

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)

15.04.01 Машиностроение
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Эксплуатация транспортных средств
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему «Оптимизация конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов автомобиля
LADA Niva Legend»

Обучающийся

А.М. Перекрестов

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
Руководитель

канд. техн. наук, А.В. Зотов

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

Консультант

канд. филол. наук, М.М Бажутина

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

Содержание

Введение.....	3
1 Состояние вопроса. Общие положения	5
1.1 Основные сведения по конструкции кронштейна	5
1.2 Общие положения по разработке кронштейна	13
1.3 Технические требования к разработке кронштейна.....	15
2 Анализ требований к испытаниям кронштейна.....	24
2.1 Требования к эксплуатационным свойствам кронштейна	24
2.2 Обзор испытаний кронштейна.....	27
3 Расчет базовой конструкции кронштейна	31
4 Оптимизация конструкции кронштейна. Расчет на прочность.....	41
4.1 Оптимизация базовой конструкции кронштейна	41
4.2 Модальный анализ оптимизированной конструкции кронштейна....	51
4.3 Расчет на прочность оптимизированной конструкции кронштейна .	61
Заключение	67
Список используемой литературы и используемых источников.....	68
Приложение А Точки центра тяжести	72

Введение

Актуальность темы магистерской диссертации связана с тем, что в настоящее время все больше внимания отводят таким автомобилям отечественного производства, как автомобили семейства ВАЗ с двигателем 21214, или же LADA «Niva Legend», которые в настоящее время пользуются широким спросом у покупателей.

Автомобиль LADA «Niva Legend» оборудован двигателем, который был разработан советскими инженерами в 70-х годах прошлого века. И, если его нельзя назвать устаревшей конструкцией, то, по крайней мере, точно можно назвать конструкцией с использованием устаревших конструктивных и технологических решений. Задача модернизации или форсирования таких двигателей в эксплуатации приобретает особую актуальность в настоящее время. Эта задача имеет практическое значение с точки зрения повышения энергоэффективности автомобилей, что может стать важным фактором глобального ресурсосбережения на транспорте.

На данный момент в современные двигатели внутреннего сгорания применяют кронштейны вспомогательных агрегатов с упрощённой компоновкой.

Целью данной работы является оптимизация конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов автомобиля LADA «Niva Legend» по критерию снижения массы конструкции. В результате оптимизации будут улучшены эксплуатационные характеристики и качество кронштейна. Снижение массы кронштейна уменьшит общую массу конструкции, что может улучшить топливную эффективность транспортных средств, уменьшить нагрузку на механизмы и системы, снизить энергозатраты. Снижение массы способствует улучшению маневренности транспортных средств и механизмов, так как уменьшается инерция системы.

Более легкий кронштейн требует меньше материала для изготовления, что может снизить затраты на производство и логистику.

Практическая ценность работы заключается в возможности реализации оптимизированной конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов на предприятии АО «АВТОВАЗ».

Для достижения поставленной цели используется следующий метод исследования: оценка технических возможностей оптимизированной конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов автомобиля LADA «Niva Legend» с использованием аппарата математического моделирования и последующим анализом эксплуатационных характеристик в пакете автоматизированного проектирования.

Задачи работы:

- анализ требований к эксплуатационным свойствам кронштейна вспомогательных агрегатов, выявление недостатков;
- расчет базовой конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов на прочность;
- оптимизация конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов по результатам анализа проведенного расчета;
- расчет оптимизированной конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов;
- анализ полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в использовании современного метода вычислительного моделирования, такого как конечно-элементный анализ, который позволяет более точно спрогнозировать поведение кронштейна под действием различных нагрузок.

Использование этого метода для оптимизации конструкции кронштейна позволяет при минимальных затратах на моделирование уменьшить массу изделия без ущерба для его прочности и долговечности, оптимизировать конструкцию кронштейна для улучшения эксплуатационных характеристик, анализировать и предсказывать поведение кронштейна в экстремальных условиях эксплуатации.

1 Состояние вопроса. Общие положения

1.1 Основные сведения по конструкции кронштейна

«Конструкция кронштейна привода вспомогательных агрегатов автомобиля LADA «Niva Legend» остается неизменной практически с момента запуска автомобилей данного семейства» [19]. На данный момент кронштейн привода вспомогательных агрегатов автомобиля LADA «Niva Legend» применяется на 8-и клапанном двигателе ВАЗ 21214 объемом 1,7 л. В современных автомобилях конструкция кронштейна вспомогательных агрегатов по сравнению с автомобилем LADA «Niva Legend» намного компактнее и практичнее.

На рисунке 1 отображен привод вспомогательных агрегатов двигателя ВАЗ 21214 производства АО «АВТОВАЗ» со всеми навесными агрегатами: водяной насос, генератор, насос гидроусилителя руля (ГУР) и компрессор кондиционера. Весь комплекс навесных агрегатов составляет сложную систему привода вспомогательных агрегатов и занимает большую часть подкапотного пространства.

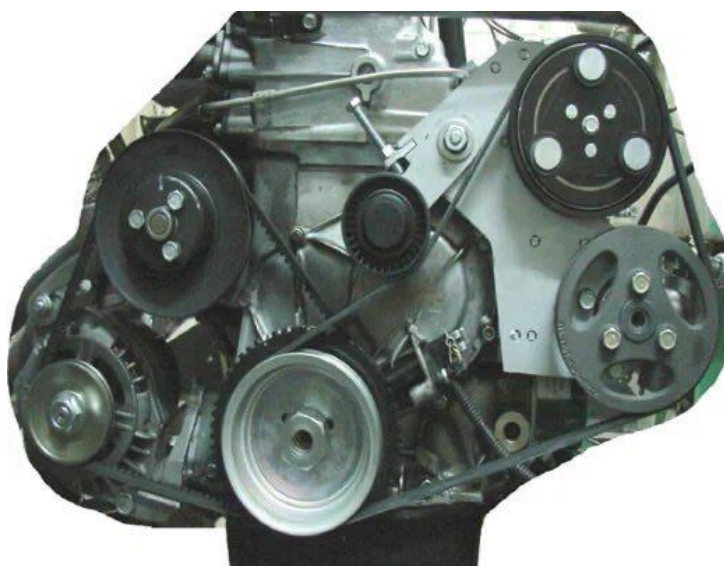


Рисунок 1 – Привод вспомогательных агрегатов двигателя ВАЗ 21214

На рисунке 2 изображен современный двигатель ВАЗ 21129 автомобиля LADA «Vesta».



Рисунок 2 – Двигатель ВАЗ 21129

Связующая роль между самим двигателем и навесными агрегатами (компрессор кондиционера и генератор) – практичный и компактный кронштейн вспомогательных агрегатов, выполненный из алюминиевого сплава АК12М2. Современные производители автомобилей давно перешли на использование в конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов материалов с пониженной удельной плотностью, что уменьшает итоговую массу автомобиля.

На рисунке 3 отображен привод вспомогательных агрегатов в конструкции, которого также применяется алюминиевый кронштейн.



Рисунок 3 – Двигатель ВАЗ 11182

«В автомобильном транспортном средстве двигатель опирается на кронштейны, которые соединены с основной рамой или каркасом автомобиля. Следовательно, во время его работы нежелательные вибрации, создаваемые двигателем, и неровности дороги могут напрямую передаваться на раму через кронштейны. Это может вызвать дискомфорт у пассажира (пассажиров) или даже привести к повреждению шасси» [6]. Когда рабочая частота или возмущение приближаются к собственной частоте тела, амплитуда колебаний увеличивается. Это явление называется резонансом. Это увеличение наиболее сильно в низкочастотных диапазонах до 50 Гц. Кроме того, при высоких

рабочих частотах серьезной проблемой становится еще и шум. Следовательно, демпфирование этих вибраций двигателя становится важной функцией монтажных кронштейнов [2]. Упор на анализ шума и вибрации кронштейна является одним из наиболее важных направлений при проектировании автомобиля сегодня. «Если резонансные частоты кронштейнов близки к рабочим частотам двигателя, то большая амплитуда вибрации может привести к его усталостному разрушению или поломке, что сократит его расчетный или желаемый срок службы» [4].

Гашение вибрации может быть обеспечено либо с помощью отдельных амортизаторов (антивибрационных креплений), либо путем соответствующего выбора материала и размеров кронштейна. Кроме того, кронштейны также подвергаются прогибу при статических и динамических нагрузках. Это отклонение должно быть в допустимых пределах.

На первых этапах разработки конструкции вспомогательных агрегатов во всей своей совокупности, оговариваются и уточняются необходимые параметры отдельных узлов, и только после этого происходит разработка кронштейна привода вспомогательных агрегатов. Кронштейн должен учесть компоновку привода целиком и полностью. Выбор типов вспомогательных агрегатов проводится совместно с ответственными подразделениями службы главного конструктора, директора по инжинирингу продукта (СГК-ДИП) с определением их габаритных размеров, требований и основных характеристик – потребляемой мощности и момента инерции.

Вспомогательные агрегаты в схеме привода рекомендуется располагать с учётом величины их потребляемой мощности для снижения нагрузок на подшипники. Наиболее мощный потребитель рекомендуется устанавливать на тяговой ветви ведущего шкива [9].

Расположение шкивов и роликов в схеме привода должно обеспечивать достаточные углы обхвата шкивов приводным ремнем и приемлемую длину каждой ветви ремня между соседними шкивами (роликами).

В таблице 1 указаны рекомендуемые параметры для проектирования привода вспомогательных агрегатов.

Таблица 1 – Рекомендуемые углы обхвата шкивов

Типы шкивов	Угол обхвата α , град	
	для привода рабочей стороной ремня	для привода наружной стороной ремня
Шкив коленчатого вала	более 135	не рекомендуется
Шкив компрессора кондиционера	более 90	–
Шкив генератора	более 120	–
Шкив водяного насоса	более 60	более 135
Шкив насоса гидроусилителя руля	более 90	не рекомендуется

Недостаточные углы обхвата способствуют проскальзыванию ремня, снижению коэффициента полезного действия (КПД) ременной передачи и возникновению шума в системе привода при эксплуатации.

