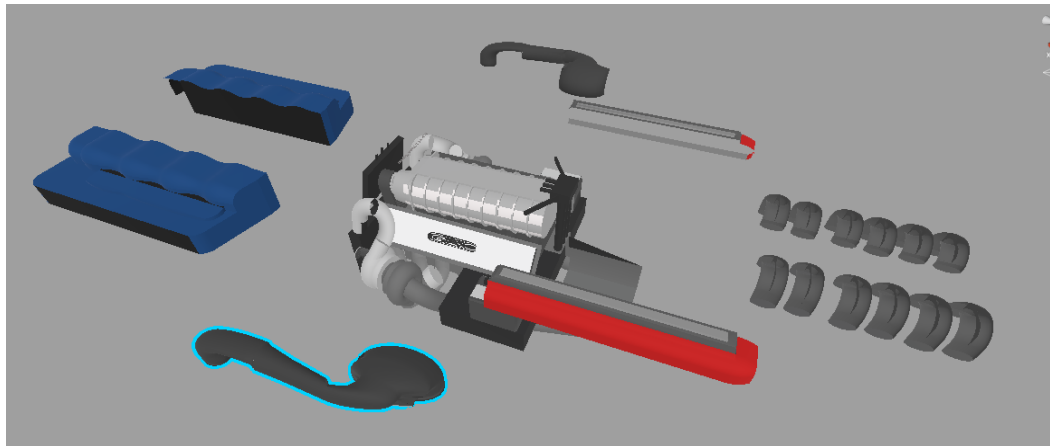


Рис.1.7 – Визуализация компонентов сборки с выделением объекта-фантома в среде AR

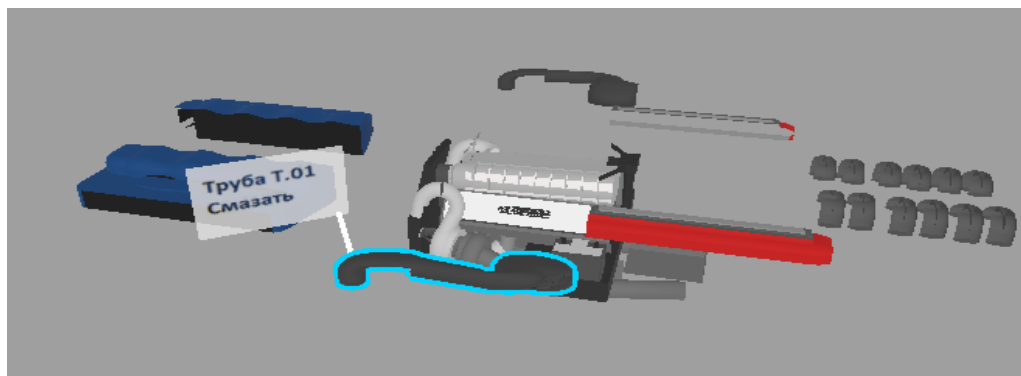


Рис.1.8 – Система информационных подсказок при сборке

**Математическое моделирование сборочных процессов.** Homem de Mello L.S. и Sanderson A.C. [76] предложили представление планов сборки в виде AND/OR-графов, описывающее все допустимые последовательности. Однако классические графовые модели не предусматривают адаптации в реальном времени и не учитывают обратную связь от оператора – а значит, не могут быть использованы для динамического AR-сопровождения.

Божко А.Н. [3] предложил гиперграфовую модель определения последовательности сборки. Гиперграфы компактнее обычных графов: одно гиперребро описывает операцию, затрагивающую одновременно несколько компонентов (соединение болтом двух фланцев и прокладки). Однако интеграция гиперграфовой модели с AR не рассматривалась.

Nagy L., Ruppert T., Löcklin A. и Abonyi J. [81] применили гиперграфы для проектирования интеллектуальных сборочных пространств, формализовав отношения между компонентами, инструментами и рабочими зонами. Работа демонстрирует применимость аппарата гиперграфов для сложных производственных систем, но не решает задачу преобразования гиперграфовой модели в AR-инструкции.

Zhu X., Xu Z. и Wang J. [91] предложили графовый алгоритм планирования сборки с обратными связями, учитывающий результаты предыдущих операций. Идея обратной связи принципиально важна для адаптивного AR-сопровождения, однако авторы использовали обычные графы, что ограничивает описание групповых операций.

Анализ рассмотренных работ позволяет заключить следующее. AR в сборке продемонстрировала значительный потенциал для сокращения  $T_{шк}$  – прежде всего подготовительно-заключительной и вспомогательной составляющих. Вместе с тем большинство исследований описывает частные случаи внедрения, не предлагая формализованных методик. Отсутствуют модели, связывающие составляющие  $T_{шк}$  с параметрами AR-сопровождения. Не разработаны методы автоматизированного формирования AR-приложений на основе сборочной документации с адаптацией к квалификации оператора. Восполнение этих пробелов составляет предмет настоящей работы.

## 1.7 Выводы по главе 1

Проведенный анализ научно-технической литературы и производственной практики позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Сборка является одним из наиболее трудоемких этапов производства машиностроительных изделий: в единичном и мелкосерийном производстве на нее приходится 35-40 процентов общей трудоемкости. Анализ структуры штучно-калькуляционного времени (формулы 1.1-1.4) показал, что при малых партиях

подготовительно-заключительное время  $T_{пз}/n$  и информационная составляющая вспомогательного времени  $T_v$  в совокупности занимают до 40-50 процентов от  $T_{шк}$ . Именно эти составляющие представляют собой основной резерв сокращения трудоемкости.

2. Существующие подходы к повышению эффективности сборки имеют ограниченную применимость для единичного и мелкосерийного производства с высокой номенклатурой изделий и не обеспечивают системного воздействия на подготовительно-заключительное время. Наиболее перспективным направлением является цифровое сопровождение сборки с использованием технологий дополненной реальности, целенаправленно сокращающих  $T_{пз}$ .

3. Технологии дополненной реальности продемонстрировали высокий потенциал для сокращения штучно-калькуляционного времени сборки: по данным различных исследований, общее сокращение  $T_{шк}$  составляет от 25 до 47 процентов, причем основной вклад вносит уменьшение подготовительно-заключительной и вспомогательной составляющих. Вместе с тем достигнутые результаты существенно зависят от сложности изделия и квалификации оператора.

4. Несмотря на значительное число исследований, в научно-технической литературе отсутствуют: формализованные методики проектирования AR-инструментов для машиностроительной сборки; модели, количественно связывающие составляющие штучно-калькуляционного времени с параметрами AR-сопровождения; методы автоматизированного формирования AR-приложений на основе существующей сборочной документации.

5. Применение аппарата теории гиперграфов для формализации сборочных процессов представляется перспективным, однако интеграция гиперграфовых моделей со средствами дополненной реальности до настоящего времени не исследовалась. Это свидетельствует о необходимости разработки такого подхода, который позволил бы использовать гиперграфовое представление сборочного процесса в качестве структурной основы для автоматизированного формирования AR-сопровождения.

## ГЛАВА 2. МЕТОД ФОРМАЛИЗАЦИИ СБОРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

### 2.1 Описание объекта исследования: сборка узлов аддитивных машин

Базовым объектом исследования в настоящей работе являются процессы узловой сборки машиностроительных изделий мелкосерийного и единичного производства, характеризующиеся пространственной сложностью сопряжений, значительной долей ручных операций и применением метода неполной взаимозаменяемости. Выбор данного класса процессов обусловлен тем, что именно для них доля подготовительно-заключительного времени в штучно-калькуляционном времени наиболее велика и, соответственно, наибольший эффект может быть получен от внедрения средств информационной поддержки оператора.

Производственным примером выбран процесс сборки функциональных узлов аддитивной машины – экструдера FDM-системы. Экструдер является ключевым узлом 3D-принтера: он обеспечивает плавление полимерного филамента и его точную подачу в зону формообразования. Качество работы экструдера напрямую определяет качество печати – точность геометрических размеров, однородность структуры материала, прочность и внешний вид изделия.

Конструкция экструдера включает несколько функциональных подсистем (рисунок 2.1): хотэнд (нагревательный блок с соплом и термобарьером), систему подачи филамента (фидер с механизмом захвата и электроприводом), систему охлаждения и крепежные элементы. Сборка экструдера – многоэтапный процесс, включающий операции пространственного позиционирования компонентов, сопряжения направляющих элементов, установки приводов и последующей юстировки.

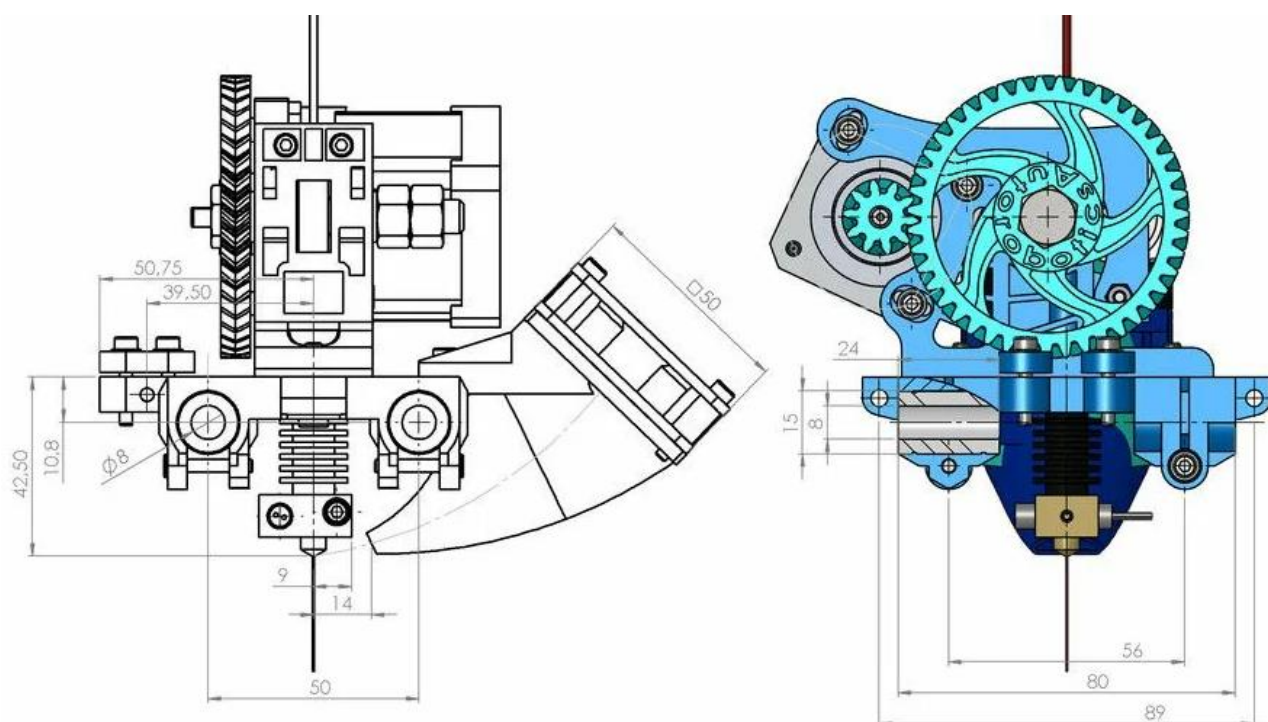


Рис.2.1 – Конструктивная схема хотэнда и фидера экструдера FDM-принтера

Выбор экструдера в качестве модельного объекта исследования обусловлен тем, что его сборка в полной мере воспроизводит характерные особенности мелкосерийного машиностроительного производства: малый размер партии, высокие требования к ориентации сопряжений, наличие разнородных видов соединений (резьбовых, прессовых, байонетных) и необходимость индивидуальной юстировки после завершения монтажа. При этом компактность узла и обозримое число компонентов позволяют провести полный хронометраж всех составляющих штучно-калькуляционного времени в контролируемых условиях эксперимента, что обеспечивает воспроизводимость результатов и возможность их последующего масштабирования на более сложные сборочные объекты.

Система подачи филамента (фидер, рисунок 2.2) обеспечивает захват и продвижение полимерной нити к нагревательному блоку. Точность установки роликов подачи и их соосность с направляющим каналом критически влияют на стабильность экструзии. Данная операция выполняется методом неполной взаимозаменяемости: допуски на сопрягаемые размеры роликов и корпуса фидера

рассчитаны вероятностным методом, и в ряде случаев требуется подбор или подгонка – что увеличивает подготовительно-заключительное время.

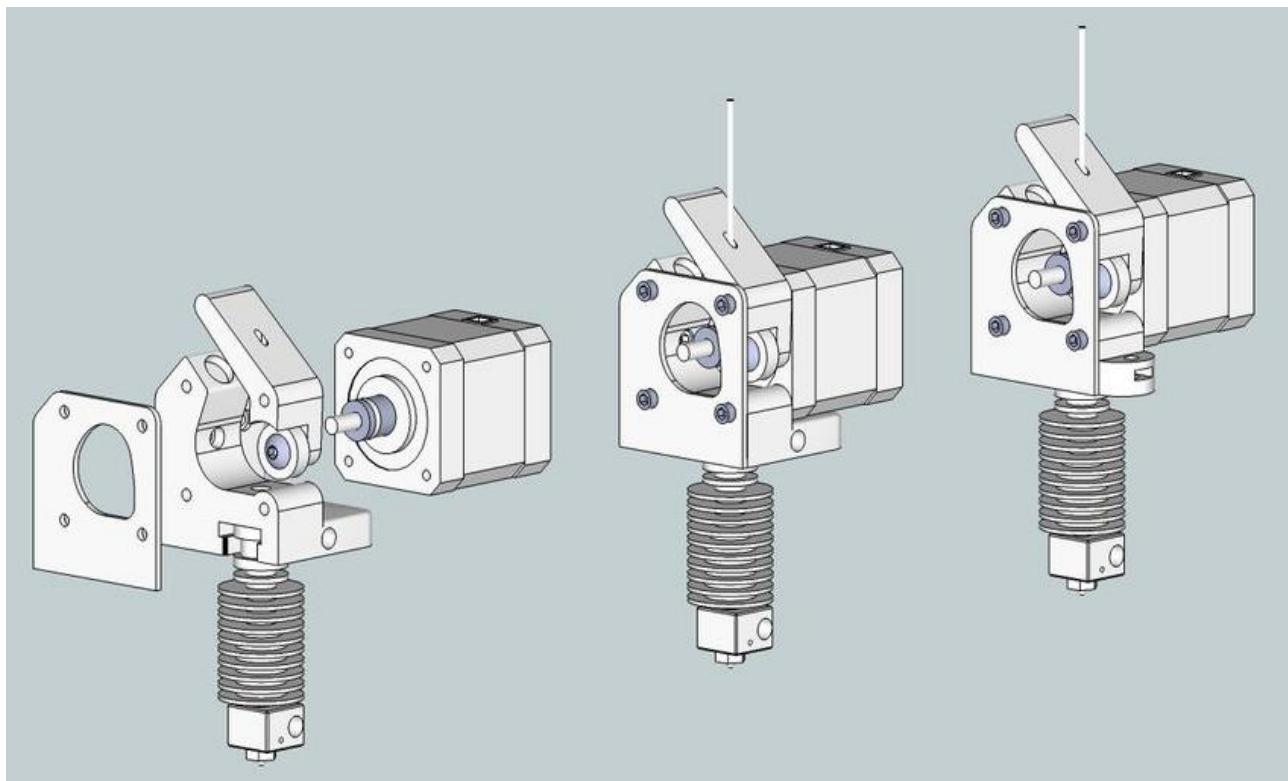


Рис.2.2 – Конструктивная схема фидера экструдера

Анализ технологического процесса сборки экструдера выявил характерные особенности, непосредственно обуславливающие высокую долю  $T_{пз}$  в штучно-калькуляционном времени:

- значительное число компонентов (от 20 до 40 деталей в зависимости от модели), требующих установки в строго определенной последовательности, – оператор вынужден многократно обращаться к документации для уточнения порядка действий;

- наличие компонентов схожего внешнего вида – идентификация деталей занимает существенную часть подготовительно-заключительного времени;

- высокие требования к точности позиционирования отдельных элементов (допуски до 0,1 мм для сопряжения направляющих) при использовании метода неполной взаимозаменяемости – необходимость подгоночных и проверочных операций;

– разнородность операций (механическая сборка, электрическое подключение, настройка и калибровка) – каждый переход к новому типу операции сопровождается обращением к документации и сменой инструмента;

– мелкосерийный характер производства (партии от единиц до десятков штук), исключающий экономическую целесообразность автоматизации и обеспечивающий высокое значение слагаемого  $T_{пз}/n$  в формуле (1.1).

Перечисленные особенности делают процесс сборки экструдера репрезентативным объектом для исследования эффективности AR-инструментов в условиях мелкосерийной ручной сборки неполной взаимозаменяемости. Результаты, полученные для данного объекта, могут быть перенесены на широкий класс сборочных процессов с аналогичными характеристиками.

Технологический процесс сборки экструдера включает несколько основных этапов. Первый этап – подготовка компонентов: проверка комплектности, визуальный контроль качества деталей, подготовка инструмента и рабочей зоны. Именно этот этап формирует основную часть подготовительно-заключительного времени: оператор знакомится с документацией, раскладывает детали, настраивает рабочее место. Второй этап – сборка механических узлов: установка сопла в нагревательный блок, монтаж термобарьера, сборка механизма подачи. Третий этап – электрическое подключение: установка нагревательных элементов и термодатчиков, подключение электропривода, организация кабельных трасс. Четвертый этап – настройка и калибровка: проверка электрических соединений, настройка параметров нагрева, калибровка подачи филамента. Заключительный этап – контроль качества: тестовая экструзия, проверка стабильности подачи, оценка качества выходного потока.

Наиболее критическими с точки зрения точности являются операции позиционирования сопла относительно термобарьера (требуется герметичность для предотвращения утечки расплава) и настройки прижимного усилия роликов подачи (определяет стабильность экструзии). Обе операции выполняются методом неполной взаимозаменяемости и сопровождаются подгонкой, что увеличивает как оперативное, так и подготовительно-заключительное время.

Предварительные эксперименты (рисунок 2.3) показали, что применение инструмента дополненной реальности обеспечивает сокращение штучно-калькуляционного времени сборки по сравнению с традиционным методом. Наибольший эффект наблюдается при первых итерациях – когда оператор еще не освоил последовательность операций и подготовительно-заключительное время максимально. По мере накопления опыта разница сокращается (оператор запоминает последовательность и реже обращается к документации), однако сохраняется на статистически значимом уровне – что объясняется сохранением эффекта от автоматической идентификации деталей и контроля последовательности, обеспечиваемых AR-системой. Таким образом, технологический процесс сборки экструдера охватывает все основные виды сборочных работ – механическую сборку, электромонтаж, юстировку и функциональный контроль. Это позволяет оценить влияние AR-сопровождения на каждую составляющую штучно-калькуляционного времени в рамках единого объекта исследования.

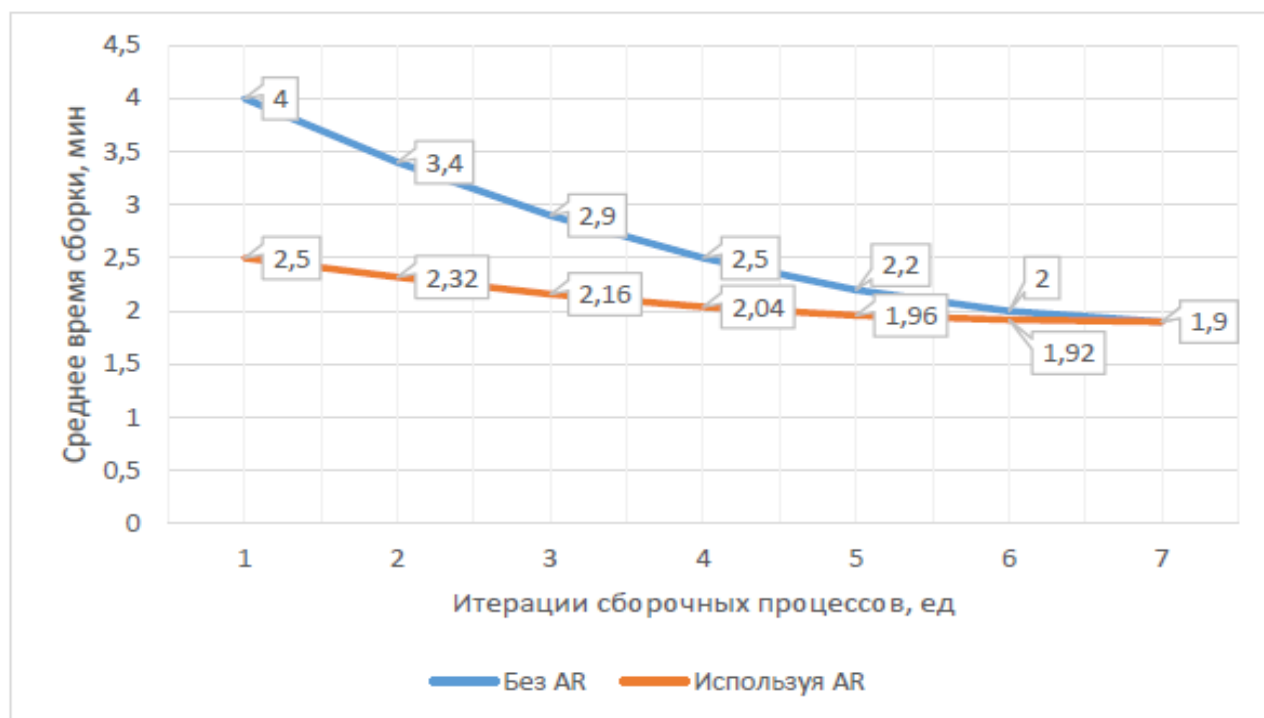


Рис.2.3 – Сравнение времени сборки при различных подходах: традиционный метод и метод с применением AR

Результаты опроса операторов (рисунок 2.4) подтвердили субъективное предпочтение сборки с использованием AR-инструмента: 18 из 22 опрошенных отметили удобство системы и ее положительное влияние на процесс работы. Характерно, что в качестве главного преимущества большинство респондентов назвали не ускорение самих операций соединения, а отсутствие необходимости обращаться к бумажной документации – то есть именно сокращение подготовительно-заключительного времени.

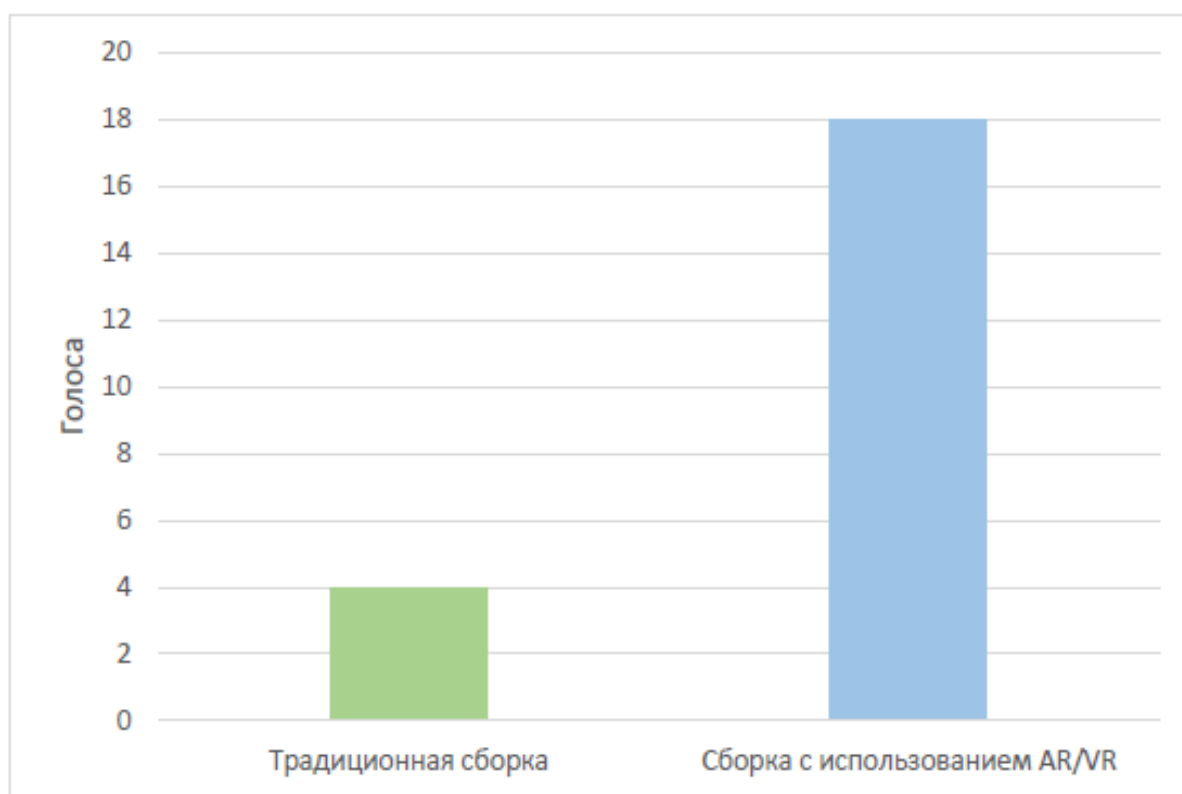


Рис.2.4 – Результаты опроса операторов о предпочитаемом способе сборки

## 2.2 Математическая модель штучно-калькуляционного времени сборки с учетом AR-сопровождения

В главе 1 установлено, что основным резервом повышения эффективности мелкосерийной ручной сборки является сокращение подготовительно-заключительного и вспомогательного времени – составляющих штучно-калькуляционного времени, ответственных за информационно-подготовительное

обеспечение процесса. Для количественного описания влияния AR-сопровождения на эти составляющие необходима математическая модель, связывающая параметры AR-системы со структурой нормы времени.

