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

ОТЗЫВ

официального оппонента
доктора технических наук, профессора Галиновского Андрея Леонидовича
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 темы диссертационной работы

Современное машиностроение находится в стадии глубокой цифровой трансформации, обусловленной переходом промышленности к концепции «Индустрия 4.0», где цифровые технологии интегрируются в производственные процессы. Рынок технологий дополненной и виртуальной реальности (AR/VR) в промышленности демонстрирует значительный рост: по прогнозам, в производственном секторе он вырастет с 1,5 млрд. долларов до 4,0 млрд долларов к 2030 году. Несомненно, эта область имеет широкие перспективы в особенности с использованием искусственного интеллекта. При этом дополненная реальность рассматривается как средство решения конкретных операционных задач: от помощи при сборке до удаленного контроля качества изделий. В этом контексте традиционные методы информационной поддержки сборщика, связанные с поиском, и идентификацией данных, сопровождаются временными потерями и в, определенной степени, требуют замены на современные подходы, прежде всего с использованием AR/VR. Как справедливо отмечает автор, доля ручного труда при сборке таких изделий достигает 80–90%, а доля подготовительно-заключительного и вспомогательного времени в штучно-калькуляционном времени может составлять до 40–50%.

Таким образом, тема исследования является актуальной научно-технической задачей.

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна работы состоит в создании комплекса взаимосвязанных теоретических положений и инструментальных средств повышения эффективности сборки машиностроительных изделий с применением дополненной реальности, а именно: установлены закономерности сокращения штучно-калькуляционного времени с выделением доли подготовительно-заключительной и вспомогательной составляющих (до 82,6%); разработаны метод формализации сборочных

процессов на основе динамических гиперграфов с адаптивной коррекцией весов, математическая модель AR-сопровождения с коэффициентами ω и φ, модифицированный алгоритм Краскала для гиперграфов, а также система фантомных объектов с уравнениями динамики позиционирования и приоритетом ручного управления.

В целом с формулировками положений научной новизны, предложенной в диссертации, можно согласиться.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность результатов обеспечивается:

корректным применением аппарата теории гиперграфов, топологической сортировки, теории графов и методов оптимизации;

значительным объёмом экспериментальных исследований (более 100 циклов сборки);

использованием современного оборудования и метрологически обеспеченных методик измерений;

высокими значениями коэффициентов корреляции статистической обработкой результатов;

положительными результатами промышленной апробации на двух предприятиях и внедрением в учебный процесс РТУ МИРЭА.

Выводы диссертации полностью соответствуют поставленным задачам, логически вытекают из теоретических и экспериментальных результатов. Автореферат **адекватно отражает** содержание диссертации.

Оценка содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 91 наименования и двух приложений. Общий объём – 121 страница, содержит 30 рисунков и 7 таблиц.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость.

В главе 1 выполнен системный анализ структуры штучно-калькуляционного времени, показано, что резервы эффективности лежат в области информационной поддержки. Проведён критический обзор существующих подходов к повышению эффективности сборки – автоматизации, совершенствования оснастки, методов бережливого производства – с обоснованием их ограниченной применимости для единичной и мелкосерийной сборки. Обоснован выбор технологий дополненной реальности как инструмента целенаправленного воздействия на $T_{пз}$ и $T_{в}$ обоснован убедительно, с опорой на широкий круг отечественных и зарубежных источников.

Глава 2 посвящена теоретическим исследованиям. В главе разработана гиперграфовая структура для формализации сборочного чертежа через динамический гиперграф. Предложена математическая модель штучно-калькуляционного времени с учётом AR-сопровождения через введение коэффициентов φ и ω, имеющих ясный физический смысл и позволяющих

количественно прогнозировать эффект внедрения AR. Разработан метод формализации сборочных процессов на основе аппарата гиперграфов: гиперрёбра естественным образом описывают групповые сборочные операции, объединяющие произвольное число компонентов, что недостижимо в рамках обычных графов без потери информации. Особую ценность представляет модель динамического гиперграфа G(t) с адаптивным изменением весовых коэффициентов, обеспечивающая автоматическую настройку информационной поддержки в зависимости от квалификации оператора. Разработан алгоритм преобразования гиперграфа в нодовую структуру. Предложенный модифицированный алгоритм Краскала для гиперграфов.