При наличии технико-экономических и компоновочных ограничений применяются механизмы натяжения ремня жёсткого типа [7], состоящего из ролика, закреплённого на кронштейне, перемещаемого при установке ремня и жёстко фиксируемого при эксплуатации. Применение механизма требует проведения периодических работ по контролю и натяжению ремня в процессе эксплуатации автомобиля.

Применение систем привода без механизма натяжения носит ограниченный характер, и используется, как правило, для привода одного вспомогательного агрегата.

Нагрузки на подшипники агрегатов привода и роликов рассчитываются при наличии схемы привода, величины предварительного натяжения ремня, диапазона оборотов вращения ведущего шкива, моментов инерции агрегатов и должны не превышать максимально допустимых значений для каждого компонента.

Общие технические требования:

– конструкция компонентов системы привода должна обеспечивать расположение шкивов и роликов на одной оси, совпадающей с осью симметрии приводного ремня, параллельно друг другу;

– для систем привода с поликлиновым ремнем существуют допустимые отклонения взаимного расположения шкивов. Необходимая точность расположения шкивов зависит от конструкции ремня, схемы привода, потребляемых мощностей агрегатов. При этом не должны превышать осевое смещение ремня более 1 мм на 100 мм длины ветви ремня и угловое смещение более чем на 1,4 градуса. По согласованию с изготовителем, могут применяться другие параметры.

Также существуют и двусторонние поликлиновые ремни. Основные преимущества и недостатки конструкции такого ремня:

– возможность компактного размещения вспомогательных агрегатов при их большом количестве (3 шт и более);

– возможность уменьшения количества направляющих роликов;

– более жёсткие требования к точности взаимного расположения шкивов;

– более жёсткие требования к физико-механическим свойствам ремня.

Конструкции компонентов и их применение в составе двигателя должны обеспечивать требования по надёжности в соответствии с отечественными стандартами или стандартами предприятия.

Для увеличения срока службы ремня высоконагруженных систем привода, на шкивы может устанавливаться обгонная муфта [27]. Рекомендуется применение обгонной муфты при использовании генераторов с высокой потребляемой мощностью.

Ролики применяются для натяжения ремня, обеспечения необходимых углов охвата шкивов и формируют трассу ремня системы привода. Применяются как ролики с гладкой наружной поверхностью, так и с поликлиновым профилем. Количество роликов в системе привода должно

быть минимально достаточным для обеспечения технических требований к системе.

«Для роликов с гладкой наружной поверхностью необходимо выполнение требований по допустимым перекосам и обеспечение контакта всей наружной стороны ремня с поверхностью ролика с учётом точности их взаимного расположения» [18].

На рисунке 4 отображена схема привода вспомогательных агрегатов на действующем кронштейне вспомогательных агрегатов.

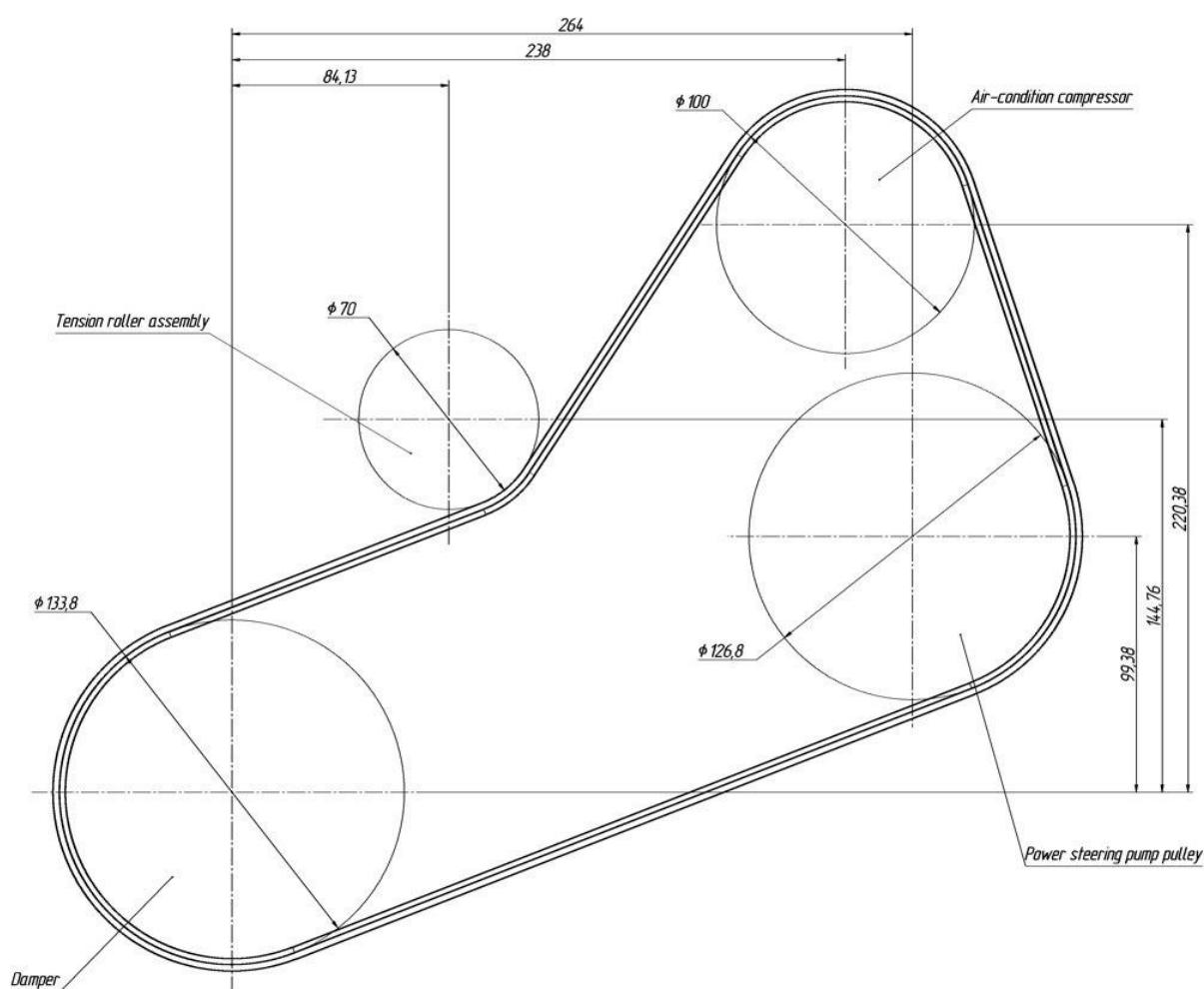


Рисунок 4 – Схема привода вспомогательных агрегатов

Схема выполнена со всеми требованиями, рекомендуемыми к приводу вспомогательных агрегатов. Непрактично полностью перерабатывать схему и

менять расположение всех агрегатов при оптимизации конструкции кронштейна, поэтому при разработке кронштейна вспомогательных агрегатов все технологичные отверстия в кронштейне для крепления навесного оборудования можно оставить неизменными.

Технические требования к кронштейнам вспомогательных агрегатов натяжных механизмов:

- кронштейны должны обладать достаточной жесткостью и соответствовать по резонансной частоте колебаний требованиям изготовителей вспомогательных агрегатов. При отсутствии рекомендаций частота собственных колебаний кронштейна должна находиться в пределах 250 Гц;

- количество размеров конструктивных элементов кронштейнов, влияющих на точность расположения шкивов, должно быть минимальным, допуски на них должны выбираться с учетом требований по точности расположения шкивов;

- конструкция кронштейнов должна быть компактной для обеспечения возможности размещения в составе двигателя в подкапотное пространство нужного семейства автомобилей;

- для снижения трудоемкости сборки в условиях массового производства применяется модульная конструкция кронштейнов в сборе с компонентами системы привода;

- в качестве материала для изготовления кронштейнов применяются алюминиевые, магниевые сплавы, стали и чугуны. Наиболее широкое применение имеют кронштейны из алюминиевых сплавов, полученные методом литья под высоким давлением с последующей механической обработкой, отвечающие современному уровню развития техники.

Таким образом, были найдены и проанализированы основные сведения по требованиям к конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов для дальнейшей ее оптимизации.

1.2 Общие положения по разработке кронштейна

В современном автомобильном производстве потребность в лёгких конструкционных материалах увеличивается, так как всё больше внимания уделяется сокращению расхода топлива и уменьшению выбросов вредных веществ. В массовом производстве традиционно предъявляются строгие требования к надежности технологического процесса.

Для производителей большое значение имеет себестоимость продукции, и поставка компонентов из материала с улучшенными характеристиками по низкой цене является одним из важных требований.

В секторе производства легковых автомобилей конкуренция обуславливает уделять большое внимание комфорту в дальних путешествиях.

Резонансная частота вибрации возникает из-за неуравновешенных масс внутри корпуса двигателя. Вибрация от двигателя полностью передается по всем контактирующим деталям, где происходит неполное ее гашение. Лучше всего с вибрациями справляются опоры крепления двигателя [13].

Но на привод вспомогательных агрегатов оказывают влияние вибрационные силы непосредственно от двигателя. Все агрегаты привода вспомогательных агрегатов должны выдерживать частоту колебания двигателя.

«В дизельном двигателе возникает большее вибровозбуждение, чем в бензиновом, поскольку дизельный двигатель имеет более высокую степень сжатия» [10]. Из-за вибраций кронштейн привода вспомогательных агрегатов двигателя может выйти из строя, поэтому, оптимизируя форму и толщину кронштейна привода вспомогательных агрегатов двигателя, или создавая полностью новую форму, необходимо учитывать возможные разрушения изделия из-за вибраций не той частоты.

Структурная оптимизация – важный инструмент для оптимального проектирования. Сравнение, с точки зрения веса и производительности компонентов, методов структурной оптимизации является эффективным

инструментом для производства продукции более высокого качества при меньших затратах.