Штучно-калькуляционное время  $T_{шк}$ , определяемое в соответствии с ГОСТ 3.1109-82 [1, 55], представляет собой норму времени на выполнение технологической операции с учетом подготовительно-заключительного времени, приходящегося на одно изделие:

$$T_{шк} = T_{шт} + \frac{T_{пз}}{n}, \quad (2.1)$$

где  $T_{шт}$  – штучное время, мин;  $T_{пз}$  – подготовительно-заключительное время на партию, мин;  $n$  – число изделий (сборочных единиц) в партии.

Штучное время включает оперативное время и регламентированные перерывы:

$$T_{шт} = T_{оп} + T_{об} + T_{отд}, \quad (2.2)$$

где  $T_{оп}$  – оперативное время, мин;  $T_{об}$  – время обслуживания рабочего места, мин;  $T_{отд}$  – время на отдых и личные надобности, мин.

Оперативное время, в свою очередь, складывается из основного и вспомогательного:

$$T_{оп} = T_o + T_v, \quad (2.3)$$

где  $T_o$  – основное (технологическое) время непосредственного выполнения соединений, мин;  $T_v$  – вспомогательное время (установка и снятие деталей, перемещение инструмента, промежуточный контроль, обращение к документации), мин.

Подставляя (2.2) и (2.3) в (2.1), получаем развернутую формулу:

$$T_{шк} = T_{оп} + T_{об} + T_{отд} + \frac{T_{пз}}{n}, \quad (2.4)$$

Рассмотрим, каким образом каждая составляющая реагирует на внедрение AR-сопровождения.

**Основное время  $T_0$**  определяется физическими параметрами процесса соединения: усилием затяжки резьбовых соединений, скоростью вращения инструмента, временем полимеризации клеевых составов и т.п. Эти параметры задаются технологическим процессом и не зависят от способа информационной поддержки оператора. Однако при наличии AR-сопровождения может наблюдаться незначительное сокращение  $T_0$  за счет более точного первоначального позиционирования компонентов (оператор реже выполняет повторные попытки совмещения). Данный эффект невелик и не требует отдельного коэффициента.

**Вспомогательное время  $T_v$**  при традиционном методе включает не только физические действия (установка, закрепление, перемещение инструмента), но и информационные: обращение к документации в ходе операции, идентификацию деталей, контроль правильности установки путем сверки с чертежом. При AR-сопровождении информационная составляющая  $T_v$  существенно сокращается: AR-система автоматически указывает следующий шаг, подсвечивает нужную деталь и визуализирует целевое положение. Для количественного описания этого эффекта введем коэффициент сокращения вспомогательного времени  $\varphi \in (0; 1]$ .

**Подготовительно-заключительное время  $T_{пз}$**  включает ознакомление с заданием и документацией, изучение сборочного чертежа, подготовку инструмента и рабочей зоны, настройку рабочего места. При AR-сопровождении подавляющая часть этих действий передается системе: оператору не нужно самостоятельно изучать чертеж, идентифицировать компоненты по спецификации, запоминать последовательность действий – вся эта информация отображается в поле зрения в виде голограмм, фантомных объектов и текстовых подсказок. Для описания эффекта введем коэффициент сокращения подготовительно-заключительного времени  $\omega \in (0; 1]$ .

**Время обслуживания  $T_{об}$  и время на отдых  $T_{отд}$**  регламентируются нормативами и задаются в процентах от оперативного времени. При внедрении AR эти составляющие не подвергаются целенаправленному воздействию.

С учетом введенных коэффициентов штучно-калькуляционное время при AR-сопровождении принимает вид:

$$T_{\text{шк}} = T_0 + T_B \varphi + T_{\text{об}} + T_{\text{отд}} + \frac{T_{\text{пз}} \omega}{n} \quad (2.5)$$

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 (2.5) вырождается в стандартную формулу (2.4), что соответствует традиционному методу сборки без AR. Таким образом, формула (2.5) является обобщением стандартной модели штучно-калькуляционного времени и позволяет количественно оценить эффект от внедрения AR для любого сочетания параметров  $\varphi$  и  $\omega$ .

Относительное сокращение штучно-калькуляционного времени при внедрении AR выражается как:

$$\Delta T_{\text{шк}} = \frac{T_{\text{шк}} - T_{\text{шк.AR}}}{T_{\text{шк}}} = \frac{T_B(1-\varphi) + T_{\text{пз}}(1-\omega)}{n T_{\text{шк}}} \quad (2.6)$$

Из формулы (2.6) видно, что эффективность AR-сопровождения определяется двумя факторами: долей вспомогательного и подготовительно-заключительного времени в  $T_{\text{шк}}$  и величиной коэффициентов  $\varphi$  и  $\omega$ . В мелкосерийном производстве (при малых  $n$ ) вклад слагаемого  $T_{\text{пз}}(1 - \omega)/n$  возрастает, что объясняет высокую эффективность AR именно для данного типа производства.

Для полноты описания введем также функцию длительности отдельной операции, учитывающую основные влияющие факторы:

$$t_i = f(C_i, S_i, Q_i, A), \quad (2.7)$$

где  $C_i$  – конструктивная сложность операции (число сопрягаемых поверхностей, тип соединения);  $S_i$  – уровень квалификации оператора;  $Q_i$  –

требуемая точность позиционирования;  $A$  – бинарный параметр, принимающий значение 1 при наличии AR-сопровождения и 0 при его отсутствии.

Конкретный вид функции  $f$  и значения коэффициентов  $\varphi$  и  $\omega$  определяются экспериментально (глава 3). Представленная модель служит теоретической основой для количественной оценки эффекта от внедрения AR-инструмента в технологический процесс сборки.

### 2.3 Формализация сборочного чертежа в гиперграфовую структуру

Для реализации AR-сопровождения в виде последовательности пошаговых инструкций необходимо формализовать сборочный процесс – представить его в виде математической структуры, пригодной для автоматизированной обработки и реализации в программной среде. В настоящей работе для этой цели применен аппарат теории гиперграфов.

Выбор гиперграфов в качестве математического аппарата обусловлен спецификой сборочных процессов. В отличие от обычных графов, где каждое ребро связывает ровно две вершины, гиперребро гиперграфа может связывать произвольное число вершин. Это свойство естественным образом отражает сборочные операции, при которых одновременно участвуют несколько компонентов: например, соединение болтом двух фланцев и прокладки представляет собой операцию, затрагивающую четыре компонента (два фланца, прокладку и болт), что невозможно выразить одним ребром обычного графа без потери информации о групповом характере операции.

**Определение гиперграфа.** Пусть  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  – множество компонентов изделия, выделенных при анализе сборочного чертежа. Гиперграф, представляющий сборочный процесс, определяется как пара [3, 60]:

$$H = (V, E), \quad (2.8)$$

где  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – множество вершин, взаимно однозначно

соответствующих компонентам изделия ( $V \leftrightarrow C$ );  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  – множество гиперребер, каждое из которых представляет функциональную связь (сборочную операцию) между группой компонентов:  $e_i \subseteq V, |e_i| \geq 2$ .

Каждому гиперребру  $e_i$  присваивается вес  $w_i$ , отражающий приоритет выполнения соответствующей сборочной операции. Множество весов обозначим  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ . Начальные значения весов назначаются на основе технологических ограничений: операции, являющиеся предшественниками других (по схеме сборки), получают более высокий приоритет.

**Матрица инцидентности.** Для формального описания структуры гиперграфа определим матрицу инцидентности  $A$  размером  $n \times m$ :

$$A = (a_{ij}), \quad (2.9)$$

где  $a_{ij} = 1$ , если  $v_i \in e_j$ ;  $a_{ij} = 0$  в противном случае.

Столбец  $j$  матрицы  $A$  содержит информацию о том, какие компоненты участвуют в  $j$ -й сборочной операции. Сумма элементов столбца равна числу компонентов, задействованных в операции. Сумма элементов строки показывает, в скольких операциях участвует данный компонент.

Вектор весов  $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$  задает приоритеты операций. Процесс сборки представляется как последовательность операций, соответствующих гиперребрам, упорядоченным по убыванию весов с учетом ограничений предшествования.

**Алгоритм формализации сборочного чертежа.** Для преобразования сборочного чертежа в гиперграфовую структуру разработан алгоритм, состоящий из пяти этапов:

1. Анализ сборочного чертежа и выделение основных компонентов (деталей и сборочных единиц). На этом этапе выполняется декомпозиция изделия на составные элементы: отдельные детали, крепежные элементы и предварительно собранные сборочные единицы, которые в дальнейшем рассматриваются как неделимые единицы. Каждому выделенному компоненту ставится в соответствие вершина гиперграфа  $v_i$ .

2. Определение взаимосвязей между компонентами на основе анализа сопряжений, указанных на чертеже. Выявляются группы компонентов, участвующих в совместных сборочных операциях, то есть устанавливаемых или закрепляемых одновременно в рамках одного технологического перехода.

3. Создание вершин гиперграфа, соответствующих выделенным компонентам:  $V = C$ . Каждая вершина наследует атрибуты соответствующего компонента: наименование, обозначение по спецификации, геометрические параметры, необходимые для последующего создания фантомного объекта в AR-среде.

4. Формирование гиперребер, отражающих функциональные связи между компонентами. Каждая сборочная операция, объединяющая два или более компонентов, порождает гиперребро  $e_i \subseteq V$ . В отличие от обычного графа, где ребро связывает ровно две вершины, гиперребро объединяет произвольное число вершин, что позволяет естественным образом описывать операции с несколькими участниками.

5. Присвоение начальных весов гиперребрам в соответствии с приоритетом сборки, определяемым технологическими ограничениями и конструктивными зависимостями. Вес  $w_i$  отражает очередность выполнения операции: более высокий вес назначается операциям, которые должны быть выполнены раньше в силу геометрических или функциональных ограничений.

Результатом выполнения алгоритма является взвешенный гиперграф  $H = (V, E, W)$ , полностью описывающий структуру сборочного процесса: множество вершин  $V$  отражает компонентный состав изделия, множество гиперребер  $E$  – совокупность сборочных операций с указанием участвующих компонентов, а вектор весов  $W$  – технологически обоснованную последовательность их выполнения. Полученная формализованная модель является входными данными для генерации AR-инструкций: каждое гиперребро преобразуется в отдельный шаг интерактивного сценария сборки, а атрибуты вершин используются для создания и позиционирования фантомных объектов в пространстве дополненной реальности.

**Пример формализации.** Рассмотрим применение алгоритма на примере узла фидера экструдера FDM-системы (рисунок 2.5). Узел состоит из компонентов: корпус фидера ( $c_1$ ), прижимной ролик ( $c_2$ ), подающий ролик ( $c_3$ ), ось роликов ( $c_4$ ), пружина прижима ( $c_5$ ), электропривод ( $c_6$ ), крепежные элементы ( $c_7$ ). Множество вершин:  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7\}$ .

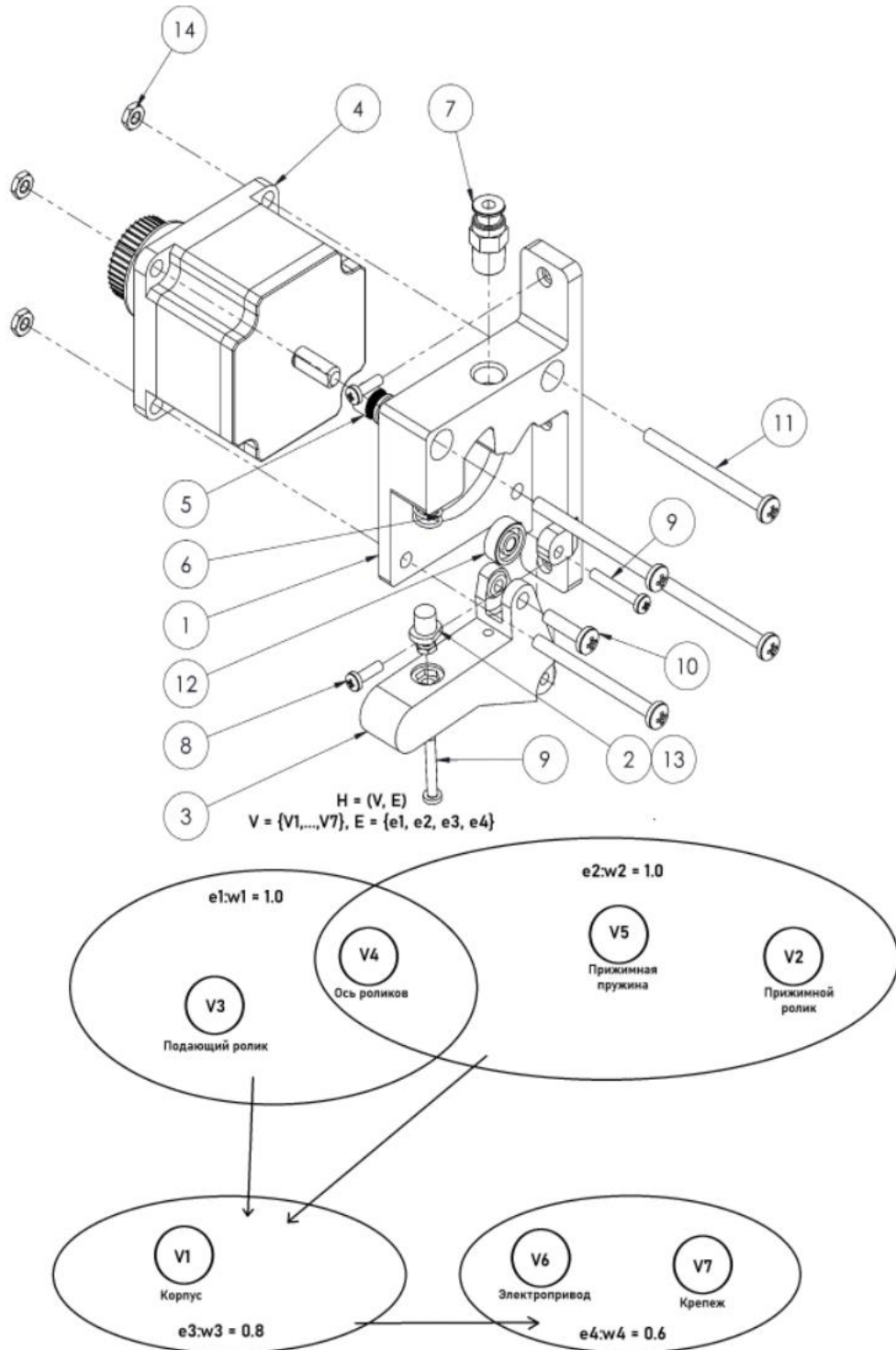


Рис.2.5 – Гиперграф сборки фидера экструдера

Анализ сборочного чертежа выявляет следующие сборочные операции (гиперребра):

$e_1 = \{v_3, v_4\}$  – установка подающего ролика на ось;

$e_2 = \{v_2, v_4, v_5\}$  – установка прижимного ролика на ось с пружиной (групповая операция, затрагивающая три компонента);

$e_3 = \{v_1, v_4\}$  – установка оси с роликами в корпус;

$e_4 = \{v_1, v_6, v_7\}$  – монтаж электропривода на корпус с крепежом.

Матрица инцидентности для данного примера:

Таблица 2.1 Матрица инцидентности  $A$  гиперграфа сборки фидера экструдера

Вершина	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$
$v_1$ (корпус)	0	0	1	1
$v_2$ (прижимной ролик)	0	1	0	0
$v_3$ (подающий ролик)	1	0	0	0
$v_4$ (ось роликов)	1	1	1	0
$v_5$ (прижимная пружина)	0	1	0	0
$v_6$ (электропривод)	0	0	0	1
$v_7$ (крепеж)	0	0	0	1

Обратим внимание на гиперребро  $e_2 = \{v_2, v_4, v_5\}$ : оно связывает три компонента, что отражает реальную технологию сборки – прижимной ролик, ось и пружина устанавливаются совместно. В обычном графе эту операцию пришлось бы разбивать на три отдельных ребра, что искусственно увеличило бы число операций и исказило бы структуру процесса.

Начальные веса назначаются с учетом технологических ограничений:  $e_1$  и  $e_2$  должны быть выполнены до  $e_3$  (нельзя установить ось в корпус без роликов),  $e_3$  – до  $e_4$  (электропривод монтируется после установки механической части). Соответственно:  $w_1 = 1,0$ ;  $w_2 = 1,0$ ;  $w_3 = 0,8$ ;  $w_4 = 0,6$ .

## 2.4 Динамический гиперграф с адаптивными весовыми коэффициентами

Статическая гиперграфовая модель, описанная в п. 2.2, фиксирует структуру сборочного процесса на этапе проектирования. Однако в реальных условиях производства возникает необходимость адаптации модели в зависимости от действий конкретного оператора. Для решения этой задачи в настоящей работе предложен динамический гиперграф – модель, в которой веса гиперребер изменяются в процессе выполнения сборки на основе анализа фактического хода операций [3, 81].

Динамический гиперграф определяется как зависящая от времени пара:

$$G(t) = (V(t), E(t)), \quad (2.10)$$

где  $V(t)$  – множество вершин (может расширяться за счет добавления корректирующих узлов);  $E(t)$  – множество гиперребер с динамическими весами  $w_{ij}(t)$ .

Каждому ребру  $e_{ij} \in E(t)$ , связывающему вершины  $v_i$  и  $v_j$ , присваивается вес  $w_{ij}(t)$ , определяющий приоритет перехода. Начальные значения весов задаются при формализации сборочного чертежа (п. 2.2).

**Механизм адаптации весов.** При обнаружении отклонения в ходе выполнения операции (ошибочная установка компонента, нарушение последовательности, превышение допустимого отклонения при позиционировании) вес соответствующего ребра модифицируется по правилу:

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) - \alpha \cdot \delta, \quad (2.11)$$

где  $\alpha$  – коэффициент адаптации (в настоящей работе принято  $\alpha = 0,1$ );  $\delta$  – индикатор отклонения ( $\delta = 1$  при обнаружении отклонения,  $\delta = 0$  в противном случае).

Смысл формулы (2.11) состоит в следующем: при каждом отклонении на данном переходе его приоритет снижается, что приводит к активации альтернативных маршрутов (если они существуют) или к включению дополнительных подсказок. Коэффициент  $\alpha$  определяет скорость адаптации: при больших значениях  $\alpha$  система быстрее реагирует на отклонения, но может оказаться неустойчивой; при малых – адаптация происходит плавно, но медленнее.

**Механизм блокировки и корректирующие узлы.** Если вес ребра опускается ниже порогового значения:

$$w_{ij}(t) < w_{min}, \quad (2.12)$$

то ребро  $e_{ij}$  временно блокируется, а система активирует корректирующий узел  $c_k$ . Корректирующий узел представляет собой дополнительный этап, на котором оператору предоставляется расширенная визуальная поддержка: детализированные инструкции, дополнительные фантомные объекты, предупреждения о типичных ошибках на данном переходе.

При активации корректирующего узла граф модифицируется:

$$V_{(t+1)} = V(t) \cup \{c_k\}, \quad (2.13)$$

$$E_{(t+1)} = E(t) \cup \{e_{ik}, e_{kj}\}, \quad (2.14)$$

то есть вместо прямого перехода  $v_i \rightarrow v_j$  оператор проходит через корректирующий узел:  $v_i \rightarrow c_k \rightarrow v_j$ . После успешного прохождения корректирующего узла вес исходного ребра восстанавливается до  $w_{min}$ , и прямой переход становится вновь доступным.

**Матрица наблюдений.** Для учета статистики отклонений вводится матрица наблюдений  $M$ , где элемент  $M_{kl}$  – количество случаев отклонения типа  $k$  на этапе  $l$  за все время работы конкретного оператора. Каждому гиперребру  $e_{ij}$  ставится в соответствие этап сборки  $l(i,j)$ , на котором оно активируется. На основе матрицы  $M$  система выполняет агрегированную коррекцию весов:

$$w_{ij} = w_{ij} - \beta \cdot \sum_k M_{k,l(i,j)}, \quad (2.15)$$

где  $l_{(i,j)}$  – номер этапа сборки, соответствующего гиперребру  $e_{ij}$ . Суммирование ведется по всем типам отклонений  $k$ , зафиксированным на этапе  $l_{(i,j)}$ , а  $\beta$  – коэффициент агрегированной адаптации ( $\beta = 0,05$ ). В отличие от пооперационной коррекции по формуле (2.11), агрегированная коррекция по формуле (2.15) учитывает накопленную историю и обеспечивает долгосрочную адаптацию системы к типичным затруднениям конкретного оператора.

**Связь динамического гиперграфа с подготовительно-заключительным временем.** Адаптивный механизм динамического гиперграфа непосредственно влияет на подготовительно-заключительное время  $T_{пз}$  через коэффициент  $\omega$  (формула 2.5). Для опытного оператора, не допускающего отклонений, веса ребер остаются на начальном уровне, система предоставляет минимум подсказок, и  $\omega$  приближается к своему нижнему пределу (максимальное сокращение  $T_{пз}$ ). Для начинающего оператора, часто допускающего отклонения, веса снижаются, активируются корректирующие узлы с расширенными подсказками –  $T_{пз}$  при этом несколько возрастает по сравнению с минимальным значением, но остается существенно ниже, чем при традиционном методе.

Таким образом, динамический гиперграф обеспечивает автоматическую адаптацию уровня информационной поддержки к квалификации оператора, не требуя ручной настройки. Это свойство принципиально важно для мелкосерийного производства, где на одном рабочем месте могут работать операторы различной квалификации.

**Процесс адаптации.** Процесс адаптации динамического гиперграфа к действиям оператора можно разделить на три этапа:

1. Сбор данных: AR-гарнитура фиксирует положение компонентов в пространстве, отслеживает действия оператора и определяет текущий этап сборки.
2. Сравнение с эталоном: для каждого узла  $v_i$  вычисляется степень отклонения  $d_i$  текущего положения компонентов от целевого:

$$d_i = \frac{1}{N} \sum \|x_{kreal} - x_{kmodel}\|, \quad (2.16)$$

где  $x_{kreal}$  – фактические координаты  $k$ -го контрольного пункта компонента;

$X_{kmodel}$  – эталонные координаты из 3D-модели;  $N$  – количество контрольных точек.

3. Принятие решения: если  $d_i > d_{threshold}$ , система генерирует корректирующий узел  $c_k$  и модифицирует граф по формулам (2.13)–(2.14). Если  $d_i \leq d_{threshold}$ , операция считается выполненной корректно, и система переходит к следующему шагу (рисунок 2.6).

