

На правах рукописи



АСЛАНОВ РОМАН ЭДВИНОВИЧ

**ВИРТУАЛЬНЫЕ ТРЕНАЖЕРЫ В ПОДСИСТЕМЕ АСУП ДЛЯ
ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ**

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Самара – 2024

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматизированного проектирования и управления» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» (СПбГТИ(ТУ)).

Научный руководитель: **Большаков Александр Афанасьевич**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Системы автоматизированного
проектирования и управления» СПбГТИ(ТУ)

Официальные оппоненты: **Обухов Артём Дмитриевич**
доктор технических наук, доцент, заведующий
лабораторией медицинских VR тренажерных систем
для обучения, диагностики и реабилитации, ФГБОУ
ВО «Тамбовский государственный технический
университет»

Гончаров Роман Дмитриевич
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Цифровое управление процессами в АПК»,
руководитель центра «Агроробототехника и VR/AR»
ФГБОУ ВО Вавиловский университет (г. Саратов)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Волгоградский государственный технический
университет"

Защита состоится «26» декабря 2024 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07) ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» (СамГТУ) по адресу: Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета по адресу: 443100, г. Самара, ул. Первомайская, 18, а также на официальном сайте диссертационного совета по адресу: <http://d21221707.samgtu.ru/>.

Автореферат разослан « » _____ 20__ г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, г. Самара, Молодогвардейская ул. 244, СамГТУ, Главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.04 (Д 212.217.07), тел.: (846) 278-44-96, факс: (846) 278-44-00; e-mail: D24.2.377.04@yandex.ru.

Учёный секретарь
Диссертационного совета
24.2.377.04 (Д 212.217.07),
к.т.н., доцент



Е.Е. Ярославкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Автоматизированные системы управления производством (АСУП) представляют сложный комплекс, состоящий из множества взаимосвязанных подсистем для управления производственными процессами организации. Подсистема подготовки персонала (ППП) является одним из важнейших компонентов АСУП, которая предназначена для подготовки, мониторинга и управления кадровым составом производственного процесса. Важным аспектом производства с использованием металлорежущих станков являются обучающие системы, которые позволяют подготовить специалистов согласно требованиям предприятия. Для эффективной подготовки таких специалистов подсистема подготовки персонала должна обладать современными инструментами обучения.

В настоящее время современными инструментами обучения являются технологии виртуальной реальности, которые всё более широко применяются при подготовке и оценке квалификации персонала АСУП. Использование виртуальных тренажеров позволяет обеспечить обучение профессиональным навыкам сотрудников в условиях физической недоступности в учебном центре станков, машин и механизмов, необходимых для организации подобной оценки в реальных производственных условиях, а также в случаях, когда простой производственного оборудования повлечет большие издержки производства. При этом снижается потребность в дорогостоящем обучении на рабочем месте, сокращаются денежные затраты на расходные материалы, уменьшается количество обучающего персонала.

Таким образом, виртуальные тренажеры являются современным инструментом для повышения эффективности подготовки специалистов в ППП АСУП. Они позволяют обеспечить безопасную, гибкую и реалистичную среду для тестирования, обучения и оптимизации производственных процессов.

Степень проработанности темы. Построению и применению симуляторов виртуальной реальности и тренажерных комплексов посвящены работы следующих исследователей: Мартинов Г.М., Матлин А.В., Петров Д.Н., Гиацинтов А.М., Ли В. Г., Халиуллин А.Р., Сметюх Н.П., Ишкильдин Р.Р., Краснянский М.Д., Кравченко О.А., Костыгова Д.М., Пью С.Т., Коцюба И.Ю., Андросов А.Ю., Кугуракова В.В., Захаров А.Ю. Архипов А.Е., Глазырин А.Е., Обухов А.Д., Солодов С.В., Федорищев Л.А., Дудырев Ф.Ф., Чистякова Т.Б., Lerner D., Sven M., Dawley L., Qingyang I, Qian L и др. Однако не разработаны модели и методы, регламент для построения на их основе виртуальных тренажеров для использования в ППП АСУП с применением металлорежущих станков.

Поэтому важной народно-хозяйственной задачей является разработка моделей, методов и алгоритмов по проектированию, построению и реализации виртуальных тренажеров для подсистемы подготовки операторов для управления металлорежущими станками АСУП.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности подсистемы подготовки операторов для управления металлорежущими станками АСУП на основе виртуальных тренажеров.

Эффективность связана с качеством процессов построения виртуальных тренажеров, а также организации профессиональной подготовки с их использованием в ППП АСУП, которое обеспечивает выполнение операторами обязанностей на профессиональном уровне при одновременном снижении количества различных нарушений, уменьшении временных и финансовых затрат. Количественные показатели для оценки эффективности: 1) сокращение времени разработки виртуальных тренажеров

требуемой функциональности; 2) повышение качества подготовки специалиста (среднего балла) на основе увеличения часов практической подготовки, а также отработанных навыков; 3) сокращение денежных затрат на расходные материалы.

Объектом исследования являются виртуальные тренажеры в подсистемах подготовки операторов металлорежущих станков автоматизированных систем управления производствами.

Предметом исследования являются модели, методы и алгоритмы разработки виртуальных тренажеров и их применения в подсистеме подготовки персонала АСУ производствами для обучения работе на металлорежущих станках.

Для достижения поставленной цели, необходимо решить ряд **задач**.

1. Проанализировать применение виртуальных тренажеров для подготовки специалистов промышленного сектора, методы проектирования и разработки программной и визуальной частей, выбора аппаратных устройств, сформулировать требования к разработке и реализации виртуальных тренажеров для подсистемы подготовки персонала АСУ производствами.

2. Разработать метод автоматизированного построения виртуальных тренажеров для подсистемы подготовки персонала АСУ производствами с применением функциональных видеороликов и формализованного процесса проектирования и разработки в виде структур процесса создания программных и визуальных модулей с учетом специфики разработки тренажеров под виртуальную реальность.

3. Разработать онтологическую модель в виде семантической сети для построения виртуальных тренажеров для подсистемы подготовки операторов АСУ производствами с использованием металлорежущих станков.

4. Разработать метод оценки качества визуализации разработанного виртуального тренажера для подготовки операторов металлорежущих станков с применением метода Кондорсе, для выбора лучшей альтернативы.

5. Провести апробацию виртуальных тренажеров для подсистемы АСУ производствами подготовки операторов металлорежущих станков с целью определения эффективности и качества профессионального обучения.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе применялись методы объектно-ориентированного анализа и проектирования программных средств, системного анализа, принцип Кондорсе для выбора альтернативного решения.

Научная новизна.

1. Разработан метод автоматизированного построения виртуальных тренажеров для подсистемы подготовки персонала АСУ производствами, *отличающийся* работой с заказчиком на основе предоставления с производства функциональных видеороликов, а также формализацией процесса проектирования и разработки в виде структур процесса создания программных и визуальных модулей с учетом специфики разработки тренажеров виртуальной реальности, *что позволило* оперативно осуществлять мониторинг правильности выполнения операций, уменьшить ошибки разработчика, а также сократить время разработки технического описания, таким образом, повысить результативность процесса проектирования и разработки виртуальных тренажеров для обучения операторов металлорежущих станков (п. 7).

