

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт математики физики и информационных технологий  
(наименование института полностью)

---

Кафедра «Прикладная математика и информатика»  
(наименование)

02.03.03 Математическое обеспечение и администрирование информационных систем  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

---

Технология программирования  
(направленность (профиль) / специализация)

---

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВСКАЯ РАБОТА)

на тему «Разработка AR-приложения визуального моделирования процесса сборки станка»

Студент

Д.А. Анисимов  
(И.О. Фамилия)

---

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Э.В. Егорова  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

---

Консультант

ст. преподаватель, М.В. Дайнеко

---

Тольятти 2020

## Аннотация

Название бакалаврской работы – «Разработка AR-приложения визуального моделирования процесса сборки станка».

Объектом исследования является процесс применения технологий дополненной реальности на производстве в целях технического обслуживания механизмов станков с визуализацией проводимых мероприятий.

Предметом исследований являются технические инструменты и технологии, применяемые для создания приложений дополненной реальности при использовании на производстве и визуализации процессов сборки или ремонта станков.

Целью бакалаврской работы является совершенствование технологических и экономических инструментов, применяемых в процессе ремонта или замены станков, при обучении персонала для работы с указанными механизмами, а также повышения эффективности указанных мероприятий, проводимых предприятием.

Для достижения заданных целей необходимо решить такие задачи, как:

- провести анализ практик применения технологий дополненной реальности в сфере производства продукции;
- разработать приложение дополненной реальности, применяемое для проведения работ, направленных на обслуживание механизмов станка, с визуализацией проводимых процессов.

В первой главе рассматривается технология дополненной реальности, принципы работы приложений дополненной реальности, инструменты для работы с дополненной реальностью, а также опыт использования технологий дополненной реальности в разных странах.

В второй главе было проведен выбор инструментов и технологий, построения приложений дополненной реальности, и моделирование и разработка программного решения для производств.

В третьей главе было проведено тестирование разработанного приложения для мобильных платформ и обозначены основные показатели, выделенные в процессе проведения тестирования.

Эта работа показывает, как использование технологии дополненной реальности может обеспечить достижение успеха на долгосрочный период и создать условия, возможности устойчивого развития производства посредством снижения вероятности поломки дорогого оборудования.

Данная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка использованной литературы. Основная часть работы изложена на 59 страницах, текст иллюстрирован 8 таблицами и 20 рисунками.

## **ABSTRACT**

The title of the graduation work is Development of AR-application for visual modeling of the industrial machines assembly process.

The aim of the research is to give some information about the technological and economic tools used for repairing or replacing industrial machines.

The object of the research is the process of applying augmented reality technologies when maintaining the machine mechanisms.

The subject of the research is the tools and technologies used to create augmented reality applications.

The graduation work touches upon the following issues: analysis of practices of applying augmented reality technologies in the areas of product manufacturing; development of augmented reality application used for operations aimed at servicing machine mechanisms.

The first chapter dwells on the principles of augmented reality technology applications and the tools that can be used to create software. This chapter focuses on the experience of using the augmented reality technologies in different countries.

Next, we model and develop software solution to be used in the production processes.

Finally, we test the application designed for mobile platforms. We also report the result of the conducted experiments that look toward studying the performance indicators.

In conclusion, we concentrate on how the use of augmented reality technology can ensure long-term success and create conditions and opportunities for sustainable production development.

## Оглавление

Введение.....	7
Глава 1 Дополненная реальность, её особенности и свойства .....	10
1.1 Технология дополненной реальности: сущность, средства и методы реализации .....	10
1.2 Принципы работы приложений дополненной реальности.....	13
1.3 Классификация и сравнение наборов средств разработки приложений дополненной реальности .....	17
1.4 Обзор инструментов для работы с дополненной реальностью.....	20
1.4.1 Обзор набора средств разработки EasyAR Sense .....	20
1.4.2 Обзор набора средств разработки ARCore.....	21
1.4.3 Обзор набора средств разработки ARKit .....	23
1.5 Внедрение интерактивных технологий в решении вопроса оптимизации производственных процессов.....	24
1.6 Анализ зарубежного и российского опыта использования технологий дополненной реальности в производственных процессах .....	27
Глава 2 Выбор инструментов и технологий для построения приложения дополненной реальности .....	32
2.1 Выбор целевого устройства и операционной системы для разработки приложения дополненной реальности .....	32
2.2 Выбор языка программирования для разработки приложения дополненной реальности .....	33
2.3 Выбор набора средств для разработки приложения дополненной реальности.....	34
2.4 Моделирование и реализация приложения дополненной реальности для визуального моделирования процесса сборки станка.....	35
2.4.1 Выбор архитектурного решения, используемого в процессе разработки приложения дополненной реальности.....	37
2.4.2 Диаграмма классов анализа реализуемого приложения дополненной реальности.....	38

2.4.3	Диаграмма классов приложения дополненной реальности ....	39
2.4.4	Создание трехмерных объектов для использования в приложении дополненной реальности на мобильных устройствах	41
2.4.5	Разработка приложения дополненной реальности в Unity .....	43
Глава 3	Тестирование работы приложения дополненной реальности на мобильной платформе .....	51
3.1	Подготовка проекта модульных тестов MSTest для разработанного приложения дополненной реальности .....	51
3.2	Тестирование производительности разработанного приложения дополненной реальности на мобильном устройстве .....	53
	Заключение .....	55
	Список используемой литературы .....	57

## Введение

Актуальность исследуемой темы обуславливается тем, что приложение дополненной реальности, используемое для моделирования процесса сбора станка и его механизмов, внедряется в производственные процессы с целью повышения эффективности проводимых ремонтных работ и адаптации персонала к новому оборудованию, а также снижения затрачиваемых денежных средств при проведении указанных деятельностей. Кроме того, приложение дополненной реальности дает предприятию, использующего его, немало преимуществ: снижение влияния человеческого фактора, то есть вероятность ошибки, при проведении работ направленных на замену или ремонт станков, что соответствует ГОСТ 15.601-98, который устанавливает требования к техническому обслуживанию и ремонту техники. Соответствие межгосударственным стандартам позволяет не только пройти сертификацию, но и дает возможность расширить позиции предприятия на товарных рынках, а также привлечь дополнительных инвесторов. Помимо прочего наличие, ранее указанного, сертификата дает возможность предприятию выпускать «белую», то есть лицензированную, продукцию.

Использование технологии дополненной реальности может обеспечить достижение успеха на долгосрочный период и создать условия, возможности устойчивого развития посредством: снижения вероятности поломки дорогого оборудования; улучшения условий работы технического персонала за счет частичной автоматизации их деятельности; помощи предприятию при выполнении обязательств; увеличения контроля за процессами происходящими при техническом обслуживании оборудования.

Целью выпускной квалификационной работы является совершенствование технологических и экономических инструментов, применяемых в процессе ремонта или замены станков, при обучении персонала для работы с указанными механизмами, а также повышения эффективности указанных мероприятий, проводимых предприятием.

Для достижения заданных целей необходимо решить такие задачи, как:

- провести анализ практик применения технологий дополненной реальности в сфере производства продукции;
- разработать приложение дополненной реальности, применяемое для проведения работ, направленных на обслуживание механизмов станка, с визуализацией проводимых процессов.

Для повышения мотивации использования подобных решений на предприятии в мировой практике принято рассматривать следующие преимущества:

- снижаются эксплуатационные расходы;
- повышается конкурентоспособность предприятия;
- создается более благоприятное мнение о предприятии среди населения, что распространяется и на продукцию;
- уменьшаются издержки, связанные с вероятностью человеческой ошибки при техническом обслуживании оборудования;
- предприятию становится легче выполнять предписания требований, устанавливаемых в межгосударственных стандартах.

Таким образом, применение приложений с использованием технологии дополненной реальности, может сыграть исключительную роль при становлении предприятий в условиях ограниченности финансовых ресурсов.

Объектом исследования является процесс применения технологий дополненной реальности на производстве в целях технического обслуживания механизмов станков с визуализацией проводимых мероприятий. Предметом исследований являются технические инструменты и технологии, применяемые для создания приложений дополненной реальности при использовании на производстве и визуализации процессов сборки или ремонта станков.

Научная новизна исследования заключается во внедрении в производственные процессы технологии дополненной реальности,



позволяющей повысить эффективность выполняемых задач обслуживания оборудования путём визуализации проводимых процессов.

Теоретическая и практическая значимость заключается в том, что полученные выводы и результаты развивают и дополняют методы, применяемые на производстве при выполнении работ, направленных на техническое обслуживание оборудования и повышения эффективности. Основные выводы и рекомендации могут быть использованы при разработке собственных приложений дополненной реальности на промышленных предприятиях, реализация которых позволит повысить эффективность и сократить расходы, затрачиваемые на переобучение сотрудников.

Данная работа состоит из введения, 3 глав, заключения и списка использованной литературы. В первой главе проводится анализ технологии дополненной реальности, обзор инструментов для работы с ней, а также рассматривается опыт использования дополненной реальности на производствах разных стран. Во второй главе происходит выбор средств и технологий разработки, моделирование и создание приложения дополненной реальности для мобильной платформы. В третьей главе подготавливается проект модульных тестов и тестируется производительность разработанного приложения. Основная часть работы изложена на 54 страницах, текст иллюстрирован 8 таблицами и 20 рисунками.

## Глава 1 Дополненная реальность, её особенности и свойства

### 1.1 Технология дополненной реальности: сущность, средства и методы реализации

Сущность работы алгоритмов дополненной реальности заключается в создании виртуальных объектов и объединение их с элементами реального мира, путем добавления к ним цифровой информации, через устройства, используемые пользователем. Исследования, приводящиеся в данной области, имеют такое название, как - Augment Reality (дополненная реальность), что сокращённо будет – AR [16].

При этом обработка цифровых изображений, поступающих с камеры устройства, должна осуществляться в режиме реального времени. Это значит, что время, затрачиваемое на работу алгоритма для одного кадра, рассчитанное по формуле (1), должно быть не более 41 мс для обеспечения обработки 24 кадров за одну секунду. Для обозначения скорости смены кадров за одну секунду используется такое понятие, как кадровая частота (англ. Frames per Second (FPS)).

$$FPS = \frac{1000}{t} \quad (1)$$

где FPS – количество кадров в секунду;

1000 – константа, количество миллисекунд в одной секунде;

t – время, затрачиваемое алгоритмом для обработки одного кадра.

Основными видами виртуальных объектов являются текстовая, числовая, графическая, звуковая, видеоинформация и другие, которые возможно ввести в поле восприятия сенсорных чувств человека. Подобные объекты чаще всего используются для представления добавочной информации к физическим сущностям, находящимся в угловом поле объектива камеры [5].

Для более подробного описания и лучшего понимания технологии, рассмотрим историю появления термина «дополненная реальность».

Первое изобретение, которое использовало технологию дополненной реальности, является Sensorama, внешний вид которой приведен на Рисунок 1, появившееся в 1962 году усилиями кинематографиста Мортон Хейлига. «Театр погружения», так называл своё устройство создатель, представлял собой кабинку, при входе в которую, человек мог ощутить себя водителем мотоцикла, мчащегося по дороге. Для погружения пользователя в целевую атмосферу использовались: стереопроектор, для воспроизведения окружающего пейзажа, сервомоторы, которые имитировали углы поворота виртуального мотоцикла, а также вентиляторы, использовавшиеся для создания ощущения потока встречного ветра. Благодаря данному аппарату физический мир частично объединялся с виртуальным [16].



