

Ученому секретарю
Диссертационного совета 24.2.332.01
при ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
к.т.н., доц. Сотовой Екатерине Сергеевне

ОТЗЫВ

официального оппонента
доктора технических наук, профессора Семенова Александра Николаевича
на диссертацию Лима Александра Аликовича
на тему: *«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

Широкое внедрение методов цифровизации в машиностроительное производство обеспечивает существенное повышение производительности и имеет высокую значимость. Особую важность такие методы могут приобрести в сборочных процессах мелкосерийного и единичного производства. В них применяется большое количество ручных операций, что повышает трудоёмкость сборочных работ в общей трудоёмкости изделия, поэтому использование современных цифровых технологий является весьма перспективным.

Такая ситуация определяется тем, что основное время, затрачиваемое на присоединение деталей, имеет существенно меньшее значение по сравнению с подготовительно-заключительным и вспомогательным временами, которые связаны с изучением технической документации, подготовкой компонентов, контролем и другими структурными компонентами.

Одним из элементов цифровой модернизации машиностроения является визуализация технологических приемов при сборке узлов и механизмов на основе технологии «дополненной реальности» (AR), обеспечивающая снижение непроизводительных затрат рабочего времени. В

этой связи математическое моделирование и формализация сборочных операций на основе разработки и внедрения новых научно обоснованных подходов к сборочному процессу путем использования технологии дополненной реальности – дополнения материальных действий визуальным сопровождением представляется актуальным направлением, имеющим важное теоретическое и практическое значение.

Новизна исследований и полученных результатов

К наиболее существенным научным результатам работы можно отнести следующие элементы диссертации, выносимые на защиту:

- математическая модель процесса сборки машиностроительных изделий с применением инструмента дополненной реальности;
- формализация сборочных процессов на основе аппарата динамических гиперграфов, позволяющая автоматически корректировать последовательность операций в режиме реального времени, сопровождая реальный процесс присоединения деталей визуализацией в виде дополненной реальности.

Научная новизна исследований, заявленная соискателем в диссертационной работе, в полной мере подтверждается созданием оригинального программного комплекса, официально зафиксированного в системе государственной регистрации, позволяет повысить производительность и качество процесса сборки в условиях единичного и мелкосерийного производств.

Положения научной новизны, сформулированные и приведенные в диссертации, достаточно корректны, полностью отражают сущность полученных результатов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность и обоснованность основных положений диссертации подтверждается тем, что они основываются на исходных принципах технологии машиностроения, законах математики, информатики и подтверждаются весомыми итогами внедрения на промышленном

предприятии, одобрением ведущей организации, корректным применением математического аппарата и результатами проведенных экспериментов.

Автор последовательно выстраивает доказательную базу: от теоретического обоснования, опирающегося на формальный аппарат гиперграфов и методы дискретной математики, к натурному эксперименту с привлечением статистически достаточного количества сборщиков разной степени подготовки. Подтверждением достоверности полученных результатов с использованием инструмента дополненной реальности также является стабильность их эффекта в процессе многократного воспроизведения сборки и совпадение лабораторных данных с результатами промышленной апробации на экструдере, где зафиксировано сопоставимое сокращение штучно-калькуляционного времени (36 – 40%).

Выводы диссертации обоснованы и логически следуют из полученных теоретических и экспериментальных результатов.

Практическая ценность работы

Практическая значимость заключается в разработанной методике применения инструмента дополненной реальности для повышения эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий, а также в разработанных рекомендациях по обучению сборщиков.

Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа изложена на 121 странице, включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 91 наименования и два приложения. Работа содержит 30 рисунков и 7 таблиц.

Во введении корректно определены объект и предмет исследования, поставлены цель и задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость. Отмечена связь работы с направлением Technet – национальной технологической инициативы.

В первой главе содержит обзор литературы и анализ текущего состояния вопроса. Автор проводит исследование структуры штучно-калькуляционного времени сборки и показывает, что основные резервы

повышения эффективности связаны с сокращением подготовительно-заключительного и вспомогательного времени. Выполнен обзор существующих подходов к оптимизации сборочных процессов. Анализ литературных источников позволяет обоснованно выделить применение технологий дополненной реальности как инструмент, способный обеспечить целенаправленное воздействие на указанные составляющие времени.

Глава 2 представляет теоретическую основу работы. Здесь предложена гиперграфовая модель формализации сборочного чертежа, позволяющая описать групповые операции. Введена математическая модель штучно-калькуляционного времени, учитывающая вклад дополненной реальности посредством коэффициентов φ и ω . Описан алгоритм преобразования гиперграфовой структуры в нодовую модель для среды Unity, а также модифицированный алгоритм оптимизации на основе алгоритма Краскала. Теоретические построения выполнены на достаточно высоком уровне.

В третьей главе представлены натурные эксперименты, где автор обоснованно классифицировал участников по уровню практической подготовки на группы, что позволило выявить не только средний эффект от внедрения AR, но и его зависимость от опыта сборщика. Заслуживает внимания архитектура программного модуля, реализующего автоматическое продвижение по нодовой структуре и формирование корректирующих подсказок в реальном времени. Отдельный интерес представляют полученные кривые обучения: коэффициент λ при AR-сопровождении составил 0,42 против 0,18 в традиционном варианте, что свидетельствует о существенном ускорении адаптации новых работников. Показано также, что разброс результатов при использовании AR значительно меньше (стандартное отклонение 5,0 мин против 15,3 мин), что важно с точки зрения стабильности технологического процесса.

