

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Проектирование и эксплуатация автомобилей»

(наименование)

23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Автомобили и автомобильный сервис

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Разработка кит-комплекта электрической силовой установки для замены ДВС на мотоциклах»

Обучающийся

С. Ю. Шибанов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Е. Д. Чижаткина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Разработка кит-комплекта электрической силовой установки для замены ДВС на мотоциклах. Выпускная квалификационная работа. Тольяттинский государственный университет, 2025.

В данной работе при помощи 3Д сканирования был смоделирован спортивный мотоцикл КТМ 690, и преобразован в финальную твердотельную КАД модель, для дальнейшей модификации и ремоторизации мотоцикла.

В первом разделе описана актуальность вопроса, а также была проанализирована составляющая рынка конкурентов на данный момент. Проведен подробный сравнительный анализ и разработана циклограмма.

Во втором разделе прописана процедура работы с 3Д сканером, и подробно описан принцип реинжиниринга. Шаг за шагом описан процесс получения 3Д модели.

В третьем разделе описан процесс проведения валидации пространственной рамы мотоцикла при помощи КАЕ в целях проверки безопасности.

В результате данной работы была получена 3Д модель мотоцикла КТМ 690 при помощи 3Д сканирования, и оптимизированная под твердотельное моделирование.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки в размере 52 страниц, содержащей 10 таблиц, 23 рисунка и графической части, содержащей 6 листов графической части.

Abstract

Development of a kit of an electric power plant for replacing the internal combustion engine on motorcycles. Graduation qualification work. Togliatti State University, 2025.

In this work, a KTM 690 sports motorcycle was modeled using 3D scanning and converted into a final solid-state CAD model for further modification and re-motorization of the motorcycle.

The first section describes the relevance of the issue, and also analyzed the current market component of competitors. A detailed comparative analysis was carried out and a cyclogram was developed.

The second section describes the procedure for working with a 3D scanner, and describes in detail the principle of reengineering. The process of obtaining a 3D model is described step by step.

The third section describes the process of validating the spatial frame of a motorcycle using CAE for safety verification.

As a result of this work, a 3D model of the KTM 690 motorcycle was obtained using 3D scanning and optimized for solid modeling.

The final qualifying work consists of an explanatory note of 52 pages, containing 10 tables, 23 figures and a graphic section containing 6 sheets of graphic section.

Содержание

Введение.....	5
1 Состояние вопроса	7
1.1 Актуальность	7
1.2 Исследование и анализ аналогов	8
1.2.1 Электрический мотоцикл Elbike Bullet 3000W	9
1.2.2 Электрический мотоцикл ElectroTown B1.....	12
1.2.3 Электрический мотоцикл Ducati Diavel.....	14
1.2.4 Электрический мотоцикл Kollter E-Cross ES1-S.....	16
1.2.5 Электрический мотоцикл на базе шасси KTM 690.....	18
1.2.6 Сравнительный анализ проектируемой модели с конкурентами	20
2 Применение методики реверс инжиниринга.....	24
3 Расчет прочности шасси мотоцикла после ремоторизации.....	38
4 Безопасность и экологичность технического объекта	43
Заключение	48
Список используемых источников.....	49

Введение

Реинжиниринг представляет собой стратегический подход к переосмыслению и радикальному пересмотру бизнес-процессов с целью достижения значительных улучшений в ключевых показателях эффективности, таких как стоимость, качество, скорость и уровень обслуживания клиентов. В условиях быстро меняющегося рынка, где технологии развиваются с невероятной скоростью, а потребительские предпочтения становятся все более разнообразными и изменчивыми, актуальность реинжиниринга возрастает многократно. Компании сталкиваются с необходимостью адаптироваться к новым условиям, чтобы оставаться конкурентоспособными и удовлетворять требования клиентов.

Реинжиниринг позволяет организациям не просто оптимизировать существующие процессы, но и полностью переосмыслить их с нуля. Это может включать в себя внедрение новых технологий, изменение организационной структуры, пересмотр ролей сотрудников и даже изменение корпоративной культуры. Важно отметить, что реинжиниринг не является одноразовым мероприятием; это постоянный процесс, который требует регулярного анализа и адаптации к новым вызовам.

В рамках этого проекта были сформулированы конкретные задачи. Главная цель – осуществить ремоторизацию мотоцикла КТМ 690, подразумевающую полную замену стандартного двигателя внутреннего сгорания и всех сопутствующих компонентов на электрическую силовую установку с аккумуляторной батареей.

При проектировании мотоцикла, переоборудованного в электрический, чтобы данный мотоцикл, теперь уже электрический, соответствовал всем нормам и стандартам законодательства Российской Федерации, а также соответствовал нормам безопасности транспортных средств. Кроме того, мотоцикл должен иметь преимущества после проведения ремоторизации, и

должен обладать как минимум улучшенной, или хотя бы не уступающей версии с ДВС динамикой.

В рамках данной работы были сформулированы следующие задачи:

- разработать и обосновать техническое задание на ремоторизацию мотоцикла;
- произвести 3Д сканирование шасси и других основных элементов мотоцикла;
- преобразовать полученный скан в твердотельную 3Д модель;
- осуществить анализ рынка и провести сравнительный анализ аналогов;
- произвести подбор необходимых электрических компонентов;
- произвести прочностной анализ шасси;
- провести оценку экологичности и безопасности.

1 Состояние вопроса

1.1 Актуальность

Электромобили уже зарекомендовали себя как комфортные, надежные и практичные средства передвижения. В ближайшие годы наблюдается тенденция к полному отказу от автомобилей с ДВС в пользу электротранспорта, что делает электрификацию привлекательным и перспективным направлением развития.

С учетом общего тренда по электрификации электрические мотоциклы также становятся популярными. Их зарядка обходится мотолюбителям значительно дешевле, чем заправка топливом.

Также стоит отметить, что электрический мотоцикл является довольно бесшумным, что сильно повышает комфорт при передвижении, а также за счет того, что электротранспорт имеет только высокочастотные и малоамплитудные вибрации, то это к тому же снижает нагрузку на водителя. За счет того, что мотоцикл создает минимальное количество шума, его также разрешено использовать в различных зонах отдыха, заповедниках, парках, потому что данный вид транспорта не распугивает местную фауну, а также не мешает отдыхающим людям.

Очень привлекательным дополнением для электрического транспорта является возможность быстрого ускорения за счет мгновенного крутящего момента. Это позволяет ускоряться на прямых участках дороги намного быстрее, чем другой транспорт, оснащенный двигателем внутреннего сгорания. Это связано также с тем, что эффективность электрического силового агрегата в разы выше, чем у двигателя внутреннего сгорания

Для того чтобы провести ремоторизацию мотоцикла, необходимо прибегнуть к ряду серьезных изменений конструкции, а именно необходимо будет изменить шасси для того, чтобы можно было разместить и закрепить силовую батарею, силовой агрегат, а также контроллер. Кроме того,

необходимо будет полностью заменить систему охлаждения, тормозную систему, так как масса мотоцикла будет увеличена, а также необходимо будет прибегнуть к модификации электрической архитектуры транспортного средства.

Чтобы произвести ремоторизацию мотоцикла, в первую очередь необходимо создать САD-модель элементов мотоцикла, чтобы можно было проводить различные необходимые модификации и компоновку электрических элементов. Для того чтобы получить точную КАД модель элементов мотоцикла, необходимо произвести полный разбор мотоцикла таким образом, чтобы появилась возможность провести 3Д сканирование каждой отдельной детали. Только таким образом можно добиться максимальной точности 3Д модели. Далее для того, чтобы 3Д получилось правильным, необходимо провести обработку сканов и преобразование их в твердотельные тела. После того, как отдельные детали получены, и сборка элементов завершена, необходимо будет провести ряд модификаций элементов шасси для дальнейшей возможности компоновки и фиксации силовой батареи, электрического двигателя и контроллера.

1.2 Исследование и анализ аналогов

«Анализ конкурентов и их технологий является необходимым этапом при разработке электротранспорта, поскольку это поможет создать конкурентоспособный продукт. Для такого анализа выбираются ключевые соперники, представляющие тот же сегмент мототехники, к которому будет принадлежать разрабатываемое устройство. На основе полученных данных будет создана сводная таблица, а также разработана циклограмма, отображающая сравнительные преимущества и недостатки будущего электрического мотоцикла. Кроме того, подобное исследование дает возможность изучить передовые технологии и эффективные инженерные

решения других производителей, что в свою очередь поможет добиться высокого качества и функциональности продукта.

Для того чтобы корректно провести сравнение ремоторизированного КТМ, необходимо грамотно подобрать конкурентов по техническим характеристикам, а именно это должен быть именно электрический мотоцикл с мощностью мотора до 6 кВт, а также находиться в ценовой категории, не превышающей стоимость КТМ с ДВС.