Рисунок 1 – Устройство Sensorama

Однако, термин «дополненная реальность» впервые был введен инженерами корпорации Boeing Томом Коделом и Дэвидом Майзеллом в 1990 году. Сотрудникам было поручено усовершенствовать процесс наладки электромонтажных схем, при сборке самолета. Основная проблема заключалась в бумажных носителях, содержащих чертежи, и в фанерных

метках, на которых наносились номера узлов. Изменения, проводимые в чертежах, часто со сменой расположения и номеров меток, приводили к путанице, трате лишнего времени и денег на адаптацию к новой схеме. Инженерами было предложено решение – шлем со встроенным экраном, который выводил всю необходимую информацию поверх меток на фанерных табличках. Благодаря чему необходимость в постоянной замене неверных данных пропала и все изменения отображались с минимальной задержкой. В результате безопасность и надежность судна возрастает, из-за понижения вероятности человеческой ошибки, а процесс сборки ускоряется.

Рассмотрев, приведенные ранее, изобретения можно выделить основные определения для дополненной реальности:

- работа в режиме реального времени;
- смешение виртуальных объектов и реального мира;
- представление мнимых объектов в виде вспомогательной информации.

Также, из рассмотренных ранее изобретений можно выделить две сферы деятельности человека, в которых чаще всего применяется технология смешанной реальности. А именно, сфера развлечений и промышленное производство.

Развитие компьютерных технологий влияет на промышленное производство в большей степени чем на рекламный бизнес. Использование технологий AR там, где они изначально отсутствовали, может привести к оптимизации и улучшению уже существующих рабочих процессов и повышению эффективности по сравнению с применением стандартных практик.

Однако дополненная реальность в настоящее время имеет ограничения в использовании в производственных процессах, так как является относительно молодой технологией, что ставит под вопрос её эффективность. Во многом на решение об применении AR влияет готовность бизнеса к

изменению и сопутствующим затратам, возникающих в процессе закупки нового оборудования и разработке программного обеспечения.

Популяризация технологий дополненной реальности зависит в основном от общего уровня компьютерной грамотности, распространения и внедрения технологий на все уровни жизни человека, а также скорости развития игровой индустрии. Примером может служить прорыв в сфере AR, произошедший после выпуска всемирно известной игры «Pokemon Go». Её выпуск стал новым толчком, стимулирующим разработчиков на создание собственных приложений с применением технологии дополненной реальности [17].

Рассмотрим более подробно основные механизмы работы приложений, использующих дополненную реальность, а также инструменты разработки и опыт использования в разных странах.

## **1.2 Принципы работы приложений дополненной реальности**

Главная особенность, которая определяет работу дополненной реальности, является то, что алгоритмы объединяют два, изначально не связанных, пространства, а именно: реальный, физический мир и виртуальный, созданный с помощью компьютерных технологий.

В результате объединения, получается новая гибридная среда, которая образуется путем наложения виртуальных объектов (представляющих собой любой вид информации, который можно ввести в поле восприятия сенсорных чувств человека) поверх изображения, поступающего с камеры устройства. Особенностью является то, что с объектами можно взаимодействовать, то есть гибридная среда является интерактивной.

Рассмотрим подробнее механизмы, используемые AR.

Оптический трекинг является основой технологии дополненной реальности. Если привести упрощение, то можно принять, что в качестве «рук» используются маркеры, а в качестве «глаз» - камера устройства. 3D

объекты и/или определенные действия программируются на каждый маркер. Алгоритмы обрабатывают изображение, полученное с камеры, на котором могут быть отображены маркеры. На успешность распознавания влияет качество маркеров, которые можно классифицировать как «хорошие», если имеется большое количество уникальных точек и «плохие» при обратном условии. Данный показатель служит не только для классификации маркеров, но и для исключения путаницы при идентификации [23].

На последнем этапе гибридная среда объединяет слой виртуальной реальности и слой изображения реального мира.

Дополненная реальность подразделяется на три основных технологии работы:

Технология распознавания маркеров/меток. Базовое понятие, использующееся чаще всего, так как привязка виртуальных объектов к реальному миру является более жесткой. Маркеры, задающиеся при создании приложения, напоминают по своему внешнему виду QR коды, но могут иметь более сложную структуру, пример приведен на Рисунок 2.



Рисунок 2 – Примеры маркеров дополненной реальности при использовании маркерной технологии

Данный вид технологии является самым популярным из-за своей относительной простоты, работа алгоритма может быть описана следующим образом: камера устройства производит захват объектов физического мира и создает событие видеопотока, о чем оповещает слушателей, созданных внутри программы; проводится анализ входящего видеопотока, посредством разбиения на цифровые изображения, покадрово; производится поиск, определенных заранее, меток; рассчитывается положение камеры устройства

относительно вычисленных меток; накладываются виртуальные объекты поверх изображения реального мира, с учетом глубины и поворота меток; гибридное изображение выводится на экран устройства [4].

Ещё одним видом работы дополненной реальности принято считать безмаркерную технологию. Особенность заключается в том, что какого-либо определенного заранее идентификатора, наподобие маркера, не существует и алгоритм, определяемый вне границ действия механизмов дополненной реальности, самостоятельно обнаруживает объекты, примеры которых приведены на Рисунок 3, поверх которых требуется произвести наложение. В качестве примера можно привести нейросеть, которая способна распознать объект по фотографии. После обнаружения объекта сторонним алгоритмом в механизмы AR передается фрагмент цифровой иллюстрации, к которому необходимо привязать виртуальный объект. Далее на изображении производится поиск уникальных точек, к которым привязываются 3D объекты, после чего полученная гибридная среда выводится на экран устройства.



Рисунок 3 – Примеры обнаруживаемых объектов при использовании безмаркерной технологии

Последней из технологий, применяемых в механизмах работы дополненной реальности, является – GPS метки. Особенность работы заключается в отслеживании местоположения устройства (смартфона) и определения угла поворота относительно земли [31]. Активация алгоритмов

дополненной реальности происходит при совпадении координат GPS с координатами виртуального объекта, заданного на этапе разработки. Местоположение физического объекта совпадает с координатами виртуального.

В итоге имеется 3 механизма доступных при разработке приложений дополненной реальности, каждый из которых применяется исключительно для своих задач [11]. То есть для правильного выбора сначала необходимо определить цель, которая будет решаться будущим решением.

Так как цель данной работы была определена ранее, остается провести анализ, описанных ранее, механик и сделать выбор наиболее подходящего решения задачи.

Для лучшей наглядности и удобства сравнения методов работы AR была составлена Таблица 1, в которой приведены основные преимущества и недостатки.

Таблица 1 – Сравнение технологий работы дополненной реальности

Технология работы	Преимущества	Недостатки
Маркерная	Жесткая привязка виртуальных объектов к маркеру, высокая точность распознавания	Необходимость в маркерах
Безмаркерная	Возможность распознавать части одного сложного объекта, отсутствует привязка к явным идентификаторам	Наложение объектов может быть слабым; имеется зависимость от освещения
GPS-метки	Отсутствует привязка к каким-либо маркерам и объектам	Погрешность GPS координат составляет 50-100 метров

Использование безмаркерной технологии является более приоритетной для решения задачи моделирования процесса сборки станка, проводимой в рамках данной работы. Так как присутствует необходимость в распознавании небольших деталей механизмов, зачастую находящихся на расстоянии 1 – 2



сантиметров, что исключает возможность использования GPS-меток, по причине неподходящей погрешности, и обычных меток, так как их использование не целесообразно.

### **1.3 Классификация и сравнение наборов средств разработки приложений дополненной реальности**

Программных платформ, предоставляющих возможность создания приложений дополненной реальности, существует достаточно много. И используемые технологии, находящиеся в основе каждой из платформ, имеют сильные различия, как правило заключающихся в таких показателях как целевая операционная система и алгоритмы трекинга изображений [25].

При разработке приложений с использованием дополненной реальности существует несколько подходов. Рассмотрим их:

- использовать наборы средств разработки (software development kit), которые уже включают в себя такие технологии как, трекинг объектов, отслеживание поверхности, захват и распознавание цифровых изображений, а также имеют поддержку нескольких операционных систем и инструментов разработки;

- использовать готовые, платные программные продукты, позволяющие без особых усилий и знаний в сфере компьютерного зрения реализовать свое решение со сканированием пространства и возможностью оптического распознавания объектов, а также с отслеживанием уникальных точек поверхности.

Большинство SDK в сфере дополненной реальности предназначены для использования на платформах Android и iOS, и, в меньшей степени, Windows. К тому же современные смартфоны имеют все необходимые аппаратные возможности, необходимые для реализации механизмов AR, к примеру модуль GPS или камера, имеющая высокую разрешающую способность [22].

Поэтому разрабатывать приложения дополненной реальность будет проще для смартфона.

Также необходимо сделать выбор среди инструментов разработки, которые будут использоваться для создания виртуальных объектов или каких-либо эффектов, например Unity или Unreal Engine. Ограничений на выбор нет, однако выбор следует делать исходя из сложности создаваемых объектов и контента [6].

В Таблица 2 приведены функциональные возможности, поддерживаемые платформы и типы лицензий наиболее популярных фреймворков, которые можно использовать при разработке приложений дополненной реальности для мобильных платформ.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики фреймворков AR

<b>SDK</b>	<b>Поддерживаемые платформы</b>	<b>Функциональные возможности</b>	<b>Тип лицензии</b>
Vuforia	iOS, UWP, Unity, Android	image targets - распознавание маркеров, simple 3D targets – распознавание примитивных 3D объектов, word targets – распознавание текста	бесплатная, ограниченная; платная, полная.
EasyAR Sense	Android, iOS, OS X, Unity, Windows, UWP	motion targets – отслеживание движений, areal learning – изучение окружающей области, depth perception – восприятие глубины	бесплатно
ARCore	Android, iOS, компьютерные очки дополненной реальности	light estimation – распознавание освещения окружающей среды, image targets - распознавание маркеров, environmental understanding – определение границ плоскости	бесплатная, ограниченная; платная, полная.
ARToolKit	Android, iOS, Linux, Windows, OS X	motion targets – отслеживание движений, image targets -	бесплатная, ограниченная;

<b>SDK</b>	<b>Поддерживаемые платформы</b>	<b>Функциональные возможности</b>	<b>Тип лицензии</b>
		распознавание маркеров	платная, полная.
ARKit	iOS	распознавание 3D-объектов, восприятие окружающей среды, облачное распознавание, работа на смарт-очках, облачное развёртывание приложений	бесплатная, ограниченная; платная, полная.

В таблице 3 приведены характеристики наиболее популярных программных продуктов, разработанных компаниями и являющихся платными.