Умеш С. Горпаде [28] разработал кронштейн крепления двигателя автомобиля и сосредоточился на определении его собственных частот. Они рассмотрели три материала для кронштейна подвески двигателя:

- алюминиевый сплав;
- магниевый сплав;
- серый чугун.

При проведении модального анализа им было обнаружено, что собственные частоты серого чугуна низкие, и соответственно будет больше помех при вибрации кронштейна двигателя. Поэтому он исключил серый чугун.

С точки зрения модального анализа, алюминиевый и магниевый сплавы показывают близкие значения собственной частоты, но, при этом, магниевый сплав имеет лучшую прочность при низких значениях напряжения, поэтому предпочтительней выбирать магниевый сплав, как более качественный материал.

Прамоуд Валундж [25] сосредоточился на использовании материала низкой плотности для кронштейнов, а также на уменьшении веса самого кронштейна. При анализе конструкции с меньшим весом выполняются предварительная и постобработка анализа поведения конструкции. Затем используется экспериментальная установка для определения уровня напряжения исследуемых материалов.

Было определено, что алюминиевый сплав имеет допустимую собственную частоту, а напряжения находятся примерно на том же уровне, что и предел текучести материала.

Далее, уменьшив толщину стенок кронштейна из алюминиевого сплава на 2 мм, после моделирования и анализа были также получены удовлетворяющие результаты, как по собственной частоте, так и по критерию

прочности. Таким образом, они добились снижения массы кронштейна, сохранив, при этом, его эксплуатационные характеристики [25].

Мы рассмотрели общие требования, предъявляемые к разработке кронштейна привода вспомогательных агрегатов, что поможет в дальнейшем, опираясь на данные положения, провести грамотно оптимизацию конструкции.

1.3 Технические требования к разработке кронштейна

Кронштейн привода вспомогательных агрегатов играет важную роль в снижении шума и вибрации, вызванных двигателем [24], и, таким образом, влияет непосредственно на уровень комфорта при вождении автомобиля.

Рассматриваемый кронштейн привода вспомогательных агрегатов применяется на автомобиле LADA «Niva Legend».

В состав привода вспомогательных агрегатов данного автомобиля входят:

- демпфер коленчатого вала;
- кронштейн привода вспомогательных агрегатов;
- компрессор кондиционера;
- насос ГУР;
- поликлиновой ремень;
- механизм натяжения поликлинового ремня;
- демпфер коленчатого вала;
- шкив водяного насоса;
- клиновой ремень;
- генератор.

Данный привод вспомогательных агрегатов разделяется на две системы, где работают одновременно два ремня – поликлиновой и клиновой.

Кронштейн привода вспомогательных агрегатов предназначен для удержания таких агрегатов как компрессор кондиционера, насос ГУР, механизм натяжения и, дополнительно, служит еще опорой для абсорбера.

Кронштейн является громоздким и выполнен из материала с большей удельной плотностью. Первостепенная задача – уменьшить собственный вес кронштейна и определить, способен ли кронштейн выдержать нагрузки от веса агрегатов при работающем двигателе.

На рисунках 5-7 представлены изображения различных видов кронштейна.

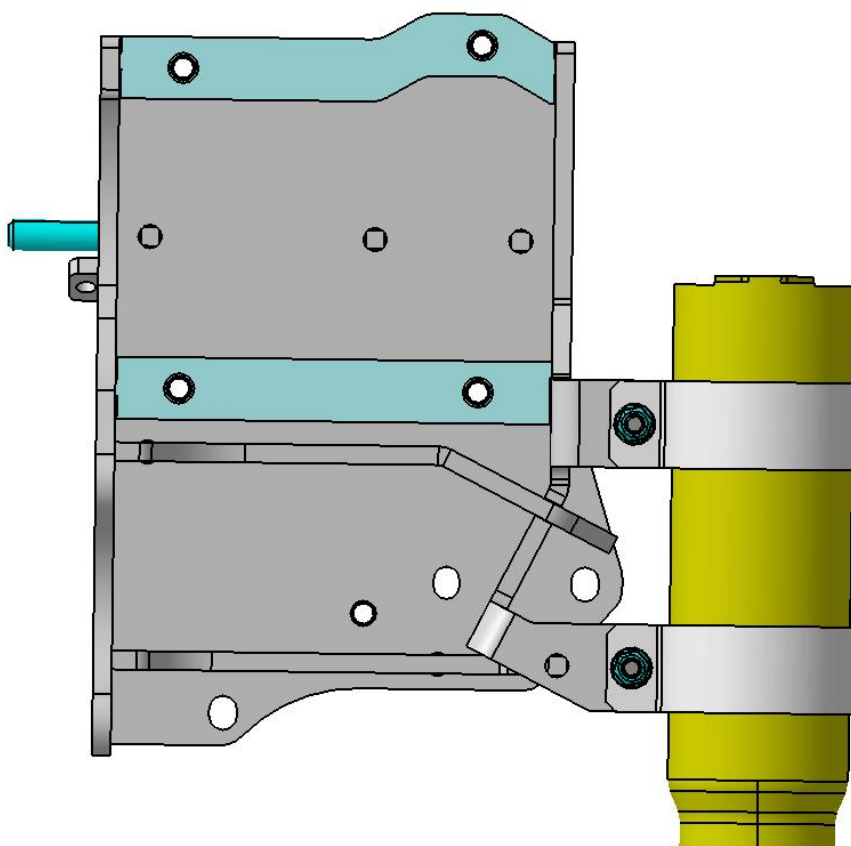


Рисунок 5 – Кронштейн, вид спереди

Кронштейн является сложной геометрической фигурой, состоящей из простых геометрических тел, выполненных как единое целое. Он состоит из

нескольких, в основном, плоских стальных пластин, соединенных в определенной конфигурации.

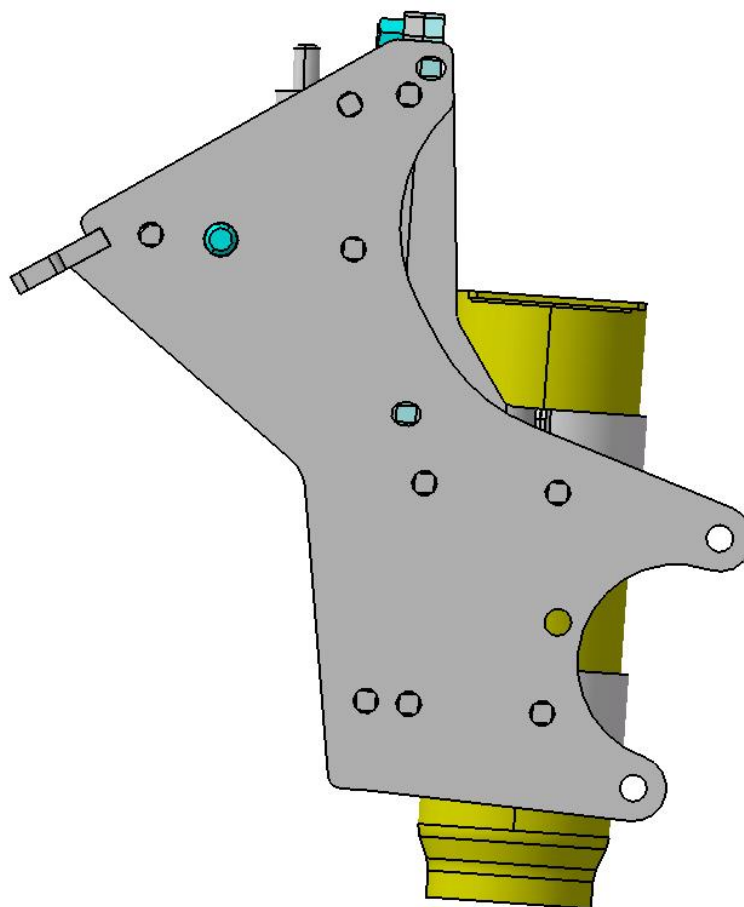


Рисунок 6 – Кронштейн, вид слева

Кронштейн обычно оснащен крепежными элементами, такими как болты, гайки или шпильки, которые используют для крепления агрегатов к нему и для закрепления его к кузову автомобиля. Так, на рисунках 5, 7 можно видеть, как к кронштейну вспомогательных агрегатов крепится абсорбер посредством двух болтовых соединений.

В основном кронштейн состоит из стальных пластин СтЗпс, неразъемно соединенных между собой посредством сварки.

«На изготовление изделия из стальных пластин, его механическую обработку, а также затраты на материал для его создания приходится

неоправданные расходы, несмотря на конечный результат в виде готовой детали» [19].

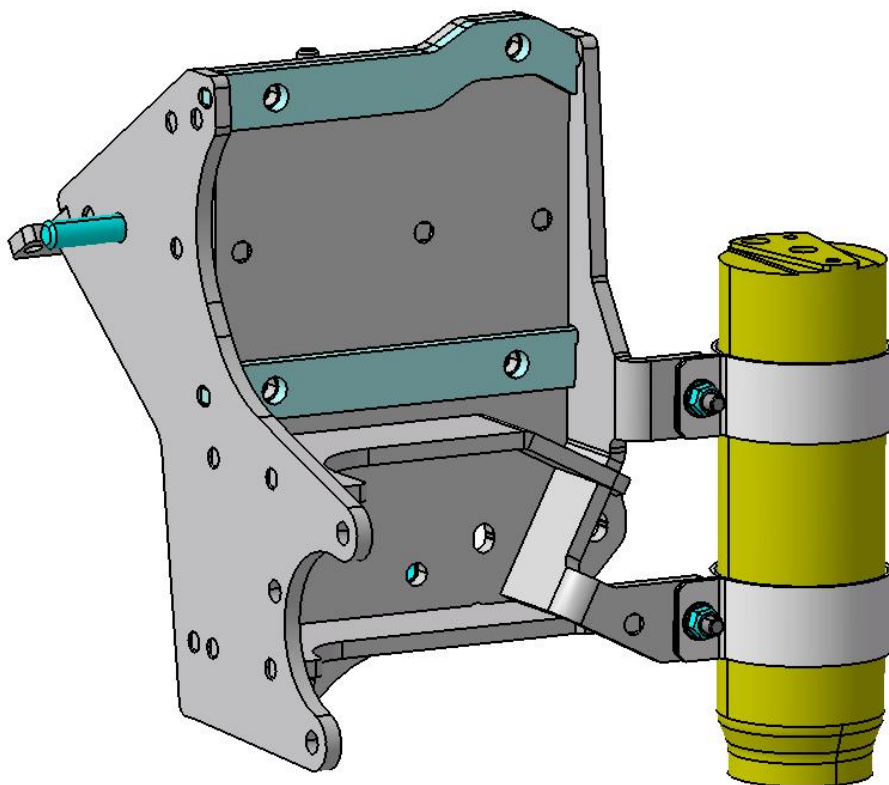


Рисунок 7 – Кронштейн, изометрический вид

Полное переосмысление технологической составляющей кронштейна вспомогательных агрегатов является одним из возможных решений по снижению стоимости с сохранением всех эксплуатационных характеристик или, даже, их улучшению.