Были подобраны ряд аналогов электрических мотоциклов:

- мотоцикл с электрической силовой установкой Elbike Bullet 3000W;
- мотоцикл с электрической силовой установкой ElectroTown B1;
- мотоцикл с электрической силовой установкой Ducati Diavel;
- мотоцикл с электрической силовой установкой Kollter E-Cross ES1-S.

Для того, чтобы определить привлекательность каждого из предложений на рынке для потребителя, необходимо сравнить все модели по ряду основных критериев, необходимых потребителю, при покупке такого вида транспортного средства, а именно:

- максимальная нагрузка, кг;
- аккумулятор;
- скорость;
- запас хода;
- стоимость;
- мощность» [3].

1.2.1 Электрический мотоцикл Elbike Bullet 3000W

Elbike Bullet 3000W – это мотоцикл с электрической силовой установкой из Китая, для передвижения на котором не обязательно иметь права категории А, а также он способен преодолевать до 90 км на одном заряде свинцово-гелевого аккумулятора. Стальная рама мотоцикла, весом 150 кг, может выдерживать нагрузки до 200 кг, что позволяет кататься вдвоем и брать небольшой груз. Подвеска состоит из 17-дюймовых колес с амортизацией и дисковыми тормозами с ручным приводом. Мотоцикл предлагает три

скорости (режима с различной мощностью двигателя). В стандартной комплектации присутствуют система сигнализации, полноразмерные «крылья», светодиодные фары, стоп-сигнал и указатели поворота. Также предусмотрены зеркала заднего вида и подножки для удобства водителя и пассажира. Недостатком является длительная зарядка аккумулятора, требующая около 10 часов. Долгая зарядка электрической батареи в наших современных реалиях является достаточно серьезной причиной отказаться от подобной покупки, при условии, что электрический мотоцикл до 5 кВт является малым транспортом, и просто не имеет права иметь такую долгую зарядку

В таблице 1 показан анализ основных параметров мотоцикла, а на рисунке 1 можно увидеть сам мотоцикл.

Таблица 1 – Технические параметры электрического байка Elbike Bullet 3000W

Параметр	Максимальная нагрузка, кг	Аккумулятор	Скорость	Мощность	Запас хода	Стоимость
Elbike Bullet 3000W	110	28	78	2.8	80	255



Рисунок 1 – Электрический мотоцикл Elbike Bullet 3000W

«Elbike Bullet 3000W – это относительно недорогой кроссовый электрический мотоцикл с интересными характеристиками. Одним из его достоинств является подрессоренная масса. Несмотря на то, что аккумуляторы и электрический двигатель по своей природе довольно тяжелые, чаще всего тяжелее аналогичных ДВС, данный мотоцикл оснащен легкой алюминиевой рамой и облегченным маятником подвески. Это делает его пригодным для использования в качестве полноценного кроссового мотоцикла. Хотя на первый взгляд этот мотоцикл представляется весьма привлекательным для покупателей, его ограниченный запас хода, который составляет всего два часа, и запрет на движение по общественным дорогам существенно снижают количество потенциальных клиентов» [5].

1.2.2 Электрический мотоцикл ElectroTown B1

ElectroTown B1 – это идеальный электрический мотоцикл для городской эксплуатации, который сочетает в себе стильный спортивный дизайн, компактные габариты и высокую маневренность. Его масса составляет всего 110 кг, а длина базы – 1 950 мм, что позволяет ему легко лавировать в плотном городском трафике и находить места для парковки.

С дорожным просветом в 250 мм ElectroTown B1 способен уверенно преодолевать участки с недостаточно хорошим покрытием, что актуально для многих городских улиц. Оснащенный мощным 3-кВт электродвигателем, мотоцикл может развивать скорость до 80 км/ч, что более чем достаточно для комфортной езды по городским дорогам. Однако при этом стоит отметить, что такая максимальная скорость может быть недостаточной для перемещения по скоростным автомагистралям.

Аккумулятор, обеспечивающий запас хода до 60 км, подходит для ежедневных поездок по городу, однако его полный заряд занимает 8 часов. Это время зарядки может потребовать дополнительного планирования поездок, особенно если вы рассчитываете на дальние поездки. Тем не менее, ElectroTown B1 остается отличным выбором для городских жителей, желающих получить экологически чистый и практичный транспорт.

На рисунке 2 изображен электрический мотоцикл ElectroTown B1, а в таблице 2 можно изучить его параметры.



Рисунок 2 – Электрический мотоцикл ElectroTown B1

Таблица 2 – Технические характеристики электрического мотоцикла ElectroTown B1

Параметр	Максимальная нагрузка, кг	Аккумулятор	Скорость	Мощность	Запас хода	Стоимость
ElectroTown B1	70	30	85	3.2	65	275

1.2.3 Электрический мотоцикл **Ducati Diavel**

Электрическая версия могучего итальянского мотоцикла обладает впечатляющими характеристиками, хотя и не предназначена для управления без прав из-за своего мощного 5000 Вт двигателя и высокой максимальной скорости. Тем не менее, данный байк вызывает большой интерес, и его нельзя не заметить на фоне прочих моделей.

С аккумуляторной батареей емкостью 60 А*ч, мотоцикл способен проехать в среднем до 130 км на одном заряде при умеренном стиле вождения. Максимальная скорость достигает 90 км/ч, что делает его отличным выбором для городских и пригородных поездок.

Основным преимуществом **Ducati Diavel** является его агрессивный и массивный внешний вид, который совершенно точно привлечет внимание других участников дорожного движения. В отличие от большинства своих конкурентов, этот байк действительно напоминает классический бензиновый мотоцикл, однако, при этом он обладает рядом уникальных достоинств: он абсолютно бесшумен, что создает комфортную атмосферу, и является экологически чистым транспортом, исключая вредные выбросы.

Мгновенный старт с места – еще одно весомое преимущество данного мотоцикла, что делает его идеальным для динамичной городской езды. Комфорт во время поездок обеспечивается благодаря высокоразвитой гидравлической амортизации, что позволяет справляться с неровностями дороги с легкостью.

Однако стоит учитывать, что одним из основных недостатков модели является высокая цена, что может стать преградой для потенциальных покупателей. Тем не менее, для истинных ценителей качества и стиля это может быть вполне оправданным вложением.

На рисунке 3 изображен электрический мотоцикл **Ducati Diavel**, а в таблице 3 можно изучить его параметры.



Рисунок 3 – Электрический мотоцикл Ducati Diavel

Таблица 3 – Технические характеристики электрического мотоцикла Ducati Diavel

Параметр	Максимальная нагрузка, кг	Аккумулятор	Скорость	Мощность	Запас хода	Стоимость
Ducati Diavel	160	65	125	5.2	95	555

1.2.4 Электрический мотоцикл Kollter E-Cross ES1-S

Доступный по цене и достаточно крупный электрический мотоцикл формата «эндуро» был разработан в Германии с акцентом на поездки по бездорожью, хотя сборка осуществляется в Китае. Эта техника подойдет тем, кто ищет универсальный транспорт для активного отдыха.

С весом всего 110 кг, этот бюджетный электромотоцикл может выдерживать общую нагрузку до 210 кг, что позволяет комфортно перевозить пассажиров или дополнительное снаряжение. Тем не менее, следует отметить, что одним из основных недостатков модели является трудность в использовании в городских условиях, что делает его менее универсальным вариантом для однотипных поездок по асфальтированным дорогам. Этот мотоцикл предназначен, в первую очередь, для любителей приключений, ищущих надежный и доступный электрический транспорт для поездок по пересеченной местности.

На рисунке 4 изображен электрический мотоцикл Kollter E-Cross ES1-S, а в таблице 4 можно изучить его характеристики.

Таблица 4 – Технические характеристики электрического мотоцикла Kollter E-Cross ES1-S

Параметр	Максимальная нагрузка, кг	Аккумулято р	Скорость	Мощность	Запас хода	Стоимость
Kollter E-Cross ES1-S	190	100	140	4.5	100	825



Рисунок 4 – Электрический мотоцикл Kollter E-Cross ES1-S

Мотоцикл оснастили гидравлическими дисковыми тормозами на обоих колесах: спереди установлен 240 мм диск с двухпоршневыми тормозными суппортами, обеспечивающий отличную тормозную эффективность, а сзади – 210 мм диск с одноцилиндровым суппортом для надежной остановки.

Кроссовый электрический мотоцикл предлагает запас хода от 90 до 110 км, что зависит от типа нагрузки и стиля вождения. Максимальная скорость достигает 100 км/ч, что делает его подходящим для увлекательной езды по сложным маршрутам. Несмотря на то что мощность двигателя не превышает 4000 Вт, этот мотоцикл обладает достаточной динамикой, однако для управления ним вам понадобятся права категории А.

1.2.5 Электрический мотоцикл на базе шасси КТМ 690

Данный проект является результатом ремоторизационного процесса, в ходе которого из мотоцикла КТМ 690 был демонтирован двигатель внутреннего сгорания, и интегрирована электрическая силовая установка [2].

Основной идеей данного проекта заключается именно сохранение любимого для многих пользователей шасси, подвеску, управление, а также эргономику, при этом имея электрическую силовую установку для повышения комфорта. Это преобразование сделает мотоцикл более экологически чистым, тихим и динамичным, что, безусловно, привлечет внимание любителей продукции компании КТМ. Для сохранения оригинального шасси будет применяться метод обратного инжиниринга, в частности, 3D-сканирование всех элементов, за которым последует создание компьютерной модели. Также в процессе электрификации в мотоцикл будут интегрирована силовая батарея, а также контроллер.

Основным преимуществом данного проекта можно отметить то, что мотоцикл после переоборудования будет иметь доступ к передвижению по дорогам общего пользования, так как будут соблюдены все государственные требования к безопасности транспортных средств.

На рисунке 5 можно увидеть оригинальный мотоцикл КТМ 690, который был оснащен ДВС (до ремоторизации). В таблице 5 можно увидеть параметры уже электрической версии мотоцикла.

Таблица 5 – Параметры электрифицированного КТМ 690

Параметр	Максимальная нагрузка, кг	Аккумулято р	Скорость	Мощность	Запас хода	Стоимость
КТМ 690	220	58	115	4.5	115	195



Рисунок 5 – мотоцикл KTM 690 с ДВС

Основным преимуществом данной модели является использование передовых инженерных и технологических решений. Данный мотоцикл может быть переоборудован в любое время с минимальными затратами времени и денег. Очень привлекательным для потребителя является возможность дать любимой технике вторую жизнь, и перевести ее в более комфортный режим, например в случаях, если двигатель внутреннего сгорания израсходовал свои моточасы или же при его поломке.

Данный мотоцикл также имеет отличную ремонтпригодность за счет удобного монтажа и демонтажа силовых элементов. Кроме того, универсальные крепления позволяют устанавливать целый ряд различных силовых установок и батарей. Все это позволяет быть владельцем данной техники в местах с ограниченным количеством станций технического обслуживания, что является несомненным плюсом для данной модели электрического мотоцикла. Кроме того, данная модель включает в себя лучшие качества легендарного КТМ 690, а также комфорт, ремонтпригодность и эргономичность электрического мотоцикла.

1.2.6 Сравнительный анализ проектируемой модели с конкурентами

«Для точной оценки качества технологического оборудования важно учитывать все показатели качества и формализовать оценку процесса. Если отдельные показатели качества P_i могут быть количественно измерены, их уровень можно сопоставить с базовым значением P_{i0} . Когда увеличение абсолютного значения отдельного показателя качества приводит к его улучшению, уровень выражается как $U_i = P_i/P_{i0}$. В случае, если увеличение абсолютного значения приводит к ухудшению качества, уровень качества следует выражать как $U_i = P_{i0}/P_i$. Таким образом, независимо от того, было ли влияние положительным или отрицательным, уровень будет увеличиваться при улучшении соответствующего показателя.

Чтобы провести сравнительный анализ нескольких моделей мотоциклов и оценить их по различным параметрам, необходимо создать сводную таблицу для наглядности сравнения. Ниже представлена таблица 6, включающая всех перечисленных конкурентов и разрабатываемый продукт. В ней можно увидеть, насколько каждый показатель разрабатываемой модели превосходит аналогичные у конкурентов при сравнительно низкой стоимости» [9].

Таблица 6 – Технические характеристики электрических мотоциклов

Параметр	Максимальная нагрузка, кг	Аккумулятор	Скорость	Мощность	Запас хода	Стоимость
Электрический мотоцикл Elbike Bullet 3000W	110	28	78	2.8	80	255
Электрический мотоцикл ElectroTown B1	70	30	85	3.2	65	275
Электрический мотоцикл Ducati Diavel	160	65	125	5.2	95	555
Электрический мотоцикл Kollter E-Cross ES1-S	190	100	140	4.5	100	825
Электрический мотоцикл KTM 690	220	58	115	4.5	115	195

После того, как были оценены наиболее важные для потребителей показатели качества и комфорта для каждой из рассматриваемой модели электрического мотоцикла, необходимо приступить к созданию сравнительной циклограммы, которая покажет общую картину, и позволит легко определить какое же из предложений является наиболее интересным и выгодным для потребителя. Для этого необходимо установить числовой коэффициент для каждого из показателей по десятибалльной шкале и перенести значения на циклограмму. Для того чтобы отличать модели друг от друга необходимо установить точки разных цветов. Далее остается только

соединить точки одного цвета между собой и рассчитать площадь полученной фигуры. Таким образом модель электрического мотоцикла, чья площадь больше имеет наиболее привлекательные характеристики.

На рисунке 6 можно увидеть циклограмму в завершенном виде. Во время ее построения коэффициенты, полученные в ходе сравнительного анализа моделей, были нанесены на циклограмму в виде точек разного цвета. Далее для каждого мотоцикла все точки были соединены непрерывной линией. Полученные фигуры, за счет своей площади, отражают насколько электрический мотоцикл обладает необходимыми для потребителей характеристиками.

Из представленных данных видно, что электрический мотоцикл Ducati выделяется по множеству параметров, что делает его особенно привлекательным. Он обладает высокой вместительностью, скоростью и автономностью, а его эстетичный дизайн придаёт ему значительное преимущество. Тем не менее, стоит отметить, что высокая цена данного мотоцикла может заставить потребителя рассмотреть менее привлекательные, но более доступные альтернативы. Также следует упомянуть, что мотоцикл на базе KTM 690 представляет собой серьезную конкуренцию среди аналогов благодаря своей относительно низкой стоимости при превосходных характеристиках по сравнению с многими конкурентами.

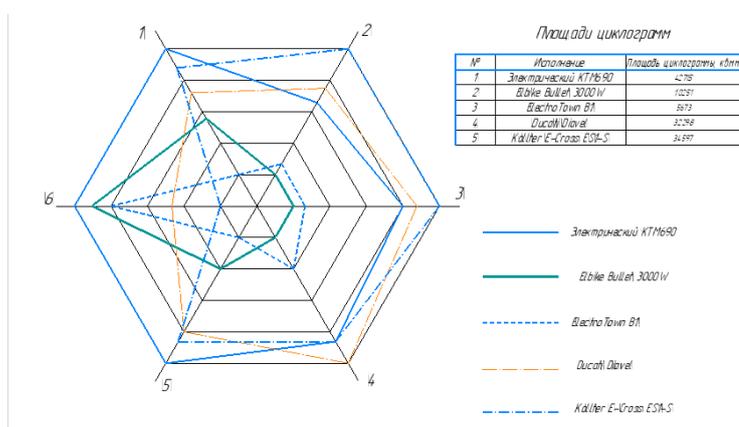


Рисунок 6 – Циклограмма характеристик моделей электрических мотоциклов

Также была составлена общая таблица с результатами анализа, которая показывает площади каждой из фигур. В таблице 7 можно увидеть результаты анализа.

Таблица 7 – Вычисление площади фигур с циклограммы

Модель	Площадь с циклограммы
Электрический мотоцикл Elbike Bullet 3000W	10
Электрический мотоцикл ElectroTown B1	5.6
Электрический мотоцикл Ducati Diavel	32
Электрический мотоцикл Kollter E-Cross ES1-S	34.5
Электрический мотоцикл КТМ 690	42

Выводы по разделу

Проведенный сравнительный анализ моделей-аналогов позволил понять какие преимущества и недостатки у ремоторизированной модели имеются по сравнению со своими прямыми конкурентами

2 Применение методики реверс инжиниринга

Получение 3D модели с помощью реверс-инжиниринга и 3D сканирования обладает рядом значительных преимуществ. Во-первых, этот процесс позволяет быстро и точно воспроизводить существующие объекты, что особенно полезно в случаях, когда оригинальные чертежи или модели недоступны. Это может быть актуально для восстановления деталей устаревших или уникальных изделий, а также для создания запасных частей.

Во-вторых, 3D сканирование обеспечивает высокую степень точности и детализации, что позволяет захватывать сложные геометрические формы и текстуры. Это особенно важно в таких областях, как промышленный дизайн, архитектура и медицина, где точность имеет критическое значение.

Кроме того, реверс-инжиниринг позволяет анализировать и улучшать существующие конструкции. Инженеры могут изучать детали изделия, выявлять недостатки и разрабатывать более эффективные решения. Это способствует инновациям и оптимизации производственных процессов.

Также стоит отметить, что использование 3D сканирования значительно ускоряет процесс разработки новых продуктов. Вместо того чтобы создавать прототипы вручную, компании могут быстро получать цифровые модели для дальнейшего тестирования и модификации [14].

В заключение, преимущества получения 3D моделей через реверс-инжиниринг и 3D сканирование заключаются в высокой точности, скорости процесса, возможности анализа и улучшения существующих объектов, а также в упрощении разработки новых продуктов. Эти технологии открывают новые горизонты для различных отраслей и способствуют повышению эффективности работы [11].

«Одной из ключевых задач, с которой мы столкнулись при разработке проекта по электрификации мотоцикла, является необходимость оцифровки и компоновки электрических компонентов таким образом, чтобы обеспечить

удобный доступ для быстрого демонтажа и ремонта узлов и деталей. Также важно в перспективе гарантировать эффективность транспортного средства.

Для решения данной задачи мы решили использовать 3D сканер. Мы остановили свой выбор на модели 3D-сканера от российского производителя Scanform. Scanform L5 – это ручной портативный 3D-сканер, который функционирует по принципу определения пространственного положения точек на поверхности исследуемого объекта с использованием оптической триангуляции. Этот процесс основан на данных, получаемых при проекции лазерных лучей на сканируемую поверхность. Сканер оснащен пятью лазерами и двумя оптическими камерами. Лазерные лучи создают на объекте искаженный узор, и с помощью снимков с камер фиксируется его форма. Затем в специализированной программе вычисляется расстояние до каждой точки в пределах видимости одного кадра, и на основе множества таких снимков формируется трехмерная модель в виде облака точек» [7].

«На первом этапе работы со сканером требуется провести калибровку измерительного оборудования. Калибровка подразумевает настройку параметров как лазеров, так и камер. Материалы, из которых изготовлен 3D-сканер, чувствительны к изменениям внешней температуры, что может повлиять на положение оптических элементов. Во время калибровки программное обеспечение корректирует оптические и геометрические параметры устройства.

На рисунке 7 представлен специализированный аппарат Scanform L5, с помощью которого были отсканированы компоненты для электрического мотоцикла на базе КТМ 690. А на рисунке 8 показана специальная калибровочная плитка, используемая для настройки камер этого аппарата. Плита выполнена из углепластика и входит в комплект с устройством. На ней нанесены темные фигуры различных размеров, а сама калибровка осуществляется в специальной программе, также поставляемой вместе с аппаратом» [16].



Рисунок 7 – Аппарат для 3Д сканирования объектов Scanform L5



Рисунок 8 – Плитка для калибровки аппарата Scanform L5

«Сначала нужно запустить программу и подключить донгл-ключ для работы программного обеспечения, а затем соединить сканирующее устройство с устройством. Далее следует перейти в раздел калибровки камер и начать настройки. На следующем этапе необходимо настроить лазеры, для чего нужно зайти в соответствующий раздел. Для калибровки лазеров рекомендуется найти ровную, хорошо освещенную поверхность и плавно перемещать сканер на расстоянии 25–55 см от линии, отображаемой в программе.

После завершения калибровки сканера необходимо подготовить поверхности объектов для 3D сканирования и их последующего преобразования в CAD модели. Для работы с 3D сканером Scanform L5 требуются светоотражающие маркеры, представляющие собой круглые

наклейки разных размеров с особыми светоотражающими центрами. Эти маркеры помогают Scanform L5 определять расстояние до объекта и его положение в пространстве. Специализированные маркеры можно увидеть на рисунке 9» [6].

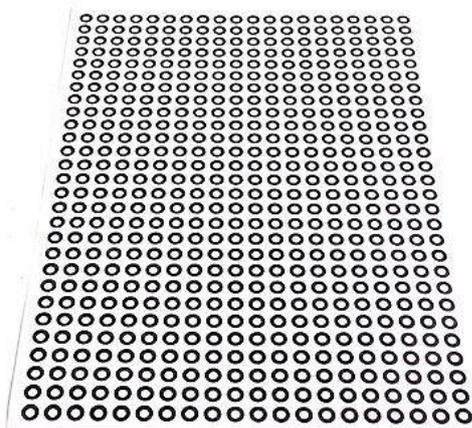


Рисунок 9 – Светоотражающие маркеры для 3Д сканирования

«Светоотражающие маркеры имеют ключевое значение на этапе обработки, отсканированной CAD модели. Во время синхронизации сканов они помогают объединять данные с высокой точностью и скоростью.

Маркеры следует наносить не только на объект для сканирования, но и на поверхность, на которой он находится, чтобы обеспечить более точное положение объекта в пространстве.

В инструкции прописано, что маркеры не должны располагаться равномерно, так как это может привести к некорректному сканированию. Также запрещается устанавливать маркеры слишком близко друг к другу, на острые кромки или на неровные участки, так как это влияет на качество результатов. Расположение маркеров должно быть достаточно свободным и хаотичным, при этом расстояние между ними должно составлять не менее 40 мм. Кроме того, маркеры должны быть целыми, без повреждений, царапин или надрезов, так как их состояние непосредственно влияет на качество

сканирования. Инструкция также предписывает избегать замятий и неровностей на светоотражающих маркерах [20].

Маркеры могут быть различных типов установки: в виде наклеек на клеевой основе или магнитов. Для немаetalлических поверхностей предпочтительнее использовать клеевые маркеры, тогда как для металлических лучше подойдут магнитные, так как наклейки не всегда хорошо держатся на металле. Для правильного сканирования необходимо обеспечить, чтобы как минимум четыре маркера были в поле зрения камер устройства, так как они служат ориентирами для измерений» [15].

На рисунке 10 представлены светоотражающие маркеры магнитного типа.

Рисунок 10 – Светоотражающие маркеры магнитного типа

Во время проведения процедуры 3Д сканирования детали, очень важно определить тип поверхности детали, которые могут быть:

- гладкие,
- текстурированные,
- отражающие,
- прозрачные,
- многокомпонентные.

«К гладким поверхностям относятся детали, которые не имеют заметных дефектов, шероховатостей или текстур, например, архитектурные элементы и статуи. Текстурированные поверхности, напротив, характеризуются рельефом или текстурой и требуют дополнительной обработки. Некоторые материалы, такие как стекло, металл и глянцевый пластик, имеют отражающие свойства, что усложняет процесс сканирования. Для таких поверхностей рекомендуется использовать матирующий спрей, который представляет собой специальный

аэрозольный состав, уменьшающий отражения и блики, делая поверхность более матовой. Также имеются объекты, состоящие из нескольких различных материалов. В случае их сканирования необходимо применять комбинированные методы. В ходе сканирования стоит регулировать яркость лазеров, что поможет улучшить качество получаемого изображения объекта.

Каждая деталь мотоцикла KTM 690 будет подвергнута сканированию, а в качестве примера рассмотрим полный цикл сканирования фары. Эта деталь является частью светотехнического узла и устанавливается в фартук, состоящий из пяти компонентов.

Для сборки необходимо измерить точные габаритные и посадочные размеры фары. При выполнении сканирования метки целесообразно размещать как на платформе, так и на самой детали.

Внешний диаметр меток составляет 10 мм, внутренний – 6 мм. На рисунке 10 представлен матирующий спрей» [6].



Рисунок 11 – Аэрозольный матирующий спрей

«Затем необходимо настроить параметры 3D сканирования. Для этого следует перейти в раздел настроек специализированного программного обеспечения, которое идёт в комплекте с 3D сканером.

В ходе сканирования использовались стандартные настройки, предложенные программой, кроме разрешения. Разрешение определяет минимальное расстояние между зафиксированными точками на заданном расстоянии сканирования. Чем выше разрешение, тем плотнее получается облако точек. Если требуется высокая детализация 3D модели, стоит увеличить разрешение. В нашем случае детали не столь критичны, поэтому мы устанавливаем разрешение в 0,4 мм.

Далее нужно перейти к разделу поиска меток. С помощью камер программа идентифицирует и анализирует расположение каждого маркера. Запускаем процесс поиска меток, при этом следует равномерно перемещать 3D сканер по поверхности детали, на которой наклеены светоотражающие маркеры. Важно следить за индикатором, который указывает оптимальное расстояние между сканером и объектом. На рисунке 12 представлено облако светоотражающих маркеров, обнаруженных в пространстве, которые будут использованы для 3D сканирования детали» [18].

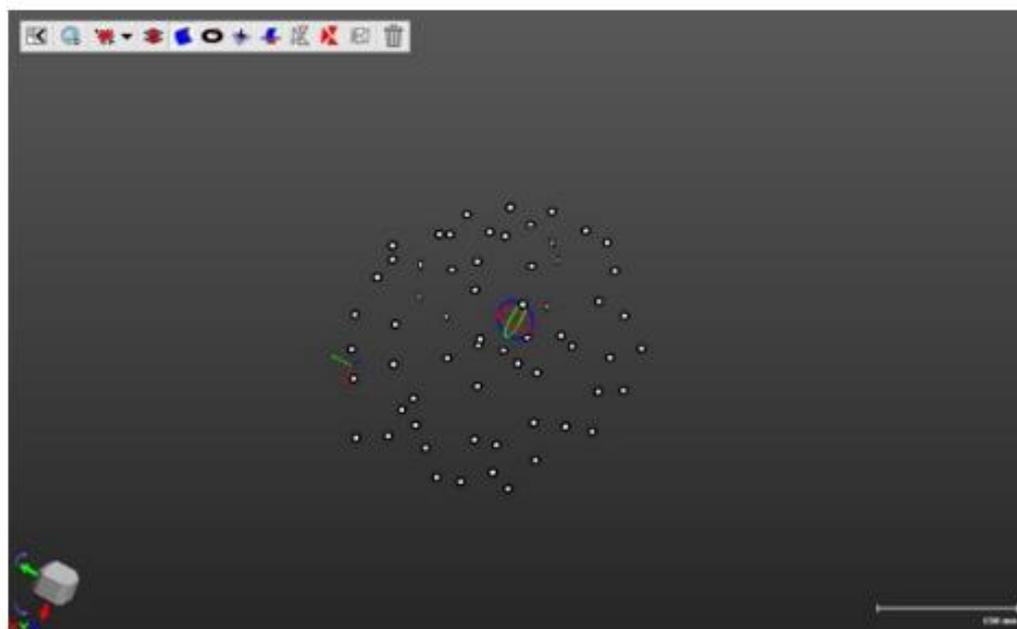


Рисунок 12 – Расположение светоотражающих маркеров в пространстве

«Теперь можно перейти к самому процессу 3D сканирования с помощью сканирующего устройства. Для достижения большей точности при переносе объекта в CAD необходимо выполнить несколько этапов сканирования детали с различных углов. Следует учитывать, что одной из основных трудностей является сканирование в сложно доступных участках детали. На рисунке 13 показан сам процесс сканирования детали, а также то, что происходит на первом этапе преобразования в CAD. Некоторые затруднительные для доступа участки могут не быть зафиксированы или могут быть сканированы не совсем корректно, однако все такие места можно будет вручную нарисовать на этапе постобработки» [19].

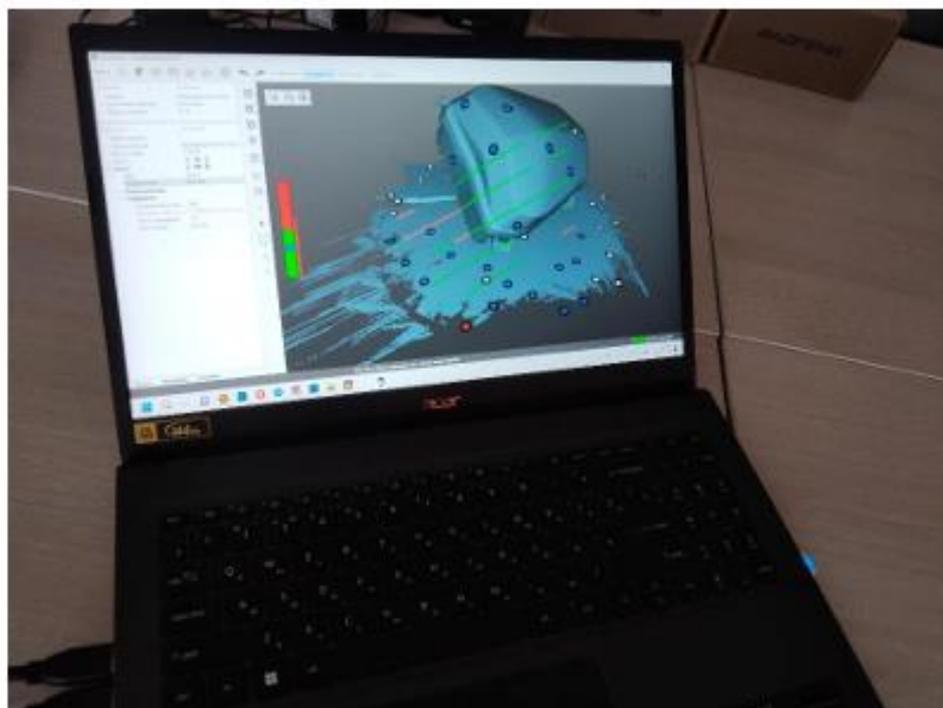


Рисунок 13 – Результат сканирования детали электрического мотоцикла KTM 690

«В ходе сканирования объекта сканер захватывал дополнительные элементы, такие как платформа, на которой находилась сканируемая деталь, а также объекты за её пределами. Эти лишние объекты затем нужно будет удалить с помощью специализированного программного обеспечения.

Светоотражающие маркеры, которые также были зафиксированы и перенесены в САД вместе с моделью детали, можно оставить до завершения финальной обработки, так как они помогут в точном объединении сканов с минимальными погрешностями.

Объединение сканов выполняется в разделе облака точек. Существует два метода объединения: автоматический и полуавтоматический. Автоматический метод достаточно прост – для него нужен инструмент «объединение сканов через маркеры», который обеспечивает точное выравнивание объектов в трехмерном пространстве без вмешательства пользователя. Полуавтоматический метод включает в себя ручной поиск общих точек: необходимо определить как минимум 5 точек на общей площади двух сканов и выполнить операцию точного выравнивания. Эту процедуру следует повторять до тех пор, пока погрешность не станет приемлемой. Поскольку на нашем объекте есть светоотражающие маркеры, мы используем автоматическое выравнивание.

Следующий этап работы включает обработку облака точек. Здесь нужно воспользоваться инструментом "Поверхность" для построения поверхности сканов. В этой вкладке также доступен инструмент "заполнение дыр", который автоматически заполняет пустоты в модели, улучшая её целостность. Кроме того, необходимо использовать инструмент для ручного выравнивания. На рисунке 14 можно увидеть процесс настройки поверхности детали относительно координат, который осуществляется вручную с помощью программы» [4].

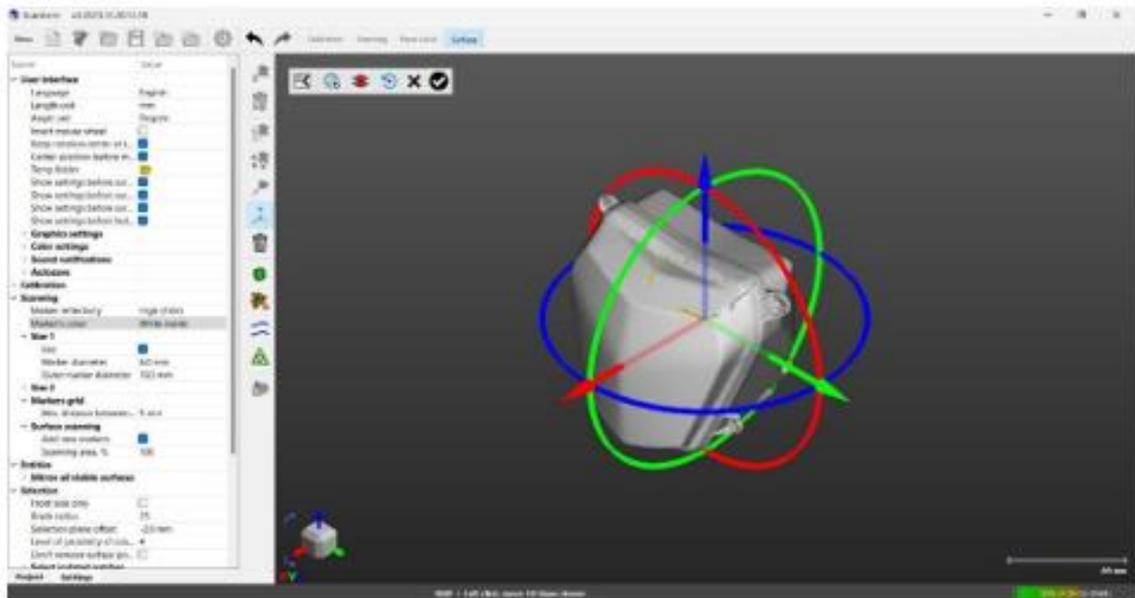


Рисунок 14 – Выравнивание скана относительно системе координат

«После того как выравнивание детали завершено, её следует импортировать в CAD-программу для проведения постобработки скана. Лучшим вариантом для загрузки детали в программное обеспечение является формат STL, так как он наиболее распространён в области CAD-моделей. STL-файл необходимо экспортировать в специализированное ПО, в данном случае Siemens NX. Процесс обработки 3D-моделей после сканирования включает удаление лишних элементов и восстановление данных сканирования, что приводит к созданию твердотельной 3D-модели детали. Сначала необходимо исправить все недостатки, оставшиеся на полигональной модели, удалив избыточные элементы с помощью инструмента «вырезать».