Таблица 3 - Сравнительные характеристики программных инструментов AR

<b>Программный продукт</b>	<b>Поддерживаемые платформы</b>	<b>Функциональные возможности</b>	<b>Тип лицензии</b>
Aurasma	Android, iOS	Создание приложений дополненной реальности, ориентированных на использование в печатных изданиях и рекламных компаниях.	платная
BlippAR	Android, iOS	Создание приложений с помощью технологии blueprints, что подразумевает использование графического интерфейса, без знания языков программирования.	платная
Layar	Android, iOS	Создание приложений дополненной реальности на основе маркерной технологии для использования в печатных изданиях.	платная
Metaverse	Android, iOS	Представляет возможность создать виртуальное пространство использующих приложение.	платная
Augment	Android, iOS	Позволяет размещать продукты компании в пространстве реального	платная

Программный продукт	Поддерживаемые платформы	Функциональные возможности	Тип лицензии
		мира.	
Daqri Studio	Android, iOS	Возможность создания приложений дополненной реальности для smart-очков, выпускающихся компанией DAQRI.	платная

Для создания собственного приложения дополненной реальности лучше всего воспользоваться готовыми пакетами разработки, представленными ранее в Таблица 2, так как имеют большие возможности кастомизации и использования по сравнению с платным программным инструментарием, приведенным в Таблица 3.

#### 1.4 Обзор инструментов для работы с дополненной реальностью

Для создания эффективного решения, которое будет использоваться для оптимизации производственных процессов, недостаточно иметь хорошее аппаратное решение, что также не мало важно, но и алгоритмы, позволяющие обрабатывать поступающую информацию и показать качественный результат [27]. Для ускорения разработки можно использовать уже готовые наборы средств разработки (SDK), которые значительно сэкономят время создания итогового продукта [18].

Рассмотрим наиболее популярные инструменты для работы с дополненной реальностью.

##### 1.4.1 Обзор набора средств разработки EasyAR Sense

EasyAR Sense - набор средств разработки, который позволяет создавать приложения дополненной реальности. Разработан в компании VisionStar Information Technology [30].

Поддерживаемые платформы для запуска: Windows, iOS, macOS, Android с API 28 и выше.

Ключевые особенности, которые предоставляет EasyAR Sense при разработке:

*Sparse spatial map* – технология построения множества точек, описывающих поверхности реального мира. На вход алгоритма поступает изображение с камеры, проводится анализ и в качестве результата получается массив точек, описывающих физические объекты в трёхмерной системе координат виртуального пространства, где за условный центр принимается камера устройства.

*Dense spatial map* – технология схожа со *sparse spatial map*, описанной ранее, однако в качестве результата получается полигональная сетка (англ. *3D mesh*), описывающая пространство физического мира в виртуальном.

*Motion tracking* – технология отслеживания положения камеры устройства в пространстве реального мира и сопоставления её состояния с виртуальной средой [25].

EasyAR Sense поддерживает все устройства iPhone или iPad, большое количество Android смартфонов, с версией системы не ниже 4.4.

Также, данный набор поддерживает различные средства разработки, такие как Unity, Unreal Engine и Android Studio. Большое количество функций предоставляется по бесплатной лицензии, остальные, например облачное распознавание образов, доступны по ежегодной или ежемесячной подписке.

#### 1.4.2 Обзор набора средств разработки ARCore

ARCore - это набор для разработки программного обеспечения с применением технологии дополненной реальности и нацеленного на использование в мобильных устройствах. Разработан в компании Google.

Целевой поддерживаемой платформой является Android. Однако имеется ряд ограничений, которые не позволяют использовать данное решение на всех устройствах под управлением данной операционной

системы. Весь список доступных, прошедших сертификацию, устройств находится на официальном сайте в разделе документации [20].

Основные технологии данной библиотеки доступные при разработке, предоставляют следующие возможности.

Surface tracking – технология реализующая отслеживание положения устройства относительно поверхности окружающей среды. С помощью этого можно отслеживать перемещение физических объектов и изменять положение виртуальных относительно рассчитанного смещения [7].

Planar image tracking - технология предназначена для распознавания и отслеживания плоских изображений и наложения поверх них заданных виртуальных сцен, чаще всего применяется совместно с маркерами.

3D object tracking – технология распознавания схожа с planar image tracking, только вместо изображений распознаются сложные распознаются сложные 3D объекты, созданные в программах визуализации [3].

ARCore поддерживает наиболее популярные средства разработки как Unity, Android Studio и Unreal Engine. Благодаря своей гибкости библиотеку можно использовать не только при разработке мобильных решений, но и при создании настольных и даже web приложений, запускаемых в браузере на поддерживаемых устройствах.

### 1.4.3 Обзор набора средств разработки ARKit

ARKit – набор средств разработки приложений дополненной реальности для устройств под управлением операционной системы iOS и разработанной компанией Apple.

ARKit сочетает в себе систему отслеживания движения устройства, захват сцены камеры, расширенную обработку сцены и отображения объектов, чтобы упростить задачу создания приложений с дополненной реальностью.

Данный инструмент работает исключительно на устройствах iPad и iPhone с процессором A9 и более новыми. Запуск под операционной системой Android невозможен [27].

ARKit SDK – имеет низкий порог вхождения, что делает эту технологию более привлекательной для новичков.

Одним из немногих, но значимых недостатков является поддержка очень ограниченного круга устройств.

Рассмотрев наиболее популярные средства разработки AR приложений, можно выделить следующие критерии, влияющие на выбор SDK: целевая операционная система, поддерживаемые средства разработки, реализованные технологии дополненной реальности, поддерживаемые устройства.

Так как целью данной выпускной квалификационной работы является создание мобильного приложения, которое должно поддерживаться наибольшим количеством моделей смартфонов - для минимизации денежных затрат предприятия на приобретение дополнительного оборудования, то более целесообразным будет использовать EasyAR Sense. Выбор обусловлен тем, что данный инструмент разработки поддерживает платформы Android, iOS, Windows и macOS, чем не обладают ARCore и ARKit, которые поддерживают лишь одну платформу, Android и iOS соответственно. Помимо прочего EasyAR Sense имеет возможность сборки под Android с API 28 и

выше, что позволяет использовать более 98% всех устройств, на данной операционной системе.

Также SDK EasyAR поддерживает такие средства разработки как Unity, Visual Studio и Unreal Engine, из-за чего процесс разработки упрощается, а соответственно происходит экономия времени.

### **1.5 Внедрение интерактивных технологий в решении вопроса оптимизации производственных процессов**

Обычно оптимизация производственных процессов ставит перед собой две цели: повышение эффективности производства в целом и сокращение затрат. Как правило, конечная цель достигается за счет внедрения более современных технологий и улучшения организации труда. Промышленность является двигателем технологического процесса и AR технологии не являются исключением [3].

Крупные компании, такие как Boeing, GE Oil & Gas, Lockheed Martin, Leybold, AGCO, используют дополненную реальность уже не один год. Решения эксплуатируемые каждым из приведенных производителей отличаются друг от друга. Например Boeing, как уже известно, использует шлем с полупрозрачным экраном, на котором высвечивается вспомогательная информация об объектах, находящихся в фокусе камеры. Сотрудники же Lockheed Martin при сборке и ремонте боевых истребителей F-35 получают пошаговые инструкции, с помощью очков, подобно Google Glass [21].

Цель дополненной реальности на производстве, заключается в повышении эффективности проводимых операций, путем сокращения времени простоя, более быстрой скорости выявления проблем и поддержкой работающих служб и процессов. Рассмотрим с помощью каких способов AR достигает положительных результатов в задаче оптимизации производственных процессов.



Повышение скорости работы. Инженеры, занимающиеся сборкой, могут видеть визуализацию объектов, накладываемую поверх изображения реального мира. Положение болтов, кабелей и нумерация деталей все это доступно к просмотру через дисплей, соответственно нет необходимости каждый раз искать, разворачивать и анализировать бумажный носитель, что существенно повышает скорость работы. При использовании этого метода точность инженеров может возрасти до 96%, и они могут работать на 30% быстрее.

Легкий доступ к данным. Сервисные инженеры, имеющие доступ, могут просмотреть любую информацию об интересующем их объекте, будь то местоположение, инвентарь, спецификации и другое. Все эти данные поставляются из внутренней системы планирования корпоративных ресурсов компании и устройств с поддержкой технологии IoT. Также приложения, имеющие возможность анализа QR-кодов, могут отображать графики, изображения и видеоролики около интересующего оборудования [21].

Сокращение времени обслуживания. Дополненная реальность с легкостью может визуально показать процесс ремонта, какого-либо оборудования без привлечения специалиста по ремонту. Тем самым нет необходимости каждый раз вызывать мастера на отдаленный участок, соответственно возрастает скорость ремонта и уменьшаются затраты при простое оборудования. Примером может служить компания Bosch, которая с 2013 года сотрудничает со стартап-компанией AR Reflekt, в результате сотрудничества была создана платформа Common Augmented Reality Platform (CAR), включающая в себя приложение для технического обслуживания.

Сокращение времени простоя. Периодически производство может нести убытки в размере сотен тысяч долларов, возникающих в результате простоя из-за поломки оборудования и времени, затрачиваемого мастером на поиск проблемы. Но использование приложений дополненной реальности может помочь мастеру диагностировать проблему и устранить её в более короткие сроки, по сравнению с обычным визуальным осмотром.

Предотвращение ошибок. В качестве примера, можно привести компанию Airbus, которая начиная с 2011 года использует инструмент Smart Augmented Reality Tool (SART), с помощью которого сотрудник на участке сборки фюзеляжа проверяет установку кронштейнов. Камера планшета накладывает виртуальное изображение сборки на реальный продукт, находящийся в процессе комплектации. Эта технология позволяет инженеру быстро обнаруживать любые недостатки [5].

Из рассмотренных ранее способов оптимизации производственных процессов можно выделить основные затраты, возникающие при отсутствии оптимизации:

- перепроизводство,
- задержки, простой,
- лишние погрузки (разгрузки), перевалочные операции,
- переизбыток запасов,
- лишние перемещения людей, продуктов,
- ненужные операции, производственные приемы,
- бракованные изделия.

Существует множество способов нивелирования данных затрат, которые решают одну или несколько проблем. Однако дополненная реальность может решить частично или полностью каждый пункт из списка расходов, приведенных ранее. Исходя из данных, опубликовываемых на сайтах компаний производителей, использующих AR в своих производственных процессах, следует, что эффективность производства изменилась после применения технологий смешанной реальности. Рассмотрим направления, по которым наблюдались изменения:

- увеличение производительности труда;
- сокращение технологических потерь на производстве;
- уменьшение норм расхода вспомогательных материалов;
- снижение непроизводственных простоев оборудования;
- исключение выпуска некачественной продукции;

- повышение квалификации персонала.

Из рассмотренных изменений можно отметить исключительно положительный эффект, оказываемый на производственный процесс. Поэтому инвестиции в сферу AR технологий являются оправданными и возвращаются в течении одного, максимум двух лет [1].

Рассмотрим более подробно применение технологий смешанной реальности в разных странах.

### **1.6 Анализ зарубежного и российского опыта использования технологий дополненной реальности в производственных процессах**

Применение технологии дополненной реальности в России не так сильно распространено по сравнению с зарубежными странами, однако можно насчитать более десятка программных и аппаратных решений, созданных на территории России. Рассмотрим наиболее популярные из них.

«Виртуальный инженер» от компании VR Corp. Программный продукт позволяет получить доступ к технической документации, связаться с мастером по голосовой связи или электронной почте. Также имеется возможность воспроизведения 3D анимации, использующихся в качестве интерактивной справки [18].

Данное решение можно использовать для оптимизации собственных производственных процессов или создать продукцию для потребителя с уникальной интерактивной справкой и улучшенной поддержкой.

Реализованный функционал:

- визуализация технических схем;
- доступ ко всей информации в режиме реального времени;
- интерактивная анимационная подсказка;
- возможность удалённой технической поддержки.

По оценке компании VR Corp стоимость разработки для небольшого производственного процесса может стоить в районе 50 – 100 тысяч рублей,

что делает эту разработку доступной не только крупным предприятиям, но и малому и среднему бизнесу [4].

Смешанная реальность имеет большее развитие и распространение за рубежом. Использование дополненной реальности давно практикуется за рубежом. На данный момент европейские компании используют совершенно иные продукты с использованием более изученной и модифицированной технологией AR.

Daqri – американская компания, занимающаяся созданием программного обеспечения и оборудования, с использованием дополненной реальности, для производственных задач [26].

Самый известный продукт компании – DAQRI Smart Glasses, модульные очки со встроенным мобильным процессором. Имеют низкую задержку при рендеринге рабочих нагрузок, защищены от воздействия внешних факторов, что даёт возможность использования вне помещений.

Ещё одним продуктом компании является DAQRI WorkSense, программная платформа. Используется для связи между сотрудниками, доступа к удаленным данным, просмотра рабочих инструкций в виде изображений, графиков, видео инструкций и интерактивных элементов.

Приведенные продукты компании являются независимыми и по желанию потенциального заказчика, могут быть объединены либо между собой, либо с существующими внутри организации сервисами.

В качестве партнеров фигурируют такие компании, как Amazon, IBM, Oracle и Autodesk [18].

В качестве преимуществ, которые предоставляют решения компании DAQRI, можно выделить:

- эргономичность устройств;
- высокая интегрированность;
- достаточная производительность;
- защита от внешних факторов;
- портативность.

К недостаткам относятся следующие показатели:

- высокая цена. 4995 долларов за одно устройство;
- недостаточное поле зрения (англ. FOV). Угол обзора 44 градуса;
- низкое разрешение дисплея на один глаз, составляет 1360 на 768 пикселей.

Другим решением в сфере дополненной реальности можно считать смарт-очки Meta 2, разработанные стартап-компанией Meta. Использование данных очков не ограничено производственными задачами [1].

Продукт представляет из себя устройство в виде очков и программного набора средств разработки, с помощью которого можно реализовать собственное решение. Также имеется поддержка интеграции с операционной системой Windows, на которой можно запускать привычные пользователю приложения, например Microsoft Excel.

Взаимодействие с программным обеспечением реализовано через распознавание жестов рук.

Рассмотрим преимущества использования смарт-очков Meta 2:

- поле обзора 90 градусов;
- стоимость 949 долларов за одно устройство;
- разрешение дисплея на один глаз 2560 на 1440;
- возможность работать с корректирующими линзами и очками;
- дизайн, разработанный для многочасового ношения;
- фронтальная камера с разрешением 720p;
- массив сенсоров для трекинга рук и отслеживания положения в пространстве, включая шести-осевой IMU.

Одним из основных недостатков данной платформы является обязательное подключение к персональному компьютеру с помощью проводной системы, что не позволяет использовать это решение вне производственных помещений.

Для сравнения продуктов, используемых в производственных процессах, была составлена таблица 4.

Таблица 4 – Сравнение зарубежных и российских продуктов AR для производств

	Виртуальный инженер	Daqri Smart Glasses	Meta 2
Цена за одно устройство	50.000-100.000 руб.	От 4995 долларов	от 949 долларов
Поддержка голосовой связи	Не имеется	Имеется	Имеется
Доступ к файловому хранилищу организации	Имеется	Имеется	Имеется
Возможность работы вне помещения	Имеется	Имеется	Не имеется
Возможность интеграции с существующими системами производства	Не имеется	Имеется	Имеется
Наличие документации и технической поддержки	Имеется	Имеется	Имеется

Рассмотрев 3 продукта дополненной реальности от компаний российских разработчиков и зарубежных, можно выделить следующие аспекты: Российская разработка обладает наименьшим функционалом, однако имеет наименьшую цену, запрашиваемую за одно устройство, что позволяет использовать её предприятиям малого и среднего бизнеса; Daqri Smart Glasses имеет наибольший функционал и соответствующую цену, качественный продукт, который может позволить себе крупное предприятие; Meta 2 имеет характеристики подходящие для использования на предприятиях малого, среднего и крупного бизнеса, однако имеет важный недостаток, а именно невозможность работы вне помещений, что делает эту разработку крайне ограниченной в использовании [7].

Подводя итоги, можно сказать, что Российские разработки имеют большой потенциал развития в своей стране, однако им будет сложно конкурировать с представителями за рубежом, так как у них имеются более продвинутые технологии в сфере дополненной реальности и имеется

большой опыт, потому что технологии дополненной реальности относительно недавно получили развитие в нашей стране.

Как уже было сказано ранее, применение технологии дополненной реальности на данный момент является трендом, что способствует ее развитию и использованию как у нас в стране, так и за рубежом.

Рассмотрев опыт использования технологий дополненной реальности в сфере производства, а также существующие инструменты и принципы работы с AR технологиями, можно отметить, что использование именно этой технологии необходимо для визуализации процесса сборки станка. Так как имеются явные показатели, повышающие эффективность выполняемых задач и снижающие затраты.

В следующих главах данной работы будет рассмотрен процесс создания мобильного приложения для операционной системы Android с применением технологии дополненной реальности без использования маркеров.

## **Глава 2 Выбор инструментов и технологий для построения приложения дополненной реальности**

### **2.1 Выбор целевого устройства и операционной системы для разработки приложения дополненной реальности**

Исходя из задачи, создания приложения дополненной реальности для моделирования процесса сборки станка, в качестве аппаратного решения лучше всего использовать современные смартфоны. На это решение влияют такие факторы, как – необходимость в мобильности решения, так как целевой объект, станок, чаще всего находится вне офисных помещений, и размеры устройства должны быть приемлемы для использования, помещаться в охват человеческой руки [5].

Конечно, можно было сделать выбор и смарт-очков, однако, имеется такой недостаток как цена, запрашиваемая за одно устройство. Покупка подобных устройств накладывает дополнительные расходы, чего можно избежать при использовании мобильных телефонов.

В качестве операционной системы (ОС) можно выбрать один из трех наиболее популярных, составляющих около 95% всего рынка мобильных операционных систем, вариантов:

- android,
- iOS,
- windows Phone.

Для разработки была выбрана операционная система Android, так как, во-первых, для начала процесса создания приложения не требуется платная регистрация в качестве разработчика, в отличии от iOS, во-вторых, по данным представленными компанией Google количество устройств работающих на Android превышает показатель в 2,5 миллиарда пользователей, что в два раза больше, чем у iOS, а значит будет охвачено большее количество устройств [15].



Также исходя из официальной статистики предоставляемой компанией Google количество устройств, работающих на версии системы 4.4 и более новой, составляет 98%.

Таким образом было принято решение разрабатывать мобильное приложение, для устройств под управлением операционной системы Android с минимальной версией системы 4.4.

## **2.2 Выбор языка программирования для разработки приложения дополненной реальности**

Так как выбор операционной системы был сделан в пользу Android, количество языков программирования доступных для использования ограничивается следующими:

- Java,
- Kotlin,
- C#,
- BASIC,
- Corona,
- PhoneGap.

Традиционным языком программирования для операционной системы Android является Java [22]. Однако стоит учесть следующие необходимые факторы:

- интеграция в популярные средства разработки игр и приложений, использующих 3D графику, такие как Unity;
- поддержка большинством наборов средств разработки приложений дополненной реальности;
- большой опыт программирования, что существенно сэкономит время и сократит количество ошибок.

Набольшими совпадением обладают такие языки как Java и C# на платформе .Net. Для лучшего сравнения была создана Таблица 5.

Таблица 5 – Сравнение языков программирования для создания решений AR

	C#	Java
Использование в средах разработки приложений дополненной реальности	Unity, Unreal Engine, Visual Studio, Visual Code	Android Studio
Наборы средств разработки, используемые для приложений AR	ARCore, ARKit, EasyAR, Vuforia, Kudan, ARToolKit	ARCore, ARKit, Vuforia, ARToolKit

Наибольшим совпадением обладает язык программирования C#, так как используется платформой разработки в режиме реального времени Unity и, соответственно, поддерживается наибольшими SDK для приложений AR [17]. Помимо этого использование Unity позволит значительно сократить время, затрачиваемое на разработку решения. Таким образом было принято использовать именно его для разработки приложения.

### **2.3 Выбор набора средств для разработки приложения дополненной реальности**

Использование библиотек, реализованных другими разработчиками или компаниями, может значительно ускорить процесс разработки. Наборов программных средств для создания приложений дополненной реальности существует достаточно много, каждый из них реализует свой функционал и имеет собственные преимущества и недостатки. Рассмотрим каждый из них в отдельности.

В предыдущих разделах данной работы был описан функционал фреймворков для приложений дополненной реальности, чтобы выбрать наиболее подходящий была составлена

Таблица 6.

Таблица 6 – Основные наборы средств разработки приложений дополненной реальности

AR SDK	Компания разработчик	Тип использования	Поддерживаемые платформы
Vuforia	Qualcomm	Платный; бесплатный	iOS, Android, Unity
ARToolKit	DAQRI	Платный; бесплатный	Android, iOS, Windows, Linux, Mac OS X, SGI
Wikitude	Wikitude GmbH	Платный; бесплатный	Android, iOS, Google Glass, Epson Moverio, Vuzix M-100, Xamarin, Unity
LayAR	BlippAR Group	Платный; бесплатный	iOS, Android
Kudan	Kudan Limited	Платный; бесплатный	iOS, Android, Unity
EasyAR	VisionStart	Бесплатный	iOS, Android, Unity, UWP
ARKit	Apple	Платный; бесплатный	iOS, Mac OS X

В ходе анализа данных приведенных в

Таблица 6 и предыдущих главах был выбран набор средств разработки приложений дополненной реальности EasyAR. Так как обладает всеми необходимыми свойствами: поддержкой технологии оценки окружающего пространства; имеет стабильное и быстрое отслеживание в движении; поддерживает средство разработки Unity; обладает возможностью использования под операционной системой Android [3]. Данные причины делают EasyAR наилучшим выбором, для разработки приложения моделирования процесса сборки станка.

## **2.4 Моделирование и реализация приложения дополненной реальности для визуального моделирования процесса сборки станка**

Цель создаваемого приложения заключается в отображении вспомогательной информации, используемой при техническом обслуживании оборудования на производстве. Начнем с теоретической разработки.

При создании приложения, стоит учитывать, что существует две системы координат, одна из которых – это система координат устройства, а другая мировая система координат. Задача состоит в совмещении виртуальных образов с объектами, находящимися в физическом мире. А значит необходимо вычислить положение системы координат, использующихся в виртуальном пространстве, относительно системы координат устройства.

Эйлер показал, что любой поворот системы координат можно совершить тремя преобразованиями, каждое из которых является поворотом вокруг своих осей. В данном случае в (2) представлены матрицы поворота на угол  $\alpha$  оси  $z$ , затем на  $\beta$  оси  $x$  и на  $\gamma$  оси  $z$  [15].

$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$R_x(\beta) = \begin{pmatrix} 1 & -0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{pmatrix}, R_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Перемножая матрицы поворота (2) получаем общую матрицу R (3). Помножая на R, получаем поворот системы координат на углы Эйлера, затем делаем параллельный перенос.

$$R = R_z(\gamma) * R_x(\beta) * R_z(\alpha) \\ = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \cos(\gamma) - \cos(\beta) \sin(\alpha) \sin(\gamma) & -\cos(\gamma) \sin(\alpha) - \cos(\alpha) \cos(\beta) \sin(\gamma) & \sin(\beta) \sin(\gamma) \\ \cos(\beta) \cos(\gamma) \sin(\alpha) + \cos(\alpha) \sin(\gamma) & \cos(\alpha) \cos(\beta) \cos(\gamma) - \sin(\alpha) \sin(\gamma) & -\cos(\gamma) \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \sin(\beta) & \cos(\alpha) \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Таким образом с помощью формулы (4) можно перейти в систему координат устройства.

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Для построения приложения, необходимо определиться какие этапы для проектирования будут затронуты:

- определение используемого архитектурного решения;
- описание архитектуры системы;
- создание трехмерных объектов, для использования на мобильной платформе;
- разработка приложения дополненной реальности в Unity.

Одной из важных проблем использования дополненной реальности в мобильных устройствах, низкая мощность телефонов и планшетов в отличии от стационарных компьютеров и ноутбуков. Помимо прочего необходимо предусмотреть возможность использования внешних алгоритмов распознавания объектов [4].

Для упрощения процесса разработки воспользуемся существующими паттернами проектирования, выбор которых проведем далее.

2.4.1 Выбор архитектурного решения, используемого в процессе разработки приложения дополненной реальности

Существует несколько паттернов проектирования, которые можно использовать при построении приложений дополненной реальности под мобильные устройства:

- MVC, Model-View-Controller;
- MVP, Model-View-Presenter;
- MVVM, Model-View-ViewModel.

MVC является наиболее популярным шаблоном проектирования и включает в себя аспекты других архитектурных решений. В данном паттерне, каждый объект может иметь одну из трех существующих ролей: модель; представление; контроллер. Такое разбиение способствует абстракции объектов и скрыванию явных методов управления между ними. Схема работы паттерна MVC представлена на Рисунок 4.

Использование паттерна MVC является хорошей практикой, так как в приложении будут использованы повторяющиеся элементы, что позволит сократить расходы памяти и процессорного времени, затрачиваемого на обработку одной и той же информации. Ещё одно преимущество данного архитектурного решения заключается в возможности масштабирования при добавлении новых функций.

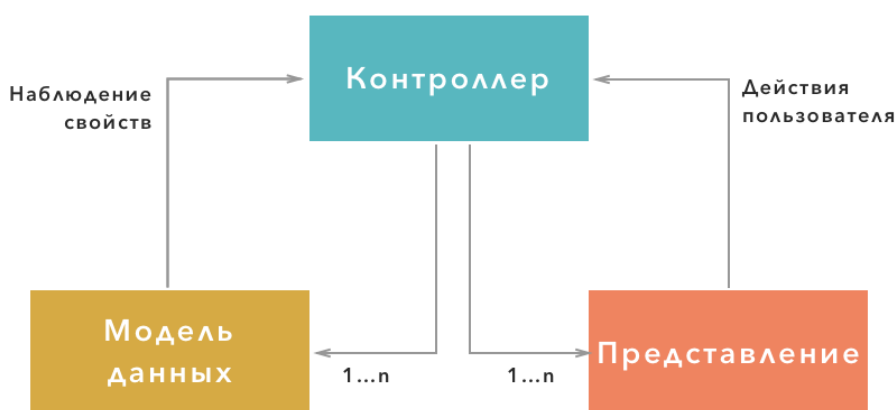


Рисунок 4 – Схема паттерна проектирования MVC

Паттерн MVC в реализуемом приложении, в рамках данной бакалаврской работы, позволит объединить технологию дополненной реальности с внешними алгоритмами распознавания объектов.

#### 2.4.2 Диаграмма классов анализа реализуемого приложения дополненной реальности

Воспользуемся диаграммой классов, где разбиение элементов на три группы согласуется с рассмотренным ранее шаблоном проектирования MVC.

Данный вид диаграммы используется для построения системы на концептуальном уровне, то есть без использования точного определения атрибутов и операций [11].

Абстрактно систему можно выделить в пять классов, где UI – граничный класс, WorldManager, ModelManager, EasyARLib – управляющие классы и 3DModel – класс сущности. Данные классы можно увидеть на диаграмме классов представленной на Рисунок 5.

На данной диаграмме граничный класс UI служит для графического представления элементов управления, которые позволят пользователю взаимодействовать с системой. Изменениями параметров данного класса занимается WorldManager, который, соответственно, является управляющим классом для пользовательского интерфейса. С помощью него можно отобразить дополнительные кнопки или расширить существующий интерфейс. Управляющий класс ModelManager служит для загрузки трехмерных моделей в виртуальную сцену проекта, взаимодействует с EasyARLib, который в свою очередь считывает такие параметры объекта, как список текстур, координаты вершин, загружает их и возвращает в ModelManager, где в последствии трехмерный объект устанавливается по заданным координатам в сцене [9].



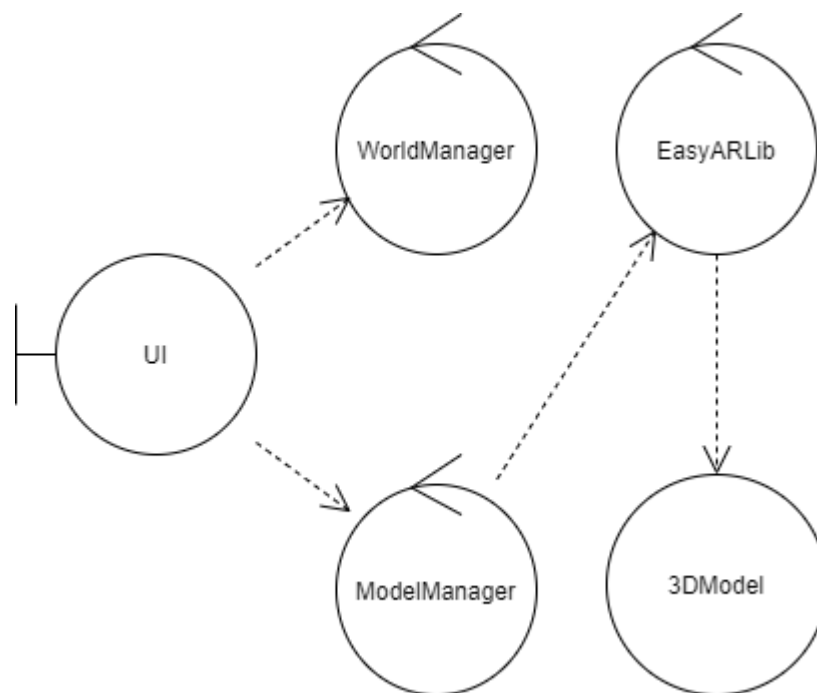


Рисунок 5 – Диаграмма классов анализа

Таким образом, представленная диаграмма классов анализа показывает фрагмент системы, который занимается расположением уже распознанного объекта в виртуальной среде, где пользователь может взаимодействовать со сценой.

#### 2.4.3 Диаграмма классов приложения дополненной реальности

Для демонстрации классов системы, методов, полей, а также взаимосвязей между ними будет использована диаграмма классов. На Рисунок 6 представлены основные классы, которые используются при разработке приложения дополненной реальности.

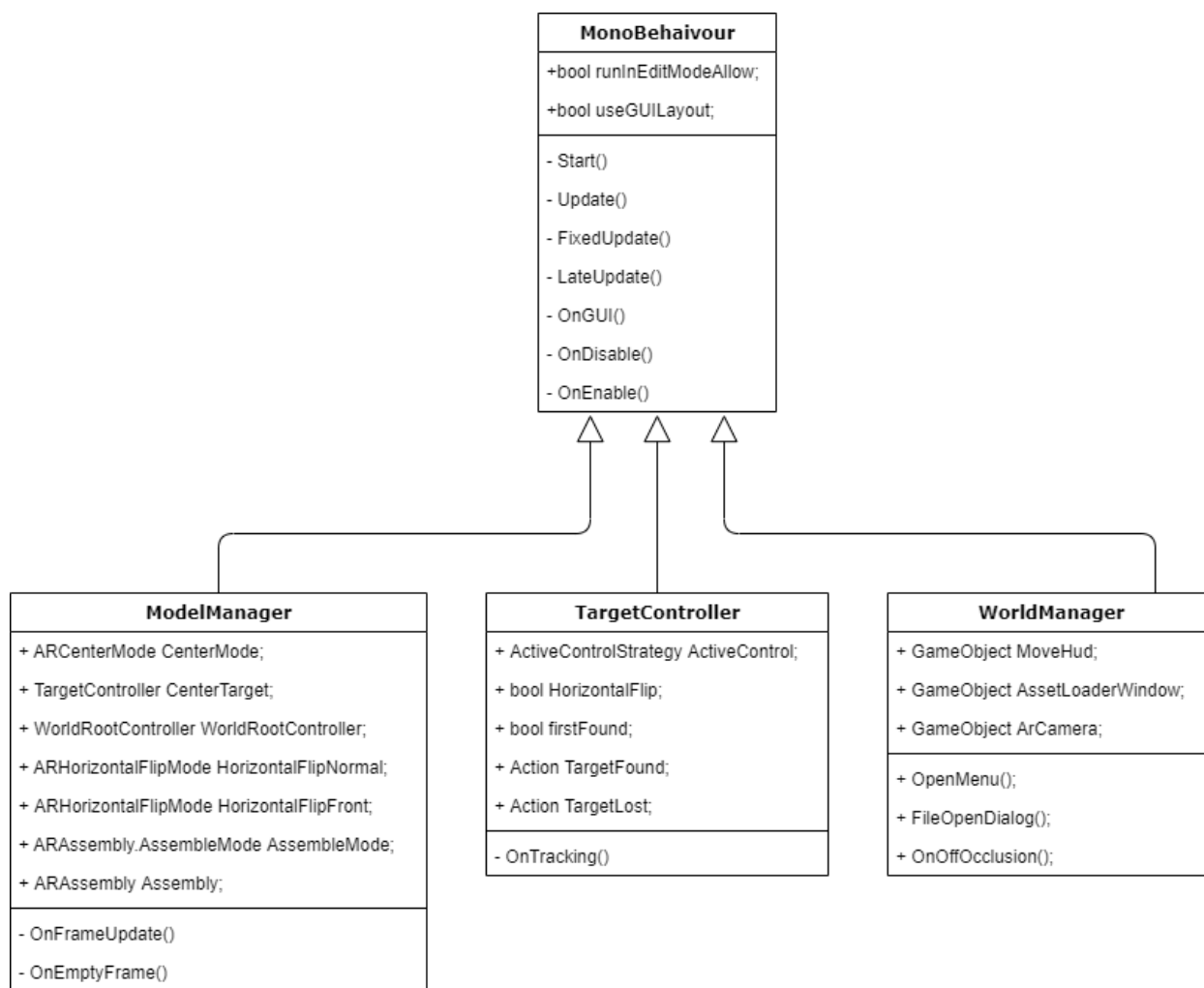


Рисунок 6 – Диаграмма классов

Базовый класс MonoBehaviour – класс Unity, каждый скрипт должен наследоваться от данного родителя.

Класс ModelManager объединяет функционал EasyAR Sense и возможностей Unity. В методе Start происходит инициализация полей класса. Update служит для обработки поступающих изображений с камеры покaдрово [13].

TargetController служит для обнаружение объектов на поступающем изображении и позволяет контролировать положение трехмерных объектов на сцене. Содержит поле ActiveControl необходимо для определения стратегии поведения алгоритма. Также имеются поля делегаты TargetFound и TargetLost, которые вызываются при обнаружении объекта и, соответственно, при его потере на следующем кадре.

WorldManager управляет пользовательским интерфейсом и позволяет пользователю взаимодействовать с объектами находящимся в виртуальной среде.

Таким образом, представленная диаграмма показывает классы разрабатываемой программы и отношения между ними. Далее необходимо рассмотреть процесс создания трехмерных объектов, которые будут использоваться в разрабатываемом приложении на мобильном устройстве.

#### 2.4.4 Создание трехмерных объектов для использования в приложении дополненной реальности на мобильных устройствах

Так как для реализации приложения будет использоваться инструмент разработки Unity, нужно создать объемные модели в поддерживаемых форматах. Наиболее используемыми являются fbx, технология и формат файлов разработанный Kaydara, и obj, формат файлов описания геометрии, разработанный в Wavefront Technologies [15].

В качестве инструмента для создания таких объектов было решено использовать бесплатное программное обеспечение Blender. Это бесплатный 3D-пакет с открытым исходным кодом [16]. Он поддерживает весь 3D конвейер, а именно моделирование, такелаж, анимацию, симуляцию, рендеринг, композитинг и отслеживание движения, редактирование видео и конвейер 2D анимации.

Для построения 3D объектов программное обеспечение Blender использует скрипты, написанные на языке программирования Python. Например, для создания примитивной трехмерной фигуры – тора, можно использовать скрипт, который задаёт уравнение (5).

$$\begin{cases} x = a * \sin(v), \\ y = (b + a * \cos(v)) * \cos(u), \\ z = (b + a * \cos(v)) * \sin(u) \end{cases} \quad (5)$$
$$b > a > 0$$

При этом параметры  $u$  и  $v$  ограничены областью от 0 до  $2\pi$ .

В итоге применения уравнения (5) и параметров  $u$  и  $v$ , чья область была задана ранее, можно получить фигуру представленную в окне редактирования Blender и отображенную на Рисунок 7.

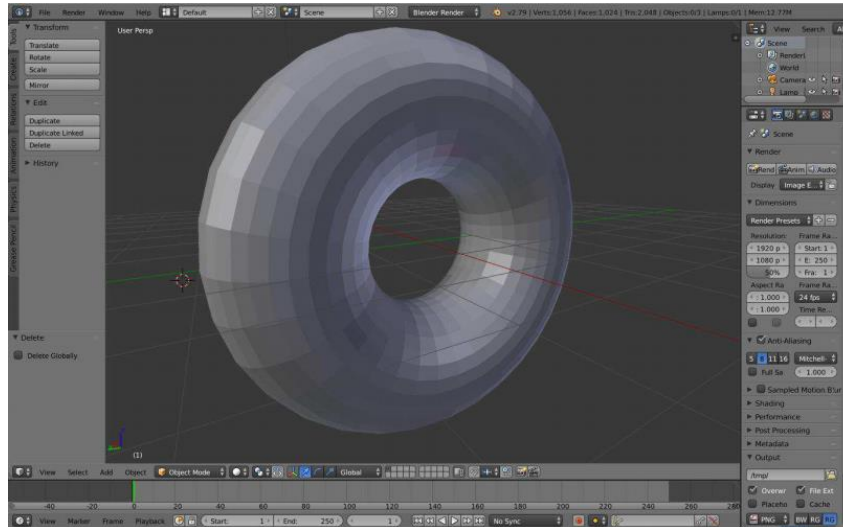


Рисунок 7 – 3D объект в окне редактирования Blender

Важным аспектом, является то, что система порядка вершин в Unity инвертирована и идет против часовой стрелки, это необходимо учитывать. В итоге получается трехмерная модель, которую можно экспортировать в формате fbx [7].

В результате был описан процесс создания трехмерных объектов и их экспорт в формат файлов, подходящих для приложения дополненной реальности, которые можно использовать на мобильных устройствах, без значимых потерь производительности.

#### 2.4.5 Разработка приложения дополненной реальности в Unity

Алгоритм работы, проводимый в рамках создания приложения, можно разбить на несколько этапов:

- разработка элементов дополненной реальности;
- работа с элементами дополненной реальности в выбранной системе разработки;
- экспорт решения под выбранную операционную систему.

На этапе разработки элементов дополненной реальности необходимо создать объемные модели, которые будут использоваться для распознавания примитивов на изображении, поступающего с камеры устройства.

Далее нужно создать сценарии, которые отвечают за взаимодействие пользователя, посредством передвижения, изменения размера или наклона объектов виртуальной среды [13].

На завершающем этапе приложение подготавливается к использованию на целевой операционной системе. Для этого в системе разработки задаются параметры компиляции и производится экспорт на нужное устройство, где в дальнейшем происходит тестирование и доработка в случае необходимости.

Более подробно алгоритм работы представлен на Рисунок 8.

Для корректной работы необходимо создать 3D модель и определить ключевые точки, которые будут использоваться для позиционирования виртуального объекта в реальном мире.

В качестве элементов, как было сказано ранее будут использоваться объемные, трехмерные модели. Процесс их создания заключается в работе с программным обеспечением Blender. Цель состоит в создании примерно схожего прототипа, 3D объекта, к его физическому отображению [12].

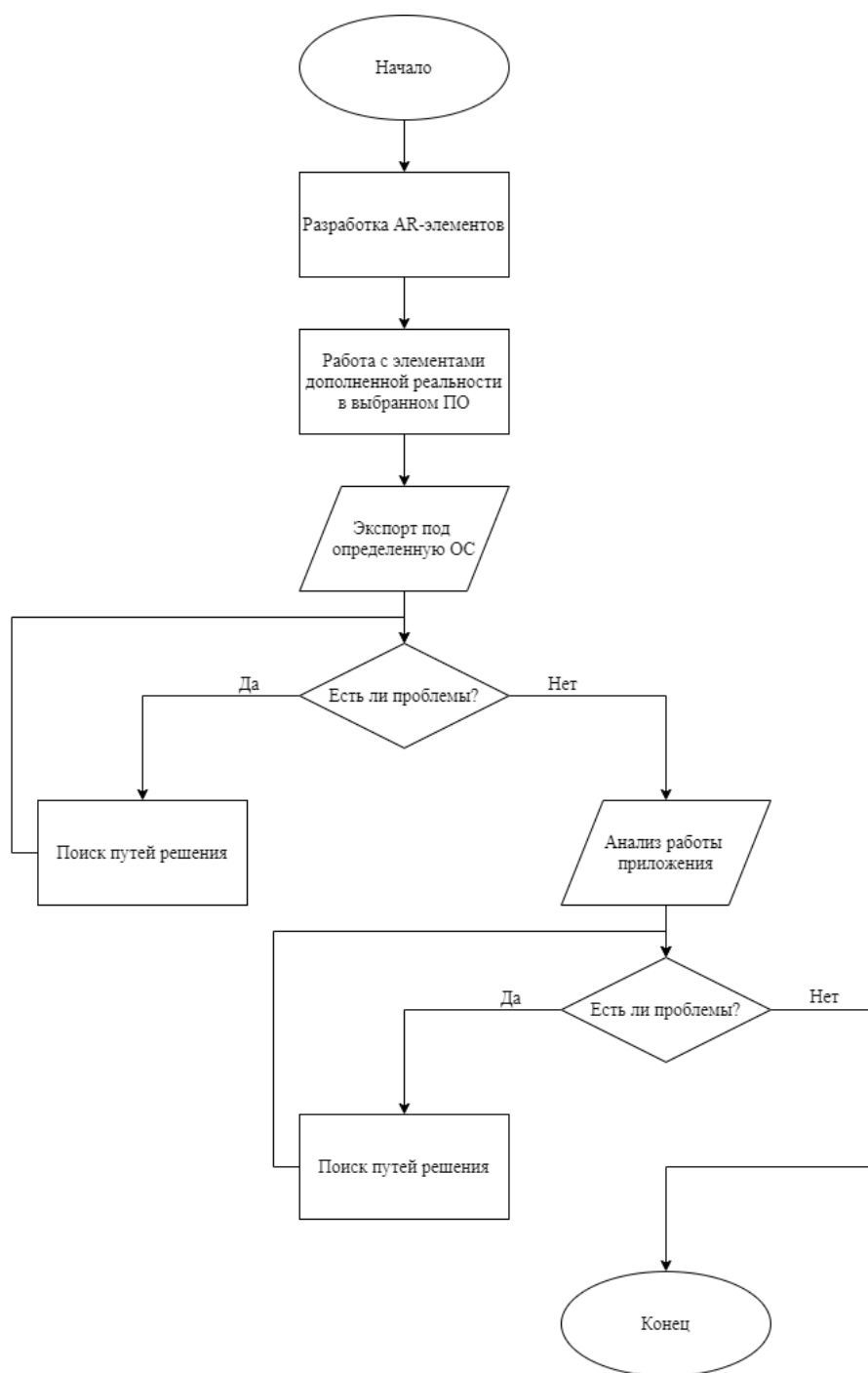


Рисунок 8 – Алгоритм разработки приложения дополненной реальности

Для проекта был выбран фреймворк EasyAR, в котором имеются такие механизмы как трекинг трехмерных моделей (3D tracking). Эта технология рассчитывает уникальные точки на поступающем изображении и сравнивает их с точками (вершинами) 3D модели, что позволяет расположить её под нужными углами и расстоянии, как реальный, физический объект [19].

Первый шаг к использованию 3D Tracking — это, конечно, подготовка 3D модели целевого объекта. 3D-модель должна быть в формате Wavefront OBJ и должна поставляться с соответствующим файлом материала и хотя бы одним файлом карты текстуры в формате JPEG или PNG. Далее приведены некоторые необходимые условия, для работы фреймворка EasyAR:

- модель должна иметь богатые текстуры;
- модель может иметь разные формы;
- файл модели не должен ссылаться на абсолютный путь;
- имя файла и путь в файле модели не должны содержать пробелов;
- файл модели должен использовать кодировку UTF-8.

Рассмотрим процесс создания и импорта 3D модели для приводной шестерни станка СТБ-80, изображенной на Рисунок 9.

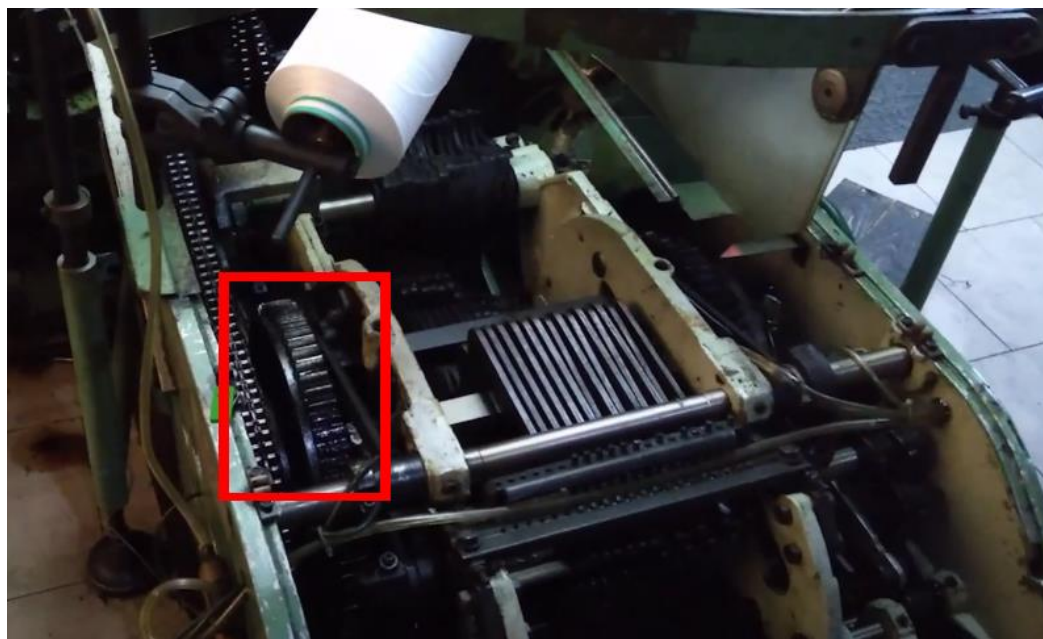


Рисунок 9 – Приводная шестерня станка СТБ-80

Для создания 3D модели воспользуемся программным обеспечением Blender, которое является бесплатным и позволит создать нужные объекты без знаний в сфере проектирования. Результат работы отображен на Рисунок 10.

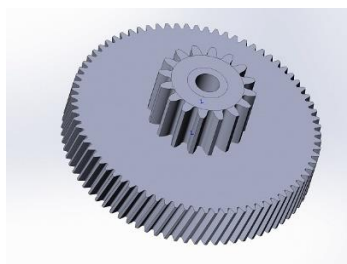


Рисунок 10 – 3D модель шестерни

Теперь необходимо импортировать полученную модель в ресурсы будущего проекта. Для этого необходимо воспользоваться механизмами импорта Unity, как это представлено на Рисунок 11.

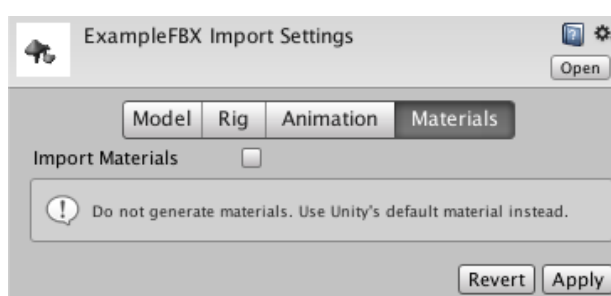


Рисунок 11 – Импорт трехмерной модели в Unity

Далее необходимо создать сцену и 3D маркер из библиотеки EasyAR. Для этого воспользуемся инспектором объектов, как это показано на Рисунок 12. После чего необходимо закрепить созданную ранее модель шестерни за распознаваемым маркером [6].

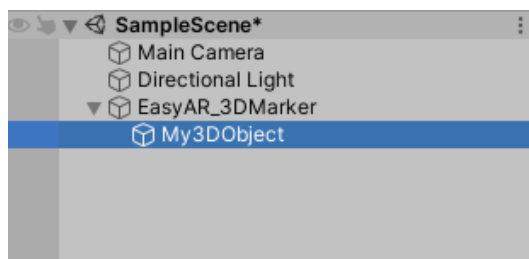


Рисунок 12 – Инспектор объектов Unity

Подготовка объектов и настройка программной платформы завершена. Теперь набор программных средств EasyAR сможет сопоставить ключевые точки 3D модели с изображением реального объекта, после чего произойдет позиционирование внутри виртуального пространства и вывод



получившегося кадра на экран устройства, используемого пользователем [30].

За позиционирование объекта в сцене, отвечает класс ModelManager, код которого приведен на Рисунок 13.

```
public class ModelManager : MonoBehaviour
{
    public ARCenterMode CenterMode;
    public TargetController CenterTarget;
    public WorldRootController WorldRootController;
    public ARHorizontalFlipMode HorizontalFlipNormal;
    public ARHorizontalFlipMode HorizontalFlipFront = ARHorizontalFlipMode.World;
    public ARAssembly.AssembleMode AssembleMode;
    [HideInInspector, SerializeField]
    public ARAssembly Assembly = new ARAssembly();
    private WorldRootController previousWorldRootController;
    private int frameIndex = -1;
    private KeyValuePair<bool, bool> frameStatus = new KeyValuePair<bool, bool>();
    public delegate void FrameChangeAction(OutputFrame outputFrame, Matrix4x4 displayCompensation);
    public event FrameChangeAction FrameChange;
    public event Action<OutputFrame> FrameUpdate;
    public event Action<WorldRootController> WorldRootChanged;
    Ссылка: 48
    public enum ARCenterMode...
    Ссылка: 18
    public enum ARHorizontalFlipMode...
    Ссылка: 15
    public Optional<CameraParameters> FrameCameraParameters { get; private set; }
    ☐ Сообщение Unity | Ссылка: 0
    private void Start()...
    ☐ Сообщение Unity | Ссылка: 0
    private void Update()...
    ☐ Сообщение Unity | Ссылка: 0
    private void OnDestroy()...
    ссылка: 1
    private void OnFrameUpdate(OutputFrame outputFrame, InputFrame inputFrame, Matrix4x4 displayCompensation)...
    Ссылка: 2
    private void OnEmptyFrame()...
```

Рисунок 13 – Управляющий класс ModelManager

В данном фрагменте кода выполняется объединение возможностей EasyAR Sense с виртуальной сценой Unity. Все поля класса, начинающиеся с приписки AR – являются абстракцией над библиотекой EasyAR. Так как она написана на языке программирования C++ необходимо создать интерфейсы, своеобразные мосты, которые позволяют использовать возможности библиотеки, написанной на языке программирования отличной от C#, на котором создается приложение [4].

Также представленный ранее класс ModelManager имеет пять методов, среди которых метод Start – запускается единожды при загрузке сцены и служит для инициализации необходимых данных его код приведен на Рисунок 14.

```

Сообщение Unity | Ссылка: 0
private void Start()
{
    if (!EasyARController.Initialized)
    {
        return;
    }
    Assembly.Assemble(this);
    if (!WorldRootController) { WorldRootController = FindObjectOfType<WorldRootController>(); }
}

```

Рисунок 14 – Код инициализирующего метода Start

После инициализации начинается работа метода Update. Данный метод вызывается каждый кадр, что позволяет обрабатывать поступающее изображение с камеры в виде очереди и не нарушать последовательность кадров. Более подробный код этого метода приведен на Рисунок 15.

```

private void Update()
{
    if (!Assembly.Ready) ...
    if (WorldRootController != previousWorldRootController) ...
    var oFrame = Assembly.OutputFrame;
    if (oFrame.OnNone) ...

    using (var outputFrame = oFrame.Value)
    using (var iFrame = outputFrame.inputFrame())
    {
        if (FrameCameraParameters.OnSome)
        {
            FrameCameraParameters.Value.Dispose();
        }
        FrameCameraParameters = iFrame.cameraParameters();
        var displayCompensation = EasyARController.Instance.Display.GetCompensation(FrameCameraParameters.Value);
        var index = iFrame.index();
        if (frameIndex != index && FrameChange != null)
        {
            FrameChange(outputFrame, displayCompensation);
        }
        frameIndex = index;
        OnFrameUpdate(outputFrame, iFrame, displayCompensation);
        if (FrameUpdate != null)
        {
            FrameUpdate(outputFrame);
        }
    }
}

```

Рисунок 15 – Код метода Update

Помимо ModelManager значимым классом можно считать TargetController, который позволяет следить за количеством объектов, находящихся в текущем кадре, а также узнавать их координаты. Важным аспектом работы данного контроллера, является то, что он может работать в трех режимах, которые регулируются с помощью стратегий [15]. Стратегия –

это обычное перечисление состояний, выбор одного из состояний, влияет на работу алгоритма. Код перечисления представлен на Рисунок 16.

```
Ссылка: 6
public enum ActiveControlStrategy
{
    HideWhenNotTracking,
    HideBeforeFirstFound,
    None,
}
```

Рисунок 16 – Перечисление стратегий работы класса TargetController

ActiveControlStrategy имеет три состояния, HideWhenNotTracking означает отображение трехмерного объекта только после того, как он будет распознан на входящем изображении, HideBeforeFirstFound – рассчитывать положение объекта исходя из предыдущего кадра, то есть объект не исчезает сразу, если цель не была распознана и состояние None – не отображать объекты.

Данное поведение контролируется в методе OnTracking, который вызывается каждый кадр в уже рассмотренном ранее классе ModelManager. Код метода представлен на Рисунок 17.

Заключительным этапом необходимо настроить параметры компиляции приложения. Сначала необходимо задать имя пакета. Имена пакетов пишутся строчными буквами, чтобы избежать конфликта с именами классов или интерфейсов. Компании используют обратное доменное имя в Интернете для начала имен своих пакетов, например com.mypackage. Как это показано на Рисунок 18. Также потребуется дополнительная инсталляция JDK и Android SDK, без которых приложение на устройство на платформе Android создать не получится [9].

После проведенных действий и настроек нужно построить приложение под целевую операционную систему Android. Для этого в разделе «Build Settings» присутствует кнопка «Build». После нажатия на которую начнется процесс компиляции.

```

Ссылка: 6
internal void OnTracking(bool status)
{
    if (IsTracked != status)
    {
        if (status)
        {
            if (ActiveControl == ActiveControlStrategy.HideWhenNotTracking ||
                (ActiveControl == ActiveControlStrategy.HideBeforeFirstFound &&
                 !firstFound))
            {
                gameObject.SetActive(true);
            }
            firstFound = true;
            TargetFound?.Invoke();
        }
        else
        {
            if (ActiveControl == ActiveControlStrategy.HideWhenNotTracking)
            {
                gameObject.SetActive(false);
            }
            TargetLost?.Invoke();
        }
        IsTracked = status;
    }
    if (IsTracked)
    {
        OnTracking();
    }
}

```

Рисунок 17 – Код метода OnTracking

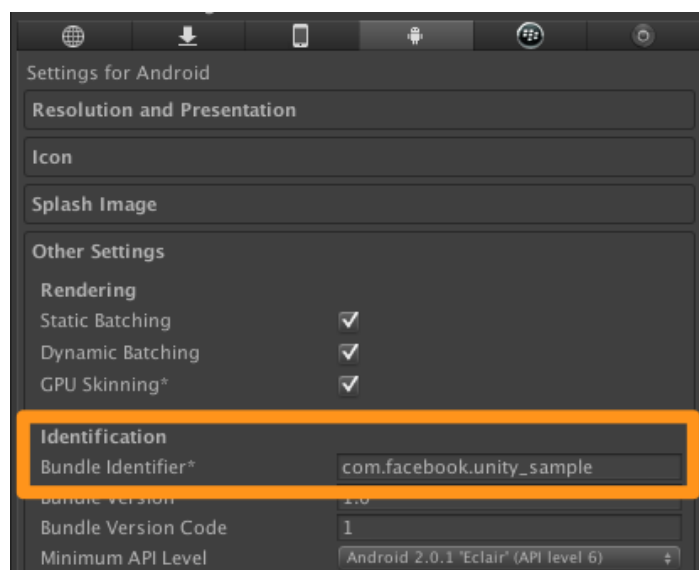


Рисунок 18 – Настройка имени пакета в Unity

В результате будет получен арк файл, который необходимо переместить на нужное устройство и установить, с помощью встроенных механизмов Android.