Для данной детали основные требования к изготовлению конструкции следующие:

- легкость;
- соответствие технологичных размеров;
- высокая жесткость;
- высокая прочность;
- компактность;

– простота в изготовлении.

В защищенной мной ранее бакалаврской работе была предложена и спроектирована новая модель кронштейна (рисунок 8). Данная модель кронштейна была сконструирована под изготовление методом литья под давлением алюминиевого сплава АК12М2.

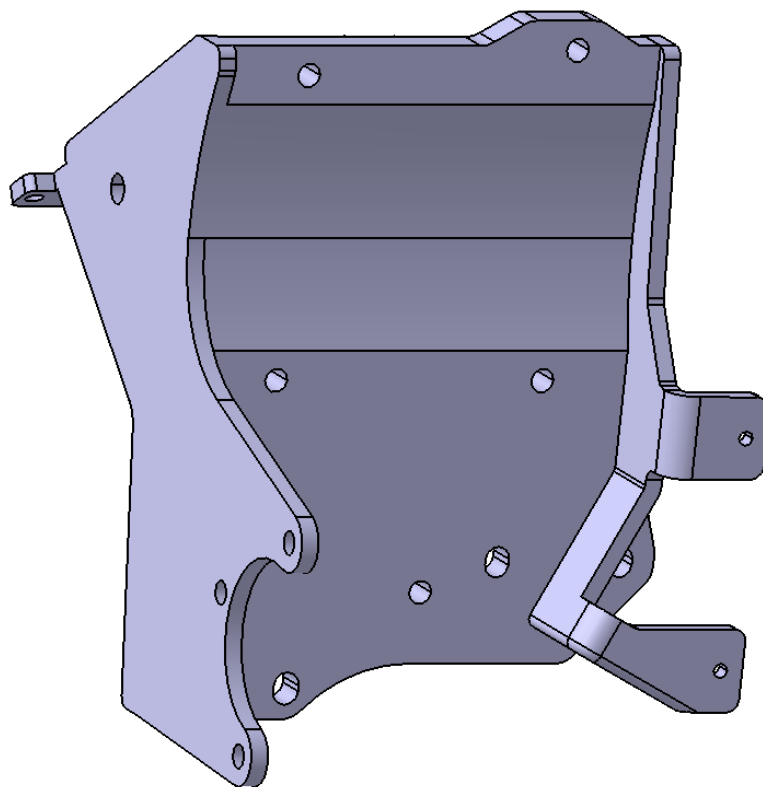


Рисунок 8 – 3D-модель кронштейна привода (АК12М2)

В бакалаврской работе также была доказана экономическая эффективность такой замены материала и метода изготовления, а в магистерской диссертации стоит задача доказательства работоспособности спроектированной конструкции.

Сначала необходимо провести статический анализ данного кронштейна для проверки конструкционной прочности конструкции. Результаты будут проанализированы на напряжения и деформации. И в зависимости от полученных результатов конструкцию кронштейна необходимо будет

протестировать на возможность изменения толщины стенок, но, сохранив при этом, технологичность конструкции.

В настоящее время разработано достаточное количество современного программного обеспечения для виртуального тестирования и проверки конструкции изделия. Проектирование кронштейна двигателя для автомобиля будет выполнено с использованием анализа методом конечных элементов.

Кронштейн привода вспомогательных агрегатов двигателя выполняет важную функцию надежного удержания компонентов привода вспомогательных агрегатов. Правильная геометрия и расположение агрегатов привода вспомогательных агрегатов обеспечивает способность выдерживать рабочие нагрузки во время всего срока службы.

Кронштейн привода вспомогательных агрегатов, поддерживающий навесные агрегаты, подвергается высоким статическим и динамическим нагрузкам, а также большому количеству вибраций. Когда рабочая частота или возмущение приближается к собственной частоте тела, амплитуда вибраций увеличивается.

«Потребность в легких конструкционных материалах в автомобильной промышленности возрастает по мере того, как возрастает потребность в снижении выбросов и экономии топлива» [15].

Уменьшение веса автомобиля для повышения экономичности – это тот тип задачи, с которой сейчас сталкивается автомобильная отрасль. Данная работа направлена на оптимизацию конструкции кронштейна крепления навесных агрегатов.

При проектировании конструкции транспортного средства очень сложно добиться более высокой жесткости и прочности, а также минимизировать вес компонента. Как упоминалось ранее – кронштейн привода вспомогательных агрегатов используется для крепления собственно этих самых агрегатов и конструктора здесь сталкиваются с определенными проблемами, такими как ограниченное пространство под размещение всех

этих агрегатов, стоимость современных материалов, вес конструкции кронштейна.

Компрессор кондиционера, установленный на кронштейне двигателя, играет важную роль в автомобильной системе кондиционирования воздуха. Неуравновешенные силы, создаваемые двигателем и компрессором, вызывают колебания всей конструкции. Поэтому компрессор кондиционера для снижения вибрационных сил поддерживается как раз кронштейном привода вспомогательных агрегатов автомобиля.

Выделим этапы проектирования кронштейна:

– определить центры тяжести расположения элементов двигателя. Центром тяжести называют точку, через которую проходит равнодействующая всех сил тяжести, действующих на материальные точки, на которые разбито рассматриваемое тело, при любом положении тела в пространстве. При анализе сил центр тяжести оказывается очень важным параметром;

– выбор надлежащего положения для каждого отдельного компонента. То есть надлежащее расположение отдельного компонента кронштейна, такого как, например, ребра, монтажные отверстия двигателя, монтажные отверстия компрессора, должно быть выбрано в соответствии с проектным и непроектным пространством;

– выбор коэффициента жесткости для каждого крепления. Коэффициент жесткости для крепления выбирают таким образом, чтобы можно было узнать сопротивление деформации рассматриваемого компонента;

– наложение граничных условий на крепления. Здесь должны назначаться надлежащие граничные условия в соответствии с системой действующих сил;

– оптимизация конструкции кронштейна;

– разработка окончательного дизайна САД-модели изделия в соответствии с полученными данными.

На этапе проектирования очень важна концепция оптимизации топологии. Это обычная привычка проектировать в зависимости от опыта инженера-конструктора на ранней стадии разработки продукта.

Надежные и удовлетворительные результаты с проверенной структурной моделью получаются путем оптимизации.

Оптимизация топологии в основном направлена на минимизацию объема без влияния на прочность кронштейна или его жесткость. Параметр жесткости определяется как ограничение на максимально допустимое смещение кронштейна. В результате должна быть получена оптимизированная CAD-модель кронштейна с учетом проектного пространства под кронштейн.

Анализ методом конечных элементов является одним из наиболее подходящих методов нелинейного анализа инженерных задач. В качестве входных геометрических данных требуется сетка конечных элементов.

Сетка может быть создана непосредственно на цифровой модели изделия. Поскольку модель CAD представляет собой сложную геометрию, при проектировании есть возможность вносить изменения для получения надлежащих результатов путем:

- изменения материала;
- изменения размера сетки;
- температурного режима.

В этих процессах задействовано различное программное обеспечение, связанное с механикой. Программное обеспечение, используемое в нашей работе для CAD-моделирования компонента – CATIA (V5), а программное обеспечение, используемое для создания сетки и проведения анализа поведения – ANSYS.

После выявления всех характеристик кронштейна вспомогательных агрегатов методом анализа конечными элементами необходимо будет:

- провести оптимизацию конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов;

– провести анализ оптимизированной конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов.

«Задача инженера – спроектировать надежный и долговечный автомобиль, отвечающий потребительским свойствам, будь то легковой автомобиль для повседневного использования по городу или грузовой автомобиль, выполняющий перевозки габаритных грузов на дальние расстояния» [23].

Для обеспечения выполнения данной задачи необходимо придерживаться прописанных методик, ГОСТов, документов предприятий, а также набранному опыту инженеров в сфере автомобилестроения и стремиться к изучению новых технологий.

Выявленные технические требования к разработке кронштейна вспомогательных агрегатов дают нам необходимые данные и знания для оптимизации уже имеющейся конструкции кронштейна.

В качестве вывода по первому разделу, про состояние существующего кронштейна вспомогательных агрегатов, можно отметить, что были найдены и проанализированы основные сведения по требованиям к конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов для дальнейшей ее оптимизации.

Также были рассмотрены общие требования, предъявляемые к разработке кронштейна привода вспомогательных агрегатов, что поможет в дальнейшем, опираясь на данные положения, провести грамотно оптимизацию конструкции.

В заключении раздела можно сказать, что конструкцию кронштейна возможно улучшить, сделав её более компактной и снизив общий вес.

2 Анализ требований к испытаниям кронштейна

2.1 Требования к эксплуатационным свойствам кронштейна

Первым этапом разработки конструкции кронштейна является автоматизированное проектирование (САПР).

Этот этап включает в себя создание модели в зависимости от расположения двигателя на шасси. На этом этапе моделирования ключевым моментом является использование пакета CREO – масштабируемое, обеспечивающее взаимодействие параметрическое решение для максимальной оптимизации, повышения качества 3D-проектирования изделий и сокращения времени окупаемости. В геометрии кронштейна выбор материала является важным фактором, влияющим на вес. Чтобы вес свести к минимуму, используют материал с меньшей удельной плотностью.