2. Разработана онтологическая модель для построения виртуальных тренажеров для подготовки операторов металлорежущих станков в ППП АСУ производствами, *отличающаяся* использованием выявленных основных понятий и отношений между ними в предметной области работы операторов металлорежущих станков и реализацией с использованием инструментальной программной среды

Protege, что позволило повысить эффективность планирования и стандартизации для подготовки операторов металлорежущих станков в ППП АСУ производствами (п. 8).

3. Предложен метод оценки эффективности визуализации разработанного виртуального тренажера подготовки операторов токарной и фрезерной обработок ППП АСУ производствами, *отличающийся* применением метода поиска лучшей альтернативы, который основывается на принципе Кондорсе, что позволило определить лучшую альтернативу на основе ранжирования экспертных оценок при выборе визуализации тренажера виртуальной реальности для ППП АСУ производствами (п. 13).

Работа соответствует научной специальности: 2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: пункт 7 «Теоретические основы и методы моделирования и управления организационно-технологическими системами и киберфизическими производственными комплексами»; пункт 8 «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления и их цифровых двойников»; пункт 13 «Методы планирования, оптимизации, отладки, сопровождения, модификации и эксплуатации функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включающие задачи управления качеством, финансами и персоналом».

Теоретическую и методологическую основу исследования составляют труды отечественных (Матлин А.В., Петров Д.Н., Гиацинтов А.М., Ли В. Г., Халиуллин А.Р., Сметюх Н.П., Ишкильдин Р.Р., Кравченко О.А., Костыгова Д.М., Пью С.Т., Коцюба И.Ю., Андросов А.Ю., Кугуракова В.В., Захаров А.Ю. Архипов А.Е., Глазырин А.Е., Солодов С.В., Федорищев Л.А., Дудырев Ф.Ф. и др.) и зарубежных (Lerner D., Sven M., Dawley L., Qingyang I, Qian L. и др.) исследователей по теоретическим и практическим аспектам разработки, исследования и применения симуляторов виртуальной реальности и тренажерных комплексов для подготовки специалистов различных предметных областей.

Теоретическая значимость результатов диссертации заключается в обосновании использования предложенных методов и онтологической модели для проектирования и построения виртуальных тренажеров подсистемы подготовки персонала АСУП в различных сферах промышленного производства. Для проектирования компонентов виртуальных тренажеров для АСУП установлена применимость диаграмм нотаций IDEF0, деятельности и прецедентов UML, а также принципа Кондорсе для выбора альтернативного решения в задаче оценки визуальной составляющей.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в сокращении временных и финансовых затрат на выполнение проектных работ с применением предложенных методов разработки технического задания с использованием видео контента, онтологической модели и структуры процесса создания программных и визуальных модулей виртуальных тренажеров, а также методов разработки архитектуры приложения исполняющих алгоритмов и визуальных компонентов тренажера виртуальной реальности для подсистемы подготовки персонала АСУП.

Реализация и внедрение. Использование метода проектирования виртуальных тренажеров для ППП АСУП, онтологической модели в виде семантической сети и способа разработки симуляторов виртуальной реальности, метода разработки архитектуры приложения, исполняющих алгоритмов и визуальных компонентов виртуальных тренажеров с использованием диаграмм

нотаций IDEF0, диаграмм деятельности и прецедентов UML и принципа Кондорсе для поиска лучшей альтернативы при принятии решений выбора лучшей визуализации в ООО «АЙТИПРО» позволили повысить эффективность разработки виртуальных тренажеров на 32%.

Разработанный виртуальный тренажер подсистемы подготовки операторов токарной и фрезерной обработок автоматизированной системы управления производством используется в ГБПОУ МГОК. Приложение показало эффективность при подготовке операторов металлорежущих станков АСУП. Внедрение результатов исследования повысило качество подготовки операторов металлорежущих станков АСУП на 9,64%.

Результаты диссертационной работы легли в основу нового федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по специальности 09.02.10 Разработка компьютерных игр, дополненной и виртуальной реальности приказ Министерства просвещения Российской Федерации от 25.06.2024 № 441 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта (Зарегистрирован 25.07.2024 № 78924)

Разработанный программный комплекс «Лаборатория универсальной токарной и фрезерной обработки в среде виртуальной реальности (VR)» используется для подготовки обучающихся по направлению машиностроения в области токарной и фрезерной обработок ГАУ СО «Агентство по развитию человеческого капитала».

В Центре опережающей профессиональной подготовки Ростовской области структурного подразделения государственного бюджетного профессионального образовательного учреждения Ростовской области «Ростовский-на-Дону колледж связи и информатики» предложенные программно-инструментальные средства применяются в профессиональной ориентации школьников.

Результаты исследования используются в образовательном процессе ГБПОУ Колледж «Царицыно» при обучении студентов по специальности 09.02.07 Информационные системы и программирование в рамках профессиональной дисциплины «Разработка виртуальной и дополненной реальности», при проведении конкурсов профессионального мастерства по компетенции «Разработка виртуальной и дополненной реальности» и компетенции «Разработка виртуальных миров» Всероссийского чемпионатного движения по профессиональному мастерству "Профессионалы", а также при проведении демонстрационного экзамена по компетенции «Разработка виртуальной и дополненной реальности» для студентов учреждений среднего профессионального образования РФ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод автоматизированного проектирования виртуальных тренажеров для обучения операторов металлорежущих станков в ППП АСУ производствами.
2. Онтологическая модель для построения виртуальных тренажеров для обучения операторов металлорежущих станков в ППП АСУ производствами.
3. Метод оценки эффективности визуализации разработанного виртуального тренажера подготовки операторов токарной и фрезерной обработок ППП АСУ производствами с использованием принципа Кондорсе для выбора альтернативного решения.
4. Программное обеспечение – виртуальный тренажер для подсистемы подготовки операторов металлорежущих станков АСУ производствами.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования обсуждались на VI Всероссийском Форуме федеральных учебно-методических объединений в

системе СПО (Москва, 2021); Международном форуме Kazan Digital Week (Казань, 2021); VIII ежегодной всероссийской научно-практической конференции «Цифровизация общества: состояние, проблемы, перспективы» (Москва, 2021); Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции «Актуальные проблемы теории и практики обучения физико-математическим и техническим дисциплинам в современном образовательном пространстве» (Курск, 2022); XV Международной научно-практической конференции «Шамовские чтения» (Москва, 2023); международных конференциях: «Математические методы в технике и технологиях» (Ярославль, 2022; Н. Новгород, 2023; Казань, 2024); «Кибер-физические системы: проектирование и моделирование» CYBERPHY:2022 – «Cyber-Physical Systems Design And Modelling» (Ярославль, 2022).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 20 печатных работ, среди которых 6 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 – индексируемых в БД Scopus, 1 монография, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте РФ.

Личный вклад автора. Разработаны метод проектирования виртуальных тренажеров для АСУП [5], метод построения архитектуры приложения, алгоритмов и визуальных компонентов с использованием диаграмм нотаций IDEF0, диаграмм деятельности и прецедентов UML, структуры базы данных, а также принципа Кондорсе для выбора альтернативного решения [1, 2, 3, 7]. Разработано и апробировано программное обеспечение тренажера виртуальной реальности подсистемы подготовки операторов металлорежущих станков АСУП [6]. Разработаны виртуальные тренажеры для обучения, оценки компетенций специалистов и студентов, а также для профессиональной ориентации школьников [4].