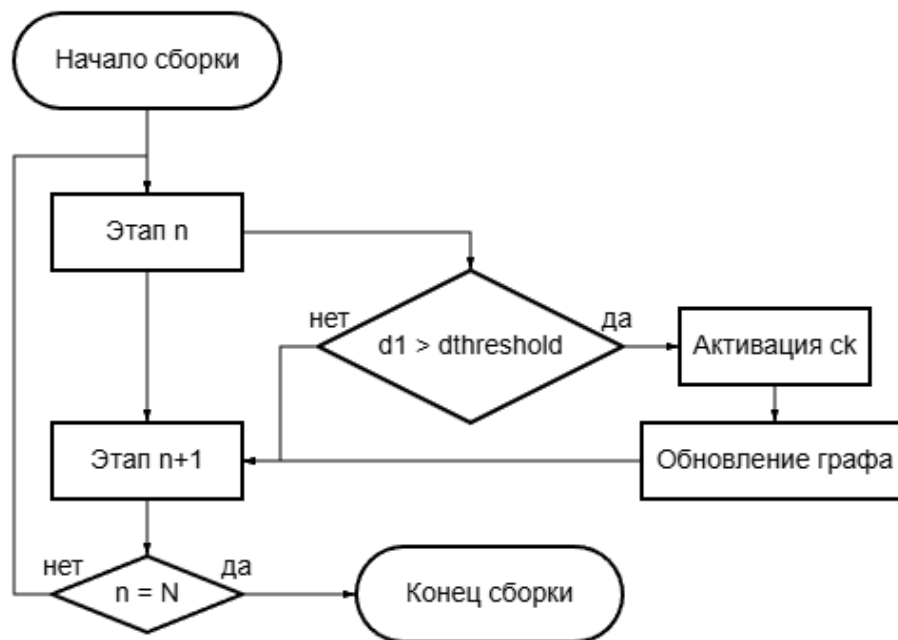


Рис.2.6 – Блок-схема процесса адаптации

Описанный механизм реализует обратную связь между действиями оператора и поведением AR-системы. В терминах теории управления, динамический гиперграф с адаптивными весами представляет собой замкнутую систему с отрицательной обратной связью: отклонения оператора (вход) приводят к усилению информационной поддержки (управляющее воздействие), что, в свою очередь, снижает вероятность последующих отклонений (выход).

Важно подчеркнуть, что адаптация происходит персонализированно: матрица наблюдений  $M$  ведется для каждого оператора отдельно, и один и тот же сборочный процесс будет сопровождаться различным объемом подсказок в зависимости от истории работы конкретного исполнителя. Это обеспечивает оптимальный баланс между сокращением  $T_{пз}$  (за счет подсказок) и сохранением  $T_{оп}$  (за счет отсутствия избыточной визуализации для опытных операторов).

## 2.5 Преобразование гиперграфа в нодовую структуру Unity

Гиперграфовая модель, построенная по алгоритму п. 2.2 и дополненная динамическими весами (п. 2.3), представляет собой абстрактное математическое описание сборочного процесса. Для реализации AR-сопровождения на устройстве Microsoft HoloLens 2 необходимо преобразовать эту модель в нодовую структуру среды Unity – программной платформы, выбранной для разработки AR-приложения (п. 1.5) [33].

Нодовая система Unity представляет собой ориентированный граф, в котором каждая нода (узел) соответствует этапу сборки, а направленные связи между нодами определяют последовательность выполнения этапов. Каждая нода содержит: набор визуальных элементов (фантомные объекты, текстовые подсказки, анимации), условия активации и завершения этапа, ссылки на 3D-модели компонентов. Задача состоит в том, чтобы автоматизировано преобразовать гиперграф  $H = (V, E)$  в нодовую структуру Unity, сохранив при этом все технологические ограничения и зависимости.

**Определение нодовой структуры.** 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:

$$f(e_i) = n_j, \quad (2.17)$$

где  $n_j$  представляет операцию сборки компонентов, входящих в гиперребро  $e_i$ . Таким образом, каждая сборочная операция (гиперребро гиперграфа) порождает одну ноду в Unity.

Дополнительно определим функцию  $g: V \rightarrow N$ , сопоставляющую отдельным компонентам (вершинам гиперграфа) ноды, в которых они впервые появляются в процессе сборки:

$$g(v_i) = n_k, \quad (2.18)$$

где  $n_k$  – нода, соответствующая первой сборочной операции, в которой задействован компонент  $v_i$ , то есть операции с наименьшим весом среди всех гиперребер, содержащих  $v_i$ .

**Матрица смежности нодовой структуры.** Для описания связей между нодами введем матрицу смежности  $B$  размером  $k \times k$ :

$$B = (b_{ij}), \quad (2.19)$$

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

Направленная связь от  $n_i$  к  $n_j$  означает, что этап  $n_j$  может быть начат только после завершения этапа  $n_i$ . Матрица  $B$  формируется на основе отношений предшествования, определенных при анализе сборочного чертежа и зафиксированных в гиперграфовой модели через веса гиперребер.

**Условия корректности преобразования.** Процесс преобразования гиперграфа в нодовую структуру должен удовлетворять следующей системе условий:

- 1)  $\forall e_i \in E, \exists n_j \in N: f(e_i) = n_j$  – каждая сборочная операция должна быть представлена нодой;
- 2)  $\forall v_i \in V, \exists n_k \in N: g(v_i) = n_k$  – каждый компонент изделия должен быть задействован хотя бы в одной ноде;
- 3)  $\forall e_i, e_j \in E: w_i > w_j \Rightarrow f(e_i)$  предшествует  $f(e_j)$  в нодовой структуре – порядок нод должен соответствовать приоритетам гиперребер;
- 4) нодовая структура не должна содержать циклов (ацикличность) – каждый этап выполняется ровно один раз.

Условие (3) устанавливает связь между весами гиперребер и порядком активации нод: операции с более высоким приоритетом выполняются раньше. Это гарантирует соблюдение технологических ограничений, заложенных при формализации сборочного чертежа.

**Алгоритм преобразования на основе топологической сортировки.** Для автоматизированного построения нодовой структуры из гиперграфа применяется топологическая сортировка – алгоритм упорядочения вершин ориентированного ациклического графа. Алгоритм работает следующим образом:

Шаг 1. Построить граф предшествования из гиперграфа: для каждой пары гиперребер  $e_i, e_j$ , связанных отношением предшествования ( $w_i > w_j$  и  $e_i \cap e_j \neq \emptyset$ ), создать направленное ребро от  $f(e_i)$  к  $f(e_j)$ .

Шаг 2. Выполнить топологическую сортировку графа предшествования, получив линейный порядок нод.

Шаг 3. Для нод с одинаковым уровнем предшествования (не связанных отношением «раньше–позже») упорядочить по убыванию весов соответствующих гиперребер.

Шаг 4. Заполнить матрицу смежности  $B$  в соответствии с полученным порядком.

**Привязка параметров фантомных объектов к нодам.** Каждой ноде  $n_i$  ставится в соответствие набор параметров фантомного объекта:

$$\Phi_i = (x_{pi}, q_{pi}) \quad (2.20)$$

где  $x_{pi} \in \mathbb{R}^3$  – целевая позиция компонента в пространстве;  $q_{pi} \in SO(3)$  – целевая ориентация (задается кватернионом).

Последовательность активации фантомных объектов определяется порядком нод, полученным при топологической сортировке. При завершении операции на ноде  $n_i$  (критерий завершения описан в п. 3.2) система автоматически активирует фантомный объект для следующей ноды  $n_{i+1}$ , обеспечивая непрерывность AR-сопровождения.

**Пример преобразования.** Для гиперграфа фидера экструдера из п. 2.2 преобразование дает следующую нодовую структуру. Гиперребра  $e_1$  (установка подающего ролика на ось) и  $e_2$  (установка прижимного ролика с пружиной) не связаны отношением предшествования – они могут выполняться в любом порядке, но обе должны предшествовать  $e_3$  (установка оси в корпус). Топологическая

сортировка с учетом весов ( $w_1 = w_2 = 1,0 > w_3 = 0,8 > w_4 = 0,6$ ) дает порядок:  $n_1 \rightarrow n_2 \rightarrow n_3 \rightarrow n_4$ . Матрица смежности:

$$B = \{\{0,1,0,0\}, \{0,0,1,0\}, \{0,0,0,1\}, \{0,0,0,0\}\}. \quad (2.21)$$

Каждой ноде присваиваются параметры фантома:  $n_1$  получает  $\Phi_1 = (x_{p1}, q_{p1})$ , где  $x_{p1}$  – координаты подающего ролика на оси, извлеченные из САПР-модели, и так далее для каждой последующей ноды (рисунок 2.7).

### Функция преобразования: $f: E \rightarrow N$

#### Система уравнений:

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

$$\forall v_i \in V, \exists n_k \in N: g(v_i) = n_k$$

$$\forall e_i, e_j: w_i > w_j \Rightarrow f(e_i) \text{ предшествует } f(e_j)$$

$$\sum |f(e_i)| = |N| - 1$$

Матрица смежности:  $B = (b_{ij})$

#### Оптимизация:

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

```
public UnityNode ConvertHypergraph(HyperGraph hyperGraph)
{
    foreach (var vertex in hyperGraph.Vertices)
    {
        if (!_vertexToNodeMap.ContainsKey(vertex))
        {
            var node = new UnityNode { Name = vertex.Name };
            _vertexToNodeMap[vertex] = node;
            _allNodes.Add(node);
        }
    }

    var sortedEdges = hyperGraph.HyperEdges
        .OrderByDescending(e => e.Weight)
        .ToList();

    foreach (var edge in sortedEdges)
    {
        var edgeNode = new UnityNode { Name = $"Edge_{edge.Id}" };
        _edgeToNodeMap[edge] = edgeNode;
        _allNodes.Add(edgeNode);

        // Связывание с нодами вершин
        foreach (var vertex in edge.Vertices)
        {
            if (_vertexToNodeMap.TryGetValue(vertex, out var vertexNode))
            {
                edgeNode.Children.Add(vertexNode);
            }
        }
    }
}
```

Рис.2.7 – Преобразование гиперграфа в нодовую структуру

## 2.6 Оптимизация последовательности сборочных операций

Топологическая сортировка (п. 2.4) определяет допустимый порядок выполнения операций, но не гарантирует его оптимальность. Если в гиперграфе существуют операции, не связанные отношением предшествования (параллельные ветви), порядок их выполнения может быть выбран различными способами. Задача оптимизации состоит в определении такой последовательности, которая минимизирует суммарные затраты времени и ресурсов [2].

**Функция стоимости.** Определим функцию стоимости  $c(e_i)$  для каждого гиперребра  $e_i$ , учитывающую основные факторы, влияющие на трудоемкость операции:

$$c(e_i) = \alpha \cdot |e_i| + \beta \cdot s(e_i) + \gamma \cdot t(e_i), \quad (2.22)$$

где  $|e_i|$  – количество компонентов, участвующих в операции (мощность гиперребра);  $s(e_i)$  – конструктивная сложность операции (оценивается экспертно по шкале от 1 до 10 с учетом числа сопрягаемых поверхностей, типа соединения, требуемой точности);  $t(e_i)$  – нормативное время выполнения операции, мин;  $\alpha, \beta, \gamma$  – весовые коэффициенты, определяемые экспериментально.

Физический смысл функции стоимости: операция тем «дороже», чем больше компонентов она затрагивает ( $|e_i|$ ), чем она сложнее ( $s(e_i)$ ) и чем больше времени требует ( $t(e_i)$ ). Весовые коэффициенты  $\alpha, \beta, \gamma$  позволяют настроить баланс между этими факторами в зависимости от конкретного производства.

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

1)  $\cup(e_i \in E^*) e_i = V$  – все компоненты изделия задействованы (полнота покрытия);

2)  $\sum(e_i \in E^*) c(e_i) \rightarrow \min$  – суммарная стоимость минимальна.

Данная задача аналогична задаче построения минимального остовного дерева, но обобщена на случай гиперграфа. Для ее решения в настоящей работе предложен модифицированный алгоритм Краскала, адаптированный для работы с гиперребрами [63].

**Модифицированный алгоритм Краскала для гиперграфов.** Алгоритм состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Отсортировать все гиперребра множества  $E$  по возрастанию стоимости  $c(e_i)$ .

Шаг 2. Инициализировать пустое множество выбранных гиперребер:  $E^* = \emptyset$ .

Шаг 3. Для каждого гиперребра  $e_i$  в отсортированном списке выполнить проверку: если добавление  $e_i$  к  $E^*$  не приводит к образованию цикла в индуцированном графе, то добавить  $e_i$  в  $E^*$ .

Шаг 4. Повторять шаг 3 до тех пор, пока все вершины не будут включены в  $E^*$ , то есть пока не выполнится условие  $\cup(e_i \in E^*) e_i = V$ .

Полученное множество  $E^*$  определяет оптимальную последовательность сборочных операций с минимальной суммарной стоимостью.

**Проверка отсутствия циклов.** Отличие модифицированного алгоритма от классического алгоритма Краскала для обычных графов состоит в процедуре проверки цикличности. Для гиперграфа цикл определяется как последовательность гиперребер  $e_1, e_2, \dots, e_k$ , в которой каждая пара соседних гиперребер имеет непустое пересечение, и при этом  $e_1 \cap e_k \neq \emptyset$ . Проверка отсутствия циклов выполняется с использованием структуры данных «система непересекающихся множеств» (Union-Find), адаптированной для гиперребер: при добавлении гиперребра  $e_i$  проверяется, принадлежат ли все его вершины одному и тому же множеству; если да – добавление  $e_i$  создаст цикл и должно быть отклонено.

**Сложность алгоритма.** Временная сложность модифицированного алгоритма Краскала определяется этапом сортировки и составляет  $O(m \cdot \log m)$ , где  $m$  – число гиперребер. Проверка цикличности с использованием Union-Find выполняется за  $O(m \cdot \alpha(n))$ , где  $\alpha(n)$  – обратная функция Аккермана, растущая крайне медленно. Для практических размеров задач (десятки компонентов, десятки операций) алгоритм выполняется за доли секунды.

**Пример оптимизации.** Для гиперграфа фидера экструдера из п. 2.2 зададим стоимости:  $c(e_1) = 2,5$  (два компонента, средняя сложность),  $c(e_2) = 4,2$  (три компонента, высокая сложность – установка пружины),  $c(e_3) = 3,0$  (два компонента, точное позиционирование),  $c(e_4) = 3,8$  (три компонента, электрическое подключение). После сортировки:  $e_1 (2,5) \rightarrow e_3 (3,0) \rightarrow e_4 (3,8) \rightarrow e_2 (4,2)$ . Однако  $e_3$  не может быть выполнена до  $e_1$  и  $e_2$  (технологическое ограничение: ось нельзя установить в корпус без роликов). Алгоритм учитывает это через проверку предшествования и выдает допустимую последовательность:  $e_1 \rightarrow e_2 \rightarrow e_3 \rightarrow e_4$  с суммарной стоимостью 13,5.

**Связь оптимизации с подготовительно-заключительным временем.** Оптимальная последовательность операций влияет на  $T_{пз}$  двумя путями. Во-первых, минимизация функции стоимости косвенно снижает вспомогательное время  $T_v$  за счет уменьшения числа переналадок инструмента и перемещений

компонентов. Во-вторых, оптимальный порядок операций упрощает визуализацию в AR-системе: оператор получает логически последовательные инструкции, не требующие возврата к ранее выполненным этапам, что сокращает  $T_{пз}$  за счет уменьшения когнитивной нагрузки.

## 2.7 Выводы по главе 2

Проведенные в данной главе исследования позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Математическая модель штучно-калькуляционного времени сборки с учетом AR-сопровождения (формула 2.5), основанная на стандартной структуре  $T_{шк}$  по ГОСТ 3.1109-82 и расширенная введением коэффициентов  $\varphi$  и  $\omega$ , показывает, что при малых размерах партии (характерных для мелкосерийного производства) вклад слагаемого  $T_{пз} \cdot \omega / n$  в общее сокращение  $T_{шк}$  возрастает. Это объясняет высокую эффективность AR именно для единичного и мелкосерийного производства и обосновывает целесообразность воздействия в первую очередь на подготовительно-заключительную составляющую.

2. Формализация сборочных процессов в виде гиперграфовой структуры  $H = (V, E)$  с матрицей инцидентности  $A$  и вектором весов  $W$  обеспечивает компактное и естественное представление групповых сборочных операций, затрагивающих одновременно несколько компонентов, – что невозможно при использовании обычных графов без потери информации о структуре процесса.

3. Модель динамического гиперграфа  $G(t)$  с адаптивным изменением весовых коэффициентов (формулы 2.11, 2.15) позволяет автоматически настраивать уровень информационной поддержки в зависимости от квалификации конкретного оператора. Через связь с коэффициентом  $\omega$  (формула 2.5) механизм адаптации обеспечивает оптимальный баланс между сокращением  $T_{пз}$  и сохранением оперативного времени  $T_{оп}$ , исключая необходимость ручной настройки системы.

4. Алгоритм преобразования гиперграфовой модели в нодовую структуру Unity на основе топологической сортировки (п. 2.4) с функциями  $f: E \rightarrow N$  и  $g: V \rightarrow N$  обеспечивает однозначное соответствие между сборочными операциями и нодами AR-приложения, что гарантирует сквозную прослеживаемость от чертежа до интерактивной инструкции.

5. Модифицированный алгоритм Краскала для гиперграфов (п. 2.5) с вычислительной сложностью  $O(m \cdot \log m)$  позволяет определять оптимальную последовательность сборочных операций в реальном времени, что делает его применимым для задач практического размера без ограничений по быстродействию.

Принципиальной особенностью предложенного метода является его модульность: каждый из рассмотренных элементов – математическая модель  $T_{шк}$ , гиперграфовая формализация, механизм адаптации, алгоритм преобразования в нодовую структуру и оптимизация последовательности – может быть использован как самостоятельно, так и в составе единого цикла проектирования AR-сопровождения. Это означает, что при изменении конструкции изделия или технологического процесса достаточно скорректировать соответствующий модуль, не перестраивая всю систему. Такая архитектура особенно существенна для мелкосерийного производства с частой сменой номенклатуры, где затраты на повторное проектирование AR-инструкций должны быть минимальны.

Совокупность полученных результатов образует метод формализации сборочных процессов, обеспечивающий полный цикл преобразования: от сборочного чертежа через гиперграфовую модель к нодовой структуре AR-приложения с оптимизированной последовательностью операций и адаптивным управлением. Экспериментальная проверка метода и определение значений коэффициентов  $\varphi$  и  $\omega$  выполнены в главе 3.

## ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

### 3.1 Объект и методика экспериментального исследования

Целью экспериментального исследования является определение значений коэффициентов  $\varphi$  и  $\omega$  (формула 2.5), количественная оценка влияния AR-сопровождения на составляющие штучно-калькуляционного времени и проверка работоспособности метода формализации сборочных процессов, разработанного в главе 2.

**Экспериментальная установка.** Для апробации результатов исследования собрана установка, включающая три основных компонента:

– аппаратное обеспечение: устройство дополненной реальности Microsoft HoloLens 2 (оптический прозрачный дисплей, поле зрения  $52^\circ$  по диагонали, разрешение  $2048 \times 1080$  на каждый глаз, масса 566 г, отслеживание положения рук, распознавание жестов, голосовое управление, пространственная привязка с точностью 1-2 см);

– программное обеспечение: AR-приложение, разработанное в среде Unity с использованием пакета Mixed Reality Toolkit (MRTK), реализующее нодовую структуру, систему фантомных объектов и корректирующий алгоритм;

– рабочая зона с компонентами сборки: стол с размеченными областями для деталей и инструментов, набор компонентов экструдера FDM-системы (рисунок 3.1).

Выбор Microsoft HoloLens 2 в качестве аппаратной платформы обусловлен возможностью работы в режиме оптической прозрачности, что позволяет оператору одновременно видеть реальные компоненты и наложенные виртуальные объекты без отрыва от рабочей зоны. Кроме того, встроенные средства пространственного позиционирования обеспечивают точность привязки фантомных объектов, достаточную для задач узловой сборки.

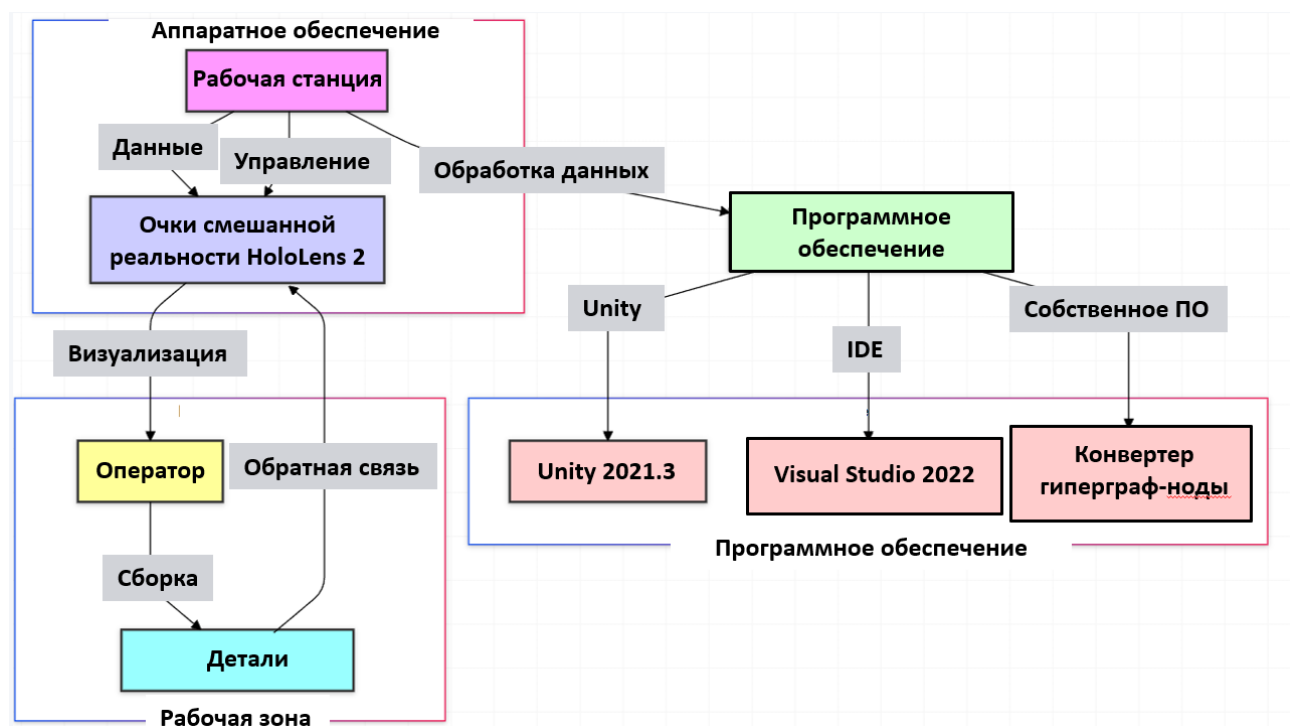


Рис.3.1 – Схема установки для проведения эксперимента

**Объект сборки.** В качестве объекта экспериментального исследования выбран экструдер FDM-системы – узел аддитивной машины, характеризующийся признаками, типичными для мелкосерийной ручной сборки неполной взаимозаменяемости (п. 1.7): значительное число компонентов (27 деталей), наличие деталей схожего внешнего вида, высокие требования к точности позиционирования (допуски до 0,1 мм для сопряжения направляющих), разнородность операций (механическая сборка, электрическое подключение, настройка и калибровка), единичный и мелкосерийный характер производства.

Сборочный чертеж экструдера был формализован в гиперграфовую структуру по алгоритму п. 2.2. Полученный гиперграф содержит 27 вершин и 12 гиперребер. На его основе сформирована нодовая структура из 12 нод с привязанными параметрами фантомных объектов (п. 2.4), которые показаны на рисунке 3.2. Последовательность операций оптимизирована модифицированным алгоритмом Краскала (п. 2.5).

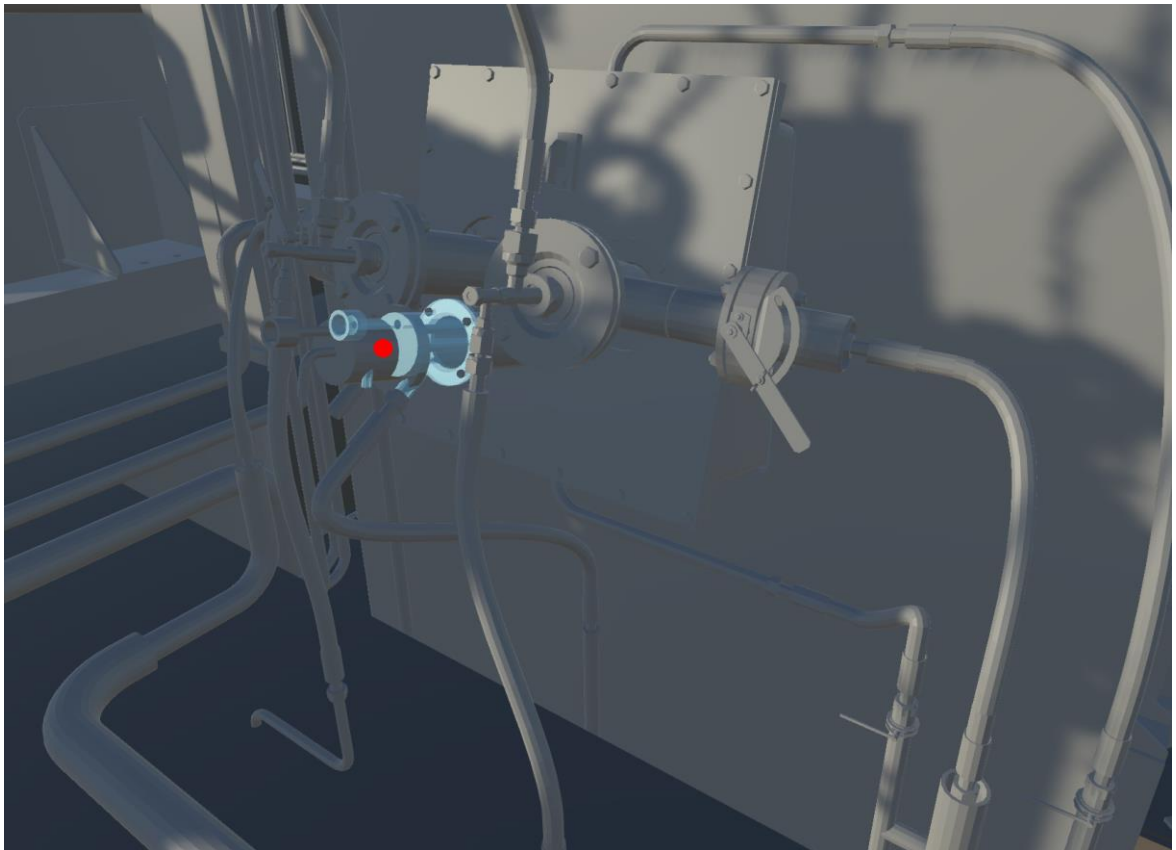


Рис.3.2 – Система визуального сопровождения объекта-фантома

**Методика проведения эксперимента.** Эксперимент проводился с участием 10 операторов различной квалификации. Уровень квалификации оценивался по шкале К от 1 (новичок, не имеющий опыта сборки данного типа изделий) до 10 (эксперт с опытом более 50 сборок данного изделия). Распределение операторов: 4 новичка (К = 1-3), 3 оператора среднего уровня (К = 4-6), 3 эксперта (К = 7-10).

Каждый оператор выполнял сборку экструдера в двух условиях:

– традиционный метод: оператор работает с бумажным сборочным чертежом и технологической картой, самостоятельно определяет последовательность действий, идентифицирует детали и контролирует правильность установки;

– AR-метод: оператор работает с устройством Microsoft HoloLens 2, получает пошаговые визуальные инструкции, фантомные объекты для позиционирования компонентов и автоматический контроль правильности установки.

Порядок чередования условий (традиционный → AR или AR → традиционный) был рандомизирован для исключения эффекта переноса навыков. Каждый оператор выполнял не менее 5 повторений в каждом условии.

**Методика хронометража.** Ключевой особенностью настоящего эксперимента является отдельный замер составляющих штучно-калькуляционного времени, а не только общего времени сборки. Для каждого цикла сборки фиксировались:

– подготовительно-заключительное время  $T_{пз}$ : от момента получения задания до начала первой операции соединения (включает изучение документации / ожидание загрузки AR-сценария, идентификацию компонентов, подготовку инструмента) и от завершения последней операции до сдачи изделия;

– основное время  $T_o$ : суммарное время непосредственного выполнения соединений (затяжка крепежа, установка деталей в сопрягаемые поверхности, электрическое подключение);

– вспомогательное время  $T_v$ : промежуточные обращения к документации в ходе операции, перемещение инструмента, промежуточный контроль;

– время обслуживания и отдыха  $T_{об} + T_{отд}$ : перерывы, уход за рабочим местом;

– количество отклонений (ошибок): фиксировалось как сопутствующий показатель.

Хронометраж выполнялся двумя способами: ручным (наблюдатель с секундомером фиксировал границы между составляющими по заранее определенным признакам) и автоматическим (AR-система записывала временные метки начала и завершения каждой ноды). Для AR-метода использовались данные автоматического хронометража; для традиционного – данные ручного наблюдения.

### 3.2 Система фантомных объектов

Ключевым элементом разработанного AR-приложения является система фантомных объектов, обеспечивающая точное позиционирование компонентов в пространстве и реализующая функцию, традиционно входившую в

подготовительно-заключительное время: интерпретацию сборочного чертежа и определение целевого положения деталей.

Для каждого физического компонента создается виртуальный «фантом» – полупрозрачная голограмма, отображаемая в поле зрения оператора и указывающая целевое положение и ориентацию детали. 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 объекта с фантомом (попадание в зону допуска);
- $x(t) \in \mathbb{R}^3$  – текущая позиция объекта;
- $q(t) \in SO(3)$  – текущая ориентация объекта (кватернион).

**Условие возврата к фантому.** Динамика системы определяется условием возврата:

$$C_r(t) = \neg H(t) \wedge P(t), \quad (3.1)$$

которое активируется при отпускании объекта в зоне фантома. Физический смысл: когда оператор отпускает деталь ( $H = 0$ ) и она находится вблизи целевого положения ( $P = 1$ ), система автоматически «притягивает» деталь к точному положению фантома.

**Уравнение обновления позиции.** Позиция объекта обновляется в каждом кадре согласно уравнению:

$$x(t+\Delta t) = H(t) \cdot x_h(t) + [C_r(t) \wedge D(x(t), x_p)] \cdot x_p + \\ + [\neg(H(t) \vee (C_r(t) \wedge D(x(t), x_p)))] \cdot x(t), \quad (3.2)$$

где  $x_h(t)$  – позиция руки оператора;  $x_p$  – целевая позиция фантома;  $D(x(t), x_p) = \|x(t) - x_p\| \geq \varepsilon$  – условие превышения порогового расстояния  $\varepsilon = 0,01$  м.

Уравнение (3.2) реализует три режима поведения объекта: если объект в руке оператора ( $H = 1$ ) – он следует за рукой; если объект отпущен в зоне фантома и

расстояние до целевой позиции превышает  $\varepsilon$  – объект перемещается к фантому; во всех остальных случаях – объект остается на месте.

Корректность ориентации определяется сопоставлением текущего кватерниона  $q(t)$  с целевым  $q_r$ : система классифицирует ориентацию как верную ( $O = 1$ ) или неверную ( $O = 0$ ).

**Визуализация углового отклонения.** Для операций, требующих точной ориентации компонентов (например, сопряжение направляющих при методе неполной взаимозаменяемости), система дополнительно визуализирует угловое отклонение текущей ориентации детали от целевой. Оператор видит цветовой индикатор, изменяющийся от красного (большое отклонение) через желтый к зеленому (допуск достигнут), что позволяет выполнять точную ориентацию без обращения к измерительным инструментам (рисунок 3.3).

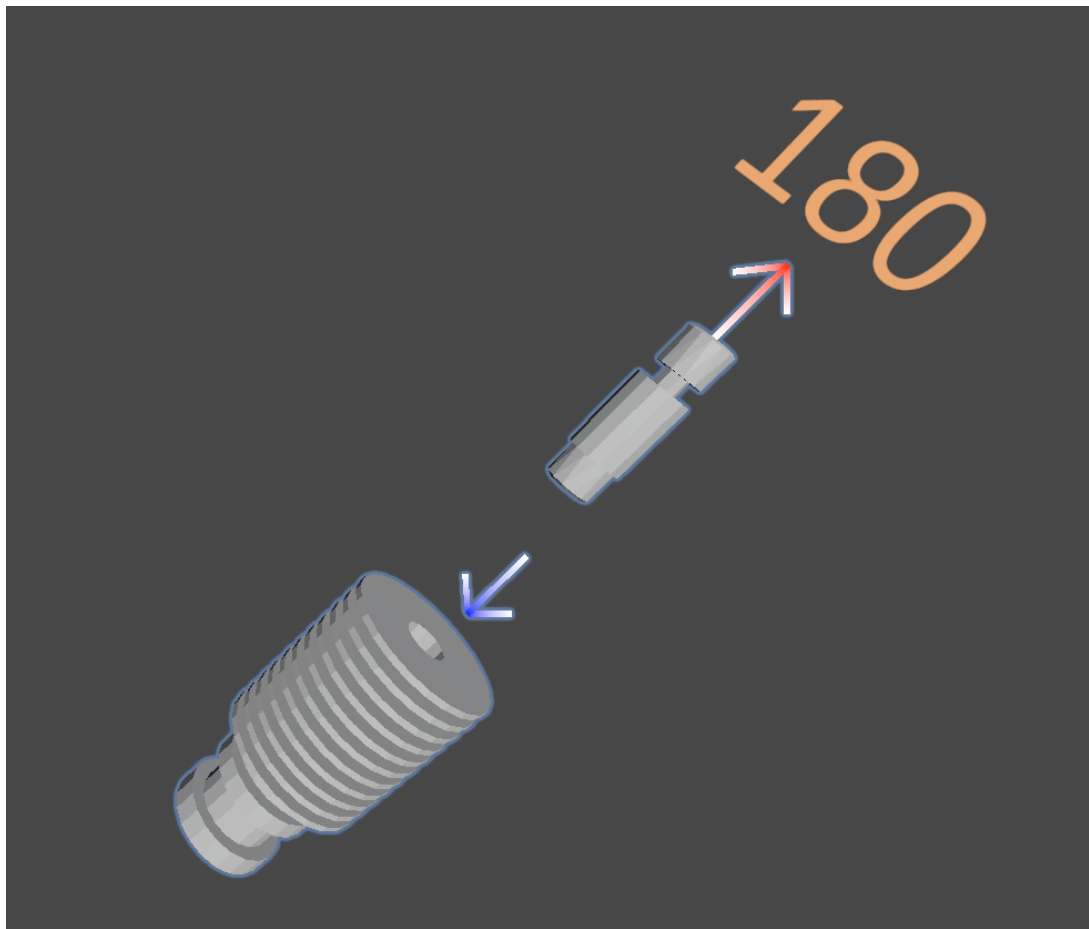


Рис.3.3 – Визуализация виртуального помощника отклонения угла поворота относительно заданной оси сопряжения

**Критерий завершения операции.** Операция считается завершённой при одновременном выполнении двух условий:

$$\|x(t) - x_p\| < \varepsilon \text{ и } O(t) = 1, \quad (3.3)$$

где  $\varepsilon$  – допуск по позиции;  $O(t)$  – бинарный признак корректности ориентации компонента ( $O = 1$ , если ориентация соответствует целевой,  $O = 0$  в противном случае). При выполнении условия (3.3) система фиксирует время завершения операции и автоматически активирует фантомный объект для следующей ноды..

**Интеграция с гиперграфовой моделью.** Связь системы фантомных объектов с гиперграфовой моделью осуществляется через сопоставление каждой ноды  $n_i$  набора параметров фантома  $\Phi_i = (x_{pi}, q_{pi})$ , определенного в п. 2.4. Последовательность активации фантомов задается порядком нод, полученным при топологической сортировке гиперграфа. При срабатывании корректирующего алгоритма (п. 2.3) вместо стандартного фантома активируется расширенный набор визуальных подсказок: дополнительные стрелки-указатели, текстовые пояснения, анимация процесса установки.

### 3.3 Архитектура программного модуля AR-сопровождения сборки

Для реализации метода формализации сборочных процессов и обеспечения AR-сопровождения на устройстве Microsoft HoloLens 2 разработан программный модуль, архитектура которого определяется функциональными требованиями технологического процесса сборки. Модуль не является самостоятельным программным продуктом общего назначения – он представляет собой технологический инструмент, реализующий замкнутый контур управления информационной поддержкой оператора.

Архитектура модуля включает четыре функциональных блока, каждый из которых соответствует определенной задаче в контуре управления технологическим процессом (рисунок 3.4).

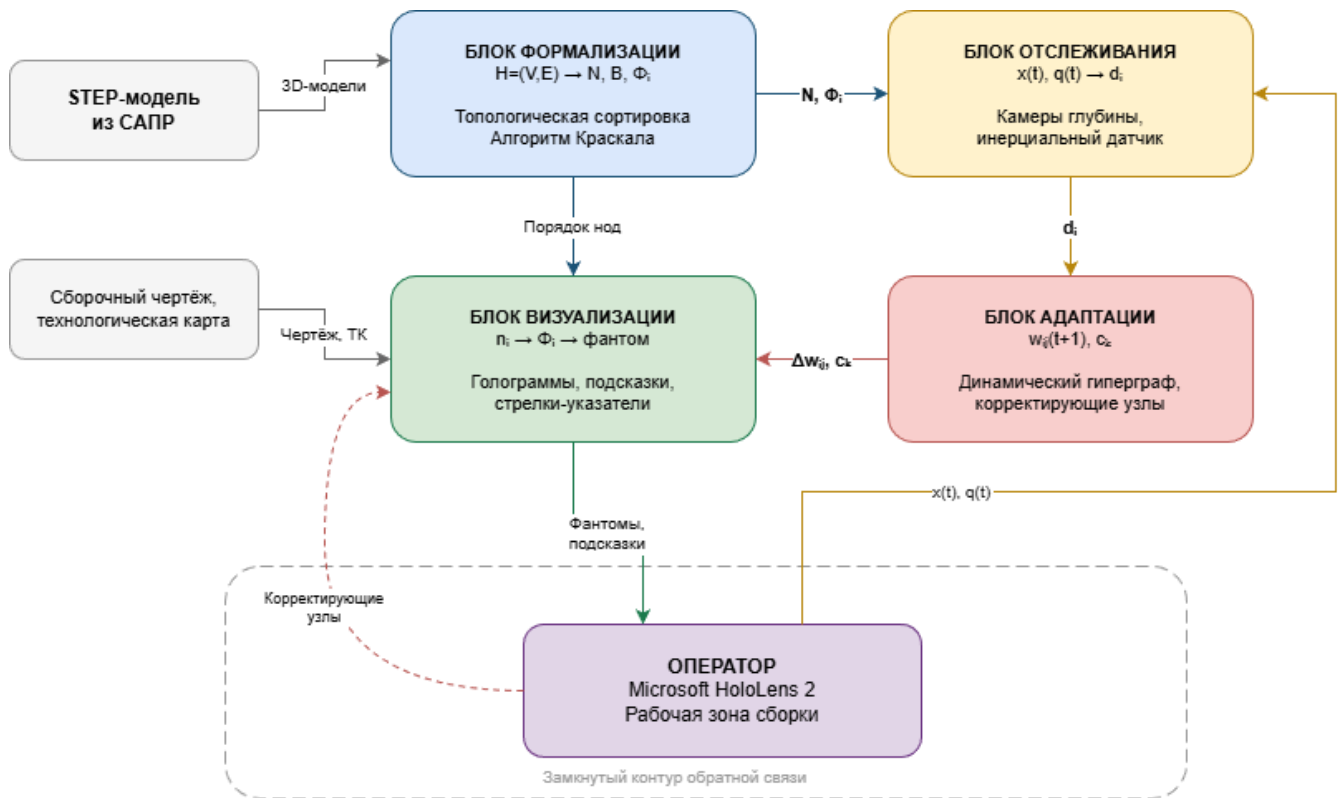


Рис.3.4 – Функциональная архитектура программного модуля AR-сопровождения сборки

**Блок формализации** принимает на вход гиперграф  $H = (V, E)$  с матрицей инцидентности  $A$  и вектором весов  $W$ , выполняет топологическую сортировку (п. 2.4) и оптимизацию последовательности модифицированным алгоритмом Краскала (п. 2.5). На выходе – упорядоченная нодовая структура  $N$  с матрицей смежности  $V$  и привязанными параметрами фантомных объектов  $\Phi_i$ . Блок формализации выполняется однократно, при подготовке AR-приложения к работе. Время выполнения для экструдера Hydra (32 вершины, 15 гиперребер) составило менее 0,01 с.

**Блок визуализации** принимает текущую ноду  $n_i$  с параметрами  $\Phi_i = (x_{pi}, q_{pi})$  и генерирует фантомный объект в пространстве рабочей зоны. Фантом представляет собой полупрозрачную голограмму компонента в целевом положении, текстовую подсказку с наименованием детали и действием, и стрелки-указатели направления установки. Блок визуализации работает непрерывно (обновление каждый кадр, 30 fps) и обеспечивает совмещение виртуальных объектов с реальным пространством через систему пространственных якорей.

**Блок отслеживания** принимает данные от четырех камер глубины и инерциального датчика устройства HoloLens 2. На каждом кадре блок определяет: текущую позицию  $x(t)$  и ориентацию  $q(t)$  компонента в пространстве рабочей зоны; состояние рук оператора  $H(t)$  (захват / отпускание); степень отклонения  $d_i$  текущего положения компонента от целевого по формуле (2.16). Данные передаются в блок адаптации для принятия решения.

**Блок адаптации** реализует механизм динамического гиперграфа (п. 2.3). На основании значения  $d_i$  блок обновляет вес ребра  $w_{ij}$  по формуле (2.11), проверяет условие блокировки  $w_{ij} < w_{\min}$  (формула 2.12) и при необходимости активирует корректирующий узел  $s_k$ , модифицируя граф по формулам (2.13)–(2.14). Результат – сигнал блоку визуализации об изменении набора подсказок: расширенные инструкции для проблемного перехода или минимальные подсказки для стабильно выполняемых операций.

Совокупность четырех блоков образует замкнутый контур с отрицательной обратной связью: отклонения оператора (вход) через блок отслеживания поступают в блок адаптации, который корректирует поведение блока визуализации (управляющее воздействие), что снижает вероятность последующих отклонений (выход). Контур замыкается через оператора — человека, взаимодействующего с фантомными объектами в реальном пространстве. Такая архитектура обеспечивает непрерывную самонастройку системы в процессе сборки: чем больше отклонений фиксируется, тем интенсивнее информационная поддержка, и наоборот — при стабильной работе объем подсказок автоматически сокращается.

С позиции структуры штучно-калькуляционного времени функциональные блоки воздействуют на различные составляющие. Блок формализации определяет оптимальную последовательность операций, сокращая  $T_{пз}$  за счет исключения самостоятельного планирования оператором. Блок визуализации предоставляет фантомные объекты, заменяющие обращение к чертежу ( $T_{пз}$ ) и промежуточный контроль ( $T_{в}$ ). Блок отслеживания автоматизирует проверку правильности установки ( $T_{в}$ ). Блок адаптации обеспечивает персонализацию уровня поддержки, оптимизируя баланс между сокращением  $T_{пз}$  и сохранением  $T_{оп}$ .

### 3.4 Алгоритм автоматического продвижения по нодовой структуре

В традиционном процессе сборки оператор самостоятельно определяет последовательность действий, обращаясь к сборочному чертежу и технологической карте. Каждое такое обращение – это прерывание рабочего цикла: оператор откладывает инструмент, находит нужный фрагмент документации, интерпретирует его и возвращается к работе. В условиях мелкосерийного производства, когда оператор не имеет устойчивого навыка сборки конкретного изделия, подобные прерывания происходят многократно и составляют значительную часть подготовительно-заключительного времени  $T_{пз}$ . По результатам предварительных экспериментов (п. 2.1), на долю информационных прерываний приходится до 30–40% от общего  $T_{пз}$ , что делает их приоритетным объектом сокращения.

Автоматическое продвижение по нодовой структуре устраняет эту необходимость: система сама определяет текущий этап сборки, отслеживает его завершение и предъявляет оператору информацию о следующем шаге без обращения к бумажной или электронной документации. Тем самым информационная составляющая  $T_{пз}$  сводится к минимуму – оператор получает нужную инструкцию в нужный момент непосредственно в поле зрения.

Реализация данного подхода требует решения нескольких взаимосвязанных задач: определения момента завершения текущей операции на основе пространственных данных, корректного перехода к следующей ноде с учетом матрицы смежности  $B$ , а также обработки ситуаций отклонения, когда действия оператора не соответствуют ожидаемому результату. Перечисленные задачи решаются единым алгоритмом автоматического продвижения по нодовой структуре, который интегрирует в замкнутый цикл отслеживание действий оператора, проверку условий завершения операций и адаптацию весов динамического гиперграфа. Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 3.5.

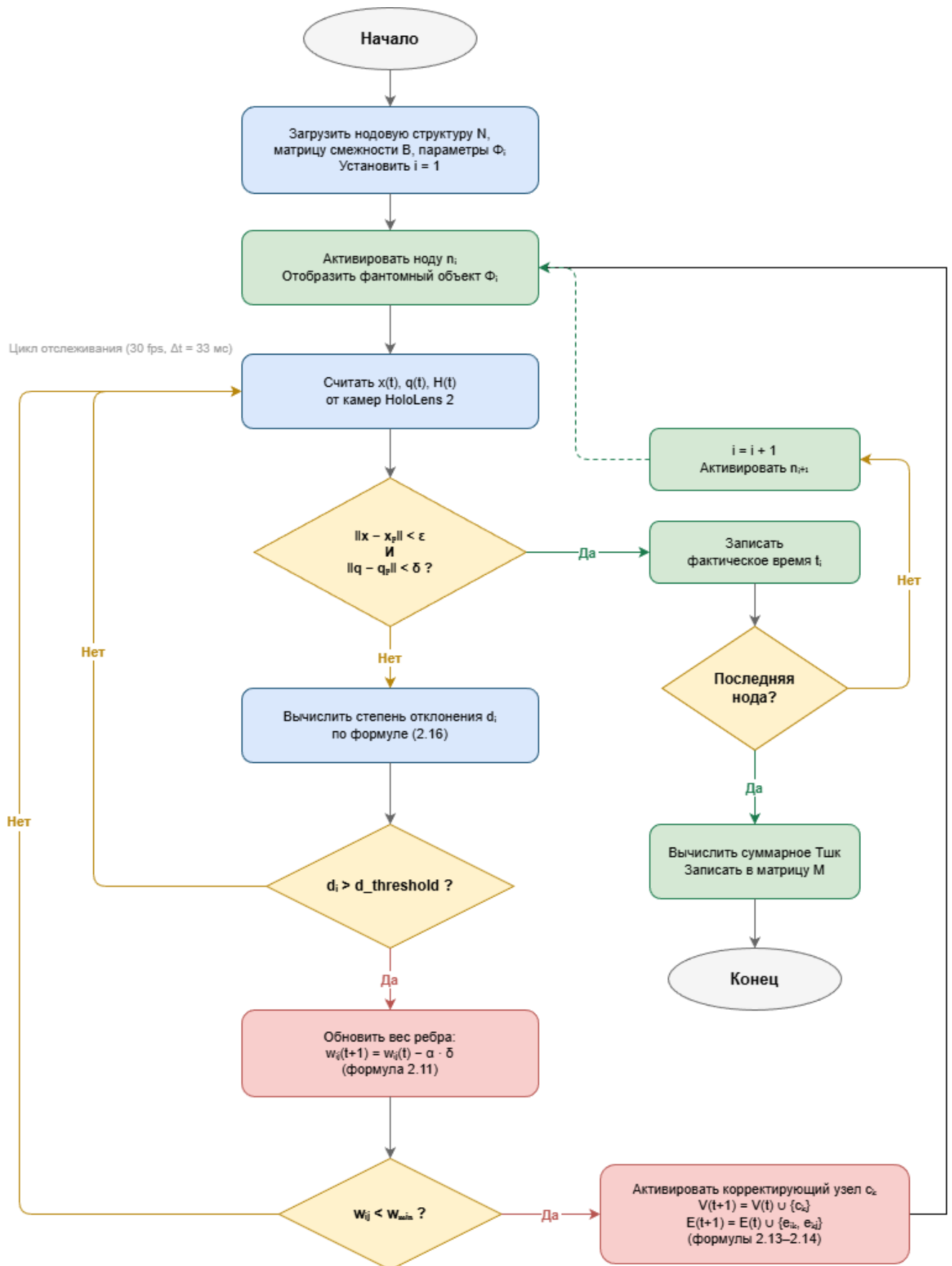


Рис.3.5 – Блок-схема алгоритма автоматического продвижения по нодовой структуре

**Инициализация.** При запуске AR-приложения загружаются нодовая структура  $N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$  с матрицей смежности  $B$  и набором параметров фантомных объектов  $\Phi_i$ . Текущий индекс устанавливается на первую ноду:  $i = 1$ . Система активирует фантомный объект  $\Phi_1$ , отображая полупрозрачную голограмму первого компонента в целевом положении.

**Цикл отслеживания.** На каждом кадре (30 fps, период  $\Delta t = 33$  мс) выполняется следующая последовательность действий. Камеры глубины HoloLens 2 передают данные о пространственном положении объектов и рук оператора. Система обновляет переменные состояния: индикатор захвата  $H(t)$ , текущую позицию  $x(t)$  и ориентацию  $q(t)$  компонента.

**Проверка условия завершения.** Для текущей ноды  $n_i$  проверяется одновременное выполнение двух условий (формула 3.3):  $\|x(t) - x_{pi}\| < \varepsilon_i$  (попадание в допуск по позиции) и  $O(t) = 1$  (попадание в ориентацию). Если оба условия выполнены – операция считается завершённой: система фиксирует фактическое время  $t_i$ , обновляет матрицу наблюдений  $M$  и переходит к следующей ноде  $n_{i+1}$  по матрице смежности  $B$ . Фантомный объект  $\Phi_i$  деактивируется, активируется  $\Phi_{i+1}$ .

**Обнаружение отклонений.** Если условие завершения не выполнено, система вычисляет степень отклонения  $d_i$  по формуле (2.16) – среднее евклидово расстояние между фактическими и эталонными координатами контрольных точек компонента. Если  $d_i$  не превышает порогового значения  $d_{\text{threshold}}$ , цикл возвращается к считыванию данных (оператор продолжает установку компонента). Если  $d_i > d_{\text{threshold}}$  – зафиксировано отклонение.

**Адаптация весов.** При обнаружении отклонения вес соответствующего ребра обновляется по формуле (2.11):  $w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) - \alpha \cdot \delta$ , где  $\alpha = 0,1$  и  $\delta = 1$ . Далее проверяется условие блокировки (формула 2.12): если  $w_{ij} < w_{\text{min}} = 0,3$ , ребро блокируется и активируется корректирующий узел  $c_k$ . Граф модифицируется по формулам (2.13)–(2.14): множество вершин расширяется  $V(t+1) = V(t) \cup \{c_k\}$ , множество ребер –  $E(t+1) = E(t) \cup \{e_{ik}, e_{kj}\}$ . Оператору предоставляются расширенные визуальные подсказки.

**Завершение.** После успешного выполнения последней ноды  $n_k$  система вычисляет суммарное штучно-калькуляционное время  $T_{шк}$  как сумму зафиксированных  $t_i$  по всем нодам, записывает результат в матрицу наблюдений  $M$  для данного оператора и завершает цикл сборки.

Быстродействие алгоритма определяется временем одной итерации цикла отслеживания. Измерения показали, что одна итерация (считывание данных, проверка условий, обновление весов) выполняется за 2-4 мс на процессоре Qualcomm Snapdragon 850 устройства HoloLens 2, что составляет менее 12% от бюджета кадра (33 мс при 30 fps). Оставшееся время используется для рендеринга фантомных объектов. Таким образом, алгоритм не создает задержек, ощутимых оператором, и обеспечивает мгновенную реакцию на его действия.

Следует подчеркнуть, что алгоритм реализует не программную логику общего назначения, а управление конкретным технологическим процессом – пошаговым выполнением сборочных операций. Каждый элемент алгоритма имеет прямое соответствие в структуре штучно-калькуляционного времени: проверка условия завершения заменяет промежуточный контроль оператора ( $T_B$ ), автоматическое продвижение к следующей ноде заменяет обращение к документации для определения следующего шага ( $T_{пз}$ ), адаптация весов обеспечивает персонализацию  $T_{пз}$  в зависимости от квалификации.

### **3.5 Алгоритм привязки фантомных объектов к реальному изделию**

Корректность работы системы фантомных объектов критически зависит от точности совмещения виртуальных моделей с реальным пространством рабочей зоны. Задача совмещения сводится к определению матрицы трансформации между тремя системами координат: системой координат САПР (в которой заданы целевые положения компонентов), системой координат AR-устройства (в которой HoloLens 2 отслеживает объекты) и системой координат рабочей зоны (привязанной к физическому рабочему столу). Схема трансформации представлена на рисунке 3.6.

## Схема трансформации систем координат

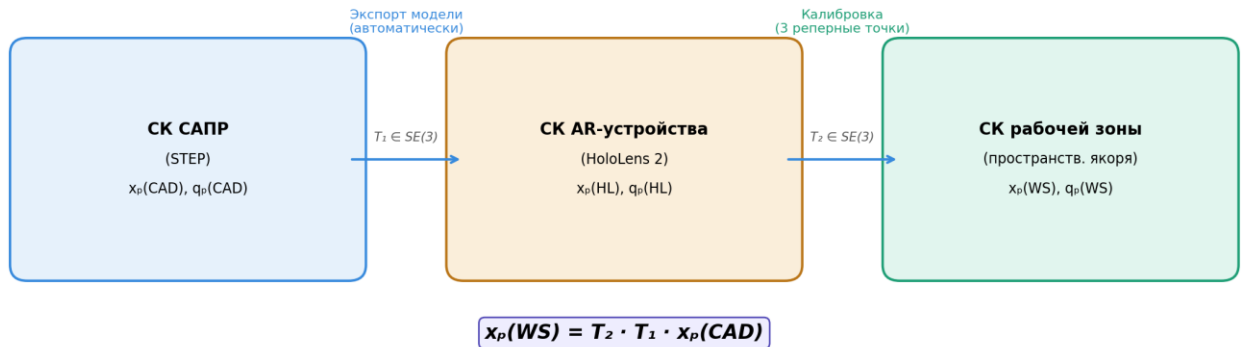


Рис.3.6 – Схема трансформации систем координат

**Трансформация  $T_1$  (САПР  $\rightarrow$  AR-устройство)** выполняется автоматически при экспорте 3D-модели из САПР в формат FBX. Система координат САПР (как правило, правая декартова, ось  $Z$  – вверх) приводится к системе координат Unity (левая декартова, ось  $Y$  – вверх). Матрица  $T_1$  определяется однократно и является постоянной для данного изделия.

**Трансформация  $T_2$  (AR-устройство  $\rightarrow$  рабочая зона)** определяется при калибровке и является переменной – она зависит от расположения изделия на рабочем столе. Калибровка выполняется следующим алгоритмом:

1. Оператор размещает изделие (или базовую деталь) на рабочем столе в произвольном положении.
2. Система предлагает оператору указать три реперные точки на изделии, нажав на них пальцем. Реперные точки выбираются на этапе подготовки AR-приложения: это характерные геометрические элементы (углы, отверстия, грани), однозначно идентифицируемые и в САПР-модели, и на физическом изделии.
3. По трем парам соответствий (реперная точка в САПР, реперная точка в пространстве AR) вычисляется матрица  $T_2 \in SE(3)$  методом наименьших квадратов. Решение единственно при условии, что три точки не лежат на одной прямой.
4. Система выполняет верификацию: отображает контрольный фантом (фантомный объект базовой детали) и предлагает оператору визуально оценить точность совмещения. Если отклонение визуально превышает допустимое – калибровка повторяется.

Итоговая трансформация координат фантома из системы САПР в систему рабочей зоны:  $x_p(\text{WS}) = T_2 \cdot T_1 \cdot x_p(\text{CAD})$ . Аналогично пересчитывается ориентация:  $q_p(\text{WS}) = T_2 \cdot T_1 \cdot q_p(\text{CAD})$ .

Экспериментальная оценка точности привязки выполнена следующим образом. После калибровки измерено расстояние между контрольным фантомом и соответствующей реальной деталью в десяти контрольных точках. Средняя ошибка составила 8,4 мм (стандартное отклонение 2,1 мм), максимальная – 12,7 мм. Данная точность достаточна для сборочных операций рассматриваемого класса: допуски позиционирования для экструдера Hydra составляют от 0,5 мм (сопряжение сопла с термобарьером, где точность обеспечивается физическим контактом деталей, а фантом лишь указывает направление) до 5 мм (установка крышки корпуса).

Для повышения устойчивости привязки при длительной работе используются пространственные якоря (spatial anchors) – маркеры, размещаемые на фиксированных элементах рабочей зоны. HoloLens 2 автоматически корректирует накопленную ошибку инерциальной навигации при обнаружении якорей в поле зрения. Рекомендуемое расстояние между якорями – 0,5-1,0 м; для рабочей зоны сборки экструдера размещено 4 якоря по углам стола.

### 3.6 Алгоритм формирования корректирующих подсказок

При активации корректирующего узла  $s_k$  (п. 2.3) система должна выбрать тип визуальной подсказки, соответствующий характеру отклонения оператора. Неправильный выбор подсказки приводит к увеличению вспомогательного времени  $T_v$  вместо его сокращения: например, стрелка направления перемещения бесполезна, если проблема состоит в ориентации компонента.

Для автоматического выбора типа подсказки разработан алгоритм, реализующий дерево решений на основе анализа вектора отклонения (рисунок 3.7). Входными данными являются позиционное отклонение  $\Delta x = \|x(t) - x_p\|$ , признак

корректности ориентации  $O(t)$  и результат идентификации, вычисленные блоком отслеживания.

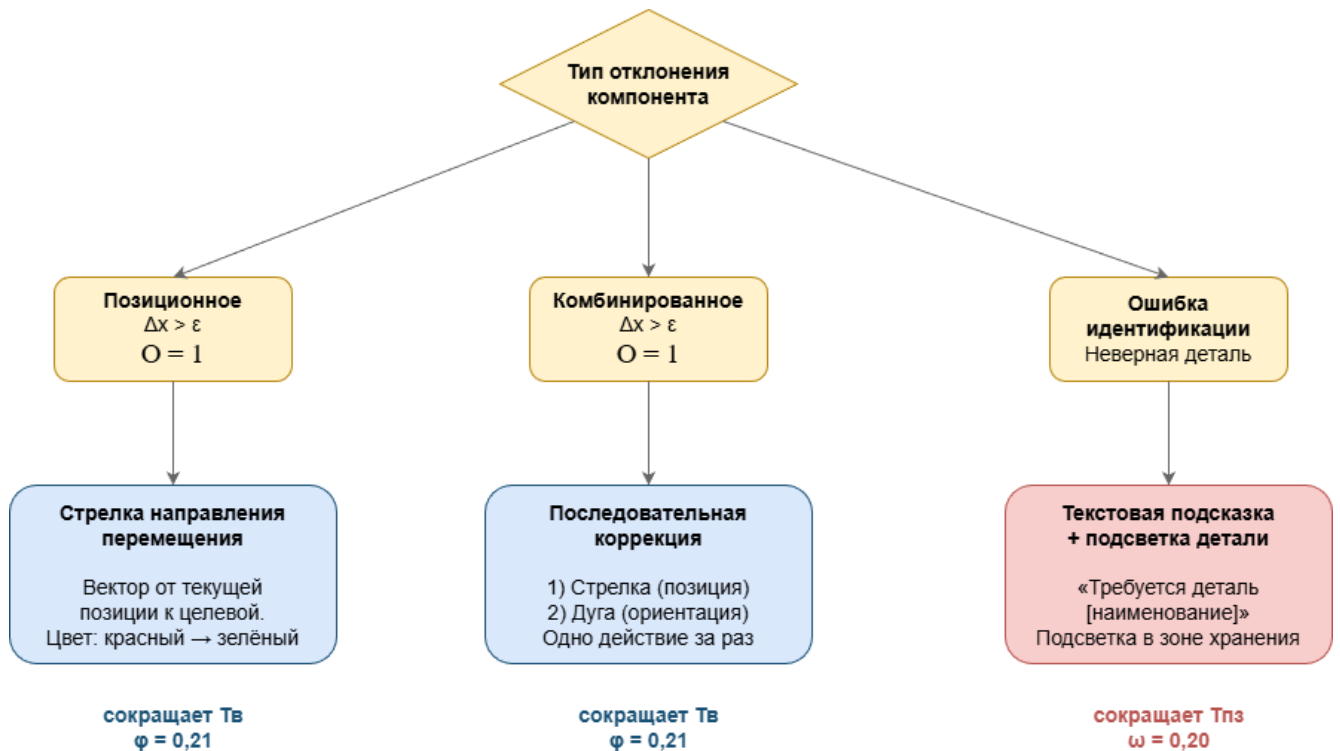


Рис.3.7 – Дерево решений выбора типа корректирующей подсказки

**Тип 1 – позиционное отклонение** ( $\Delta x > \epsilon$ ,  $O = 1$ ): компонент ориентирован правильно, но смещен от целевого положения. Система генерирует стрелку направления перемещения – вектор от текущей позиции компонента к целевой позиции фантома. Длина стрелки пропорциональна величине отклонения, цвет изменяется от красного (большое отклонение) к зеленому (приближение к допуску). Данный тип подсказки сокращает вспомогательное время  $T_v$ , устраняя необходимость визуальной оценки расстояния до целевого положения.

**Тип 3 – комбинированное отклонение** ( $\Delta x > \epsilon$ ,  $O = 0$ ): компонент смещен и ориентирован неправильно. Система сначала отображает стрелку перемещения, а по достижении позиционного допуска – индикатор необходимости поворота. Последовательная коррекция предпочтительнее одновременной, поскольку оператору когнитивно проще выполнять одно действие за раз.

**Тип 4 – ошибка идентификации** (взята не та деталь): блок отслеживания распознает форму компонента по mesh-данным камер глубины и сравнивает с

эталонной моделью текущей ноды. Если геометрия не совпадает – система генерирует текстовую подсказку «Требуется деталь [наименование]» с подсветкой правильного компонента в зоне хранения деталей. Данный тип подсказки непосредственно сокращает подготовительно-заключительное время  $T_{пз}$ , замещая операцию самостоятельной идентификации деталей оператором.

Каждый тип подсказки воздействует на определенную составляющую штучно-калькуляционного времени: типы 1 и 2 сокращают вспомогательное время  $T_{в}$  за счет ускорения позиционирования и ориентирования компонентов, тип 3 – подготовительно-заключительное время  $T_{пз}$  за счет устранения ручного поиска и идентификации деталей. Таким образом, алгоритм выбора подсказок реализует дифференцированное воздействие на структуру  $T_{шк}$ , обеспечивая сокращение именно той составляющей, которая является причиной задержки в конкретный момент сборки.

Связь типов подсказок с составляющими штучно-калькуляционного времени представлена в таблице 3.1. Из таблицы видно, что подсказки типов 1-3 воздействуют на вспомогательное время ( $T_{в}$ ), а подсказка типа 4 – на подготовительно-заключительное ( $T_{пз}$ ). Это согласуется с экспериментальными данными (п. 3.3.1): вспомогательное время сократилось в 4,8 раза ( $\varphi = 0,21$ ), подготовительно-заключительное – в 5 раз ( $\omega = 0,20$ ).

Таблица 3.1 Типы корректирующих подсказок и их связь с составляющими  $T_{шк}$

Тип	Условие	Визуализация	Составляющие $T_{шк}$	Коэфф.
1.	$\Delta x > \varepsilon, \Delta q < \delta$	Стрелка перемещения	$T_{в}$	$\varphi$
2.	$\Delta x < \varepsilon, \Delta q > \delta$	Дуга поворота + цвет	$T_{в}$	$\varphi$
3.	$\Delta x > \varepsilon, \Delta q > \delta$	Послед.: стрелка → дуга	$T_{в}$	$\varphi$
4.	Неверная деталь	Текст + подсветка	$T_{пз}$	$\omega$

Экспериментальная проверка алгоритма выполнена в ходе основного эксперимента (п. 3.1). За 100+ циклов сборки зафиксировано следующее распределение типов корректирующих подсказок: тип 1 (позиционное) – 47% случаев, тип 2 (ориентационное) – 28%, тип 3 (комбинированное) – 14%, тип 4 (идентификация) – 11%. Преобладание позиционных отклонений объясняется тем, что ориентация компонентов в значительной степени задается формой сопрягаемых поверхностей (деталь «встает» только в одном положении), тогда как точная позиция требует пространственной оценки расстояний, которая представляет большую когнитивную сложность для оператора.

Частота активации корректирующих подсказок снижалась по мере накопления опыта оператором. Для новичков ( $K < 3$ ) среднее число активаций составляло 8,2 на одну сборку в первых пяти циклах и снижалось до 2,4 после пятнадцати циклов. Для экспертов ( $K > 7$ ) – 1,1 в первых циклах и 0,3 после пятнадцати. Данная динамика согласуется с механизмом адаптивного гиперграфа: по мере стабилизации работы оператора веса ребер остаются выше порогового значения, и корректирующие узлы не активируются.

### 3.7 Результаты экспериментального исследования

Экспериментальная апробация проводилась с участием 10 операторов различной квалификации. Каждый оператор выполнил не менее 5 циклов сборки в каждом из двух условий (традиционный метод и AR-метод). Суммарно выполнено более 100 циклов сборки с отдельным хронометражем, составляющих  $T_{шк}$ .

**Общие результаты.** Среднее штучно-калькуляционное время сборки экструдера сократилось с 68,7 мин (традиционный метод) до 42,3 мин (AR-метод), что составляет улучшение на 38,4%. Данный результат согласуется с диапазоном 25–47%, установленным в обзоре литературы (п. 1.3), и подтверждает применимость разработанной модели для рассматриваемого класса изделий. Время обучения новых операторов сократилось с 21 до 5 рабочих дней – оператор

достигал стабильного уровня производительности в 4,2 раза быстрее, чем при работе с бумажной документацией. Как сопутствующий эффект зафиксировано снижение числа отклонений с 3,8 до 1,2 на одну сборку, что объясняется превентивным характером AR-сопровождения: фантомные объекты и автоматическое продвижение по нодовой структуре предупреждают ошибки на этапе их возникновения, а не фиксируют их постфактум.

**Декомпозиция штучно-калькуляционного времени по составляющим.** Раздельный хронометраж позволил определить, за счет каких составляющих достигнуто сокращение общего  $T_{шк}$ . Результаты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Составляющие штучно-калькуляционного времени сборки экструдера при традиционном и AR-методе

Составляющая	Традиционный метод, мин	AR-метод, мин	Сокращение, %	Коэффициент
$T_{пз}$ (подготовительно-заключительное)	$21,5 \pm 4,2$	$4,3 \pm 1,1$	80,0	$\omega = 0,20$
$T_{в}$ (вспомогательное)	$5,8 \pm 1,3$	$1,2 \pm 0,4$	79,3	$\varphi = 0,21$
$T_{о}$ (основное)	$38,2 \pm 3,1$	$32,7 \pm 2,4$	14,4	–
$T_{об} + T_{отд}$ (обслуживание и отдых)	3,2	4,1	–	–
<b><math>T_{шк}</math> (штучно-калькуляционное)</b>	<b>68,7</b>	<b>42,3</b>	<b>38,4</b>	–

**Подготовительно-заключительное время  $T_{пз}$**  показало наибольшее абсолютное сокращение: с  $21,5 \pm 4,2$  мин до  $4,3 \pm 1,1$  мин. Коэффициент сокращения  $\omega = 4,3 / 21,5 = 0,20$ , что означает пятикратное уменьшение. При традиционном методе  $T_{пз}$  включало: изучение сборочного чертежа (8-12 мин), идентификацию и раскладку компонентов (5-7 мин), подготовку инструмента

(2-3 мин), ознакомление с последовательностью операций (3-5 мин). При AR-методе изучение чертежа полностью исключается (заменяется загрузкой AR-сценария за 30-40 с), идентификация компонентов выполняется по подсветке фантомов (1-2 мин), последовательность операций задается автоматически нодовой структурой.

**Вспомогательное время  $T_v$**  сократилось с  $5,8 \pm 1,3$  мин до  $1,2 \pm 0,4$  мин ( $\varphi = 0,21$ , сокращение в 4,8 раза). При традиционном методе основную часть  $T_v$  составляли промежуточные обращения к документации (2-3 мин) и контроль правильности установки путем сверки с чертежом (1,5-2 мин). При AR-методе промежуточные обращения к документации исключены (следующий шаг отображается автоматически), а контроль интегрирован в систему фантомных объектов (система сигнализирует о достижении целевого положения).

**Основное время  $T_o$**  уменьшилось с  $38,2 \pm 3,1$  мин до  $32,7 \pm 2,4$  мин (на 14,4%). Данное сокращение не является целевым эффектом AR-сопровождения и объясняется более точным первоначальным позиционированием компонентов благодаря фантомным объектам: оператор реже выполняет повторные попытки совмещения сопрягаемых поверхностей.

**Время обслуживания и отдыха  $T_{об} + T_{отд}$**  составило 3,2 мин при традиционном методе и 4,1 мин при AR-методе. Различие статистически не значимо ( $p > 0,05$ ) и находится в пределах погрешности измерения. Незначительное увеличение при AR-методе может быть связано с необходимостью периодической подстройки устройства HoloLens 2.

Проверка арифметической согласованности: для традиционного метода  $T_o + T_v + T_{пз} + (T_{об} + T_{отд}) = 38,2 + 5,8 + 21,5 + 3,2 = 68,7$  мин; для AR-метода:  $32,7 + 1,2 + 4,3 + 4,1 = 42,3$  мин. Суммы совпадают с общим  $T_{шк}$ , что подтверждает корректность раздельного хронометража. Наибольший абсолютный вклад в сокращение  $T_{шк}$  вносят  $T_{пз}$  (снижение на 17,2 мин) и  $T_v$  (снижение на 4,6 мин), что в совокупности составляет 82,6% от общей экономии и согласуется с теоретическим выводом о приоритетном воздействии AR на подготовительно-заключительную и вспомогательную составляющие.

Таким образом, наибольший вклад в сокращение  $T_{\text{шк}}$  вносит уменьшение подготовительно-заключительного времени ( $\omega = 0,20$ , сокращение в 5 раз) и вспомогательного времени ( $\varphi = 0,21$ , сокращение в 4,8 раза). Суммарно на эти две составляющие приходится  $(21,5 - 4,3) + (5,8 - 1,2) = 21,8$  мин из общего сокращения 26,4 мин, то есть 82,6%. Оставшиеся 17,4% обеспечены сокращением основного времени. Это подтверждает центральный тезис работы: основной резерв повышения эффективности мелкосерийной сборки лежит в оптимизации информационно-подготовительной составляющей процесса (рисунок 3.8).

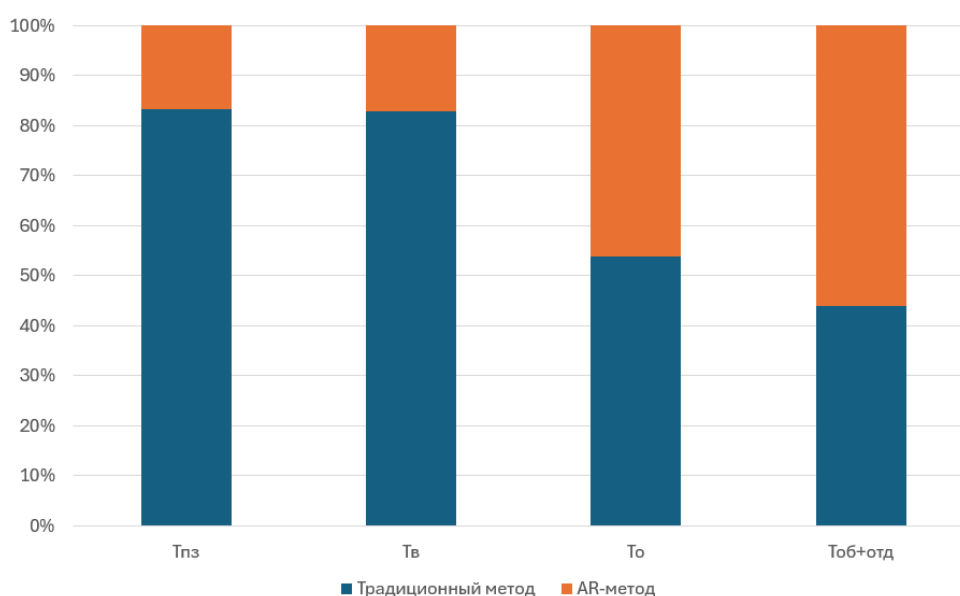


Рис.3.8 – Сравнительная структура штучно-калькуляционного времени сборки экструдера при традиционном методе и с применением AR-сопровождения

**Кривые обучения и влияние квалификации оператора.** Для исследования динамики освоения сборочного процесса проведен анализ зависимости времени сборки от номера повторения. Установлено, что данная зависимость описывается экспоненциальной функцией – классической кривой обучения:

$$T(n) = T_{\text{опт}} + (T_0 - T_{\text{опт}}) \cdot e^{-\lambda n}, \quad (3.4)$$

где  $T_0$  – время первой сборки, мин;  $T_{\text{опт}}$  – оптимальное время, достигаемое при полном освоении процесса, мин;  $\lambda$  – коэффициент скорости обучения;  $n$  – номер повторения.

Для операторов-новичков ( $K < 3$ ) получены следующие значения параметров:

- традиционный метод:  $T_0 = 95,3$  мин,  $T_{\text{опт}} = 52,1$  мин,  $\lambda = 0,18$ ;
- AR-метод:  $T_0 = 72,8$  мин,  $T_{\text{опт}} = 42,3$  мин,  $\lambda = 0,42$ .

Коэффициент скорости обучения при AR-методе ( $\lambda = 0,42$ ) в 2,3 раза превышает аналогичный показатель для традиционного метода ( $\lambda = 0,18$ ). Это означает, что новичок с AR-сопровождением 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).