На следующем этапе ставится задача – создание трехмерной сетки для двухкомпонентных моделей САПР. Для построения сетки и анализа используется соответствующее программное обеспечение, например ANSYS. Тетра-сетка позволяет получать достаточно точные результаты. Параметры используемых крепежных элементов (болтов), удерживающих кронштейн на двигателе также влияют на прочность конструкции.

«Основные параметры механических свойств при анализе:

- модуль Юнга, E , МПа;
- коэффициент Пуассона;
- плотность, ρ , кг/м³;
- предел текучести, МПа» [12].

Изменения в выборе материала могут быть внесены после того, как будет проведён анализ с неудовлетворительными результатами.

Следующий этап представляет собой непосредственно анализ конструкции на сопротивление воздействию статических и динамических сил. Когда система неподвижна, применяется статический анализ. Расчёт включает

в себя систему сил. Отталкиваясь от веса навесных элементов, на кронштейн прикладываются статические и термические нагрузки, затем определяются прогиб и деформации. Все нагрузки, в конечном счете, и дают информацию, по которой проводится анализ.

На шасси имеется n -е количество мест установки двигателя. В соответствии с положением центра тяжести двигателя и положения кронштейна теоретически рассчитывается статическая передача веса на кронштейн [8]. Этот вес дополнительно распределяется на места крепления болтов, удерживающих двигатель.

Динамические силы включают в себя те нагрузки, которые испытывает транспортное средство в движении и которые меняются со временем [11]. Для этого учитываются максимальные перегрузки при ускорении, торможении и прохождении поворотов.

Параметры, влияющие на расчёт:

- нагрузка при ускорении;
- нагрузка при прохождении поворотов.

Этап ограничений представляет собой определение граничных условий, что очень важно при анализе методом конечных элементов.

Следующим этапом является модальный анализ, который определяет реакцию на внешние переходные колебания. Модальный анализ показывает значения, соответствующие собственным частотам без учета каких-либо приложенных сил. Полученные значения важны, поскольку они показывают направление отклонения и свободную амплитуду вибрации для каждой собственной частоты.

Поскольку кронштейн предварительно нагружен, модальный анализ должен это учитывать. Максимальная амплитуда отклонения при свободной вибрации проверяется для каждой конструкции на каждой из резонансных частот, лежащих в рабочем диапазоне частот. В расчёт могут быть включены следующие характеристики:

- холостой ход, об/мин;

- максимальное количество оборотов вала в минуту;
- среднее количество оборотов вала в минуту;
- частота вибрации, f (Гц);
- количество цилиндров двигателя;
- число оборотов за цикл, n .

В итоге рассчитывается рабочий диапазон частот.

Далее происходит расчёт на усталостный ресурс, поскольку кронштейны подвергаются воздействию постоянно меняющихся нагрузок.

Сначала рассчитываются приблизительно среднее и амплитудное напряжения, затем от расчетов выносливости – предел усталости.

От предела усталости зависит срок эксплуатации кронштейна.

При анализе моделирования максимальное напряжение по Мизесу должно быть ниже предельного значения предела текучести выбранного материала. Но данное значение является неполным критерием для запуска разработки, даже если анализ не показывает неудовлетворительных результатов.

Исходя из многолетнего опыта и долгой практики инженеров-конструкторов, при проектировании конструкции кронштейнов привода вспомогательных агрегатов главной особенностью и первостепенной задачей является анализ собственной частоты колебаний конструкции кронштейна. Кронштейны должны обладать достаточной жесткостью и соответствовать по резонансной частоте колебаний требованиям изготовителей вспомогательных агрегатов. При отсутствии рекомендаций частота собственных колебаний кронштейна должна находиться в пределах 250 Гц.

Количество размеров конструктивных элементов кронштейна, влияющих на точность расположения шкивов, должно быть минимальным. Допуски на них должны выбираться с учетом требований по точности расположения шкивов.

Конструкция кронштейна должна быть достаточно компактной для возможности размещения в составе двигателя в подкапотное пространство семейства автомобилей ВАЗ.

Исходя из вышесказанного, для проверки конструкции кронштейна первоочередным с наименьшей затратой времени и ресурсов этапом при разработке кронштейна является прочностной расчет в системе автоматизированного проектирования.

2.2 Обзор испытаний кронштейна

Любой кронштейн привода вспомогательных агрегатов производства АО «АВТОВАЗ» подвергается двум основным видам испытаний:

- испытание на безотказность работы в составе двигателя в пределах 600 ч по пройденным циклам;
- испытание на устойчивость к вибрационным нагрузкам.

Цель испытаний – оценить безотказность кронштейна привода вспомогательных агрегатов.

Критерии безотказности кронштейна привода вспомогательных агрегатов при испытаниях:

- отсутствие проблем при установке кронштейна;
- прочность кронштейна при работе двигателя.

Испытание на безотказность в составе двигателя устанавливается инструкцией АО «АВТОВАЗ», которая устанавливает порядок испытания поршневого бензинового двигателя внутреннего сгорания с принудительным искровым зажиганием или поршневого дизельного двигателя внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия на испытательном стенде с целью определения безотказности двигателя при полной нагрузке. Испытуемая деталь устанавливается на двигатель, подвергающийся испытанию. Продолжительность испытаний по циклам для двигателей составляет 600 ч.

При достижении наработки по циклам должны определяться параметры двигателя по внешней скоростной характеристике и расход моторного масла на угар.

Моторный стенд, на котором производятся испытания опытных деталей, должен передавать все условия, возникающие при движении автомобиля в городе:

- температура двигателя;
- температура окружающей среды;
- нагрузка на двигатель коробкой передач;
- нагрузка на генератор силой тока 60 А.

На рисунке 9 представлен моторный бокс испытаний двигателя с опытными деталями, в частности, показан стенд и процесс мониторинга показателей двигателя.

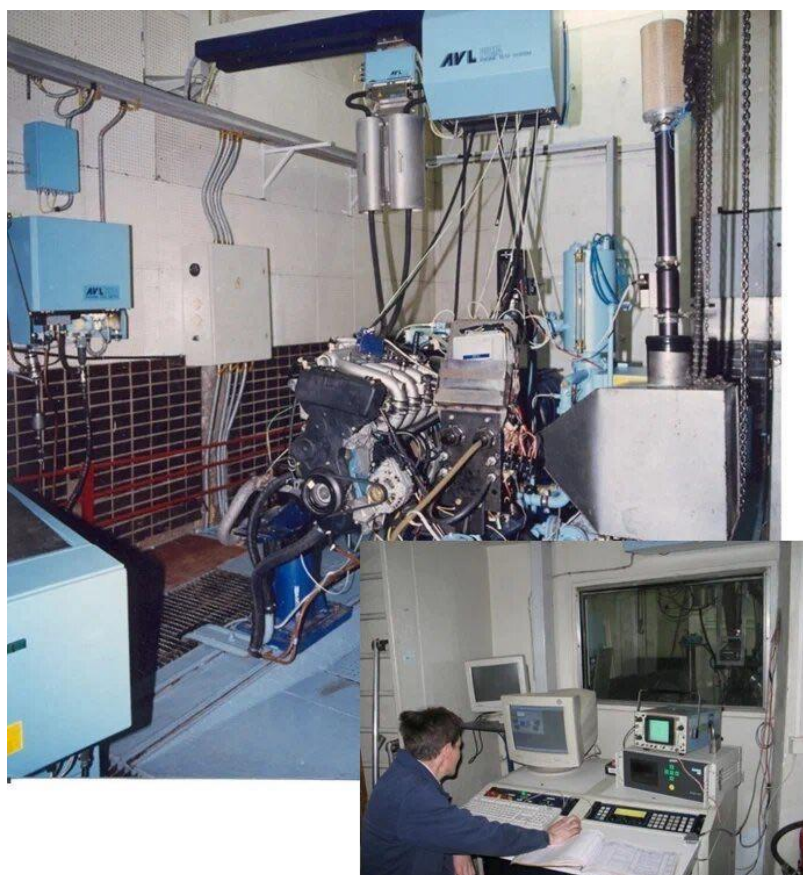


Рисунок 9 – Испытательный моторный бокс

Испытания на устойчивость кронштейна к вибрационным нагрузкам проходят на вибростенде. Вибрация, которая должна быть приложена с помощью генератора вибрации к деталям или компонентам, обеспечивается в следующих частотных диапазонах:

- от 25 до 500 Гц – для деталей без электроники;
- от 25 до 1000 Гц – для деталей или компонентов с электроникой;
- для некоторых деталей или компонентов, которые очень чувствительны к высоким частотам, диапазон частот может быть расширен за пределы 1000 Гц (датчик температуры двигателя и генератора).

Перед каждым испытанием на выносливость должны быть проведены соответствующие измерения для определения собственных режимов работы детали или исследуемого компонента.

Каждая деталь или компонент имеет соответствующий частотный предел, ниже которого влияние частоты собственных колебаний будет максимально ограничено. Эта частота соответствует, как минимум, концу первой гармоники двигателя (Н1,5 в 3 цилиндрах; Н2 в 4 цилиндрах и Н3 в 6 цилиндрах) плюс 10 %.

Если частота собственных колебаний ниже необходимого частотного предела, то настоятельно рекомендуется провести десять миллионов циклов на вибростенде для деталей, состоящих исключительно из сплавов железа, и 20 миллионов циклов на вибростенде для деталей из других.

Проведение испытаний по методике, описанной выше, является самым точным и наглядным исследованием, способным наверняка определить, способна ли испытываемая деталь выдержать нагрузки от внешних и внутренних факторов.

На кронштейн привода вспомогательных агрегатов воздействуют две системы сил:

- первая система возбуждающих сил – это вес самого кронштейна вместе с весом всех агрегатов, закрепленных на нем;

– вторая система возбуждающих сил – это моторная гармоника, возникающая вследствие работы двигателя внутреннего сгорания.