Глава 3 содержит результаты экспериментального исследования, проведённого с участием десяти операторов различной квалификации. Описана система фантомных объектов, даны уравнения динамики позиционирования, обеспечивающие точность установки компонентов по координатам. Экспериментально подтверждено сокращение времени сборки $T_{шк}$ на 38,4%, снижение числа ошибок на 68,4%, ускорение обучения с 21 до 5 дней. Получены кривые обучения и зависимости от квалификации. Статистическая значимость полученных результатов подтверждена дисперсионным анализом.

Глава 4 посвящена вопросам практической реализации полученных результатов. Представлена шестиэтапная методика создания AR-приложения – от оцифровки изделия до развёртывания и калибровки на устройстве, – пригодная для непосредственного использования инженером-технологом без необходимости самостоятельной разработки алгоритмов формализации и оптимизации. Промышленная апробация на экструдере Hydra аддитивной установки подтвердила устойчивость лабораторных результатов в производственных условиях. Внедрение результатов на двух предприятиях – ООО «Инновационные технологии и дизайн» и ООО «Астрон Билдингс» – и в учебный процесс кафедры цифровых и аддитивных технологий РТУ МИРЭА, подтверждённое соответствующими актами, свидетельствует о значимости работы для производства и образования.

Заключение содержит основные итоги работы, полностью соответствующие поставленной цели и сформулированным задачам. Выводы конкретны, обоснованы экспериментальными данными и хорошо структурированы.

По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 4 в журналах из перечня ВАК, получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертанта

Научная значимость работы заключается в создании нового подхода к формализации сборочных процессов (динамические гиперграфы) и

математической модели, связывающей параметры AR-сопровождения с нормированием времени.

Практическая значимость состоит в разработке и внедрении методики AR-сопровождения, позволяющей:

- Сократить время сборки $T_{шк}$ на 36–40% в реальном производстве;
- в 4–5 раз уменьшить $T_{пз}$ и $T_{в}$;
- ускорить ввод новых операторов в 3 раза;
- снизить зависимость результата от квалификации персонала.

Результаты приняты к внедрению в ООО «Инновационные технологии и дизайн», ООО «Астрон Билдингс» и в учебном процессе РТУ МИРЭА.

Соответствие работы требованиям ВАК

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научно-техническом уровне. Она полностью соответствует паспорту специальности 2.5.6 «Технология машиностроения» (п. 3 – математическое моделирование технологических процессов сборки; п. 10 – цифровые технологические процессы). Содержание работы отвечает требованиям п. 7 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Оценка языка и стиля диссертации и автореферата

Диссертация и автореферат написаны технически грамотным, ясным языком. Терминология соответствует принятой в области технологии машиностроения и цифрового производства. Иллюстративный материал (рисунки, схемы, таблицы) информативен и хорошо связан с текстом. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Основные замечания по работе

1. Отсутствует сравнительный анализа с другими AR-платформами. Следовало бы кратко обосновать выбор Microsoft HoloLens 2. по сравнению с альтернативами (например, Meta Quest)
2. В работе не приведен экономический анализ внедрения AR-системы, следовало бы привести расчёт экономической эффективности для типового предприятия мелкосерийного производства.
3. В работе имеется уточнение, что работа ориентирована на мелкосерийное производство. Не ясно, когда, т.е. при какой партии имеется целесообразность внедрять результаты диссертации, а когда выгоднее традиционная технология.
4. Уточнение формулы штучно-калькуляционного времени предлагается проводить посредством введения коэффициентов φ и ω, которые определяются экспериментально. Не ясно в каком объеме должны быть проведены такие эксперименты.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и носят, в основном, рекомендательный и дискуссионный характер. Они не затрагивают основных защищаемых положений.

Заключение по диссертационной работе

Диссертация Лима А.А. «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 СМ-12 "Технологии ракетно-космического машиностроения" ФГОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н. по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы, профессор

НУК СМ
Зав.каф. СМ-12
А.Л. Галиновский

Галиновский Андрей Леонидович

Адрес: 105005, Москва, 2-я Бауманская дом 5, строение 1, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Тел.8 (916)158-00-64

E-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru

«ВЕРНО»
СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ
ПОВАЛЯЕВА И.О.
ОТДЕЛ ПО ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ ЕДИНОЙ ПРИЁМНОЙ УКСА
МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА