

**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский политехнический университет»
(Московский Политех)

Б.Семеновская ул., д.38, Москва, 107023
Тел.+7 495 223 05 23, Факс +7 499 785 62 24
www.mospolytech.ru | E-mail: mospolytech@mospolytech.ru
ОКПО 04350607, ОГРН 1167746817810,
ИНН/КПП 7719455553/771901001

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе,
кандидат технических наук

« 8 » июня 2026 г. А.Ю. Наливайко



ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования

«Московский политехнический университет» (Московский Политех) на
диссертацию **Лима Александра Аликовича «Повышение эффективности
технологических процессов сборки машиностроительных изделий на основе
применения инструментов дополненной реальности»**, представленную на
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 –
«Технология машиностроения»

Актуальность темы исследования

Сборка является заключительным и одним из наиболее трудоёмких этапов технологического процесса изготовления машиностроительных изделий: в зависимости от сложности конструкции на неё приходится от 30 до 50% общей трудоёмкости. В условиях единичного и мелкосерийного производства доля ручных операций особенно велика, а в структуре штучно-калькуляционного времени значительную часть составляют подготовительно-заключительное и вспомогательное время, связанные с изучением технической документации, идентификацией и подготовкой компонентов, контролем последовательности операций. Полная автоматизация и роботизация таких процессов экономически нецелесообразны вследствие высоких затрат на специализированное оборудование и частых переналадок при смене номенклатуры.

В этой связи применение технологий дополненной реальности (AR), обеспечивающих визуальное сопровождение оператора в рабочей зоне, представляет собой перспективный инструмент воздействия на информационно-подготовительную составляющую процесса сборки. Работа соответствует приоритетному направлению Technet Национальной технологической инициативы и концепции «Индустрия 4.0». Таким образом, тема диссертации является **актуальной научно-технической задачей**, имеющей важное теоретическое и прикладное значение.

Структура и общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 91 наименования и двух приложений. Общий объём работы составляет 125 страниц, включает 30 рисунков и 7 таблиц. Структура работы логична, последовательность изложения отвечает поставленным цели и задачам.

Во введении обоснована актуальность темы, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ структуры штучно-калькуляционного времени сборочных операций и обзор существующих подходов к повышению эффективности сборки. Показано, что основные резервы лежат в области сокращения подготовительно-заключительного и вспомогательного времени, и обоснован выбор технологий дополненной реальности как инструмента, обеспечивающего целенаправленное воздействие на эти составляющие. Установлено, что в научно-технической литературе недостаточно проработаны формализованные методики проектирования AR-инструментов с учётом специфики машиностроительной сборки.

Во второй главе разработан метод формализации сборочного чертежа на основе аппарата динамических гиперграфов с адаптивным изменением весовых коэффициентов в зависимости от выявляемых ошибок. Предложена математическая модель штучно-калькуляционного времени, учитывающая эффект AR-сопровождения посредством коэффициентов φ и ω , имеющих ясный физический смысл. Разработаны алгоритм преобразования гиперграфовой структуры в нодовую модель среды Unity на основе топологической сортировки и модифицированный алгоритм Краскала для гиперграфов, обеспечивающий определение рациональной последовательности сборочных операций.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований с участием десяти операторов различной квалификации с использованием устройства Microsoft HoloLens 2 и реализованного механизма фантомных объектов, обеспечивающего позиционирование компонентов. Экспериментально подтверждено сокращение времени сборки с 68,7 до 42,3 мин (на 38,4 %), снижение числа ошибок с 3,8 до 1,2 на сборку (на 68,4 %) и ускорение обучения операторов с 21 до 5 дней. Получены кривые обучения ($\lambda = 0,42$ для AR против 0,18 для традиционного метода), установлено снижение вариативности результатов в 1,9 раза. Статистическая значимость влияния AR подтверждена дисперсионным анализом ($R^2 = 0,894$).

В четвёртой главе разработана методика повышения эффективности технологических процессов сборки с применением AR-инструментов, представленная в виде последовательного алгоритма. Предложен способ автоматизированного извлечения сборочной информации непосредственно из 3D-модели изделия, снижающий трудоёмкость подготовки AR-сопровождения. Промышленная апробация на экструдере Hydra аддитивной установки INTED MAP подтвердила устойчивость лабораторных результатов в производственных условиях (сокращение $T_{\text{шк}}$ на 36–40 %) и позволила определить значения коэффициентов модели $\omega = 0,20$ и $\varphi = 0,21$.

Научная новизна результатов исследования

Научная новизна работы заключается в следующем:

- 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.

Положения научной новизны сформулированы корректно и в полной мере отражают сущность полученных результатов.

Степень достоверности и обоснованность результатов

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечиваются корректным применением математического аппарата теории графов и гиперграфов, методов дискретной математики, топологической сортировки и оптимизации; достаточным объёмом экспериментальных исследований; использованием современного аппаратного и программного обеспечения и метрологически обеспеченных методик измерений; статистической обработкой результатов с применением дисперсионного и корреляционного анализа. Достоверность подтверждается также совпадением лабораторных данных с результатами промышленной апробации на экструдере, где зафиксировано сопоставимое сокращение штучно-калькуляционного времени. Выводы диссертации логически следуют из полученных теоретических и экспериментальных результатов.

Значимость результатов для науки и практики

Теоретическая значимость определяется развитием теоретических основ проектирования сборочных процессов: разработкой метода формализации сборочного чертежа на основе динамических гиперграфов с адаптивными весовыми коэффициентами, математической модели штучно-калькуляционного времени с учётом AR-сопровождения и модифицированного алгоритма Краскала.

Практическая значимость состоит в создании инженерной методики применения дополненной реальности, обеспечивающей сокращение штучно-калькуляционного времени сборки на 36–40% за счёт уменьшения подготовительно-заключительного и вспомогательного времени в 4–5 раз, ускорение подготовки специалистов и снижение зависимости результата от квалификации персонала. Результаты внедрены на предприятиях ООО «Инновационные технологии и дизайн», ООО «Астрон Билдингс» и в учебный процесс РТУ МИРЭА, что подтверждено актами.

Соответствие диссертации паспорту специальности

По своему содержанию диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения» (технические науки), а именно:

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

п. 10 – Цифровые технологические процессы и производства в машиностроении.

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях

Основное содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 12 опубликованных научных работах, из которых 4 – в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК РФ. Получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и национальных научно-технических конференциях, в том числе на IX Международном научно-техническом семинаре «Современные технологии сборки» (Московский Политех, 2025 г.). Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертационной работе

Отмечая научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, необходимо указать на ряд замечаний:

1. Экспериментальные исследования проведены на единственном типе сборочного узла (экструдер FDM-системы). Вопрос применимости предложенной методики к изделиям существенно иной конструктивной сложности остаётся открытым и требует дополнительной проверки.
2. В работе отсутствует технико-экономическое обоснование предлагаемого решения – нет данных о стоимости внедрения системы, сроках окупаемости и ожидаемом экономическом эффекте для типового предприятия мелкосерийного производства.
3. Некоторые рисунки (например, 1.6, 1.7, 3.2) недостаточно хорошо читаются вследствие низкой резкости изображения.
4. В работе недостаточно подробно описан корректирующий алгоритм, который формирует необходимое число подсказок в зависимости от квалификации оператора.
5. Не раскрыт механизм изменения весовых коэффициентов и процедуры их динамического изменения.

Высказанные замечания не затрагивают существа полученных научных результатов, носят рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Заключение

Диссертация Лима Александра Аликовича «Повышение эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий на основе применения инструментов дополненной реальности» является законченной научно-

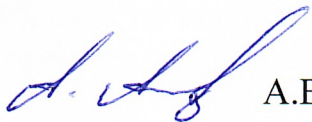
квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача – повышение эффективности сборочных процессов в мелкосерийном машиностроении за счёт сокращения подготовительно-заключительного и вспомогательного времени на основе формализации процессов посредством динамических гиперграфов и применения инструментов дополненной реальности.

По своему содержанию, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор, Лим Александр Аликович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 – «Технология машиностроения».

Диссертация рекомендуется к защите в диссертационном совете 24.2.332.01, созданном на базе ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Отзыв обсуждён и утверждён на заседании кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» факультета машиностроения Московского политехнического университета, протокол № 10-25\26 от «29» апреля _____ 2026 г.

Заведующий кафедрой
«Технологии и оборудование машиностроения»
Московского политехнического университета,
кандидат технических наук, доцент

 А.В. Александров

Профессор кафедры «Технологии и
оборудование машиностроения»
Московского политехнического университета,
доктор технических наук, профессор

 М.В. Вартанов

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет»

Адрес: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 16, Московский политехнический университет, корпус 2, ауд. 1620

Тел.: +7 (495) 223-05-23

E-mail: mospolytech@mospolytech.ru

ПОДПИСЬ Александрова А.В.
Вартамова М.В. заверяю

СПЕЦИАЛИСТ ПО
КАДРОВОМУ
ДЕЛОПРОИЗВОДСТВУ
ПОГОРЕЛОВА А.В.