Интерпретация с позиции структуры  $T_{\text{шк}}$ : быстрая фаза кривой обучения соответствует сокращению  $T_{\text{пз}}$  и  $T_{\text{в}}$  – оператор постепенно запоминает последовательность операций и перестает обращаться к документации. Выход кривой на плато означает, что  $T_{\text{пз}}$  и  $T_{\text{в}}$  достигли минимума для данного метода, а дальнейшие резервы связаны только с  $T_0$ . При AR-методе начальные значения  $T_{\text{пз}}$  и  $T_{\text{в}}$  уже значительно ниже (за счет автоматической визуализации), поэтому и стартовое время  $T_0$  ниже (72,8 vs 95,3 мин), и плато достигается быстрее (рисунок 3.9).

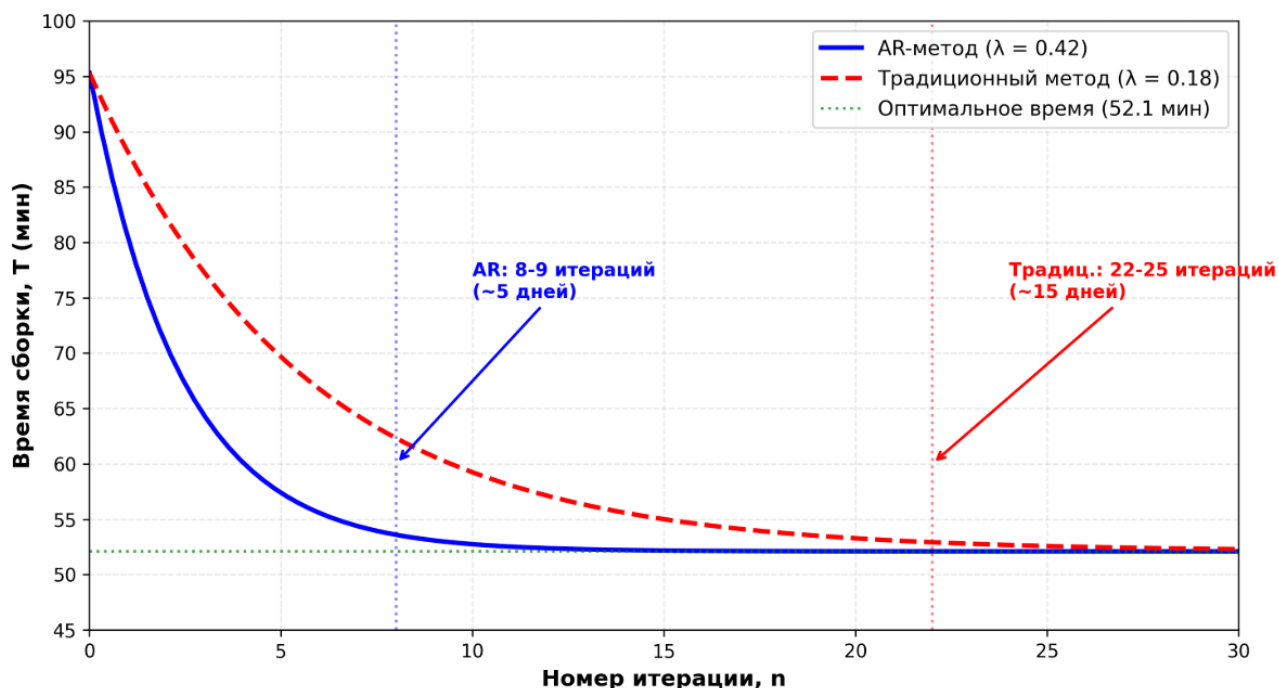


Рис.3.9 – Кривая времени обучения операторов при сборке экструдера

Зависимость времени сборки от уровня квалификации оператора  $K$  описывается гиперболической функцией:

$$T(K) = T_{min} + \frac{A}{K+B}, \quad (3.5)$$

где  $T_{min} = 39,5$  мин – минимальное время для экспертов ( $K = 10$ );  $A$  – коэффициент, характеризующий зависимость от квалификации;  $B = 1,2$  – параметр смещения.

При традиционном методе  $A = 295$ , при AR-методе  $A(AR) = 180$ . Снижение параметра  $A$  на 39% свидетельствует о том, что AR-система эффективно компенсирует недостаток опыта: разрыв в производительности между новичком и экспертом при AR-сопровождении существенно меньше, чем при традиционном методе. Это непосредственно связано с сокращением  $T_{пз}$ : у эксперта подготовительно-заключительное время минимально при любом методе, а у новичка при AR-методе  $T_{пз}$  радикально сокращается за счет автоматизации информационной подготовки.

**Анализ вариативности.** Стандартное отклонение штучно-калькуляционного времени для традиционного метода составило  $\sigma_{трад} = 15,3$  мин (22,3% от среднего значения 68,7 мин), тогда как для AR-метода  $\sigma(AR) = 5,0$  мин (11,8% от среднего значения 42,3 мин). Снижение вариативности в 1,9 раза (с коэффициента вариации 22,3% до 11,8%) указывает на существенную стабилизацию процесса. AR-система нивелирует индивидуальные различия между операторами, обеспечивая более предсказуемое и равномерное выполнение операций.

**Корреляционный анализ.** Выявлена сильная отрицательная корреляция между количеством использований AR-системы и временем выполнения операции: коэффициент корреляции Пирсона  $r = -0,87$  ( $p < 0,001$ ). Для традиционного метода эта связь слабее:  $r = -0,64$ . Различие в силе корреляции подтверждает, что AR-сопровождение обеспечивает более эффективное освоение процесса.

**Дисперсионный анализ (ANOVA).** Проведен двухфакторный дисперсионный анализ с факторами «метод сборки» (традиционный / AR) и «квалификация оператора» (новичок / средний / эксперт). Результаты:

- фактор «метод сборки»:  $F = 127,3$ ,  $p < 0,001$  – влияние AR на  $T_{шк}$  статистически высоко значимо;
- фактор «квалификация»:  $F = 48,7$ ,  $p < 0,001$  – квалификация оператора значимо влияет на  $T_{шк}$ ;
- взаимодействие факторов:  $F = 15,2$ ,  $p = 0,003$  – эффект AR различается для операторов разной квалификации (наибольший эффект – у новичков, наименьший – у экспертов).

Значимость взаимодействия факторов подтверждает, что AR-система в первую очередь сокращает  $T_{пз}$ , которое максимально у неопытных операторов и минимально у экспертов: именно поэтому эффект AR для новичков выражен сильнее.

**Регрессионная модель.** Построенная множественная регрессионная модель, учитывающая метод сборки, квалификацию и номер повторения, объясняет 89,4% вариации штучно-калькуляционного времени ( $R^2 = 0,894$ ). Высокое значение коэффициента детерминации свидетельствует о том, что выбранные факторы описывают подавляющую часть наблюдаемого разброса времени сборки.

**Зависимость снижения числа отклонений (сопутствующий эффект).** Как побочный результат зафиксировано снижение числа отклонений оператора. Временная зависимость описывается экспоненциальной функцией:

$$E(t) = E_{min} + (E_0 - E_{min}) \cdot e^{-\mu t}, \quad (3.6)$$

где  $E_0 = 4,2$  – среднее число отклонений в первые дни работы;  $E_{min} = 1,0$  – минимальное число отклонений для опытных операторов;  $\mu = 0,15$  день<sup>-1</sup> – коэффициент снижения отклонений при AR-методе;  $t$  – время работы в днях. Для традиционного метода  $\mu_{трад} = 0,06$  день<sup>-1</sup>, что в 2,5 раза ниже. Данный результат рассматривается не как самостоятельная цель, а как следствие улучшения информационной поддержки: своевременная визуализация следующего шага и фантомное позиционирование снижают вероятность ошибочных действий.

### 3.8 Свойства математической модели

Математический анализ подтверждает три важных свойства разработанной модели, обеспечивающие ее пригодность для промышленного применения.

**Детерминированность.** Для любого текущего состояния системы  $\{H(t), P(t), x(t), q(t)\}$  и заданного набора параметров фантома  $\Phi_i$  следующее состояние определяется единственным образом по уравнениям (3.1)–(3.2). Это гарантирует предсказуемость поведения AR-системы: оператор, выполняющий одни и те же действия, получает одинаковый отклик системы.

**Сходимость.** При выполнении условия возврата  $C_r(t) = 1$  и при  $D(x(t), x_p) = 1$  (расстояние до фантома превышает порог) позиция объекта гарантированно сходится к целевой позиции  $x_p$ . Это обеспечивается тем, что в уравнении (3.2) при данных условиях  $x(t+\Delta t) = x_p$ , то есть объект перемещается непосредственно к фантому.

**Непротиворечивость.** Приоритет ручного управления над автоматическим позиционированием обеспечивается множителем  $H(t)$  в первом слагаемом уравнения (3.2): если объект в руке оператора ( $H = 1$ ), он следует за рукой независимо от значений  $P(t)$  и  $D$ . Таким образом, система никогда не «вырывает» объект из рук оператора и не препятствует ручному управлению.

### 3.9 Выводы по главе 3

Проведенное экспериментальное исследование позволяет сформулировать следующие выводы.

1. Экспериментально определенные значения коэффициентов математической модели (формула 2.5) –  $\omega = 0,20$  и  $\varphi = 0,21$  – свидетельствуют о том, что AR-сопровождение оказывает наибольшее воздействие на подготовительно-заключительное время (сокращение в 5 раз) и вспомогательное

время (сокращение в 4,8 раза). На эти две составляющие приходится 82,6% общего сокращения  $T_{\text{шк}}$ , что подтверждает теоретическое положение о приоритетном влиянии AR именно на информационную составляющую трудоемкости сборки.

2. Система фантомных объектов с математическим описанием динамики позиционирования (уравнения 3.1–3.3) обеспечивает точность установки компонентов в пределах 1 см по координатам и  $1^\circ$  по ориентации, что удовлетворяет требованиям к сборке рассматриваемого класса изделий и позволяет использовать ее в качестве основного средства информационной поддержки оператора.

3. Экспоненциальная зависимость времени сборки от номера повторения (формула 3.4) с коэффициентом  $\lambda = 0,42$  для AR-метода (в 2,3 раза выше, чем для традиционного) означает, что AR-сопровождение существенно ускоряет процесс обучения: новичок достигает уровня опытного оператора за 5 дней вместо 21. Это особенно значимо для мелкосерийного производства с высокой текучестью кадров и частой сменой номенклатуры изделий.

4. Снижение зависимости  $T_{\text{шк}}$  от квалификации оператора (параметр  $A$  гиперболической модели снизился с 295 до 180) и уменьшение разброса результатов ( $\sigma$  снизилось в 1,9 раза) указывают на стабилизирующее воздействие AR-системы на технологический процесс. Статистическая значимость эффекта подтверждена дисперсионным анализом ( $F = 127,3$ ,  $p < 0,001$ ), а регрессионная модель объясняет 89,4% дисперсии данных.

5. Подтвержденные свойства математической модели – детерминированность, сходимость к целевому положению и непротиворечивость (приоритет ручного управления) – гарантируют предсказуемость поведения системы и ее пригодность для промышленного применения без риска конфликта между автоматическим позиционированием и действиями оператора.

## ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРИМЕНЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ВНЕДРЕНИЕ

### 4.1 Методика применения инструмента дополненной реальности для сокращения подготовительно-заключительного времени

На основании математической модели (глава 2) и экспериментальных результатов (глава 3) разработана методика применения инструмента дополненной реальности для сокращения штучно-калькуляционного времени сборки машиностроительных изделий. Методика ориентирована на условия мелкосерийного и единичного производства с применением метода неполной взаимозаменяемости и рассчитана на предприятия, располагающие 3D-моделями выпускаемых изделий в системе САПР. Необходимость разработки методики обусловлена тем, что существующие исследования в области AR-сопровождения сборки (п. 1.3) демонстрируют эффективность технологии в целом, однако не предлагают формализованной последовательности действий, которую инженер-технолог мог бы воспроизвести на конкретном предприятии.

Методика объединяет теоретические и экспериментальные результаты работы в единый технологический цикл: от исходных данных (сборочный чертеж, спецификация, 3D-модель) до готового AR-приложения с адаптивным сопровождением оператора. Каждый этап методики опирается на конкретный математический аппарат, разработанный в главе 2: гиперграфовую формализацию, модифицированный алгоритм Краскала, преобразование в нодовую структуру и механизм адаптации весов. Значения коэффициентов модели ( $\varphi = 0,21$ ,  $\omega = 0,20$ ) определены экспериментально в главе 3 и используются в методике для прогнозирования ожидаемого сокращения  $T_{\text{шк}}$ .

Область применения методики ограничивается изделиями, для которых выполняются следующие условия: наличие 3D-модели изделия с достаточной детализацией сборочных узлов; преобладание ручных сборочных операций с

пространственным позиционированием компонентов; малый размер партии, при котором доля  $T_{пз}$  в  $T_{шк}$  существенна. При соблюдении этих условий методика обеспечивает систематическое сокращение штучно-калькуляционного времени за счет целенаправленного воздействия на подготовительно-заключительную и вспомогательную составляющие.

## 4.2 Этапы методики

Методика представлена в виде последовательного алгоритма, состоящего из шести этапов. Каждый этап имеет определенные входные данные, результат и критерий завершения (рисунок 4.1).



Рис.4.1 – Алгоритм реализации методики сборки с применением AR

**Этап 1: оцифровка изделия и подготовка исходных данных.** Входные данные: сборочный чертеж изделия, спецификация, технологическая карта сборки, 3D-модели компонентов в формате САПР. На данном этапе 3D-модель изделия разносится на отдельные узлы сборки и детали. Каждый компонент экспортируется

в формат, совместимый со средой Unity (FBX или OBJ). Выполняется оптимизация полигональной сетки для обеспечения приемлемой производительности на устройстве HoloLens 2: рекомендуемое число полигонов на компонент – не более 10 000, суммарно на изделие – не более 200 000. Для каждого компонента определяются координаты целевого положения и ориентация в системе координат изделия.

Результат: набор 3D-моделей компонентов с координатами целевых положений, готовых к импорту в Unity (рисунок 4.2).

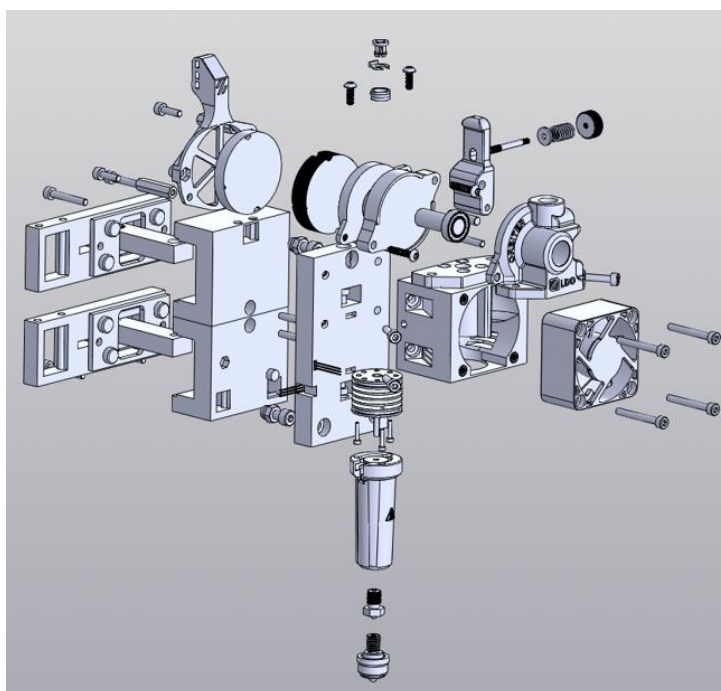


Рис.4.2 – 3D-модель сборки экструдера Hydra

**Этап 2: формализация сборочного чертежа в гиперграф.** Входные данные: сборочный чертеж, спецификация, результат этапа 1. Выполняется алгоритм формализации из п. 2.2: анализ чертежа, выделение компонентов (вершин), определение сборочных операций (гиперребер), формирование матрицы инцидентности  $A$ , назначение начальных весов  $W$  на основе технологических ограничений. Для определения отношений предшествования используется схема сборки из технологической карты. Если технологическая карта отсутствует, отношения предшествования определяются экспертно на основе анализа конструктивных зависимостей.

Результат: гиперграф  $H = (V, E)$  с матрицей инцидентности  $A$  и вектором начальных весов  $W$ .

**Этап 3: оптимизация последовательности операций.** Входные данные: гиперграф  $H = (V, E)$ , вектор весов  $W$ . Выполняется модифицированный алгоритм Краскала для гиперграфов (п. 2.5): сортировка гиперребер по стоимости  $c(e_i)$ , последовательный выбор с проверкой ацикличности, формирование оптимального множества  $E^*$ . Параметры функции стоимости  $(\alpha, \beta, \gamma)$  задаются на основе экспертной оценки или, при наличии данных предыдущих сборок, определяются статистически.

Результат: оптимальная последовательность сборочных операций  $E^*$ .

**Этап 4: преобразование гиперграфа в нодовую структуру Unity и создание фантомных объектов.** Входные данные: гиперграф  $H$ , оптимальная последовательность  $E^*$ , 3D-модели компонентов с координатами. Выполняется алгоритм преобразования из п. 2.4: топологическая сортировка, формирование нод  $N = \{n_1, \dots, n_k\}$ , заполнение матрицы смежности  $B$ . Для каждой ноды  $n_i$  создается фантомный объект с параметрами  $\Phi_i = (x_{pi}, q_{pi})$ , извлеченными из 3D-модели. Допуски  $\varepsilon_i$  назначаются исходя из требований к точности сопряжений: для ответственных соединений (сопло – термобарьер)  $\varepsilon_i = 0,5-1,0$  мм, для крепежных элементов  $\varepsilon_i = 2-5$  мм. Каждой ноде присваиваются визуальные элементы: полупрозрачная голограмма компонента в целевом положении, текстовая подсказка с наименованием детали и действием, стрелки-указатели направления установки.

Результат: нодовая структура Unity с фантомными объектами, готовая к компиляции.

**Этап 5: настройка корректирующего алгоритма.** Входные данные: нодовая структура, параметры адаптации  $\alpha, \beta, w_{\min}$ . Для каждого ребра нодовой структуры задаются параметры динамического гиперграфа (п. 2.3): коэффициент адаптации  $\alpha = 0,1$ , коэффициент агрегированной адаптации  $\beta = 0,05$ , пороговое значение блокировки  $w_{\min}$ . Для каждой ноды формируются корректирующие узлы

с<sub>к</sub> с расширенным набором визуальных подсказок: детализированная анимация процесса установки, предупреждения о типичных ошибках, дополнительные ракурсы визуализации. Инициализируется матрица наблюдений  $M$  нулевыми значениями.

Результат: полностью настроенное AR-приложение с корректирующим алгоритмом.

**Этап 6: развертывание на устройстве и калибровка.** Входные данные: скомпилированное AR-приложение. AR-приложение компилируется для платформы Universal Windows Platform (UWP) и устанавливается на Microsoft HoloLens 2. Выполняется пространственная калибровка: устройство сканирует рабочую зону, строит карту пространства и привязывает систему координат AR-приложения к реальному рабочему месту. Для повышения точности привязки могут использоваться пространственные якоря (spatial anchors) – маркеры, размещенные на рабочем столе. Проводится тестовый цикл сборки для проверки корректности позиционирования фантомных объектов и работоспособности корректирующего алгоритма.

Результат: работоспособная AR-система, готовая к промышленной эксплуатации.

**Требования к входным данным.** Для применения методики необходимы: сборочный чертеж изделия (или его электронная версия), спецификация компонентов, 3D-модели в формате САПР (STEP, IGES или нативные форматы САД-систем), технологическая карта сборки (при наличии). Минимально достаточным набором является сборочный чертеж и 3D-модели – остальная информация может быть восстановлена экспертно.

**Требования к аппаратному и программному обеспечению.** Аппаратное обеспечение: Microsoft HoloLens 2 или аналогичное устройство с оптическим прозрачным дисплеем, поддерживающее пакет MRTK. Программное обеспечение: Unity (версия 2020.3 LTS или новее), Mixed Reality Toolkit (MRTK 2.7 или новее), система САПР для подготовки 3D-моделей. Рабочая станция для разработки: ОС Windows 10/11, Visual Studio 2019/2022, Windows SDK.

**Трудоемкость подготовки AR-приложения.** По результатам апробации, подготовка AR-приложения для одного типа изделия (от получения чертежа до работоспособного приложения) занимает от 2 до 5 рабочих дней в зависимости от сложности изделия и числа компонентов. Этап 1 (оцифровка) – 0,5-2 дня, этап 2 (формализация) – 0,5-1 день, этапы 3-5 (оптимизация, ноды, настройка) – 0,5-1 день, этап 6 (развертывание и калибровка) – 0,5-1 день. При наличии готовых 3D-моделей этап 1 существенно сокращается.

### 4.3 Алгоритм извлечения сборочной информации из STEP-модели

Этап 2 методики (п. 4.1) – формализация сборочного чертежа в гиперграф – является наиболее трудоемким при ручном выполнении. Для его частичной автоматизации разработан алгоритм извлечения сборочной информации непосредственно из STEP-файла изделия (формат ISO 10303-21), минуя этап ручного анализа чертежа. Алгоритм реализует первые три шага процедуры формализации из п. 2.2: выделение компонентов, определение взаимосвязей и формирование гиперребер (рисунок 4.3).

Формат STEP содержит структурированное описание изделия в виде сущностей (entities), связанных ссылками. Для задачи формализации сборочного процесса существуют две категории сущностей:

**PRODUCT** – описание компонента изделия: наименование, идентификатор, принадлежность к контексту проектирования. Каждая сущность PRODUCT соответствует одной детали или сборочной единице и порождает одну вершину гиперграфа  $v_i \in V$ .

**NEXT\_ASSEMBLY\_USAGE\_OCCURRENCE (NAUO)** – описание связи «родитель–потомок» между двумя компонентами в иерархии сборки. Каждая сущность NAUO содержит ссылки на родительский и дочерний компоненты, что позволяет восстановить полное дерево сборки.

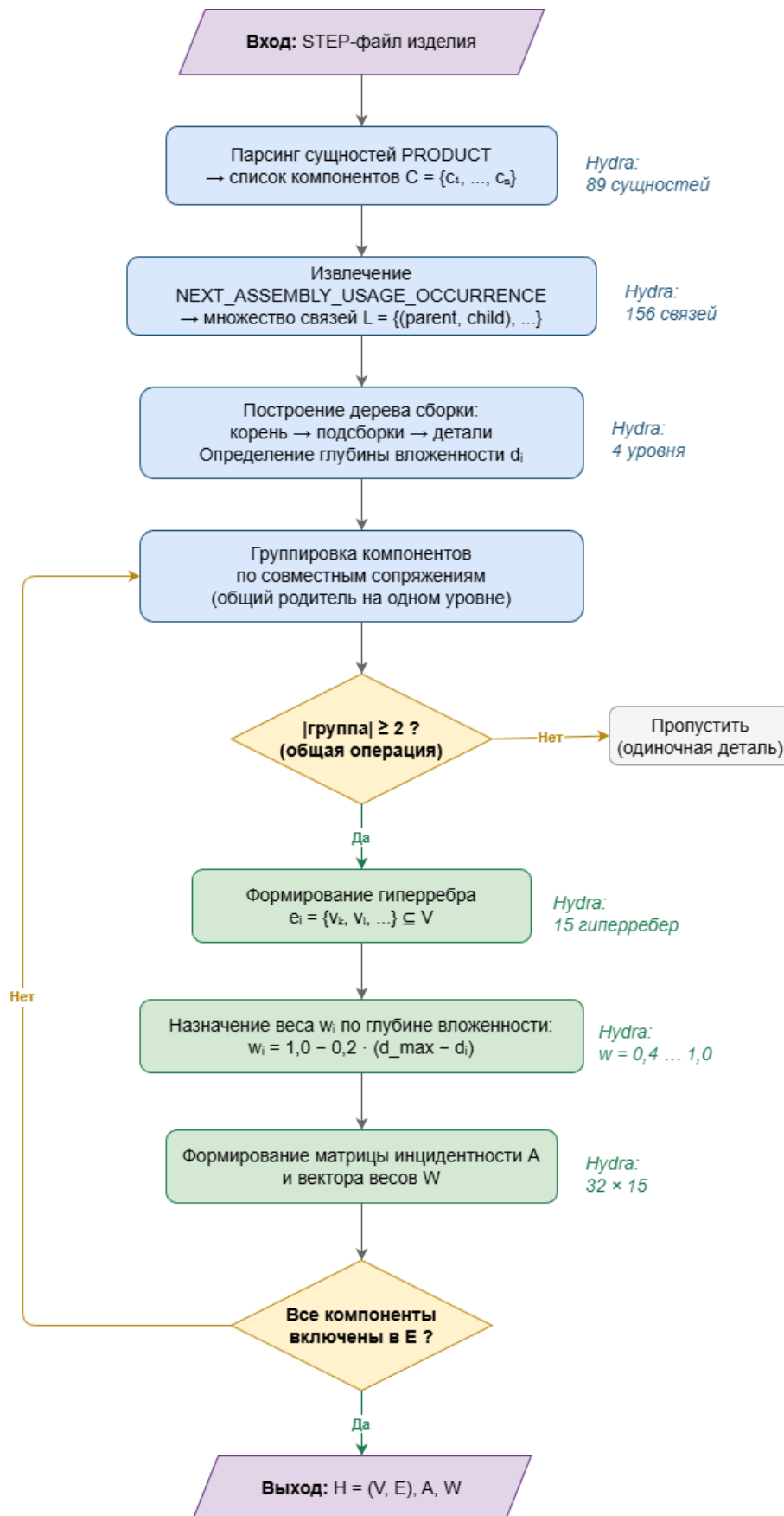


Рис.4.3 – Блок-схема алгоритма извлечения сборочной информации из STEP-модели

#### 4.4 Описание этапов алгоритма

**Этап 1: парсинг сущностей PRODUCT.** Алгоритм последовательно читает STEP-файл и извлекает все сущности типа PRODUCT. Для каждой сущности декодируется наименование (с учетом кодировки  $\backslash X2 \backslash \dots \backslash X0 \backslash$  для символов Unicode) и формируется элемент множества компонентов  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ . Для экструдера Hydra на этом этапе извлечено 89 сущностей PRODUCT.

**Этап 2: извлечение связей NAUO.** Для каждой сущности NAUO извлекаются ссылки на родительский (parent) и дочерний (child) компоненты. Формируется множество направленных связей  $L = \{(parent_1, child_1), (parent_2, child_2), \dots\}$ . Для Hydra извлечено 156 связей NAUO.

**Этап 3: построение дерева сборки.** На основании множества  $L$  строится иерархическое дерево, в котором корнем является сборка верхнего уровня (Hydra\_NV), промежуточными узлами – сборочные единицы, листьями – отдельные детали. Глубина вложенности определяется рекурсивно. Для Hydra дерево имеет четыре уровня вложенности (рисунок 4.4).

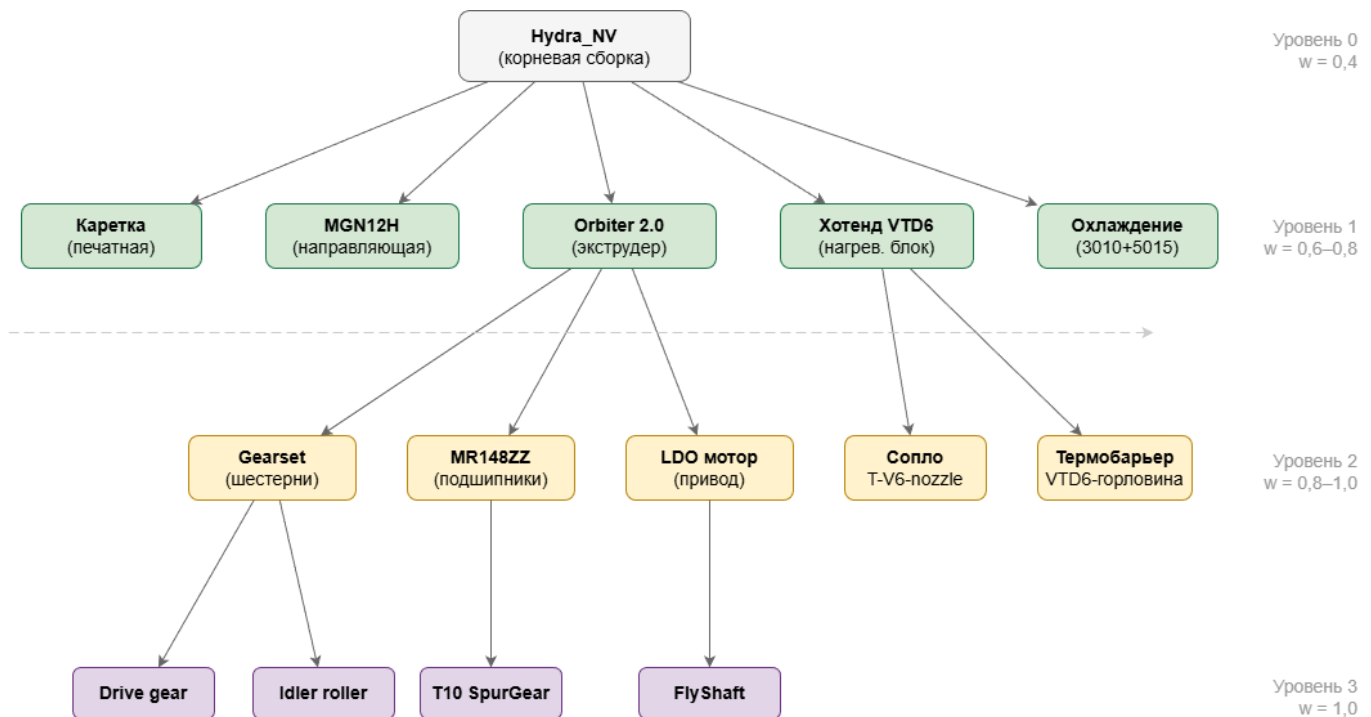


Рис.4.4 – Фрагмент дерева сборки экструдера Hydra NV (4 уровня вложенности)

**Этап 4: группировка и формирование гиперребер.** Компоненты, имеющие общего родителя на одном уровне вложенности и участвующие в совместной сборочной операции, объединяются в группу. Каждая группа мощностью  $\geq 2$  порождает гиперребро  $e_i \subseteq V$ . Группы мощностью 1 включаются в гиперребро родительского уровня. Для Hydra после группировки сформировано 15 гиперребер, связывающих от 2 до 5 компонентов каждое.

**Этап 5: назначение весов и формирование матрицы инцидентности.** Начальные веса  $w_i$  назначаются по правилу:  $w_i = 1,0 - 0,2 \cdot (d_{\max} - d_i)$ , где  $d_i$  – глубина уровня вложенности гиперребра,  $d_{\max}$  – максимальная глубина. Для Hydra  $d_{\max} = 3$ , диапазон весов от 0,4 до 1,0. Формируется матрица инцидентности  $A$  размером  $32 \times 15$  и вектор весов  $W$ .

**Проверка полноты покрытия.** Алгоритм проверяет условие  $\cup(e_i \in E) e_i = V$ . Для Hydra условие выполнено с первого прохода.

### Результаты работы алгоритма

Различие между числом сущностей PRODUCT (89) и числом уникальных компонентов (32) объясняется дублированием записей для компонентов, входящих в несколько сборочных единиц, а также наличием записей для промежуточных сборочных единиц, объединяемых с родительскими узлами (таблица 4.1).

Таблица 4.1 Результаты извлечения сборочной информации из 3D-модели Hydra

Параметр	Значение
Сущностей PRODUCT	89
Связей NAUO	156
Компонентов после фильтрации	32
Уровней вложенности	4
Гиперребер	15
Размер матрицы $A$	$32 \times 15$
Диапазон весов $W$	0,4 – 1,0
Время выполнения	< 2 с

Время выполнения алгоритма (менее 2 с) несопоставимо мало по сравнению с ручной формализацией (2-4 часа). Алгоритм сокращает время этапа 2 методики до нескольких секунд с последующей экспертной верификацией (30-60 мин).

#### 4.5 Детализация этапов методики на примере экструдера Hydra

**Этап 1: оптимизация полигональной сетки.** Исходная 3D-модель содержала 198 000 полигонов. Выполнена оптимизация алгоритмом Quadric Edge Collapse Decimation с сохранением визуально различных геометрических особенностей (рисунок 4.5).

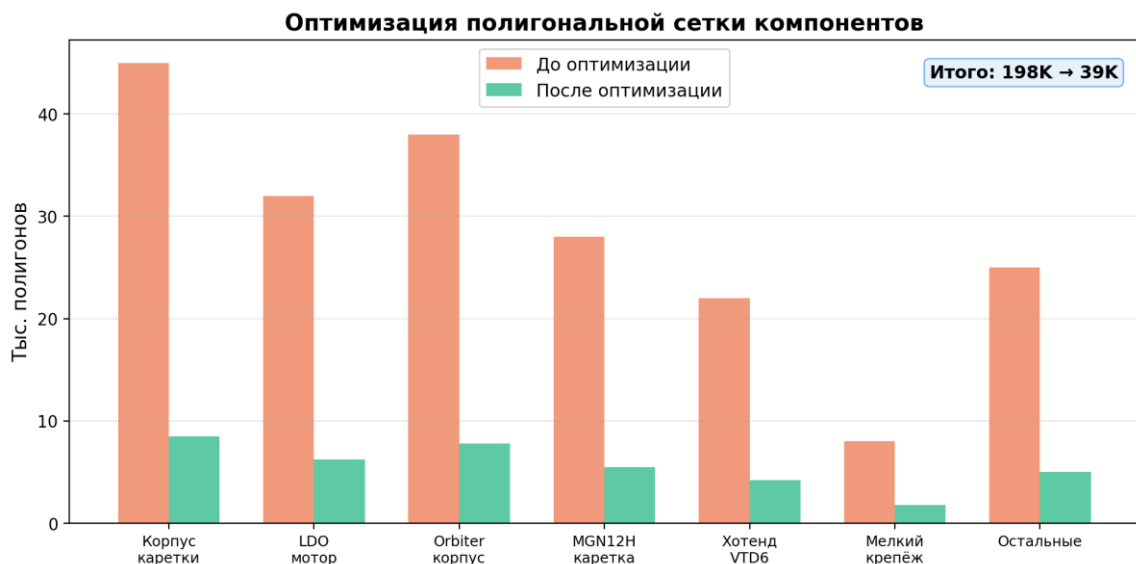


Рис.4.5 – Оптимизация полигональной сетки компонентов экструдера Hydra

Суммарное число полигонов сокращено до 39 000 (в 5,1 раза). Наибольшее абсолютное сокращение – для корпуса каретки (с 45 000 до 8 500): деталь FDM-печати имела избыточную фасеточную аппроксимацию. Частота кадров после оптимизации: стабильно 30+ fps на HoloLens 2.

**Этап 2: формализация сборочного чертежа в гиперграф.** На основании сборочного чертежа и спецификации экструдера Hydra выполнен алгоритм формализации (п. 2.2). Выделено 32 компонента, каждому из которых поставлена в соответствие вершина гиперграфа. Анализ сопряжений позволил определить 15

групповых сборочных операций, порождающих 15 гиперрёбер. Наибольшую мощность (5 вершин) имеет гиперребро, описывающее операцию сборки хотэнда: одновременная установка сопла, нагревательного блока, термобарьера, нагревательного элемента и термодатчика. Начальные веса назначены на основе технологических ограничений: операции нижних уровней сборки (детали → подузлы) получили веса 0,8–1,0, операции верхнего уровня (подузлы → узел) — 0,4–0,6. Сформирована матрица инцидентности  $A$  размерности  $15 \times 32$ . Проверка условия полноты покрытия  $Ue_i = V$  выполнена — все 32 компонента входят хотя бы в одно гиперребро.

**Этап 3: расчет функции стоимости.** Для 15 гиперрёбер вычислена функция стоимости  $c(e_i) = \alpha \cdot |e_i| + \beta \cdot s(e_i) + \gamma \cdot t(e_i)$  с коэффициентами  $\alpha = 0,3$ ,  $\beta = 0,5$ ,  $\gamma = 0,2$ . Параметр  $s(e_i)$  – медиана оценок трех технологов (таблица 4.2).

Таблица 4.2 Значения функции стоимости для операций сборки Hydra

Операция	$ e_i $	$s(e_i)$	$t$ , мин	$c(e_i)$	$w_i$	Ноды
Сборка Orbiter	4	8	10,0	6,2	1,0	$n_1$ – $n_3$
Прижим+пружина	3	7	3,5	5,2	1,0	$n_4$
Каретка на рельс	3	6	4,0	4,7	0,8	$n_5$
Установка хотэнда	3	7	6,5	5,7	0,8	$n_6$
Монтаж LDO	3	5	5,0	4,4	0,6	$n_7$
Вентиляторы	2	3	4,0	2,7	0,6	$n_8$

Модифицированный алгоритм Краскала определил оптимальную последовательность  $E^*$  с суммарной стоимостью  $C(E^*) = 48,3$ . Время выполнения – менее 0,01 с.

**Этап 4: преобразование в нодовую структуру Unity и создание фантомных объектов.** По результатам оптимизации (этап 3) выполнена топологическая сортировка гиперрёбер и сформирована нодовая структура  $N = \{n_1, n_2, \dots, n_{15}\}$  с матрицей смежности  $B$  размерности  $15 \times 15$ . Каждой ноде присвоены параметры фантомного объекта  $\Phi_i = (x_{pi}, q_{pi})$ , извлечённые из 3D-модели САПР.

Координаты  $x_{pi}$  определены как центры масс компонентов в сборочном положении, ориентации  $q_{pi}$  — как кватернионы поворота относительно глобальной системы координат модели. Для каждого фантома импортирована соответствующая 3D-модель компонента (оптимизированная на этапе 1), которой назначен полупрозрачный материал ( $\alpha = 0,4$ ) для визуального отличия от реальных деталей. Проверка условий корректности преобразования (п. 2.4) выполнена: каждое гиперребро представлено нодой, каждый компонент привязан к ноде первого появления.

**Этап 5: настройка корректирующего алгоритма.** Для каждого ребра нодовой структуры заданы параметры динамического гиперграфа (п. 2.3): коэффициент пооперационной адаптации  $\alpha = 0,1$ , коэффициент агрегированной адаптации  $\beta = 0,05$ , пороговое значение блокировки  $w_{min} = 0,3$ . Для каждой из 15 нод сформирован корректирующий узел  $s_k$  с набором визуальных подсказок трёх типов (п. 3.6): стрелка перемещения (тип 1), комбинированная подсказка с последовательной коррекцией (тип 2), подсказка идентификации (тип 3). Матрица наблюдений  $M$  инициализирована нулями — накопление статистики начинается с первого запуска. Пороговое значение отклонения  $d_{threshold} = 0,02$  м выбрано на основе экспериментальных данных главы 3.

**Этап 6: развёртывание на устройстве и калибровка.** AR-приложение скомпилировано для платформы Universal Windows Platform (UWP) и установлено на Microsoft HoloLens 2. Выполнена пространственная калибровка: устройство просканировало рабочую зону сборщика и построило карту пространства. Привязка системы координат AR-приложения к реальному рабочему месту выполнена по алгоритму п. 3.5: оператор разместил базовую деталь (корпус каретки) в рабочей зоне, система зафиксировала её положение и рассчитала матрицу трансформации между системами координат САПР и AR-устройства. Верификация точности привязки показала среднюю ошибку 8,4 мм, что находится в пределах допуска для данного класса сборочных операций. Для повышения устойчивости при длительной работе размещены три пространственных якоря на фиксированных элементах рабочего стола.

## 4.6 Сопоставление с результатами других исследователей

Для оценки достоверности данных выполнено сопоставление с рецензируемыми источниками (таблица 4.3, рисунок 4.6).

Таблица 4.3 Сопоставление результатов с зарубежными исследованиями

Исследование	Устройство	$\Delta T_{шк}$	$\Delta T_{пз}$	Декомпозиция	n опер.
Henderson, Feiner (2011)	HMD	-47%	–	Нет	20
Fiorentino, Uva (2014)	Планшет	-30%	–	Нет	14
Funk (2016)	Проекция	-35%	–	Нет	16
Boeing / Iowa State	HMD	-30%	–	Нет	N/A
Holorailway (2024)	HoloLens 2	-47%	–	Нет	30
Настоящая работа	HoloLens 2	-38,4%	-80%	Да	10

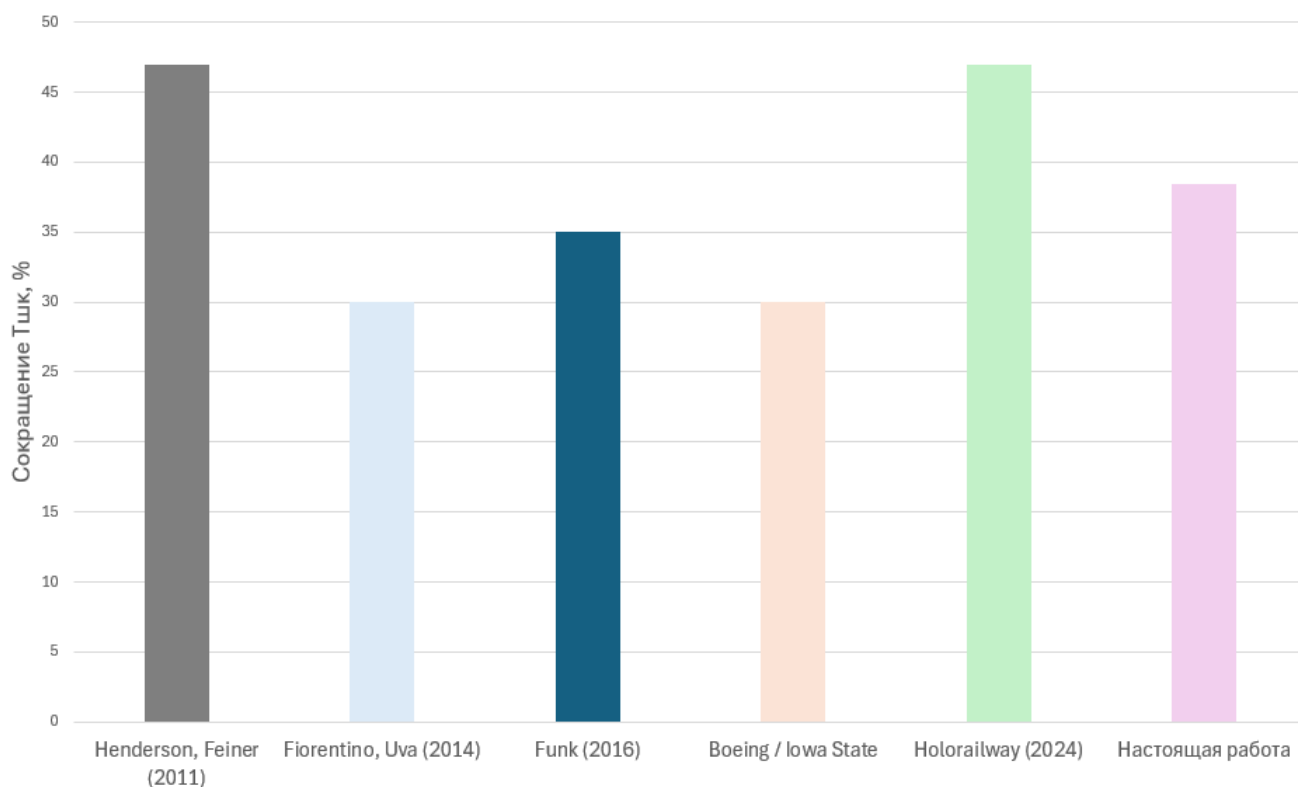


Рис.4.6 – Сопоставление общего сокращения  $T_{шк}$

Результат 38,4% находится внутри диапазона 30-47%. Нижнюю границу (30%) показало исследование Boeing с HMD системой – проекция на экран шлема не обеспечивает достаточную объемную информацию. Верхнюю границу (47%) – Henderson/Feiner и Holorailway на изделиях с высокой долей  $T_{пз}$ .

Принципиальное отличие настоящей работы – декомпозиция эффекта по составляющим  $T_{шк}$ . Ни одно из рассмотренных исследований не выполняло отдельный хронометраж  $T_{пз}$ ,  $T_{в}$  и  $T_{о}$ . Впервые показано, что 82,6% сокращения обеспечено уменьшением  $T_{пз}$  ( $\omega = 0,20$ ) и  $T_{в}$  ( $\phi = 0,21$ ), а не основного времени.

Этот результат имеет практическое значение: зная структуру  $T_{шк}$  конкретного изделия, можно прогнозировать эффективность AR без предварительного эксперимента. Если доля  $T_{пз} + T_{в}$  в  $T_{шк}$  менее 15% – эффект незначителен. Если более 30% – сокращение на 30-40% является реалистичным прогнозом.

Egger и Masood в обзоре 67 публикаций отмечали именно этот пробел: большинство исследований фиксирует общее сокращение, но не дифференцирует по составляющим. Palmarini, Erkoynucu и Roy в обзоре 57 публикаций констатировали недостаток методических разработок для конкретных производственных условий. Настоящая работа восполняет оба пробела для условий мелкосерийной ручной сборки неполной взаимозаменяемости.

#### 4.7 Промышленная апробация на экструдере Hydra

Финальная апробация разработанной методики выполнена на промышленном образце экструдера Hydra аддитивной установки. Данный экструдер представляет собой изделие, типичное для мелкосерийного производства: партии от единиц до десятков штук, значительная доля ручных операций, применение метода неполной взаимозаменяемости при сопряжении ряда компонентов.

Промышленный образец экструдера Hydra был оцифрован в системе САПР. Каждый компонент (32 детали) разнесен на отдельные узлы сборки и экспортирован в формат FBX с оптимизацией полигональной сетки. Суммарное

число полигонов составило 147 000, что обеспечило стабильную частоту кадров (не менее 30 fps) на HoloLens 2.

Сборочный чертеж формализован в гиперграф по алгоритму п. 2.2: получено 32 вершины и 15 гиперребер. После оптимизации модифицированным алгоритмом Краскала сформирована нодовая структура из 15 нод с параметрами фантомных объектов. Корректирующий алгоритм настроен с параметрами  $\alpha = 0,1$ ,  $\beta = 0,05$ ,  $w_{\min} = 0,3$ .

Апробация проводилась на рабочем месте сборщика предприятия в условиях, максимально приближенных к штатной эксплуатации. Результаты подтвердили данные лабораторных экспериментов (п. 3.3):

- штучно-калькуляционное время сократилось на 36-40% по сравнению с традиционным методом, что согласуется с экспериментальным значением 38,4%;
- основной вклад в сокращение обеспечен уменьшением  $T_{пз}$  и  $T_{в}$  (в 4-5 раз);
- система фантомного позиционирования обеспечила точность установки компонентов в пределах 1 см по координатам и  $1^\circ$  по ориентации, что удовлетворяет требованиям к сборке данного класса изделий;
- время подготовки AR-приложения для экструдера Hydra составило 4 рабочих дня (включая оцифровку и калибровку).

Операторы предприятия отметили удобство работы с системой и выразили предпочтение AR-методу перед традиционным. Основным преимуществом названо отсутствие необходимости обращаться к бумажной документации – что подтверждает ведущую роль сокращения  $T_{пз}$  в общем повышении эффективности.

#### **4.8 Реализация результатов и внедрение**

Результаты диссертационной работы приняты к внедрению на двух предприятиях и в образовательном процессе.

**ООО «Инновационные технологии и дизайн».** Методика применена для организации AR-сопровождения сборки аддитивного оборудования. Внедрение

позволило сократить штучно-калькуляционное время сборки на 35-40% и ускорить подготовку новых операторов с трех недель до пяти рабочих дней. Внедрение подтверждено актом.

**ООО «Астрон Билдингс».** Методика адаптирована для сопровождения сборки конструктивно сложных узлов промышленного оборудования. Результаты подтвердили применимость разработанного подхода к изделиям, отличным от экструдеров, – что свидетельствует об универсальности методики для класса мелкосерийных сборочных процессов. Внедрение подтверждено актом.

**РТУ МИРЭА.** Результаты работы внедрены в учебный процесс кафедры цифровых и аддитивных технологий Института перспективных технологий и индустриального программирования. Разработанное AR-приложение используется в лабораторных работах по дисциплинам, связанным с технологией машиностроения и цифровым производством. Студенты осваивают методику формализации сборочных процессов и работу с инструментами дополненной реальности на примере сборки экструдера FDM-системы. Внедрение подтверждено актом.

#### **4.9 Область применимости и ограничения**

**Область применимости.** Разработанная методика предназначена для следующих условий:

- тип производства: единичное и мелкосерийное (размер партии от 1 до нескольких десятков изделий);
- вид сборки: ручная или механизированная (не автоматическая);
- метод обеспечения точности: неполная взаимозаменяемость, регулирование, пригонка (операции, требующие от оператора принятия решений);
- сложность изделия: от 15-20 компонентов и выше (при меньшем числе компонентов подготовительно-заключительное время невелико, и эффект от AR-сопровождения снижается);

- наличие 3D-моделей в САПР (необходимое условие для создания фантомных объектов).