## **Глава 3 Тестирование работы приложения дополненной реальности на мобильной платформе**

Для оценки работы программного обеспечения необходимо провести исследования и испытания, направленные на выявление соответствия возможностей созданного решения заявленным требованиям.

В рамках данной работы было реализовано мобильное приложение дополненной реальности для визуализации процесса сбора станка, основными функциями которого являются:

- распознавание уникальных точек трехмерных объектов на входящем видеопотоке;
- сопоставление положения и углов поворота трехмерного объекта, относительно распознанного реального объекта.

В начале работы было оговорено, что созданное решение, должно обеспечивать скорость распознавания, позволяющую выводить как минимум 24 кадра в секунду. Для выявления и оценки успешности данного показателя необходимо провести тестирование производительности [28].

### **3.1 Подготовка проекта модульных тестов MSTest для разработанного приложения дополненной реальности**

Для проведения тестирования приложения на производительность, необходимо установить пакет MSTest из репозитория Nuget. Для этого в пакетном менеджере или консоли проекта вводится команда представленная на Рисунок 19.

После установки становится доступно создание проекта модульного тестирования. Для этого в той же директории, где находится исходный код был создан проект тестирования с названием UnitTestProject. Данный вид проекта предназначен для создания тест-классов, в которых прописывается логика будущего тестирования [25].

```
PowerShell для разработчиков
+ PowerShell для разработчиков ▾
** Copyright (c) 2020 Microsoft Corporation
*****
PS C:\Users\User1\Desktop\ARApp> Install-Package MSTest.TestFramework
>> Install-Package MSTest.TestAdapter
>> Install-Package Microsoft.NET.Test.Sdk
```

Рисунок 19 – Установка MSTest из репозитория

Для класса ModelManager был создан класс тестер ModelManagerTest. Код которого представлен на Рисунок 20.

```
[TestClass]
Ссылка: 0
public class ModelManagerTest
{
    [TestMethod]
    Ссылка: 0
    private void StartTest()...
    [TestMethod]
    Ссылка: 0
    private void UpdateTest()...
    [TestMethod]
    Ссылка: 0
    private void OnDestroyTest()...
    [TestMethod]
    Ссылка: 0
    private void OnFrameUpdateTest()...
    [TestMethod]
    Ссылка: 0
    private void OnEmptyFrameTest()...
}
```

Рисунок 20 – Код класса ModelManagerTest

Каждый из представленных методов тестового класса проводит тестирование только того метода, название которого он наследует. К примеру, StartTest будет тестировать метод Start в классе ModelManager.

Таким образом, для каждой существующей сущности в проекте был создан собственный класс тестер, что позволит проводить тестирование каждого элемента в отдельности и записывать результаты в отдельный лог-файл для составления статистики в виде таблиц в следующем разделе.

### 3.2 Тестирование производительности разработанного приложения дополненной реальности на мобильном устройстве

Данный вид тестирования предназначен для выявления показателей, как быстро работает приложение, система или их части, под искусственно созданной нагрузкой.

Для проведения данного вида тестирования будет использован эмулятор Android x86 HAXM. А в качестве входного видеосигнала будет использоваться записанный заранее видеоряд, содержащий цели для распознавания, количество которых возрастает со временем. Ожидаемым результатом является падение производительности до обозначенного минимума в 24 кадра в секунду и некорректное распознавание объектов при их нагромождении в одной точке [9].

Для оценки показателей эффективности необходимо провести нагрузочное тестирование.

Проведение данного тестирования позволит определить, как работает система при постоянном увеличении нагрузки и точность распознавания.

В результате тестирования была составлена Таблица 7.

Таблица 7 – Показатели нагрузочного тестирования

Количество объектов	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Среднее количество кадров в секунду	60	55	40	28	26	26	25	26	24
Среднее количество распознанных объектов	10	20	30	40	42	41	35	20	15

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что оптимальным количеством объектов, находящихся в одном кадре, является 40. При превышении данного порога точность алгоритма падает постепенно от 84% до 20% при возрастании количества объектов.

После проведения нагрузочных тестов, необходимо провести стресс тестирование.

Данный вид тестирования предназначен для тестирования системы при не стандартных нагрузках и определения возможного пика, при котором приложение будет нормально функционировать.

Так как уже имеются показатели нагрузочного тестирования, целесообразным будет проведение тестирования с показателя количества объектов больше 90.

Таблица 8 – Показатели стресс тестирования

Количество объектов	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Среднее количество кадров в секунду	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Среднее количество распознанных объектов	15	7	1	0	2	1	0	0	0

Из-за архитектурных особенностей приложение будет работать вне зависимости от количества объектов, находящихся в объективе камеры. Однако вероятность распознания после преодоления рубежа в 100 сущностей падает до 0%, что можно рассматривать как неспособность работы системы в подобных условиях.

Таким образом, при проведении тестирования было выявлено, что установленное требование в 24 кадра реализовано. Нормальное поведение алгоритмов дополненной реальности наблюдается при 40 объектах, однако при превышении данного показателя эффективность снижается до 0% (при 110 объектах).



## Заключение

В ходе проделанной работы был проведен анализ технологии дополненной реальности, её опыт использования для производственных решений, а также разработано приложение дополненной реальности для визуализации процесса сборки/обслуживания станка.

В начале исследования были поставлены задачи:

- провести анализ практик применения технологий дополненной реальности в сфере производства продукции;
- разработать приложение дополненной реальности, применяемое для проведения работ, направленных на обслуживание механизмов станка, с визуализацией проводимых процессов.

Для решения первой задачи был проведен анализ зарубежного и российского опыта использования технологий дополненной реальности в производственных процессах, где в результате были выявлены основные преимущества и недостатки существующих решений.

Для решения второй задачи были выявлены основные инструменты и механизмы, применяемые при построении приложений AR и проведён разбор существующих средств разработки. Изучены технологии оптического трекинга. В ходе реализации было создано мобильное приложение с использованием набора средств разработки EasyAR и применением языка программирования C#.

Изучение научно-технической литературы помогло определиться с выбором технологий и инструментов, которые применялись в ходе разработки приложения дополненной реальности.

В ходе работы было проведено сравнение паттернов проектирования, на основании которого было решено использовать MVC, для обеспечения модульности приложения.

Также в ходе реализации решения было освоено программное обеспечение для моделирования трехмерных объектов - Blender.

Помимо реализации приложения дополненной реальности, была проведена работа над созданием модульных тестов, которые позволили выявить показатели эффективности разработанного мобильного приложения с использованием дополненной реальности.

Результаты тестирования показали, что созданное решение обеспечивает стабильную работу приложения при большом количестве объектов, находящихся в одном кадре, а скорость обработки одного кадра не превышает 41 миллисекунды.

В связи с полученными результатами можно сделать вывод, что поставленные цели были полностью достигнуты.

## Список используемой литературы

1. Биллиг В.А. Основы объектного программирования на С# (С# 3.0, Visual Studio 2008). – М.: Интернет-университет информационных технологий, Бином. Лаборатория знаний, 2015. – 584 с.
2. Герман О.В., Герман Ю.О. Программирование на Java и С# для студента. – СПб.: БХВ-Петербург, 2015. – 512 с.
3. Ишкова Э.А. С#. Начала программирования. – М.: Бином-Пресс, 2017. – 334 с.
4. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. – 264 с.
5. Кёниг Э., Му Б. Эффективное программирование на С#. Практическое программирование на примерах. – М.: Вильямс, 2015. – 368 с.
6. Коробов П.Н. Математическое программирование и моделирование экономических процессов. – М.: ДНК, 2015. – 376 с.
7. Паоло Франка. С#. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2016. – 496 с.
8. Путилин А.Б. Вычислительная техника и программирование в измерительных системах. – М.: Дрофа, 2016. – 448 с.
9. Сухинин М.Ф. Численное решение задач линейного программирования и вычисления границ спектра симметричной матрицы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. – 160 с.
10. Шмырев В.И. Введение в математическое программирование. – М.: Институт компьютерных исследований, 2016. – 192 с.
11. Apple says there are 1.4 billion active Apple devices. [Электронный ресурс]//Статья - Режим доступа: <https://www.theverge.com/2019/1/29/18202736/apple-devices-ios-earnings-q1-2019>
12. ARToolkit [Электронный ресурс], Режим доступа: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>

13. Augmented Reality: an Enhancer for Higher Education Students in Math's learning? [Электронный ресурс], Режим доступа: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S18770509183\\_15370](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S18770509183_15370)
14. Blippbuilder [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://www.blippar.com/build-ar>
15. Design and Assessment of a Mobile Augmented Reality-Based Information Delivery Tool for Construction and Civil Engineering Curriculum. Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice. [Электронный ресурс]//Статья - Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/100a/b895378f9c6279502fa91755a3f7be34386d.pdf>
16. Dhenuka Nandhu. Half past reality-Semiotics,Architecture and Augmented Reality. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. – 68 p.
17. EasyAR: Buid your APP connecting the real world. [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://www.easyar.com/view/>
18. Giuliana Guazzaroni. Experiential Mapping of Museum Augmented Places. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. – 168 p.
19. HP Reveal: A new Extended Reality Platform. [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://www.hpreveal.com/>
20. International Society for Presence Research. [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://ispr.info/2016/08/02/a-new-age-of-vr-involving-all-five-senses/>
21. Jeremy Gibson. Introduction to Game Design, Prototyping, and Development: From Concept to Playable Game with Unity and C#. – М.: Addison Wesley, 2014. – 944 p.
22. Joao Marcelo Teixeira,Veronica Teichrieb and Judith Kelner. Embedded Augmented Reality. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. – 108 p.
23. Joe Hocking. Unity in Action: Multiplatform Game Development in C# with Unity 5. – М.: Manning Publications, 2015. – 352 p.

24. Mohamed Hamed and Sara Nada. Analysis of Electric Loads. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2017. – 268 p.
25. Muhammad Tahir. Reality Technologies and Tangible Interaction. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2018. – 124 p.
26. S. M. Rashedul Islam. Determinants of Employment in Bangladesh. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2016. – 72 p.
27. Unity. [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://unity.com/ru>
28. Vuforia Engine: developer portal. [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://developer.vuforia.com/>
29. Wes McDermott. Creating 3D Game Art for the iPhone with Unity: Featuring modo and Blender pipelines. – М.: Focal Press, 2018. – 254 p.
30. Wikitude SDK: Endless AR Possibilities. [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://www.wikitude.com/>
31. Wilson Tuladhar, Yury Dorofeev and Yeli Zhu. Research and implementation of Lobby System in Erlang. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. – 84 p.
32. ZSpace: Learning Through AR / VR Experiences. [Электронный ресурс], Режим доступа: <https://zspace.com/>