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Диссертационная работа изложена на 155 печатных страницах машинописного текста, в т.ч. содержит рисунков – 37, таблиц – 17. Список литературы включает 176 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна и положения, выносимые на защиту. Приводятся сведения об апробации, публикациях и практической значимости диссертационной работы.

В главе 1 осуществлен анализ применения симуляторов виртуальной реальности в подготовке специалистов промышленного сектора, рассмотрены традиционные подходы к проектированию и разработке программной и визуальной подсистем, выбору аппаратных устройств. Сформулированы требования к разработке и реализации виртуальных тренажеров для подсистемы подготовки персонала АСУП.

Проведенный анализ позволил выявить и обосновать задачи, которые требуется решить для достижения сформулированной цели, связанной с повышением эффективности обучения операторов металлорежущих станков в ППП АСУП. К ним относятся создание метода проектирования экономически эффективных виртуальных тренажеров для подсистемы подготовки персонала АСУП с использованием металлорежущих станков, разработать метод построения архитектуры программного приложения подсистемы подготовки персонала АСУП с применением металлорежущих станков с исполняющими алгоритмами и визуальными компонентами

виртуальных тренажеров, разработать онтологическую модель в виде семантической сети для построения виртуальных тренажеров для подсистемы подготовки операторов АСУП с использованием металлорежущих станков, разработать метод оценки качества визуализации разработанного виртуального тренажера с применением метода Кондорсе, для выбора лучшей альтернативы, провести апробацию виртуальных тренажеров для подсистемы АСУП подготовки операторов металлорежущих станков с целью определения эффективности и качества профессионального обучения.

В главе 2 разработан метод проектирования и построения виртуальных тренажеров для ППП АСУП. Его отличительной особенностью является работа с заказчиком на основе предоставления с производства функциональных видеороликов, а также формализацией процесса проектирования и разработки в виде структур процесса создания программных и визуальных модулей с учетом специфики разработки тренажеров под VR. Съемка видеороликов должна следовать заранее разработанному сценарию: V_{prod} – видеоролик производственного процесса, требования описаны как совокупность следующих характеристик

$$V_{prod} = f(T_{length}, R_{quality}, S_{content}, A_{angles}, S_{sound}, F_{format}, S_{script}), \quad (1)$$

где T_{length} – длительность видеоролика $T_{length} \leq 900$ секунд (15 минут), $R_{quality}$ – разрешение видео и частота кадров $R_{quality} \geq 1080p$ и $FPS \geq 30$, $S_{content}$ – содержание видео должно включать все ключевые этапы работы оборудования ($S_{content} = \{launch, process, shutdown, key\ actions\}$), A_{angles} – количество ракурсов съемки $A_{angles} \geq 3$ (общий вид, крупные планы, детали оборудования), S_{sound} – наличие звукового сопровождения, F_{format} – формат видео ($F_{format} = MP4$), S_{script} – сценарий видеосъемки $S_{script} = \{launch, operator\ actions, emergency\ situations\}$.

Предложенный метод позволяет оперативно осуществлять мониторинг правильности выполнения операций, уменьшить ошибки разработчика, а также сократить время разработки технического описания, тем самым повысить результативность процесса проектирования и разработки виртуальных тренажеров для обучения операторов металлорежущих станков. Метод включает процесс поэтапной разработки, включающей три основных блока: *Pre-Production*, *Production* и *Post-Production*.

Этап *Pre-Production* включает несколько ключевых процессов, таких как концептуализация на основе функциональных видеороликов и материалов заказчика, бюджетирование, формирование технической документации и планирование.

$$PreProd_{VR} = f(Concept_{idea}, Budget_{plan}, TechDoc_{create}, Team_{form}, Plan_{dev}), \quad (2)$$

где $Concept_{idea}$ – создание концепции и идеи проекта на основе видео и материалов заказчика, $Budget_{plan}$ – планирование бюджета, $TechDoc_{create}$ – составление технической документации, $Team_{form}$ – формирование команды разработчиков, $Plan_{dev}$ – планирование процесса разработки.

На этапе *Production* процесс разработки организован по методологии Agile, с разбивкой на спринты и обратной связью от заказчика.

$$Prod_{VR} = \sum_{s=1}^n Sprint_s (Backlog_s, Task_{plan}, Task_{dev}, Rev_s, Feedback_{cust}), \quad (3)$$

где $Sprint_s$ – s -й спринт разработки, $Backlog_s$ – составление бэклога задач для s -го спринта, $Task_{plan}$ – планирование задач для s -го спринта, $Task_{dev}$ – разработка задач команды, Rev_s – ревью задач после завершения спринта, $Feedback_{cust}$ – обратная связь от заказчика после демонстрации результатов спринта.

Этап *Post-Production* включает тестирование, оптимизацию и сдачу проекта заказчику.

$$PostProd_{VR} = f(Test_{perf}, Test_{function}, Bug_{fix}, Final_{opt}, Project_{delivery}), \quad (4)$$

где $Test_{perf}$ – тестирование производительности, $Test_{function}$ – функциональное тестирование (виртуальной среды и ПО), Bug_{fix} – поиск и исправление ошибок, $Final_{opt}$ – финальная оптимизация ПО и виртуальной среды, $Project_{delivery}$ – сдача проекта заказчику.

Объединяя этапы разработки, можно выразить весь процесс создания виртуального тренажера в следующем виде:

$$DevProd_{VR} = PreProd_{VR} \rightarrow Prod_{VR} \rightarrow PostProd_{VR}, \quad (5)$$

с развернутой формулой:

$$\begin{aligned} DevProd_{VR} &= f(Concept_{idea}, Budget_{plan}, TechDoc_{create}, Team_{form}, Plan_{dev}) \\ &\rightarrow \sum_{s=1}^n Sprint_s (Backlog_s, Task_{plan}, Task_{dev}, Rev_s, Feedback_{cust}) \\ &\rightarrow f(Test_{perf}, Test_{function}, Bug_{fix}, Final_{opt}, Project_{delivery}). \end{aligned} \quad (6)$$

Метод систематизирует процесс разработки виртуального тренажера, начиная с этапа *Pre-Production*, проходя через фазу разработки *Production* и завершая тестированием и сдачей проекта *Post-Production*. Метод позволяет учитывать влияние каждого этапа на конечный результат, а также поддерживает итеративный процесс с постоянной обратной связью от заказчика, что делает её адаптивной к изменениям.

В предложенном методе используется разработанная онтологическая модель в виде семантической сети (см. рисунок 1) и подход проектирования и разработки виртуальных тренажеров для ППП АСУП, включающий метод проектирования и разработки симулятора, способы разработки 3D-моделей, программной части, базы данных и программной оптимизации.

Построение предложенной онтологической модели в виде семантической сети для подсистемы подготовки персонала АСУП является результатом формализации знаний о процессе подготовки специалистов. Этот процесс включает структурирование информации о компетенциях, навыках, профессиональных знаниях, обучающих материалах и методиках обучения, используемых в подсистеме подготовки персонала.