Стандартная процедура для анализа конструкции кронштейна – это модальный анализ кронштейна привода вспомогательных агрегатов на нахождение собственной частоты колебаний. Модальный анализ проводится во избежание резонанса моторной гармоника, где частота колебаний в два раза больше частоты оборотов коленчатого вала, и резонанса кронштейна привода вспомогательных агрегатов. При возникновении резонанса амплитуда колебаний возрастает в несколько раз.

Минимальная собственная частота колебаний кронштейна вспомогательных агрегатов должна быть 200 Гц, что соответствует примерно 6000 об/мин двигателя внутреннего сгорания. Обычно это значение берут с запасом – от 230 до 250 Гц. При таких значения частота вращения коленчатого вала двигателя составляет 6200 об/мин. Далее обычно срабатывает отсечка, так как при таких значениях уже не проводятся испытания двигателей внутреннего сгорания по методикам АО «АВТОВАЗ».

Самыми затратными по ресурсам и времени в современном мире являются натурные испытания. Этот этап, в любом случае необходимо будет выполнить, но после автоматизированного проектирования.

В качестве вывода по второму разделу можно отметить, что для оценки состояния конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов необходимо провести ряд испытаний.

Для проверки конструкции кронштейна первоочередным с наименьшей затратой времени и ресурсов этапом при разработке кронштейна является прочностной расчет в системе автоматизированного проектирования.

В магистерской диссертации будет проведен только прочностной расчет в системе автоматизированного проектирования.

3 Расчет базовой конструкции кронштейна

В первую очередь проведем анализ собственной частоты кронштейна вспомогательных агрегатов, модель которого была разработана ранее при работе над бакалаврской работой (рисунок10).

Данная модель кронштейна вспомогательных агрегатов имеет массу 2 кг.

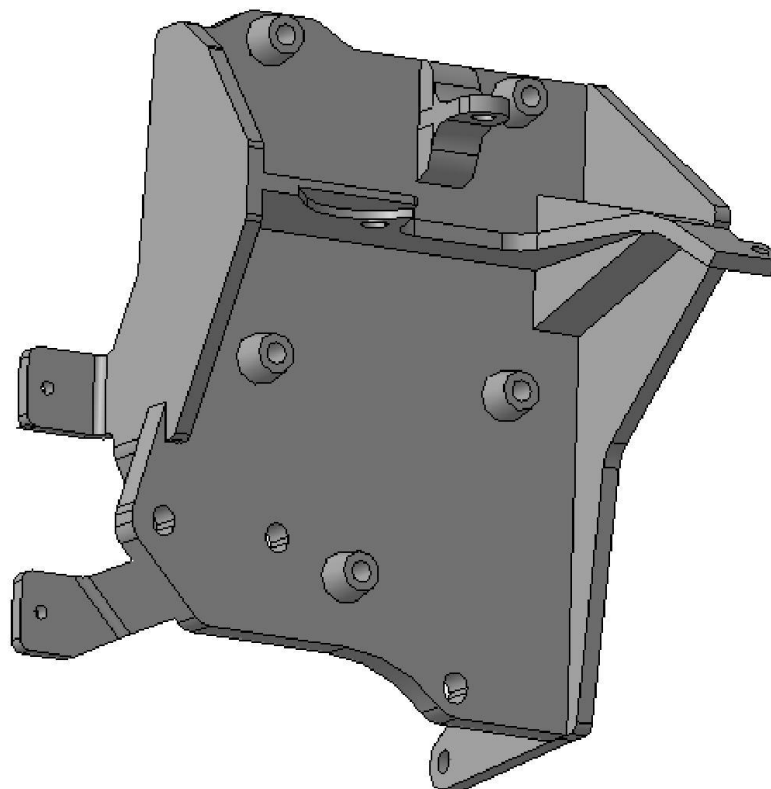


Рисунок 10 – Кронштейн привода вспомогательных агрегатов

Первоочередная задача при анализе 3D-модели кронштейна – определить частоту собственных колебаний. «По частоте можно определить характер движения, осуществляемого системой (кронштейном) на частоте колебаний, соответствующей собственной» [3]. Форма колебаний показывает, какие относительные деформации (перемещения) будет испытывать конструкция в случае возникновения резонанса на соответствующей собственной частоте. Анализ проводится в несколько этапов:

- выбор типа анализа;
- загрузка геометрической модели в программу;
- назначение свойств материала детали;
- создание конечно-элементной сетки на модели;
- закрепление детали за точки опоры;
- выбор выходных параметров.

Для начала расчёта в программе автоматизированного проектирования был выбран модуль модального анализа.

Ниже, на рисунке 11 представлены характеристики материала, используемые при расчете кронштейна привода вспомогательных агрегатов.

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	2770	kg m ⁻³
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
Isotropic Elasticity		
Alternating Stress R-Ratio	Tabular	
Tensile Yield Strength	2,8E+08	Pa
Compressive Yield Strength	2,8E+08	Pa
Tensile Ultimate Strength	3,1E+08	Pa
Compressive Ultimate Strength	0	Pa
Isotropic Thermal Conductivity	Tabular	
Specific Heat, C _p	875	J kg ⁻¹ C ⁻¹
Isotropic Relative Permeability	1	
Isotropic Resistivity	Tabular	

Рисунок 11 – Физико-механические свойства алюминиевого сплава

В расчете используется 3D-модель кронштейна вспомогательных агрегатов автомобиля LADA «Niva Legend», которая была спроектирована ранее. Первым шагом необходимо нанести на деталь конечно-элементную сетку.

На рисунке 12 показана цифровая модель кронштейна с сгенерированной сеткой.

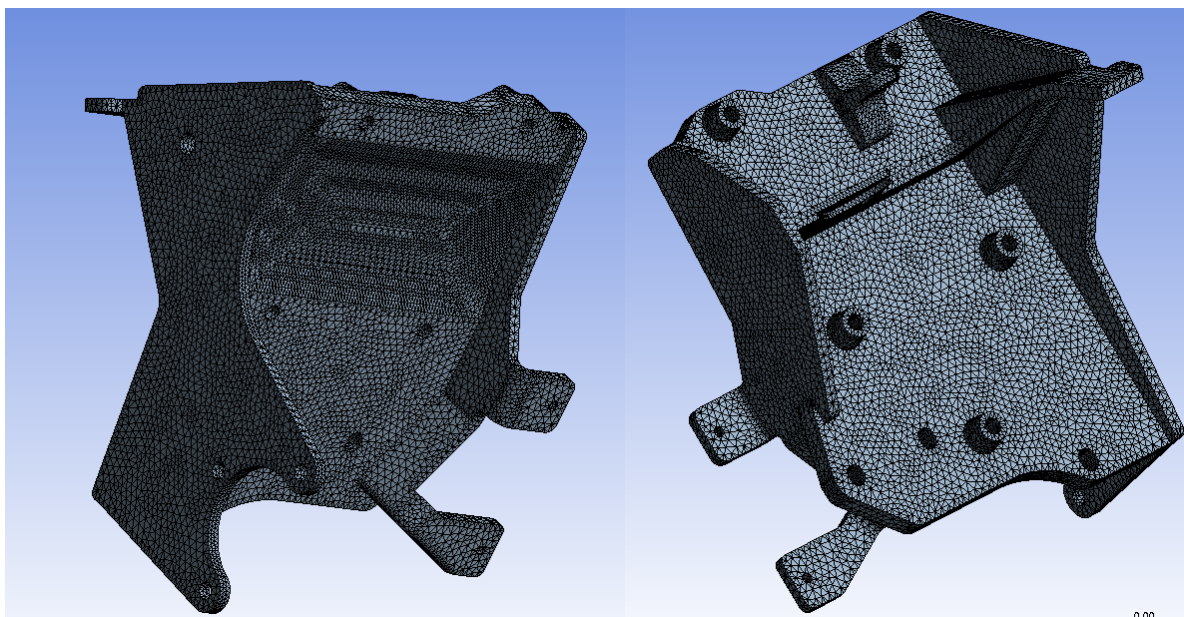


Рисунок 12 – Вид конечно-элементной модели кронштейна

Следующий этап в работе – выбор точек закрепления кронштейна привода вспомогательных агрегатов. Кронштейн крепится к блоку цилиндров ДВС обратной стороной, где прикручен тремя болтами М8 прямо к двигателю. Болты фиксируют кронштейн на блоке двигателя, никакой жесткости конструкции они не придают, поэтому при расчёте были выбраны стенки отверстий кронштейна вспомогательных агрегатов (рисунок 13).

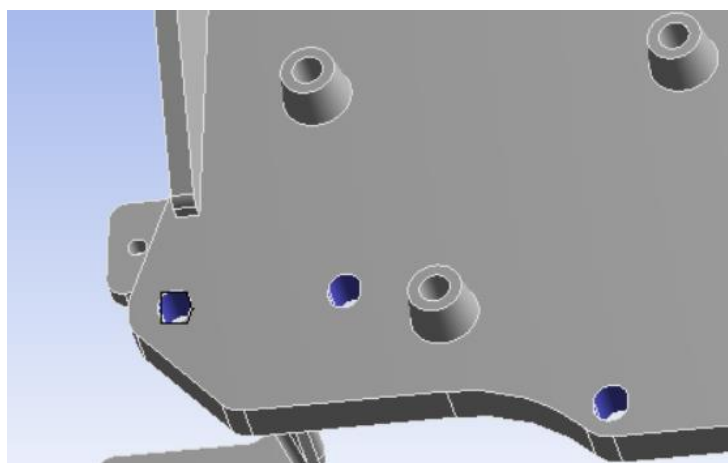


Рисунок 13 – Точки фиксации кронштейна

Прежде чем проводить модальный анализ, необходимо приложить нагрузку на кронштейн (рисунок 14). Преднагруженная конструкция кронштейна получается путем определения точек тяжести навесных агрегатов, входящих в систему привода и приложения в них соответствующих нагрузок

В таблице 2 приведены координаты точек центра тяжести навесных агрегатов, установленных на кронштейн. В приложении А также отображены эскизы с расположением точек центра тяжести всех навесных агрегатов.