В главе четыре разработана методика автоматического извлечения сборочной информации из 3D-модели сборки, которая устраняет необходимость ручного описания геометрии компонентов. Промышленные испытания на аддитивной установке подтвердили работоспособность

подхода в реальных производственных условиях и позволили верифицировать значения коэффициентов математической модели. Практическая востребованность подтверждена актами внедрения на двух предприятиях и включением результатов в образовательные программы кафедры цифровых и аддитивных технологий РТУ МИРЭА.

Заключение содержит основные результаты, полностью соответствующие цели и задачам работы.

По теме диссертации опубликовано 12 работ, из них 4 – в журналах, входящих в перечень ВАК. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертанта

Научная значимость работы состоит в развитии теоретических основ сборочных процессов в машиностроении путем формализованного перевода сборочных чертежей в гиперграфовую структуру и в разработке математической модели штучно-калькуляционного времени сборки, обеспечивающей сокращение подготовительно-заключительного и вспомогательного его за счет дополнительного визуального сопровождения.

Практическая значимость заключается в создании инженерной методики внедрения инструмента дополненной реальности, обеспечивающей сокращение штучно-калькуляционного времени сборки $T_{шк}$ на 36 – 40% за счет уменьшения подготовительно-заключительного и вспомогательного времени в 4 – 5 раз, ускорение подготовки новых специалистов в несколько раз, а также снижение зависимости эффективности сборки от квалификации персонала.

Соответствие работы требованиям ВАК

Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научно-техническом уровне. Содержание работы соответствует паспорту специальности 2.5.6 «Технология машиностроения» (п. 3 – математическое моделирование

технологических процессов; п. 10 – цифровые технологические процессы). Работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ.

Оценка языка и стиля диссертации и автореферата

Диссертация написана грамотным научно-техническим языком. Стил ь изложения соответствует требованиям, предъявляемым к квалификационным работам. Иллюстративный материал информативен и дополняет текстовое содержание. Автореферат в целом адекватно передаёт содержание диссертации.

Замечания по содержанию диссертационной работы

Признавая несомненную новизну, теоретическую и практическую значимости исследования, необходимо отметить следующие моменты, вызывающие потребность дискуссии и замечания.

1. В диссертации автор широко использует ссылки на учебные пособия, которые являются вторичными источниками информации, основанными на широко известных первичных источниках. В качестве основных литературных источников для диссертационных исследований рекомендуется использовать научные статьи, монографии, патенты, справочники и т. п.

2. Программной платформой для разработки дополненной реальности в данной работе выбрана среда Unity, которая имеет развитый инструментарий для работы с трехмерной графикой и систему визуального программирования на основе нодовых структур. Однако, автор не отметил свои права на использование этой платформы и имеется ли официальная техническая поддержка от правообладателя.

3. Во второй главе диссертации пять выводов избыточно пространны, занимают две страницы. Выводы по главам и всей диссертации должны отражать суть полученного результата, быть краткими и лаконичными.

4. На рисунке 1.1 недостаточно корректно изображена сборочная размерная цепь, поскольку одной из ее ключевых характеристик является замкнутость. Причиной является неправильное изображение звена A1, которое относится не к размеру корпуса, а к размерам трех составляющих звеньев.

5. Рисунок 2.2 не соответствует общепринятому понятию конструктивной схемы как упрощенному и схематичному изображению сборочного образования, а также его описанию.

6. Термин «инструмент дополненной реальности» в единственном числе не вполне точно передаёт сущность разработки и может вызвать неоднозначное толкование. Целесообразно использовать следующую формулировку – «система дополненной реальности» или «программно-аппаратный комплекс дополненной реальности».

7. Экспериментальные исследования проведены на единственном типе сборочного узла (экструдер). Хотя полученные результаты убедительны, вопрос о применимости данной технологии на существенно иных по конструктивной сложности и характеристикам изделий остаётся открытым.

8. В работе отсутствует технико-экономическое обоснование предлагаемой технологии дополнительной визуализации сборочного процесса. Отсутствуют данные о стоимости внедрения данной системы, сроках окупаемости и ожидаемом экономическом эффекте.

Перечисленные замечания, не затрагивают существа полученных научных результатов, которые опубликованы в достаточном количестве публикаций и обсуждались на конференциях, носят рекомендательный характер. Замечания не снижают общей положительной оценки работы и направлены на возможное развитие представленного исследования.

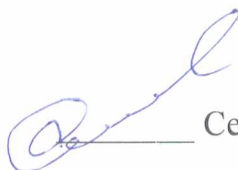
Заключение по диссертационной работе

Диссертация А.А. Лима «Повышение эффективности технологических процессов сборки машиностроительных изделий на основе применения инструментов дополненной реальности» является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научно-

технической задачи – повышение эффективности сборочных процессов в мелкосерийном машиностроении за счёт сокращения подготовительно-заключительного и вспомогательного времени на основе применения AR-технологий, формализации процессов посредством динамических гиперграфов и разработки соответствующей математической модели.

По своему содержанию, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов работа полностью соответствует требованиям п. 9-11, 13,14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Лим Александр Аликович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6. – Технология машиностроения.

Официальный оппонент:
доктор технических наук,
профессор, кафедры
«Инновационное машиностроение»
ФГБОУ ВО «Рыбинский
государственный авиационный
технический университет имени
П.А. Соловьева»



Семенов Александр Николаевич
« 1 » июня 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Адрес: 152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53

Телефон: +7 (905) 132-63-88. E-mail: semenov.anc@mail.ru

Подпись заверяю

Врио Ученого секретаря Ученого совета

РГАТУ имени П.А. Соловьева



Н.В. Архарова