Онтологическая модель представляет семантическую сеть, в которой понятия и связи между ними представлены в виде узлов и ребер графа:

$$OM = \langle X, Y, Z \rangle, \quad (7)$$

где $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ – конечное множество понятий предметной области проектирования и разработки виртуальных тренажеров для ППП АСУП; $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_M\}$, $Y \subseteq \{X_1 \times X_2 \times \dots \times X_N\}$ – конечное множество семантически значимых отношений между понятиями-объектами вышеописанной предметной области; $Z = \{X \times Y\}$ – конечное множество функций интерпретации, которые задаются на понятиях и/или отношениях. Обычно заданием функции интерпретации Z является глоссарий, составленный для множества понятий X . Таким образом, в этой модели каждый узел соответствует определенному понятию, например, типу компетенции или курсу обучения, а ребра графа описывают отношения между этими понятиями, такие как "включает в себя", "является подтипом" и т.д.

Структура процесса создания программных и визуальных модулей виртуальных тренажеров для ППП АСУП включает три основных этапа: *Pre-Production*, *Production*, и *Post-Production*.

Этап *Pre-Production* включает формирование технического задания на основе видеоконтента.

$$PreProd_{VR\ АСУП} = f(TZ_{form}, Video_{content}), \quad (8)$$

где TZ_{form} – формирование технического задания (ТЗ), $Video_{content}$ – использование видеоконтента для уточнения ТЗ.

На этапе *Production* выполняются три ключевые задачи: разработка и интеграция 3D-моделей, разработка и развертывание программного обеспечения, а также создание и интеграция баз данных при необходимости.

$$Prod_{VR\ АСУП} = Dev_{3D} \rightarrow Dev_{SW} \rightarrow Dev_{DB}, \quad (9)$$

где Dev_{3D} – разработка и интеграция 3D-моделей, Dev_{SW} – разработка и развертывание программного обеспечения, Dev_{DB} – создание и интеграция баз данных. Процесс взаимодействия между этими задачами можно выразить как циклический процесс с возможностью взаимодействия между компонентами:

$$Cycle_{prod} = Dev_{3D} \leftrightarrow Dev_{SW} \leftrightarrow Dev_{DB}. \quad (10)$$

На этапе *Post-Production* проводится оптимизация системы. Если в процессе оптимизации выявляются ошибки, они корректируются с возвращением на этап разработки ПО:

$$PostProd_{VR\ АСУП} = Opt_{system} \leftrightarrow Revise_{SW}, \quad (11)$$

где Opt_{system} – оптимизация системы, $Revise_{SW}$ – исправление ошибок в ПО при их обнаружении. Процесс корректировки при обнаружении некорректной работе и иначе:

$$Revise_{SW} \begin{cases} Return_{prod}, \\ End_{VR\ АСУП}. \end{cases} \quad (12)$$

Объединяя этапы разработки, можно выразить весь процесс создания системы VR АСУП следующей формулой:

$$Dev_{VR\ АСУП} = PreProd_{VR\ АСУП} \rightarrow Cycle_{prod} \rightarrow PostProd_{VR\ АСУП} \quad (13)$$

с развернутой формулой:

$$Dev_{VR\ АСУП} = f(TZ_{form}, Video_{content}) \rightarrow (Dev_{3D} \leftrightarrow Dev_{SW} \leftrightarrow Dev_{DB}) \rightarrow (Opt_{system} \leftrightarrow Revise_{SW}). \quad (14)$$

Формула систематизирует процесс разработки системы VR АСУП, включая начальную фазу планирования и формирования ТЗ, циклический процесс разработки и интеграции 3D-моделей, ПО и баз данных, а также этап финальной оптимизации и исправления ошибок. Структура процесса создания программных и визуальных модулей виртуальных тренажеров представляет совокупность структур процессов: создания программных модулей, создания базы данных, создания 3D-моделей и оптимизации программных компонент.

Оценка эффективности визуализации разработанного виртуального тренажера для подготовки операторов металлорежущих станков в ППП АСУП осуществлена методом поиска лучшей альтернативы, который основывается на принципе Кондорсе. Его применение обеспечивает возможность выбора лучшего решения для обеспечения визуального эффекта.

Экспертам предлагается ранжировать альтернативы, исходя из их оценки визуальной пробы приложения, в порядке от лучшего решения к худшему.

1. Ранжирование альтернатив экспертами.

2. Следующим шагом определяются оценки n_{ik} , представляющие интерес альтернатив в парных предпочтениях.

3. Далее выполняются проверки по принципу Кондорсе, где лучшим решением определяется альтернатива a_i , в случае $n_{ik} \geq n_{ki}$ для всех k , не равных i .

В диссертации приведена сравнительная оценка ряда других методик голосования, каждая из которых имеет определенные особенности, преимущества и недостатки.

Таким образом, оценка эффективности визуализации разработанного виртуального тренажера для подготовки операторов металлорежущих станков в ППП АСУП методом Кондорсе для выбора альтернативы позволяет в полной мере учесть субъективность общего оценивания и обеспечивает возможность выбора лучшего решения для обеспечения визуального эффекта, учитывая предпочтения всех экспертов.

В главе 3 описан предлагаемый метод разработки виртуального тренажера ППП АСУП, разработана архитектура симулятора: функциональное обеспечение, структура базы данных, диаграмма классов, диаграмма нотаций IDEF0, диаграмма деятельности, диаграмма прецедентов (UML). Разработаны исполняющие алгоритмы и визуальные компоненты виртуального тренажера для АСУП.

Предложенный метод позволяет синтезировать архитектуру для виртуального тренажера ППП АСУП на основе математической модели как элемента системного анализа, которая создается с использованием функционального обеспечения, структуры базы данных, диаграммы классов, диаграммы нотаций IDEF0, диаграммы деятельности, диаграммы прецедентов (UML), разработанных для алгоритмов и визуальных компонент. Такой метод позволяет повысить эффективность разработки виртуального тренажера ППП АСУП, т.е. уменьшить финансовые и временные затраты. Архитектура виртуального тренажера ППП АСУП представлена на рисунке 2.

Пользователь имеет возможность выбрать модули по работе с оборудованием (металлорежущими станками), например, токарными или фрезерными универсальными станками или обратиться к режиму обучения. В зависимости от выбора включаются модули по сохранению 3D-объектов, модуль сохранения других результатов обучения, модуль анализа выполняемых действий. Информация хранится в базе данных (БД) и управляется системой управления базой данных (СУБД).

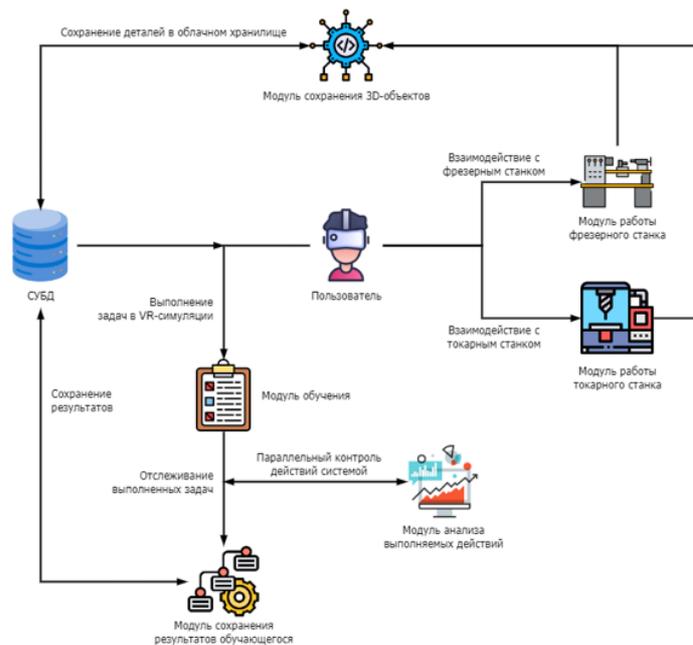


Рисунок 2. Архитектура виртуального тренажера ППП АСУП

Предлагаемая функциональная структура системы виртуальной реальности по работе на универсальных металлорежущих станках: фрезерных и токарных, изображена на рисунке 3.

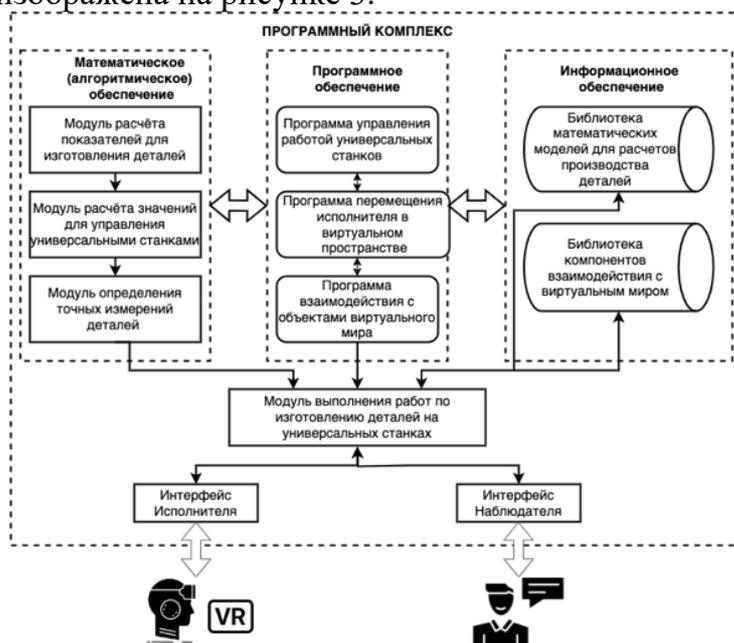


Рисунок 3. Функциональная диаграмма системы VR по работе на универсальных металлорежущих станках: фрезерном и токарном

Функциональная часть виртуального тренажера по изготовлению деталей на универсальных металлорежущих станках: фрезерных и токарных, иллюстрируется на диаграмме прецедентов (см. рисунок 4). Пользователь выполняет задания по производству деталей на универсальных станках: работает с измерительными инструментами, электронными панелями станков, имеет возможность создать заготовку в соответствии с заданными параметрами, а также заниматься наладкой и настройкой. Действия

пользователя должны выполняться с соблюдением требований техники безопасности, охраны труда и производственной дисциплины. Контроль действий осуществляется системой и преподавателями, экспертами наблюдателями. Данные о пользователе и результаты его работы сохраняются.

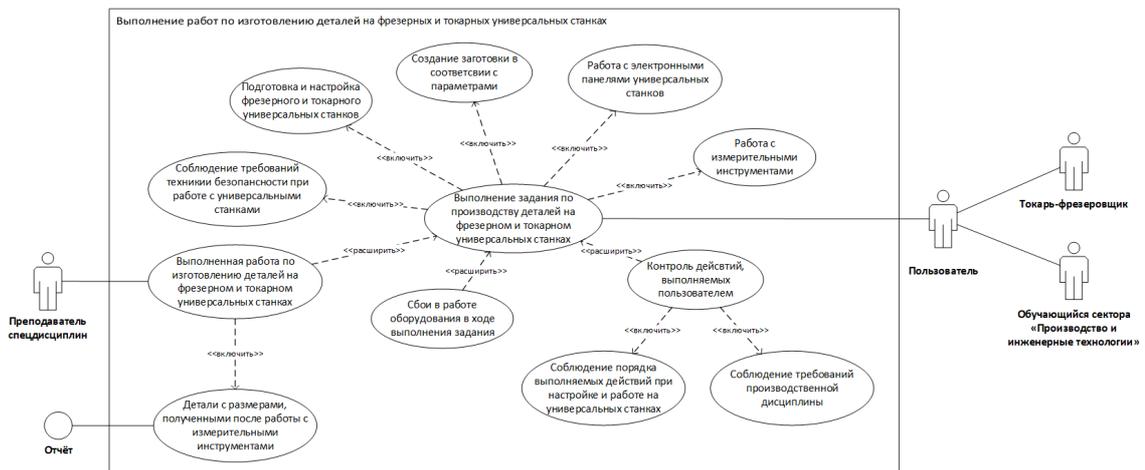


Рисунок 4. Диаграмма прецедентов

На рисунке 5 представлена контекстная диаграмма IDEF0. Она описывает взаимодействие системы с другими системами, пользователями и внешними источниками данных. Ресурсами, которые выполняют работу, являются преподаватели специальных дисциплин, обучающиеся сектора «Производство и инженерные технологии» и специалисты производства, работающие на универсальных станках.

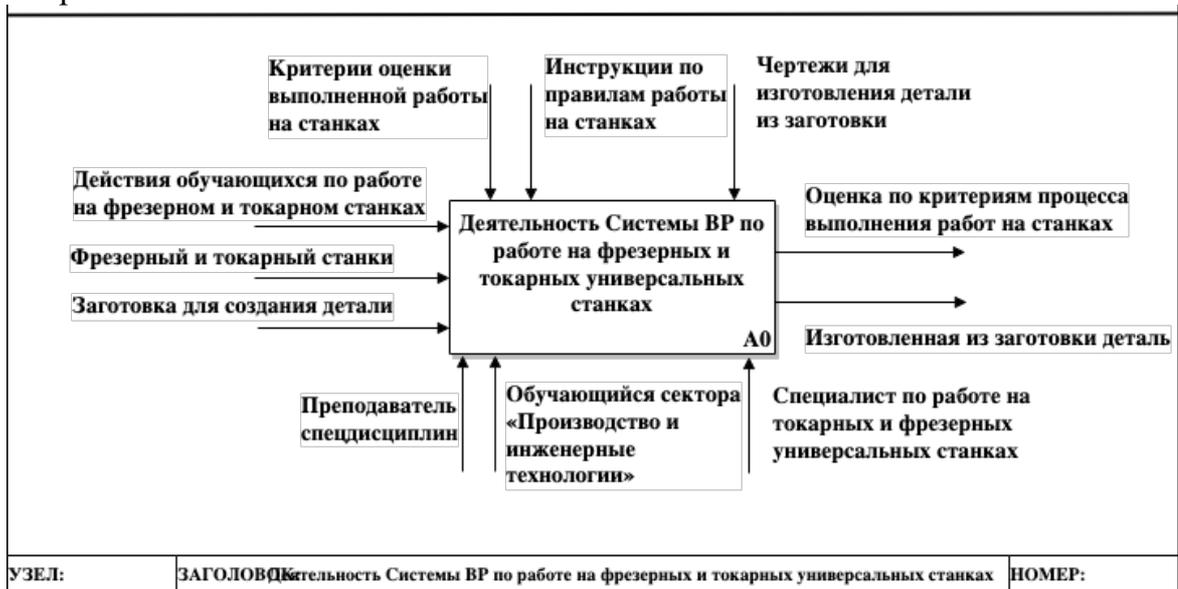


Рисунок 5. Контекстная диаграмма IDEF0 функционирования виртуальных тренажеров реальности для универсальных металлорежущих станков: фрезерных и токарных

Входными переменными являются рассматриваемые универсальные металлорежущие станки (токарные, фрезерные), заготовки для создания деталей и, собственно, действия обучающихся по работе на станках. Мониторинг и управление изготовления деталей на станках осуществляется специальной системой, контролирующей процесс работы на станках по специальным критериям, основываясь на инструкции по правилам работы на станках и чертежах деталей, которые изготавливаются. Эти действия обеспечивают изготовление деталей на универсальных станках с оценками качества процесса выполнения работы по заданным критериям. На выходе – изготовленная деталь и оценка навыков работы на станках в соответствии с критериями виртуальной среды.

В процессе обучения с использованием виртуальных тренажеров также отрабатываются нештатные ситуации. Основные представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристика нештатных ситуаций

№	Наименование нештатной ситуации	Описание	Решение
1.	Перегрузка режущего инструмента	Использование неправильной скорости резания, недостаточная охлаждение или неправильная глубина резания может привести к перегрузке режущего инструмента и его поломке.	Изменение параметров резания, увеличение охлаждения, замена изношенного инструмента.
2.	Защемление материала или инструмента	Неправильная установка заготовки или инструмента может привести к их защемлению, что может вызвать повреждение станка или травму оператора.	Остановка станка, освобождение защемленной части, проверка и исправление причин защемления.
3.	Образование острой стружки	Неправильная скорость подачи или форма режущего инструмента может привести к образованию острой стружки, которая может представлять опасность при контакте с оператором.	Изменение параметров подачи, замена режущего инструмента.
...
15	Потеря качества обработки	Неправильная настройка станка, износ режущего инструмента или дефекты в материале могут привести к потере качества обработки детали.	Проверка и коррекция параметров обработки, замена изношенного инструмента, проверка материала перед обработкой.

Блок-схема сценария обучения на примере токарного станка представлена на рисунке 6. В процессе обучения также генерируются нештатные ситуации.

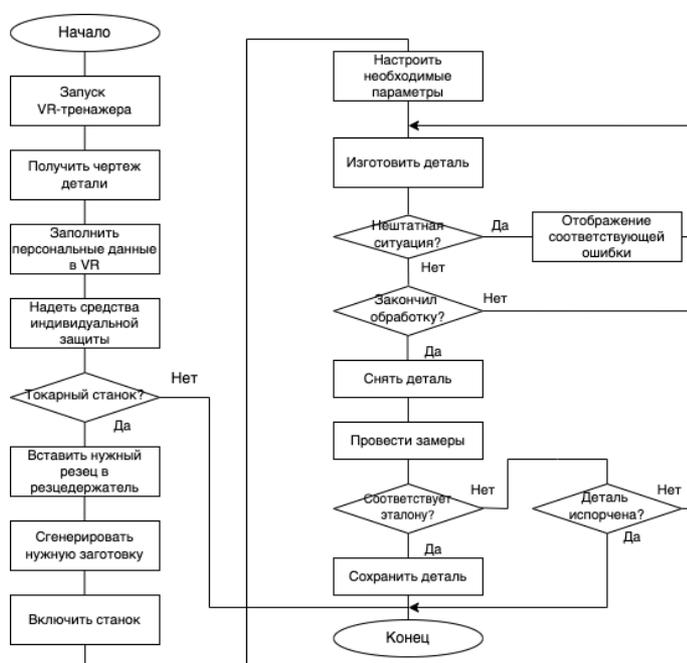


Рисунок 6. Сценарий обучения на токарном станке с использованием виртуальных тренажеров

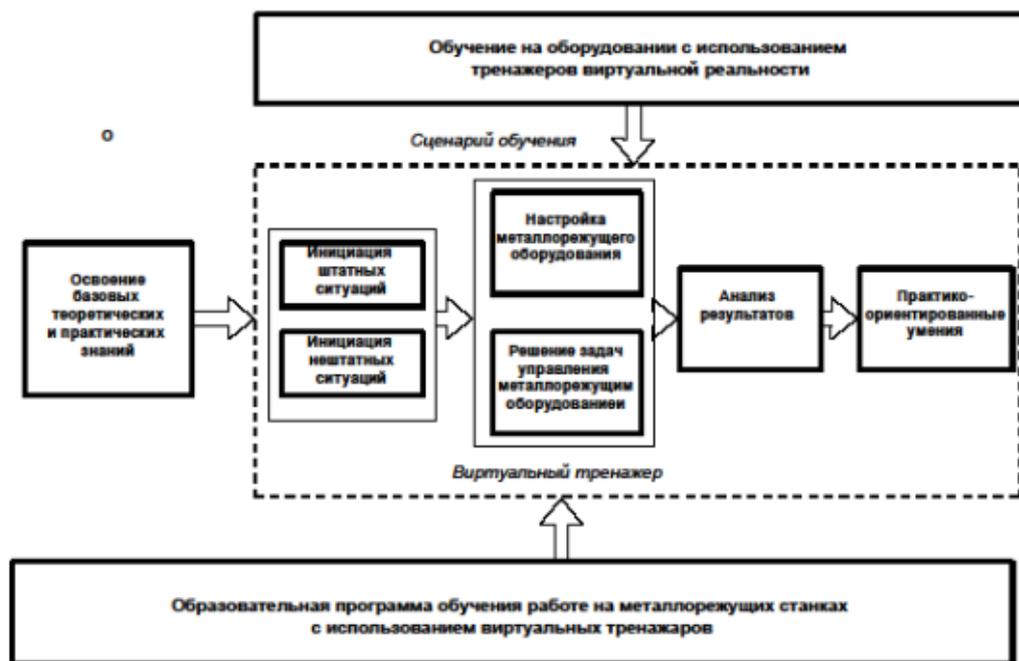


Рисунок 7. Структурная схема формирования практико-ориентированных умений работе на металлорежущих станках с использованием виртуальных тренажеров

Формирование практико-ориентированных умений управления металлорежущими станками с использованием виртуальных тренажеров осуществляется согласно схеме, представленной на рис. 7.

На основе предоставленных заказчиком чертежей металлорежущего станка осуществляется разработка 3D-модели в соответствии с реальными размерами и параметрами. Для этого проводится тщательный анализ графических изображений компонентов и деталей станка, включая их размеры, формы, материалы и технические характеристики. Определение необходимых параметров для построения 3D-модели включает учет ключевых характеристик станка, таких как размеры и формы деталей, материалы, используемые в производстве, функциональные требования и технические характеристики.