Таблица 2 – Точки центра тяжести навесных агрегатов

Агрегаты	Координаты		
	x	y	z
Компрессор кондиционера	5,8	56,9	156,7
Абсорбер	177,3	41,9	51,2
Ролик натяжной	-64	-88,5	100,1
Насос ГУР	-29,9	87,9	33,9

Предварительная нагрузка на кронштейн осуществляется посредством задания силы тяжести навесных агрегатов. В таблице 3 указаны массы всех деталей, входящих в состав навесных агрегатов.

Таблица 3 – Масса навесных агрегатов

Агрегаты	Масса, кг
Компрессор кондиционера	5,424
Абсорбер	0,393
Ролик натяжной	0,515
Насос ГУР	2,066

Модальный анализ кронштейна вспомогательных агрегатов необходим для оценки их динамического поведения под воздействием различных внешних сил и условий эксплуатации.

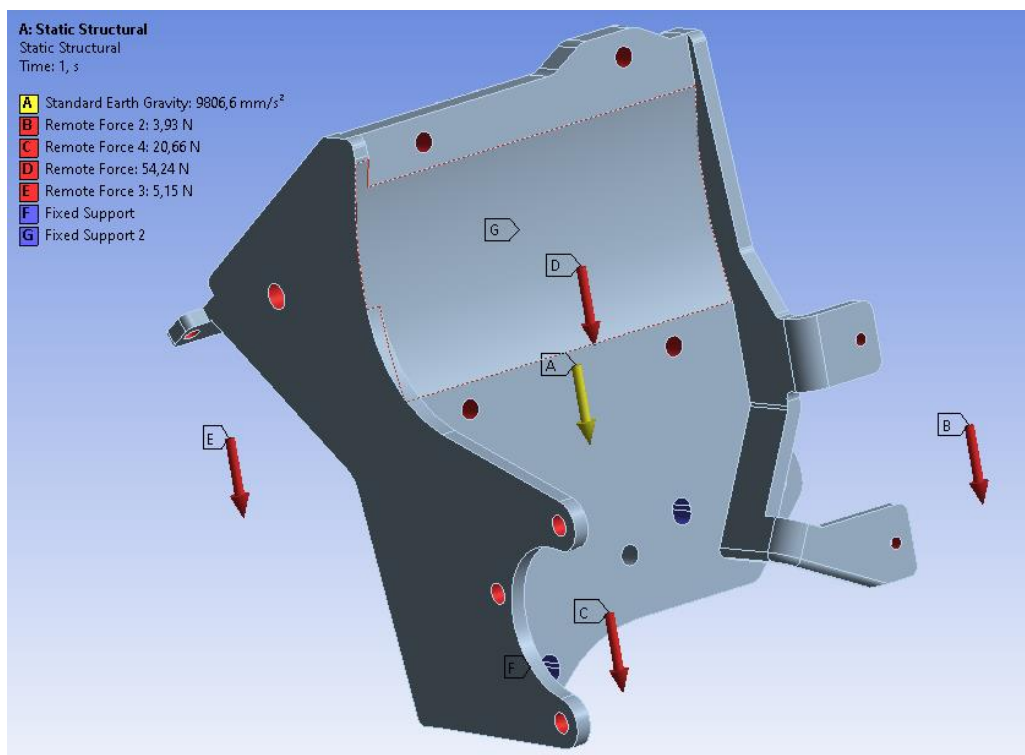


Рисунок 14 – Нагрузка на кронштейн

Расчет был произведен в модуле модального анализа для кронштейна на определение частот собственных колебаний. На рисунках 15-20 изображены результаты исследования. Все напряжения, возникающие в конструкции кронштейна, были увеличены для наилучшего отображения деформаций вследствие колебаний самого кронштейна.

Анализ мод колебаний позволяет определить формы и направления колебаний кронштейна при различных частотах. Это помогает выявить возможные проблемы с жесткостью или демпфированием конструкции и отследить направление изменения формы кронштейна на отдельных участках конструкции.

На рисунке 15 отображена самая первая собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом. Собственная частота на моде 1 составляет 605 Гц.

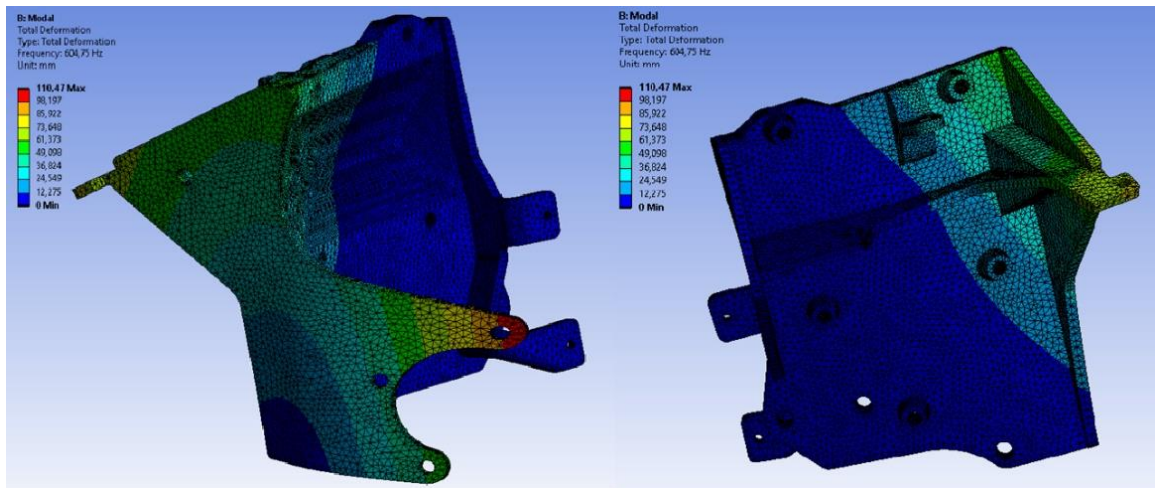


Рисунок 15 – Мода 1

На рисунке 16 отображена вторая собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом. Собственная частота на моде 2 составляет 697 Гц.

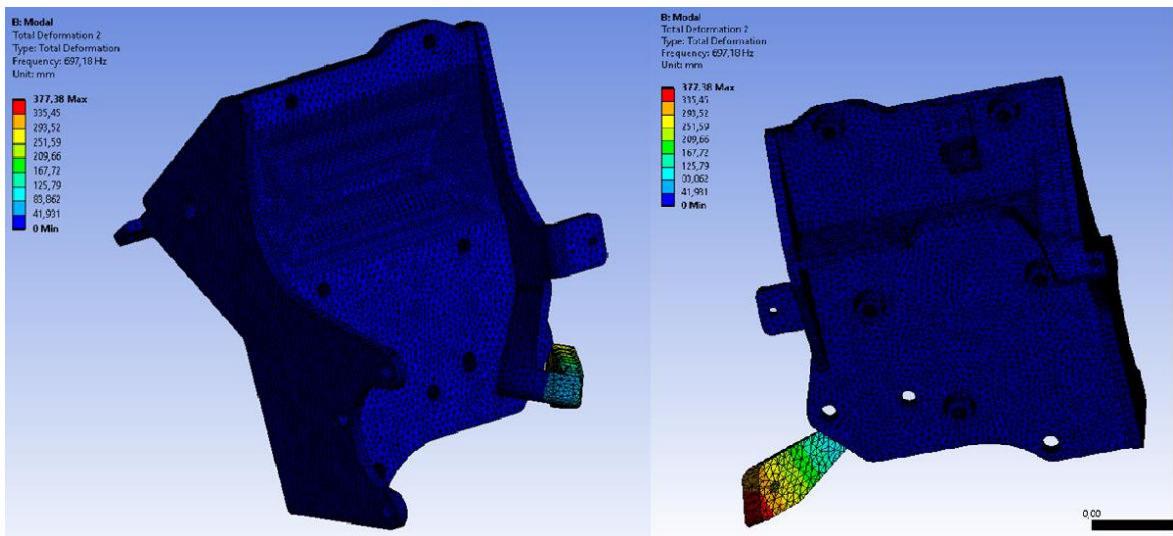


Рисунок 16 – Мода 2

На рисунке 17 отображена третья по счету собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом. Собственная частота на моде 3 составляет 739 Гц.

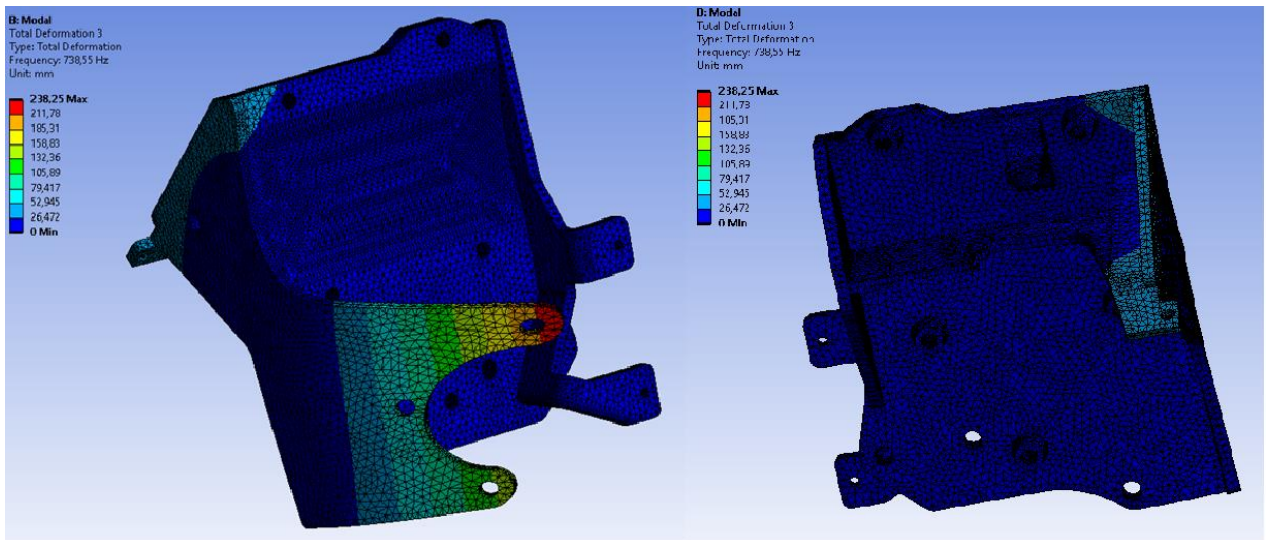


Рисунок 17 – Мода 3

На рисунке 18 отображена четвертая собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом. Собственная частота на моде 4 составляет 996 Гц.