Результаты, полученные для сборки экструдера FDM-системы, могут быть перенесены на широкий класс сборочных процессов с аналогичными характеристиками: сборка приводных узлов, редукторов, специального технологического оборудования, контрольно-измерительных приборов и другой продукции мелкосерийного машиностроительного производства.

**Ограничения.** Применение методики сопряжено с рядом ограничений, которые необходимо учитывать при принятии решения о внедрении:

- технические: ограниченное поле зрения HoloLens 2 (52° по диагонали) не позволяет одновременно визуализировать крупногабаритные узлы; точность пространственной привязки (1-2 см) может быть недостаточна для прецизионных сопряжений; зависимость качества трекинга от условий освещения рабочей зоны;

- организационные: необходимость наличия 3D-моделей изделия – для предприятий, не использующих САПР, создание моделей потребует дополнительных затрат; потребность в специалисте, владеющем средой Unity, для подготовки AR-приложения; начальное сопротивление персонала новым технологиям (преодолевается в течение 1-2 дней работы с системой);

- эргономические: масса устройства HoloLens 2 (566 г) ограничивает комфортную непрерывную работу 2-3 часами; при полномасштабной эксплуатации необходимы регулярные перерывы.

**Перспективы развития.** Дальнейшее развитие методики может быть направлено на:

- автоматизацию этапа формализации (п. 4.1, этап 2) путем применения алгоритмов автоматического анализа сборочных чертежей и 3D-моделей;

- расширение на среднесерийное производство за счет интеграции с системами управления производством (MES) для автоматической загрузки производственных заданий в AR-приложение;

- применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования оптимальных значений коэффициентов  $\varphi$  и  $\omega$  на основе характеристик изделия (без проведения предварительных экспериментов);
- адаптацию к новым поколениям AR-устройств с расширенным полем зрения и повышенной точностью трекинга.

#### 4.10 Выводы по главе 4

Проведенные в данной главе исследования позволяют сформулировать следующие выводы.

1. Разработанная методика, состоящая из шести последовательных этапов с определёнными входными данными, результатом и критерием завершения каждого, обеспечивает воспроизводимый цикл проектирования AR-сопровождения сборки и снижает порог внедрения AR-технологий на предприятии, исключая необходимость самостоятельной разработки алгоритмов формализации и оптимизации.

2. Промышленная апробация на экструдере Hydra подтвердила устойчивость результатов в производственных условиях: сокращение  $T_{шк}$  составило 36–40% (лабораторное значение — 38,4%), основной вклад обеспечен уменьшением  $T_{пз}$  в 4–5 раз. Точность фантомного позиционирования (1 см / 1°) удовлетворяет производственным требованиям.

3. Внедрение результатов на предприятиях ООО «Инновационные технологии и дизайн», ООО «Астрон Билдингс» и в учебный процесс РТУ МИРЭА подтверждает практическую значимость методики и возможность её применения как в производственной, так и в образовательной среде.

4. Перспективы развития связаны с автоматизацией формализации на основе STEP-моделей, интеграцией с MES/ERP и применением машинного обучения для прогнозирования коэффициентов  $\varphi$  и  $\omega$  без полного цикла экспериментов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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  $\lambda$ ) 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.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения : Учебник для ВУЗов / Б. М. Базров. – Москва : ИНФА-М, 2016. – 683 с.
2. Батчаева, З. Б. Нахождение остовного дерева минимального веса с применением алгоритма Краскала и алгоритма Прима / З. Б. Батчаева, А. Б. Биджиева, Р. А. Турклиев // Мирская наука. – 2018. – № 10(19). – С. 81-85.
3. Божко, А. Н. Автоматизированный структурный анализ и синтез проектных решений в технической подготовке сборочного производства сложных изделий : специальность 05.13.12 "Системы автоматизации проектирования (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Божко Аркадий Николаевич, 2019. – 442 с.
4. Бойцов, В. В. Научные основы комплексной стандартизации технологической подготовки производства / В. В. Бойцов. – Москва : Машиностроение, 1982. – 319 с.
5. Боровков, А. И. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности / А. И. Боровков, Ю. А. Рябов, Л. А. Щербина [и др.]. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2022. – 492 с.
6. Бурцев, В. М. Технология машиностроения : учебник для вузов : в 2 т. Т. 2 / В. М. Бурцев, А. С. Васильев, О. М. Деев [и др.]. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 551 с.
7. Вартанов, М. В. Технологические основы автоматической сборки : учебно-методическое пособие / М. В. Вартанов. – Москва : Московский Политех, 2021. – 58 с.
8. ГОСТ 14.301-83. Единая система технологической подготовки производства. Общие правила разработки технологических процессов. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 9 с.

9. ГОСТ 21495-76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1977. – 24 с.
10. ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. – М.: Стандартиформ, 2019. – 45 с.
11. ГОСТ 3.1109-82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. – М.: Стандартиформ, 2012. – 14 с.
12. ГОСТ Р 50995.3.1-96. Технологическое обеспечение качества. Технологическая подготовка производства. – М.: Госстандарт России, 1996. – 18 с.
13. ГОСТ 23887-79. Сборка. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 19 с.
14. Гусев, А. А. Адаптивные устройства сборочных машин / А. А. Гусев. – Москва : Машиностроение, 1979. – 208 с.
15. Гусев, А. А. Технология машиностроения (специальная часть) : учебник для вузов / А. А. Гусев, Е. Р. Ковальчук, И. М. Колесов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1986. – 479 с.
16. Дальский, А. М. Технология машиностроения : учебник для вузов : в 2 т. Т. 1 / А. М. Дальский, А. Г. Суслов, Ю. Ф. Назаров [и др.]. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. – 564 с.
17. Дунаев, П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – М.: Академия, 2004. – 496 с.
18. Жолобов, А. А. Технология машиностроения. Практикум: учеб. пособие / А.А. Жолобов [и др.]. – Минск: Высшая школа, 2015. – 335 с..
19. Зайцев, М. М. Современные методы сборочного производства в машиностроении / М. М. Зайцев, В. Ф. Ершова // 74-я всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием : сборник материалов конференции : в 2 ч., Ярославль, 21 апреля 2021 года. Том Часть 2. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2021. – С. 233-236.

20. Залата, Р. В. Разработка программного обеспечения для визуального контроля сборки фюзеляжа самолета в дополненной реальности / Р. В. Залата, М. Е. Щелкунова // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. : материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2019 года. Том Часть 2. – Комсомольский-на-Амуре государственный университет: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2019. – С. 294-297.
21. Замятин, В. К. Технология и оснащение сборочного производства машиноприборостроения : справочник / В. К. Замятин. – Москва : Машиностроение, 1995. – 608 с.
22. Игнатов, К. В. Технология сборки корпусных деталей / К. В. Игнатов, И. А. Волков // Парадигма. – 2025. – № 11-4. – С. 25-33.
23. Корсаков, В. С. Основы технологии машиностроения : учебник для вузов / В. С. Корсаков. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1974. – 336 с.
24. Кудрявцев, И. В. Использование систем виртуальной реальности для повышения качества изготовления изделий на машиностроительном производстве / И. В. Кудрявцев, А. А. Кутин // Перспективные материалы и технологии (ПМТ-2024) : Сборник докладов Международной научно-технической конференции ИПТИП РТУ МИРЭА, Москва, 12–16 апреля 2024 года. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2024. – С. 205-208.
25. Кудрявцев, И. В. Повышение эффективности технологической подготовки производства машиностроительных изделий с использованием технологий виртуальной реальности / И. В. Кудрявцев, А. А. Кутин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2025. – Т. 27, № 3-2(125). – С. 382-388.
26. Кудрявцев, И. В. Применение инструмента VR в качестве средства визуализации сборки крупногабаритных изделий на машиностроительном производстве / И. В. Кудрявцев, А. А. Кутин // Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех - 2024) : Международная научно-техническая конференция,

Москва, 02–08 декабря 2024 года. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2024. – С. 424-427.

27. Лебедев, Л. В. Технология машиностроения : учебное пособие / Л. В. Лебедев, В. У. Мнацаканян, А. А. Погонин. – Москва : Академия, 2006. – 528 с.

28. Лим, А. А. Динамические графы зависимостей для AR-сопровождения сборки FDM экструдеров // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2025. № 5. С. 39-43.

29. Лим, А. А., Зуев В.В., Баранова Н.С. Дополненная реальность в технологиях сборки // Оптические технологии, материалы и системы («Оптех 2022»). Сборник докладов конференции. Москва. 2022 года. С. 342-344.

30. 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. 2025. С. 78-86.

31. Лим, А. А., Кудрявцев И.В., Кутин А.А. Инновационные подходы в технологии сборки // Оптические технологии, материалы и системы (Оптех - 2023). Сборник докладов Международной научно-технической конференции. Москва. 2023. С. 330-334.

32. 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.

33. Лим, А. А., Кутин А.А. Гиперграфовый подход к моделированию сборочных процессов: синтез с нодовыми системами и имплементация в среде смешанной реальности // Вестник МГТУ "Станкин". 2025. № 2(73). С. 80-89.

34. Лим, А. А., Кутин А.А. Перспективы применения технологий смешанной реальности в сборочных процессах на примере очков HoloLens 2 // Компьютерное проектирование в электронике. Минск. 2024. С. 123-125.

35. 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.

36. Луцик, М. М. Использование технологий дополненной реальности при проектировании технологических процессов сборки / М. М. Луцик, Е. А. Буленков // Донбасс будущего глазами молодых ученых : Сборник материалов научно-технической конференции, Донецк, 23 ноября 2021 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2021. – С. 44-46.

37. Майн, Е. Е. Разработка приложений дополненной реальности для гарнитур Pico в среде Unity / Е. Е. Майн, Д. А. Булгаков // Наука сегодня: актуальные вопросы теории и практики : сборник статей IV Международной научно-практической конференции, Пенза, 23 декабря 2024 года. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2024. – С. 27-36.

38. Маталин, А. А. Технология машиностроения : учебник для вузов / А. А. Маталин. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2016. – 512 с.

39. Минаев, С. Г. Устройства дополненной реальности на производстве / С. Г. Минаев, Н. С. Грудинин, А. А. Телепина, Д. А. Ищенко // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : , Тамбов, 14–16 ноября 2018 года. Том 1, Выпуск 5. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО "Тамбовский государственный технический университет", 2018. – С. 452-456.

40. Митрофанов, С. П. Групповая технология машиностроительного производства : в 2 т. Т. 1 / С. П. Митрофанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1983. – 407 с.

41. Муханин, Л. Г. Основы взаимозаменяемости. Тесты и задачи / Л.Г. Муханин, Ю.В. Федоров. – СПб: ИТМО, 2012. – 120 с.

42. Никитина, В. О. Внедрение технологий дополненной реальности в процессы проведения ото / В. О. Никитина // Исследования и перспективные разработки в машиностроении : Материалы VII научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Комсомольск-на-Амуре, 22–23 сентября 2022 года / Отв. редактор Р.А. Физулаков. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 342-348.

43. Новиков, М. П. Основы технологии сборки машин и механизмов / М. П. Новиков. – 5-е изд., перераб. – Москва : Машиностроение, 1980. – 592 с.

44. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарно-инструментальные работы, выполняемые на станках и вручную: сборник / утв. Постановлением Госкомтруда СССР и Секретариата ВЦСПС от 21.05.1990 № 204/8-1. – Москва, 1990. – 220 с.
45. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин и приборов в условиях массового, крупносерийного и среднесерийного типов производства. – Москва : Экономика, 1991. – 208 с.
46. Петров, Н. В. Перспективы применения цифровых технологий монтажа судового оборудования и трубопроводов / Н. В. Петров // Судостроение. – 2019. – № 6(847). – С. 36-39.
47. Радкевич, Я. М. Метрология, стандартизация и сертификация / Я.М. Радкевич, А.Г. Схиртладзе. – М.: Юрайт, 2013. – 813 с.
48. Рахимьянов, Х. М. Технология машиностроения: сборка и монтаж : учебное пособие / Х. М. Рахимьянов, Б. А. Красильников, Э. З. Мартынов. – 2-е изд. – М. : Издательство Юрайт, 2017. – 241 с. "
49. РД 50-635-87. Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 45 с.
50. Ребрин, Ю. И. Основы экономики и управления производством : конспект лекций / Ю. И. Ребрин. – Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. – 145 с.
51. Рововой, Э. Ю. Создание AR-приложения на базе unity 3D / Э. Ю. Рововой, М. В. Иванов, И. А. Киселев // Инновационные аспекты развития науки и техники : сборник статей XII Международной научно-практической конференции, Саратов, 12 августа 2021 года. – Саратов: Индивидуальный предприниматель Емельянов Николай Владимирович, 2021. – С. 48-55.
52. Рягин, Ю. И. "Индустрия 4.0" и экономическая эффективность: дорожная карта перехода к безбумажным технологиям при сборке сложных крупногабаритных изделий / Ю. И. Рягин, А. Н. Бабушкин, В. А. Плетминцева // Иннов: электронный научный журнал. – 2018. – № 2(35). – С. 3.

53. Сабирзянова, Г. М. Повышение эффективности сборки автомобиля путем проведения предиктивного анализа с помощью технологии виртуальной реальности / Г. М. Сабирзянова, Т. В. Сидорова, Р. М. Хисамутдинов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 2. – С. 106-109.
54. Седых, М. И. Анализ временных структур сборочных операций / М. И. Седых // Современные технологии сборки : Доклады IX Международного научно-технического семинара, Москва, 16–17 октября 2025 года. – Москва: Московский политехнический университет, 2025. – С. 71-78.
55. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 1 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2003. – 912 с.
56. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2003. – 944 с.
57. Старостина, В. А. AR и VR технологии в обучении производственного персонала / В. А. Старостина, В. В. Воробьев, М. А. Рагозина, Г. И. Юрковская // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. материалов V Междунар. науч.-практ. конф. – Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2019. – Т. 3. С. 779-781.
58. Сулов, А. Г. Технология машиностроения : учебник / А. Г. Сулов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2007. – 429 с.
59. Схиртладзе, А. Г. Технологические процессы в машиностроении / А. Г. Схиртладзе, Г. А. Расторгуев, А. Г. Схиртладзе, Ю. И. Некрасов. – Тюмень : ТИУ, 2008. – 405 с.
60. Тарасов, В. А. 77-30569/339658 Метод формирования совокупности допустимых вариантов сборки изделий на основе применения ориентированных гиперграфов / В. А. Тарасов, П. В. Круглов, И. А. Болотина // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 2. – С. 4.
61. Тимофеев, М. В. Повышение эффективности процессов сборки роторов газотурбинных двигателей на основе технологии имитационного моделирования /

М. В. Тимофеев, Е. В. Тимофеева // Известия МГТУ МАМИ. – 2014. – Т. 2, № 1(19). – С. 184-186.

62. Трачук, А. В. Влияние технологий Индустрии 4.0 на повышение производительности и трансформацию инновационного поведения промышленных компаний / А. В. Трачук, Н. В. Линдер // Стратегические решения и риск-менеджмент. – 2020. – Т. 11, № 2. – С. 132–149.

63. Угаров, А. С. Реализация алгоритма прима-краскала средствами логического программирования / А. С. Угаров, Я. С. Маркова // Исследовательский потенциал молодых ученых: взгляд в будущее : Сборник материалов XIII Региональной научно-практической конференции аспирантов, молодых ученых и магистрантов, Тула, 06 марта 2017 года. – Тула: Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, 2017. – С. 194-198.

64. Шакуров, Н. Г. Разработка технологического процесса сборки машины. Технология машиностроения / Н. Г. Шакуров. – Уфа : Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2018. – 104 с.

65. Якушев, А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Учебник для вузов / А.И. Якушев, Л. Н. Воронцов, Н. М. Федотов. – 6-е изд., перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

66. Azuma, R. T. A survey of augmented reality / R. T. Azuma // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – 1997. – Vol. 6, no. 4. – P. 355–385.

67. Boothroyd, G. Product design for manufacture and assembly / G. Boothroyd, P. Dewhurst, W. A. Knight. – 3rd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2010. – 712 p.

68. Choi, S. Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions / S. Choi, K. Jung, S. D. Noh // Concurrent Engineering. – 2015. – Vol. 23, no. 1. – P. 40–63.

69. Egger, J. Augmented reality in support of intelligent manufacturing – A systematic literature review / J. Egger, T. Masood // Computers & Industrial Engineering. – 2020. – Vol. 140. – P. 106195.

70. Feiner, S. Knowledge-based augmented reality / S. Feiner, B. MacIntyre, D. Seligmann // Communications of the ACM. – 1993. – Vol. 36, no. 7. – P. 53–62.

71. Fiorentino, M. Augmented reality on large screen for interactive maintenance instructions / M. Fiorentino, A. E. Uva, M. Gattullo, S. Debernardis, G. Monno // *Computers in Industry*. – 2014. – Vol. 65, no. 2. – P. 270–278.
72. Funk, M. Working with augmented reality? A long-term analysis of in-situ instructions at the assembly workplace / M. Funk, A. Bächler, L. Bächler [et al.] // *Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*. – 2017. – P. 222–229.
73. Groover, M. P. Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems : international adaptation / M. P. Groover. – 7th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2021. – 816 p.
74. Henderson, S. J. Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task / S. J. Henderson, S. Feiner // *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. – 2010. – P. 191–200.
75. Henderson, S. J. Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair / S. J. Henderson, S. Feiner // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. – 2011. – Vol. 17, no. 10. – P. 1355–1368.
76. Homem de Mello, L. S. AND/OR graph representation of assembly plans / L. S. Homem de Mello, A. C. Sanderson // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. – 1990. – Vol. 6, no. 2. – P. 188–199.
77. Hu, S. J. Assembly system design and operations for product variety / S. J. Hu, J. Ko, L. Weyand [et al.] // *CIRP Annals*. – 2011. – Vol. 60, no. 2. – P. 715–733.
78. Masood, T. Adopting augmented reality in the age of industrial digitalisation / T. Masood, J. Egger // *Computers in Industry*. – 2020. – Vol. 115. – P. 103112.
79. Masood, T. Augmented reality in support of Industry 4.0 – Implementation challenges and success factors / T. Masood, J. Egger // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2019. – Vol. 58. – P. 181–195.
80. Michalos, G. Augmented reality (AR) applications for supporting human-robot interactive cooperation / G. Michalos, P. Karagiannis, S. Makris [et al.] // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 41. – P. 370–375.

81. Nagy, L. Hypergraph-based analysis and design of intelligent collaborative manufacturing space / L. Nagy, T. Ruppert, A. Löcklin, J. Abonyi // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2022. – Vol. 65. – P. 88–103.
82. Nee, A. Y. C. Augmented reality applications in design and manufacturing / A. Y. C. Nee [et al.] // *CIRP Annals*. – 2012. – Vol. 61, no. 2. – P. 657–679.
83. Nof, S. Y. Industrial assembly / S. Y. Nof, W. E. Wilhelm, H. J. Warnecke. – London : Chapman & Hall, 1997. – 482 p.
84. Ong, S. K. Augmented reality applications in manufacturing: a survey / S. K. Ong [et al.] // *International Journal of Production Research*. – 2008. – Vol. 46, no. 10. – P. 2707–2742.
85. Oztemel, E. Literature review of Industry 4.0 and related technologies / E. Oztemel, S. Gursev // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2020. – Vol. 31, no. 1. – P. 127–182.
86. Palmarini, R. A systematic review of augmented reality applications in maintenance / R. Palmarini, J. A. Erkoyuncu, R. Roy, H. Torabmostaedi // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2018. – Vol. 49. – P. 215–228.
87. Schmalstieg, D. Augmented reality: principles and practice / D. Schmalstieg, T. Höllerer. – Boston : Addison-Wesley, 2016. – 528 p.
88. Uva, A. E. Evaluating the effectiveness of spatial augmented reality in smart manufacturing: a solution for manual working stations / A. E. Uva [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 94, no. 1-4. – P. 509–521.
89. Wang, X. Augmented reality in built environment: Classification and implications for future research / X. Wang [et al.] // *Automation in Construction*. – 2016. – Vol. 32. – P. 1–13.
90. Xie, B. A Review on Virtual Reality Skill Training Applications / B. Xie, H. Liu, R. Alghofaili [et al.] // *Frontiers in Virtual Reality*. – 2021. – Vol. 2. – P. 645153.
91. Zhu, X. Graph-based assembly sequence planning algorithm with feedback weights / X. Zhu, Z. Xu, J. Wang [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2023. – Vol. 125, no. 7–8. – P. 3607–3617.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

Astron | Здания для Бизнеса

**АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ЛИМА АЛЕКСАНДРА АЛИКОВИЧА**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Лим А.А. на тему «Повышение эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий на основе применения инструментов дополненной реальности», выполненной в ЦАТ ИПТИП РГУ МИРЭА, внедрены в производственный процесс ООО «Астрон Билдингс».

В рамках внедрения использованы следующие результаты исследования:

1. Методика применения инструмента дополненной реальности для повышения эффективности сборки, включающая оцифровку изделия и формирование цифрового сопровождения.
2. Программно-аппаратный комплекс визуального сопровождения сборки на базе Microsoft HoloLens 2 с пошаговыми инструкциями, системой фантомных объектов и корректирующим алгоритмом.

Внедрение результатов подтвердило их практическую значимость для повышения производительности сборочных процессов в условиях мелкосерийного производства.

Генеральный директор  
ООО «Астрон Билдингс»



М.Э. Буххаймер  
27.03.2026 г.



МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«МИРЭА – Российский технологический университет»

**РТУ МИРЭА**

просп. Вернадского, д. 78, Москва, 119454  
тел.: (499) 600 80 80 доб. 1140, факс: (495) 434 92 87  
e-mail: mirea@mirea.ru, http://www.mirea.ru

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### АКТ

об использовании в учебном процессе материалов диссертационной работы Лима Александра Аликовича на тему «Повышение эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий на основе применения инструментов дополненной реальности»

Настоящим Актом удостоверяем, что результаты диссертационной работы Лима Александра Аликовича внедрены в учебный процесс Института перспективных технологий и индустриального программирования РТУ МИРЭА на кафедре цифровых и аддитивных технологий.

Материалы результатов исследований, полученные Лимом А.А., используются в учебном процессе при подготовке бакалавров (15.03.01) и магистров (15.04.01) по направлению «Машиностроение» при проведении практических занятий и лабораторных работ по дисциплинам:

- Технология машиностроения;
- Цифровые технологии в производстве.

Первый проректор



Н.И. Прокопов



ООО «Инновационные технологии и дизайн»  
ИНН 9728162540; КПП 772801001  
Адрес: Москва, Голубинская улица, д.9, оф.407

Email: [sales@inted.pro](mailto:sales@inted.pro)  
Тел: +7(916)5182705

### АКТ

**внедрения результатов диссертационной работы «Повышение эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий на основе применения инструментов дополненной реальности» А.А. Лим на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Лим А.А., выполненной в ЦАТ ИПТИП РГУ МИРЭА, внедрены в производственный процесс ООО «ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ДИЗАЙН» при сборке 3D-принтера «INTED MAP» и экструдера «Hydra».

В рамках внедрения были получены следующие показатели:

1. Сокращение среднего времени сборки экструдера на 38,4%;
2. Уменьшено количество ошибок на 68,4%;
3. Повышена скорость обучения операторов в 2,3 раза;

Внедрение результатов подтвердило их практическую значимость. Методика рекомендована к применению при сборке других узлов 3D-принтеров предприятия.

Генеральный директор

Кочетов Н.Е.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026617859

**Программа иммерсивного обучения и сопровождения  
сборочного процесса в машиностроении «Oracle»**

Правообладатели: *Кудрявцев Илья Владиславович (RU), Лим  
Александр Аликович (UZ), Кутин Андрей Анатольевич  
(RU)*

Авторы: *Кудрявцев Илья Владиславович (RU), Лим  
Александр Аликович (UZ), Кутин Андрей Анатольевич  
(RU)*



Заявка № 2026616698

Дата поступления 12 марта 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 20 марта 2026 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 000570e4d7e41030531b4b881be75f29506  
Владелец: *Зубов Юлиан Сергеевич*  
Действителен с 24.03.2025 по 28.11.2026

*Ю.С. Зубов*

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026619244

**Программа организации технологической подготовки  
производства и сборки крупногабаритных изделий  
«Атлант»**

Правообладатели: *Кудрявцев Илья Владиславович (RU), Лим Александр Аликович (UZ), Краско Александр Сергеевич (RU)*

Авторы: *Кудрявцев Илья Владиславович (RU), Лим Александр Аликович (UZ), Краско Александр Сергеевич (RU)*

Заявка № 2026618060

Дата поступления 24 марта 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 апреля 2026 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
Сертификат 00a571648774d1d952164b8818e75129506  
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 24.03.2025 по 28.11.2026

*Ю.С. Зубов*