Описан метод разработки визуализации включая 3D-моделирование и анимацию. Процесс разработки выполняется в соответствии со определенными предложенными этапами. Предложен метод оптимизации проекта с программными и визуальными компонентами. Оптимизация важна для качественной и корректной работы приложения на целевом устройстве. Процесс разработки выполняется в соответствии разработанными этапами. Интеграция БД в симулятор виртуальной реальности ППП АСУП. Для взаимодействия среды разработки Unity с СУБД SQLite интегрирована библиотека с открытым исходным кодом SQLite4Unity3d.

В главе 4 представлена практическая реализация тренажера, включая описание функциональных компонентов, визуализации и оценки эффективности внедрения. Функциональные возможности тренажера позволяют провести процесс обучения и оценки по части профессиональных компетенций по работе на металлорежущих станках в соответствии с ФГОС 15.02.16 Технология машиностроения. Для работы на токарном станке необходимо задать параметры заготовки, которая будет установлена в шпиндель. Эти параметры включают длину, диаметр и глубину посадки в шпиндель. Для взаимодействия с панелью управления используется виртуальный указательный палец. Создание заготовки осуществляется путем генерации меша, который определяет позиции вершин и координаты для треугольников. Например, для создания

цилиндрической заготовки для токарного станка вершины, за исключением первой и последней, располагаются по следующей формуле:

$$x = \cos\left(\pi \times 2 \times \frac{i}{\text{resolution}}\right) \times R, \quad (15)$$

$$y = \sin\left(\pi \times 2 \times \frac{i}{\text{resolution}}\right) \times R, \quad (16)$$

где resolution – количество вершин на круг, R – радиус заготовки, i – номер вершины. Для работы на фрезерном станке пользователь должен сначала настроить заготовку и фрезу, выбирая параметры, такие как длина, ширина и высота заготовки. При этом важно учитывать оптимальные настройки для подачи, скорости и глубины резания, чтобы достичь максимальной производительности станка. Время обработки заготовки определяется формулой:

$$T = \frac{\pi \cdot D \cdot \delta \cdot L}{1000 \cdot V \cdot S}, \quad (17)$$

где V – скорость резания, S – величина подачи, D – диаметр заготовки, L – длина заготовки, δ – припуск.

Ниже приводится описание результатов эксперимента по оценке эффективности внедрения виртуального тренажера подготовки операторов металлорежущих станков: G_1, G_2, G_3 – группы обучающихся (контрольная и экспериментальные группы, соответственно), $N_1 = 7, N_2 = 7, N_3 = 7$ – количество обучающихся в каждой группе, $X_{i,j}$ – балл на демонстрационном экзамене для j -го обучающегося в i -й группе:

$$X_{i,j} \in [0,16], \quad (18)$$

$$R_{i,j} = \frac{X_{i,j}}{X_{max}} \times 100\%, \quad (19)$$

где $X_{max} = 16$ – максимальный балл на экзамене, $R_{i,j}$ – результат в процентах для j -го обучающегося в i -й группе, \bar{X}_i – средний балл для i -й группы, C_i – затраты на расходные материалы для i -й группы.

Средний балл для i -й группы вычисляется по формуле:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} X_{i,j}, \quad (20)$$

$$G_1: \bar{X}_1 = \frac{1}{7}(7 + 9 + 10 + 12 + 8 + 7 + 9) = 8.86, \quad G_2: \bar{X}_2 = \frac{1}{7}(9 + 7 + 7 + 10 + 10 + 5 + 7) = 7.86, \quad G_3: \bar{X}_3 = \frac{1}{7}(7 + 9 + 2 + 2 + 3 + 2 + 3) = 4.$$

Для перевода баллов в проценты используется следующая формула:

$$R_{i,j} = \frac{X_{i,j}}{16} \times 100\%. \quad (21)$$

Затраты и их сравнений на расходные материалы для каждой группы:

$$C_1 = 16,500 \text{ рублей для } G_1; \quad C_2 = 12,000 \text{ рублей для } G_2; \quad C_3 = 6,000 \text{ рублей для } G_3.$$

$$\Delta C_{1,2} = C_1 - C_2 = 16,500 - 12,000 = 4,500 \text{ руб.}$$

$$\Delta C_{1,3} = C_1 - C_3 = 16,500 - 6,000 = 10,500 \text{ руб.}$$

После дополнительного обучения результаты группы G_2 увеличились: $\Delta \bar{X}_2 = 10.4 - 7.86 = 2.54$ балла. В процентах: $\Delta R_2 = 65.00\% - 49.11\% = 15.89\%$.

Относительное улучшение по сравнению с первой группой: $\Delta_{rel} = 65.00\% - 55.36\% = 9.64\%$. Таким образом, подтверждено, что использование виртуального тренажера позволяет уменьшить финансовые затраты на расходные материалы, одновременно поддерживая или улучшая качество обучения. Дополнительная возможность отработки нестандартных ситуаций и безопасных для здоровья навыков является значительным преимуществом подхода.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Сформулированные задачи диссертационного исследования выполнены, поставленная цель достигнута.

1. Разработан метод автоматизированного построения виртуальных тренажеров для ППП АСУП, который основывается на работе с заказчиком на основе предоставления с производства функциональных видеороликов, а также формализацией процесса проектирования и разработки в виде структур процесса создания программных и визуальных модулей с учетом специфики разработки тренажеров под виртуальную реальность. Это позволило оперативно осуществлять мониторинг правильности выполнения операций, уменьшить ошибки разработчика, а также сократить время разработки технического описания, тем самым повысить результативность процесса проектирования и разработки виртуальных тренажеров для обучения операторов металлорежущих станков.

2. Разработана онтологическая модель для построения виртуальных тренажеров для подготовки операторов металлорежущих станков в ППП АСУП. Что позволило выявить основные понятия и отношения между понятиями в предметной области работы операторов металлорежущих станков и последующей реализацией. Это позволило повысить эффективность планирования и стандартизации для подготовки операторов металлорежущих станков в ППП АСУП.

3. Предложен метод оценки эффективности визуализации разработанного виртуального тренажера подготовки операторов токарной и фрезерной обработок ППП АСУ производствами. Метод поиска лучшей альтернативы основывается на принципе Кондорсе. Это позволило подобрать лучшую альтернативу на основе ранжирования экспертных оценок при выборе качественной визуализации тренажера виртуальной реальности для ППП АСУП.

4. Разработан и апробирован виртуальный тренажер для подсистемы подготовки операторов металлорежущих станков на примере токарной и фрезерной обработок АСУП. Это позволило повысить результативность обучения операторов на 9,64%, а также отработать сложно реализуемые нештатные ситуации.

5. Разработанные и примененные методы, структуры процесса создания программных и визуальных модулей с учетом специфики разработки тренажеров под виртуальную реальность и модели и алгоритмы позволили достичь следующих результатов: повышение эффективности разработки виртуальных тренажеров на 32% для ООО «АЙТИПРО»; уменьшение срока разработки виртуального тренажера с 4 до 2,5 месяцев для ФГБУН ГНЦ РФ «Институт медико-биологических проблем» РАН; разработка с уменьшением финансовых затрат на 23% виртуального тренажера «Сервис цифровых (VR) микропрофессиональных проб» для ООО «Атлас новых профессий».

Рекомендации и перспективы. Полученные результаты могут использоваться для эффективного проектирования и разработки виртуальных тренажеров для ППП АСУП для различных отраслей промышленности, а также при подготовке студентов колледжей по специальностям 09.02.10 Разработка компьютерных игр, дополненной и виртуальной реальности» и 09.02.07 Информационные системы и программирование.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. **Асланов, Р. Э.** Модели и методы разработки подсистемы подготовки специалистов автоматизированной системы управления производством с использованием симуляторов виртуальной реальности / Р. Э. Асланов, А. А. Большаков // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2023. – № 65. – С. 81–89. – DOI 10.36807/1998-9849-2023-65-91-81-89. – EDN EETIKD (K2).
2. **Асланов, Р. Э.** Симулятор виртуальной реальности по оказанию первой медицинской помощи для использования при обучении персонала АСУП / Р. Э. Асланов, А. А. Большаков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 2. – С. 52–65. – DOI 10.24143/2072-9502-2023-2-52-65. – EDN GGEERJ (K2).
3. **Асланов, Р. Э.** Тренажер токарной и фрезерной обработки на основе компьютерных моделей с использованием технологий виртуальной реальности / Р. Э. Асланов, А. А. Большаков // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 9. – С. 17–20. – DOI 10.25728/avtprom.2022.09.03. – EDN KPCNWM (K2).
4. **Асланов, Р. Э.** Виртуальные тренажеры в подсистеме АСУП для подготовки операторов металлорежущих станков / Р. Э. Асланов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2024. – № 3 (33) (K2).
5. **Асланов, Р. Э.** Статистический анализ результативности интерактивного обучения / Р. Э. Асланов, В. С. Осипов, Д. А. Яковлев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 6. – С. 300–303. – EDN VEKELY (K2).
6. Осипов, В. С. Тестирование VR-приложения «Виртуальный мир профессий: «Инженер-нефтяник» / В. С. Осипов, **Р. Э. Асланов** // Научно-технический вестник Поволжья. – 2024. – № 1. – С. 129–131. – EDN AUPGPQ (K2).

Публикации изданиях, индексируемых в БД Scopus

7. **Aslanov, R.** Method for constructing virtual reality simulators for turning and milling for an engineering education system for building cyber-physical systems / R. Aslanov, A. Bolshakov // Society 5.0. Cyber-Solutions for Human-Centric Technologies / Editors A. G. Kravets [et al.]. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. – P. 91–106. – (Studies in Systems, Decision and Control ; vol. 437). – DOI 10.1007/978-3-031-35875-3_8.

Монография

8. **Асланов, Р. Э.** Использование симуляторов виртуальной реальности для подготовки операторов токарной и фрезерной обработок в подсистемах подготовки персонала АСУП / Р. Э. Асланов, А. А. Большаков. – Санкт-Петербург : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 264 с. – ISBN 978-5-7422-8374-4.

Свидетельства о результатах интеллектуальной деятельности

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611048 Российская Федерация. Система интеграции интернета вещей (IoT) в пространство информационной модели (BIM) на базе технологии виртуальной реальности (VR) : № 2021667125 : заявл. 25.10.2021 : опубл. 19.01.2022 / **Асланов Р. Э.**, Дудырев Ф. Ф., Печеная А. С., Плеханов А. М., Рунасов К. А. – 1 с.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660861 Российская Федерация. Лаборатория универсальной токарной и фрезерной обработки в среде виртуальной реальности (VR) : № 2021615879 : заявл. 17.04.2021 : опубл. 02.07.2021 / **Асланов Р. Э.**, Артемьев И. А., Фролов А. А., Хаббатуллин Р. Р., Шишкин И. Н. – 1 с.

Публикации в других изданиях и конференциях

11. Концепция сервиса цифровых (VR) микро-профессиональных проб «Виртуальный мир профессий: инженер-нефтяник» / А. А. Голубничий, В. С. Осипов, Е. А. Виноградов, **Р. Э. Асланов** // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 1. – С. 132–137. – EDN VPUKFR (K2).
12. **Асланов, Р. Э.** Математические и инструментальные методы технологий Индустрии 4.0 с интеграцией с виртуальной, дополненной и смешанной реальностями / Р. Э. Асланов, А. А. Большаков, В. Н. Сеннов // Математические методы в технологиях и технике. – 2024. – № 1. – С. 109–114. – EDN KYEXDR.
13. **Асланов, Р. Э.** Построение онтологической модели в виде семантической сети подсистемы подготовки персонала АСУП / Р. Э. Асланов, А. А. Большаков // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 10. – С. 17–22. – DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_10_17. – EDN STNQRN.
14. **Асланов, Р. Э.** Разработка методов и моделей для построения подсистемы подготовки операторов токарной и фрезерной обработки АСУП на основе симуляторов виртуальной реальности / Р. Э. Асланов, А. А. Большаков // Математические методы в технологиях и технике. – 2023. – № 8. – С. 95–100. – DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_8_95. – EDN ROXOAA.
15. **Асланов, Р. Э.** Функциональное обеспечение системы виртуальной реальности обучению работе на фрезерных и токарных универсальных станках / Р. Э. Асланов // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 11. – С. 92–99. – DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_11_92. – EDN TWKNVE.
16. **Асланов, Р. Э.** Информатизация профессионального образования через внедрение модели центра иммерсивных технологий / Р. Э. Асланов, Л. А. Шунина, А. В. Гриншкун, А. А. Большаков // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. – 2023. – Т. 20, № 1. – С. 78–92. – DOI 10.22363/2312-8631-2023-20-1-78-92. – EDN CNCTDE.
17. **Асланов, Р. Э.** Применение технологии виртуальной реальности в инклюзивном образовании лиц с полным или частичным поражением нижних конечностей / Р. Э. Асланов, А. А. Большаков, А. В. Гриншкун // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Информатизация образования. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 208–223. – DOI 10.22363/2312-8631-2022-19-3-208-223. – EDN IPGVFP.
18. **Асланов, Р. Э.** Применение "Виртуальной реальности" в образовании / Р. Э. Асланов, Д. Р. Шикун, О. В. Фомина // Сб. трудов конференции: VIII ежегодной всероссийской научно-практической конференции «Цифровизация общества: состояние, проблемы, перспективы». Москва. ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова». – 2021. – С. 146–158.
19. Гайбатова, А. Р. Разработка метода синхронизация и шифрования данных / А. Р. Гайбатова, **Р. Э. Асланов**, Г. О. Крылов, В. Н. Конев // Информатизация и связь. – 2017. – № 4. – С. 77–80. – EDN ZOXAJN.
20. Chugunkov, I. V. Creation of datasets from open sources / I. V. Chugunkov, D. V. Kabak, V. N. Vyunnikov, **R. E. Aslanov** // Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018, St. Petersburg and Moscow. – St. Petersburg and Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2018. – P. 295–297. – DOI 10.1109/EIConRus.2018.8317091. – EDN YBXTUD.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.04,
созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 5 от «24» октября 2024 г.)

Тираж 100 экз. Заказ №

Формат 60×841/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Отпечатано в типографии.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной печати, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244