Для преобразования полигонального 3D-скана в полноценную твердотельную 3D-модель можно использовать два основных метода. В первом методе применяется модуль поверхностного моделирования, в ходе которого задаются поля точек, соединяются их грани, а затем с помощью команды «заметание» создаются поверхности, что в итоге даёт твердотельную 3D-модель детали. Второй метод включает использование команды «Авто поверхность», при которой программа 3D-моделирования пытается

самостоятельно преобразовать скан в поверхность, однако этот подход потребует больше времени на дополнительную доработку. В нашем случае оптимальным вариантом будет полное ручное проектирование. Для этого следует использовать инструмент "Rapid Surfacing", который позволяет работать с поверхностями свободной формы. Прежде чем начать, необходимо провести условное упрощение полигональной модели, разделив её на сектора. Результаты деления поверхности детали на сектора представлены на рисунке 15» [8].

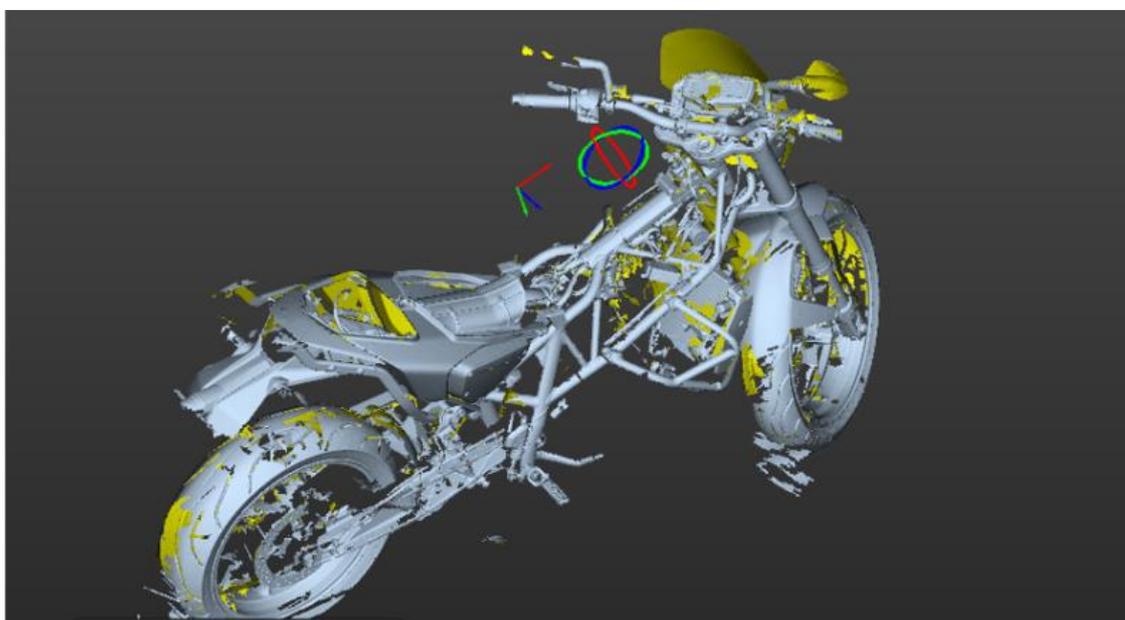


Рисунок 15 – Разделение детали после сканирования на секторные элементы

«Программа для 3D-моделирования самостоятельно выполняет процесс сегментации полигональной поверхности на секторные элементы. Однако для корректного выполнения этой задачи важно точно задать параметры программы, чтобы обеспечить нужное количество сегментов. Когда достигнуто оптимальное количество секторных элементов, значительно упрощается создание поверхностей первого и второго порядка.

На следующем этапе работы с моделью необходимо сформировать поверхности, соответствующие каждому из ранее созданных секторов. При

использовании методик поверхностного моделирования с секторными элементами важно, чтобы грани образовывались таким образом, чтобы они пересекались и могли быть обрезаны. Как только все поверхности будут объединены, программа автоматически сформирует твердое тело, заполнив все пустоты. Конечный результат, представляющий собой твердотельную 3D-модель сканируемой детали, показан на рисунке 16» [1].



Рисунок 16 – Конечная твердотельная 3Д модель

«Работы проводятся в таком же порядке для каждого узла мотоцикла, после чего следует перейти к сборке общей цифровой модели мотоцикла. Для этого было решено полностью отсканировать мотоцикл. В процессе сканирования было использовано 396 маркеров, выполнено 5 отдельных сканов, которые затем были объединены.

Далее наступает этап полной сборки цифровой модели мотоцикла, где каждый элемент располагается в модели в соответствии с его физическим местоположением на мотоцикле. Базовые точки служат для точного позиционирования компонентов относительно друг друга. Проводится проверка совместимости и соответствия деталей с учётом их размеров, форм и функций. Этот этап является крайне важным для правильной установки и эксплуатации мотоцикла. Цифровая модель также корректируется и оптимизируется для повышения её точности, производительности и реалистичности. Конечная 3D-модель электрического мотоцикла на базе KTM 690 представлена на рисунке 17» [21].

Рисунок 17 – CAD-модель электрического мотоцикла на базе KTM 690

Выводы по разделу

В данном разделе была рассмотрена методика проведения реверс инжиниринга путем 3D сканирования и преобразовании полученного скана в твердотельную КАД модель. Данный метод является достаточно быстрым и точным путем получения необходимых моделей для последующей их модификации.

3 Расчет прочности шасси мотоцикла после ремоторизации

«После завершения полной замены двигателя в мотоцикле КТМ 690, который ранее использовал двигатель внутреннего сгорания, на новый электрический мотор, необходимо провести оценку прочности и крутильной жесткости шасси. Поскольку предыдущая силовая установка добавляла конструкции шасси дополнительные параметры жесткости, важно проверить, как это изменилось.

Изучение рамы электрического мотоцикла, который утратил более 20% жесткости, обеспечиваемой ДВС, будет осуществляться с помощью имитации бокового изгиба при прохождении поворота, а также анализа боковых сил, возникающих в местах соприкосновения шин с дорогой на скорости 120 км/ч.

В исходной конструкции рамы КТМ 690 20% жесткости приходилось на силовой агрегат. После его удаления необходимо оценить оставшуюся крутильную жесткость рамы и определить зоны, подверженные деформациям и напряжениям. Также следует учесть, что в процессе замены двигателя рама претерпела определенные модификации, требующие дополнительной валидации. Такой анализ поможет выявить потенциальные проблемные участки и внести своевременные изменения.

Во время маневров в повороте рама подвержена крутящим и изгибающим нагрузкам. Недостаточная жесткость конструкции может привести к деформации, что повлечет за собой возможные сбои в работе различных систем мотоцикла. Поэтому крайне важно провести глубокий анализ для определения потенциальных рисков и разработки необходимой стратегии их устранения.

Во время проведения симуляции имитируется дорожная ситуация, при которой угол поворота руля мотоцикла максимальный, и нагрузка приходится от пятна контакта шины с дорожным покрытием, максимальный угол руля можно увидеть на рисунке 18» [12].



Рисунок 18 – Поворот руля мотоцикла

Во время прохождения поворота на большой скорости шасси мотоцикла может испытывать крутящую нагрузку до 3,5 кН. На рисунке 19 можно увидеть деформацию рамной конструкции мотоцикла, возникающую при приложении нагрузки в 3,5 кН.

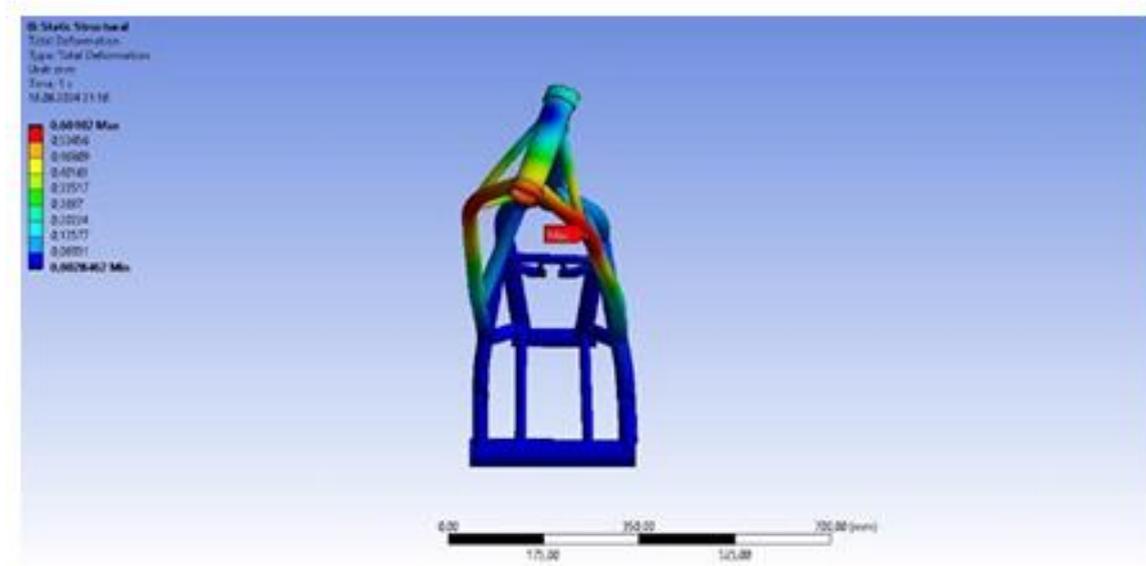


Рисунок 19 – Деформация рамы мотоцикла во время симуляции

На рисунке 19 можно увидеть, что во время симуляции, имитирующей критические нагрузки при прохождении поворота на высокой скорости, деформация шасси не превышает 0,7 мм, что является допустимым отклонением, и показывает, насколько данное шасси безопасно.

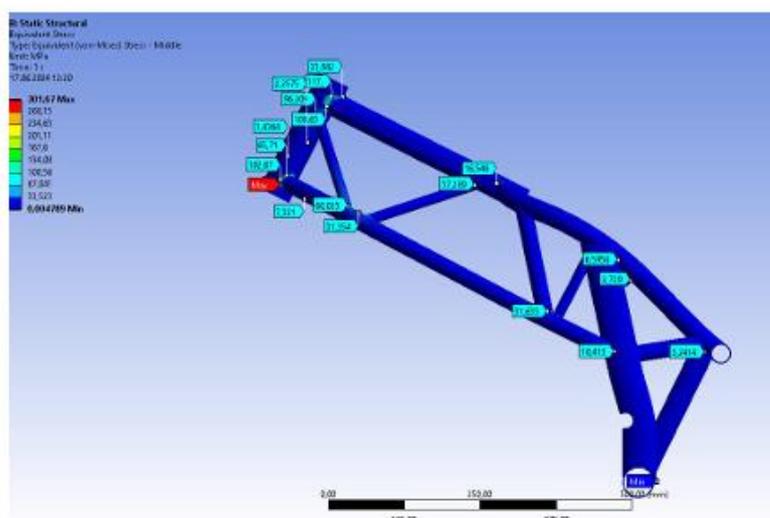


Рисунок 20 – Напряжения в шасси, возникающие во время симуляции

«Чтобы удостовериться, что рама имеет хорошую конструкцию и способна выдерживать нагрузки во время резких маневров, необходимо, чтобы возникающие напряжения не превышали предел текучести материала, из которого она изготовлена. В ходе симуляции для рамы КТМ 690 было установлено максимальное значение напряжения в 300 Мпа, тогда как предел текучести этой рамы находится в диапазоне 600–750 Мпа.

На рисунке 21 видно, что наибольшая концентрация напряжений во время поворота наблюдается в стакане. Самой уязвимой точкой является место соединения стакана с основной несущей трубой. Эти результаты свидетельствуют о том, что, несмотря на повышенные напряжения в этой области, материал рамы по-прежнему сохраняет свою прочность и устойчивость под нагрузками.

Анализ жесткости конструкции, проведенный после замены силовой установки, предоставил ценные сведения. Валидация показала, что заменённый мотор не оказал значительного влияния на жесткость конструкции при заданных условиях эксплуатации. Запас прочности оказался достаточно высоким, что позволяет использовать эту раму для проектирования и установки новой силовой установки. Данное решение является достаточно безопасным и не повлияет существенно на управляемость мотоцикла. В заключение можно сказать, что дальнейшая модернизация этого транспортного средства с использованием данной рамы является целесообразной и многообещающей, обеспечивая высокие эксплуатационные характеристики и надежность в различных условиях» [10].

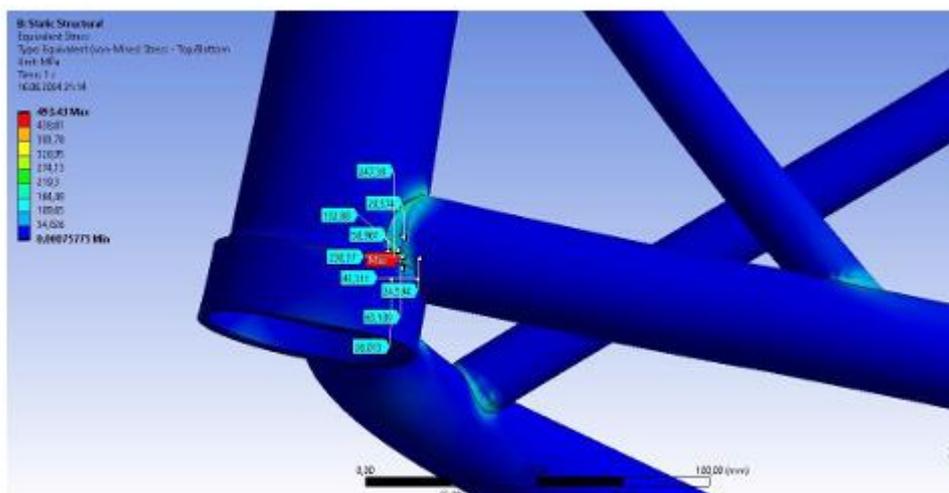


Рисунок 21– Максимальное напряжение в конкретном соединении

Выводы по разделу

В данном разделе был проведен КАЕ анализ пространственной рамы спортивного мотоцикла в целях валидации прочностных характеристик рамной конструкции.

4 Безопасность и экологичность технического объекта

«Производство мотоцикла с электрическим двигателем связано с рисками для работников, поэтому весь процесс должен быть регламентирован нормами охраны труда, которые гарантируют безопасность сотрудников при изготовлении компонентов. При разработке соответствующей документации акцент делается на опыт зарубежных компаний в машиностроении, а также на актуальные законы Российской Федерации.

В документе изложены все ключевые требования и необходимые сведения для обеспечения безопасных условий труда, а каждый сотрудник проходит инструктаж и регулярно участвует в семинарах по повышению квалификации, что способствует созданию безопасной рабочей среды на производстве.

Для изготовления мотоцикла с электрической силовой установкой требуются слесарные, сварочные и сборочные операции» [17].

Операционные ведомости по слесарным работам представлены в таблице 8.

Таблица 8 – ОВПФ слесарных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
1	2	3	4
Слесарные работы	– резка металла, – сверление, – резьбонарезание	Углошлифовальная машина, струбцина, керн, шуруповерт, молоток, метчик и метчикодержатель	Физические: механизмы, изделия, вращающиеся части, острые кромки, повышенная запыленность и загазованность

«Для данного сотрудника установлены следующие требования по технике безопасности:

– использовать в работе оборудование, инструменты и средства малой механизации строго по назначению, следуя инструкциям производителя;

- выполнять только те задачи, которые были поручены непосредственным руководителем, и не передавать их другим лицам без его разрешения;
- поддерживать чистоту и порядок на рабочем месте, включая проходы к нему; при возникновении захламления рабочей зоны следует организовать её уборку;
- регулярно проходить проверки знаний по технике безопасности и охране труда;
- периодически проходить медицинские осмотры и проверки состояния здоровья;
- соблюдать правила внутреннего распорядка предприятия;
- следить за соблюдением мер пожарной безопасности и охраны труда на рабочем месте. ОВПФ сварочных работ указаны в таблице 9» [13].

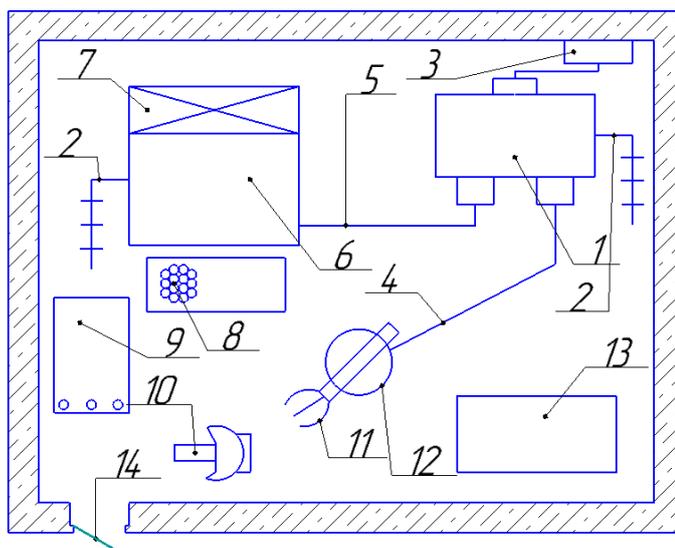
Таблица 9 – ОВПФ сварочных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
1	2	3	4
Сварочные работы	Сварка деталей	Сварочная оснастка, источник сварочного тока, пинцы, ручной инструмент.	Физические: механизмы, изделия, острые кромки, повышенная запыленность и загазованность, высокая температура, ультрафиолетовое и инфракрасное излучение, излишняя яркость сварочной дуги, опасность ожогов, возможность взрыва баллонов и систем, электромагнитные поля.

Для данного работника установлены следующие правила техники безопасности:

- необходимо провести подготовку и уборку перед осуществлением сварочных работ;
- проверка рабочего оборудования на исправность и его настройка осуществляется до начала работы;

- регулярно проводятся проверки знаний по технике безопасности и охране труда;
- предполагается периодическая проверка здоровья и медицинские осмотры;
- важно соблюдать внутренний распорядок на предприятии;
- необходимо придерживаться норм пожарной безопасности и правил охраны труда на рабочем месте.



1 – сварочный аппарат; 2 – заземление; 3 – силовой провод питания; 4 – шланг для подачи проволоки и газа; 5 – обратный токоподводящий провод; 6 – верстак; 7 – вентиляция; 8 – резиновая изоляция рабочего; 9 – проволока; 10 – щиток; 11 – пистолет для подачи проволоки и газа; 12 – стул; 13 – ящик для электродов; 14 – дверной проем.

Рисунок 22 – Рабочие место для работ со сварочным аппаратом

«Основные обязанности сварщика включают в себя:

- сварку конструкций из различных материалов, обладающих требуемыми характеристиками;
- выполнение прихваток деталей;
- устранение дефектов путём зачистки;
- резку простых элементов с использованием дуговой сварки;

– контроль качества сварного шва и его проникаемости в материал после завершения сварки с применением специализированных инструментов.

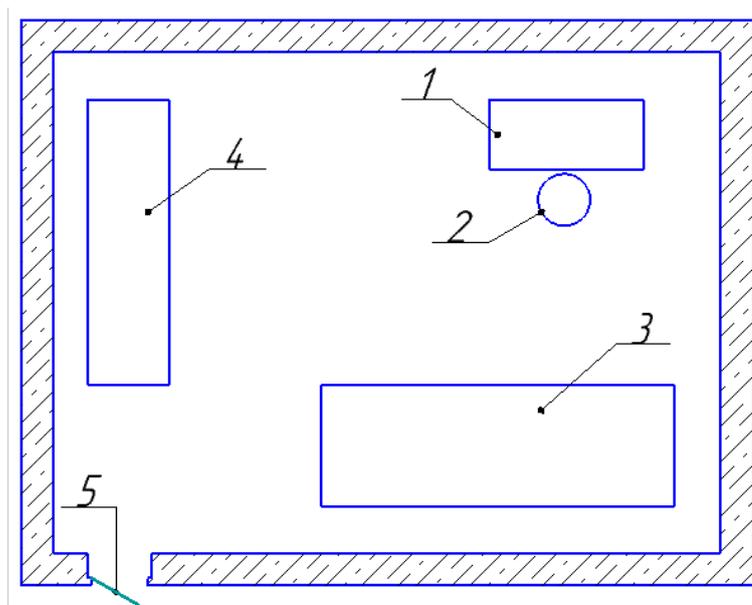
ОВПФ сборочных работ указаны в таблице 10» [18].

Таблица 10 – ОВПФ сборочных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
Сборочные работы	Сборка узла с упором на чертежи и модели	– стол для работы, тиски, инструмент (зубило, молоток, напильник), инструменты для измерения (линейка, штангенциркуль), электроинструмент.	Физические: – части разрушившегося изделия, острые края; – повышенный уровень шума; – абразивная пыль, воздействие электрического тока

Для данного сотрудника действуют следующие нормы техники безопасности:

- знакомство с инструкциями по безопасности;
- поддержание промышленной санитарии (содержание рабочего места в чистоте);
- соблюдение дисциплины на рабочем месте;
- правильное использование оборудования в соответствии с его назначением;
- в случае выявления поломки – необходимо информировать ремонтную группу.



1 – рабочее место; 2– стул; 3 – верстак; 4 – инструментальный шкаф; 5-дверной проем.

Рисунок 23 – Рабочее место для работ со сварочным аппаратом

«Ключевые обязанности сборщика включают в себя:

- сборку деталей или узлов конструкции в специальном приспособлении согласно чертежу или модели;
- проверку точности установки компонентов с использованием измерительных инструментов в соответствии с чертежами;
- предоставление комментариев для дальнейшей обработки данной детали.

В заключение данного раздела следует отметить, что выполнение всего спектра мероприятий и мер, разработанных для данных ОВПФ, позволит практически полностью защитить работников во время осуществления технологического процесса» [15].

Заключение

В рамках данной работы был выполнен трехмерный сканинг спортивного мотоцикла КТМ 690, после чего создана окончательная твердотельная САД-модель для последующих этапов модификации и ремоторизации транспортного средства.

В первом разделе рассмотрена актуальность темы, а также проведен анализ текущего состояния рынка конкурирующих моделей. Выполнено детальное сравнение характеристик и составлена циклограмма развития рынка.

Во втором разделе подробно описана процедура работы с 3D-сканером, а также изложены основные принципы реинжиниринга. Шаг за шагом представлен процесс получения точной трехмерной модели.

Третий раздел посвящен методам валидации рамы мотоцикла с использованием методов компьютерного инженерного анализа (КАЕ), направленных на проверку ее прочностных характеристик и безопасности.

В результате исследования была создана точная 3D-модель КТМ 690 с помощью сканирования, которая затем была оптимизирована для использования в твердотельном моделировании и дальнейших разработках.

Список используемых источников

1. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя в 3-х т. Т.3. 8-е изд. перераб. и доп. под ред. И. Н. Жестоковой. М.: Машиностроение, 2001. 864 с.
2. Арутюнян Г. А., Евсеев К. Б. Разработка подвески спортивного автомобиля класса «Формула студент» // Молодежный научно-технический вестник. № 1. 2013. С. 148–154.
3. Вишняков Н. Н., Вахламов А.Н. Автомобиль: Основы конструкции: учеб, для ВУЗов специальности «Автомобили и автомобильное хозяйство» 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1986, 304 с.
4. Волкова Е. И., Двоглазова Н. А. Методика расчёта бизнес-презентации в рамках проекта Formula Student // Ежегодный сборник трудов "Студенческие инженерные проекты". 2017. С. 198–204.
5. Волкова Е. И., Шерстобитова О. О. Разработка пространственной рамы для гоночного болида Black Bullet // VII выпуск журнала "Точная наука". 2017. С. 18–20.
6. Горелов В. А., Косицын Б.Б. Разработка комплексной системы управления движением спортивного автомобиля класса «Формула Студент» по заданной трассе // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. С. 45–55.
7. Кисуленко Б.В. Краткий автомобильный справочник. М.: Автополисплюс, 2005. 560 с.
8. Лукин П. П. Конструирование и расчёт автомобиля. М.: Машиностроение, 1984. 376 с.
9. Маркина А. А., Чепкасов С.Н., Бережная М.А. Разработка комплексной системы управления движением спортивного автомобиля класса «Формула Студент» по заданной трассе // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2019. С. 1–12.

10. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2003. 782 с.
11. Маталин А. А. Технология машиностроения: учеб. для студ. вузов, обуч. по спец. 151001 напр. "Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроит. производств". Изд. 3-е, стер. ; Гриф УМО. Санкт-Петербург: Лань, 2010. 512 с.
12. Петрова М. С. Охрана труда на производстве и в учебном процессе: учеб. пособие. М.: ЭНАС, 2006. 232 с.
13. Раскин А.М. Основы расчета и указания к дипломному проектированию агрегатов шасси автомобиля. Саратов: Ротапринт, 1975. 68 с.
14. Суслов, А. Г. Технология машиностроения: учеб. для вузов / А. Г. Суслов. - 2-е изд., перераб. и доп.; Гриф МО. – М.: Машиностроение, 2007. - 429 с.
15. Formula SAE URL: <http://www.fsaeonline.com/> (дата обращения: 22.05.2024).
16. Franca J. D., Gazziro M. A., Ide, A. N., & Saito, J. H. (2005, September). A 3D scanning system based on laser triangulation and variable field of view. In Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on (Vol. 1, pp. I-425).
17. Joonbum P., Kyoungseok H., Cooling and dynamic performance of electric vehicle traction motor adopting direct slot cooling method, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 147 p.
18. Martín G., Vergara R., Fabián C. Tommasini, applying 3D scanning and printing technology in the replication of pinnae for head-related transfer function measurements, Applied Acoustics, 2024, 223 p.
19. Milliken, W. and Milliken, D., 1995. Race Car Vehicle Dynamics. 1st ed. United States of America: SAE Publications Group. pp. 857.
20. Pat's Corner - Back to Basics URL: <https://www.formulastudent.de/pr/news/details/article/pats-corner-back-to-basics/> (дата обращения: 11.12.2024).

21. Pothamsetty R., K., Muthumuniyandi Muthupandi, Duduku Mojeswararao, Numerical analysis on space frame chassis of a formula student race car, Materials Today: Proceedings, Part 3, 2022, 759 p.