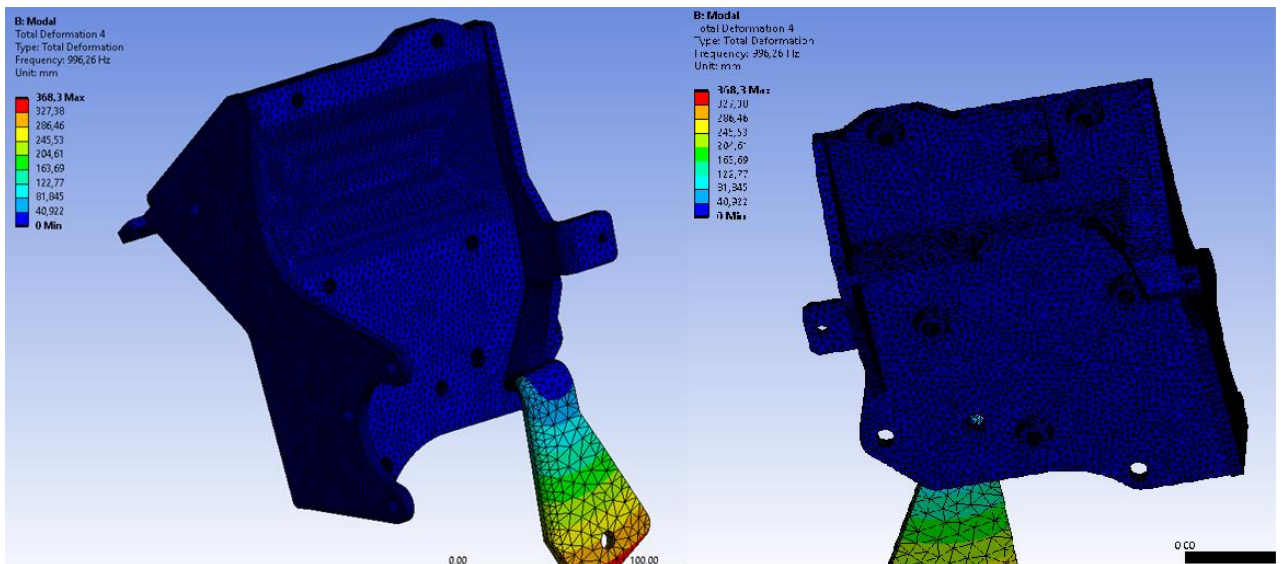


Рисунок 18 – Мода 4

На рисунке 19 отображена пятая собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом. Собственная частота на моде 5 составляет 1149 Гц.

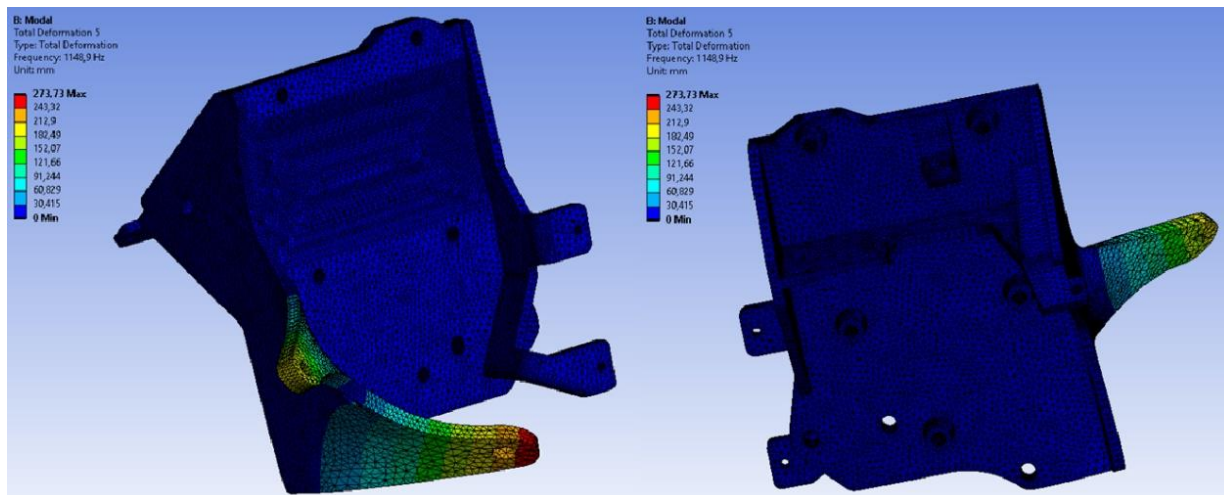


Рисунок 19 – Мода 5

На рисунке 20 отображена шестая собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом. Собственная частота на моде 6 составляет 1444 Гц.

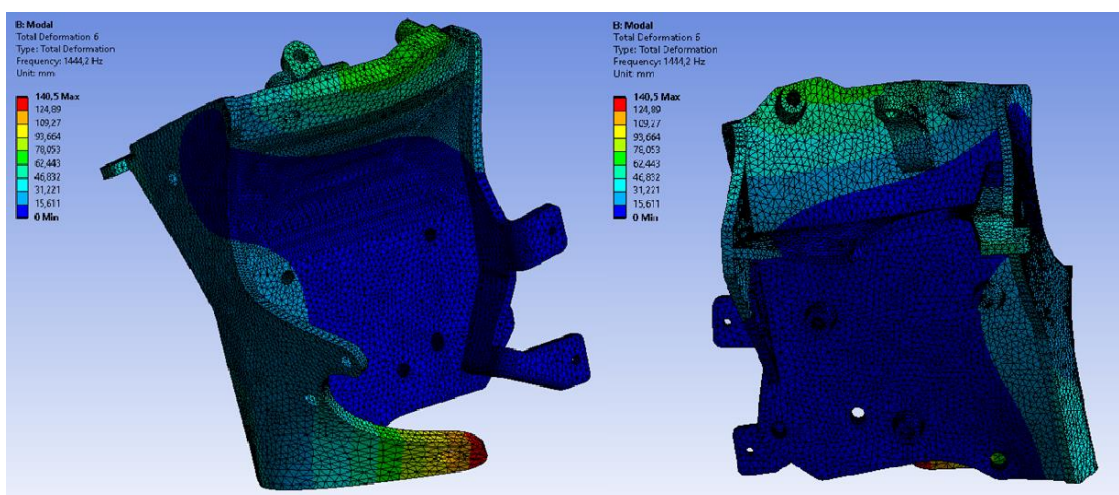


Рисунок 20 – Мода 6

Самым напряженным участком при модальном анализе является ухо крепления насоса ГУР.

Необходимо отследить места с излишней прочностью, которые можно ослабить и при этом снизить вес или перераспределить материал на ослабленные места для усиления конструкции.

Анализ модальных форм может выявить области конструкции, которые испытывают низкое напряжение или не подвержены высоким динамическим нагрузкам.

Менее напряженными участками кронштейна являются места в средней области кронштейна. Это будет учтено при дальнейшей оптимизации конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов.

Первые шесть значений частот на каждой моде представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Показатели частот собственных колебаний

Номер моды	Частота собственных колебаний, Гц
1	605
2	697
3	739
4	996
5	1149
6	1444

Из данных показателей необходимо выделить первые два, они самые важные при анализе резонанса. Частота собственных колебаний не должна быть менее 250 Гц. Как видно, первая частота здесь соответствует 605 Гц, что вполне удовлетворяет условиям и даже с запасом.

Обычно при возникновении резонанса частот кронштейна и двигателя происходят обрывы болтов крепления кронштейна к двигателю внутреннего сгорания, но это также не исключает случаев разрыва самой конструкции кронштейна, так как имеется вероятность появления переменных напряжений в кронштейне при частых резонансах.

Таким образом, кронштейн привода вспомогательных агрегатов автомобиля LADA «Niva Legend» прошёл проверку методом конечных элементов на исследование частоты собственных колебаний в программе автоматизированного проектирования.

Частота собственных колебаний конструкции кронштейна при модальном анализе превысила пороговое значение почти в 3 раза. Необходимо пересмотреть строение конструкции кронштейна и упростить её, уменьшив вес самой детали, при этом сохранив жесткость и значение собственной частоты колебаний не менее 250 Гц.

Оптимизация конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов будет также проходить в системе автоматизированного проектирования, способной выполнить все необходимые задачи и условия по моделированию твердотельного объекта.

В качестве вывода третьего раздела можно отметить, что при оптимизации конструкции кронштейна необходимо учитывать все технологические места, используемые в креплении навесного оборудования: компрессора кондиционера, насоса ГУР, механизма натяжения поликлинового ремня, абсорбера, а также мест крепления самого кронштейна вспомогательных агрегатов к двигателю внутреннего сгорания.

Модальный анализ помог нам:

- выявить слабые точки, которые наиболее подвержены динамическим нагрузкам или имеют низкую собственную частоту;
- выявить возможности для улучшения структурной интеграции компонентов кронштейна.

4 Оптимизация конструкции кронштейна. Расчет на прочность

4.1 Оптимизация базовой конструкции кронштейна

Оптимизировать конструкцию кронштейна вспомогательных агрегатов будем путем изменения толщины стенок кронштейна, а именно уменьшения определенных участков в теле кронштейна, изменения радиусов скруглений кромок кронштейна и углов наклона стенок.

На рисунке 21 отображена геометрия модели кронштейна с разных ракурсов до её оптимизации.

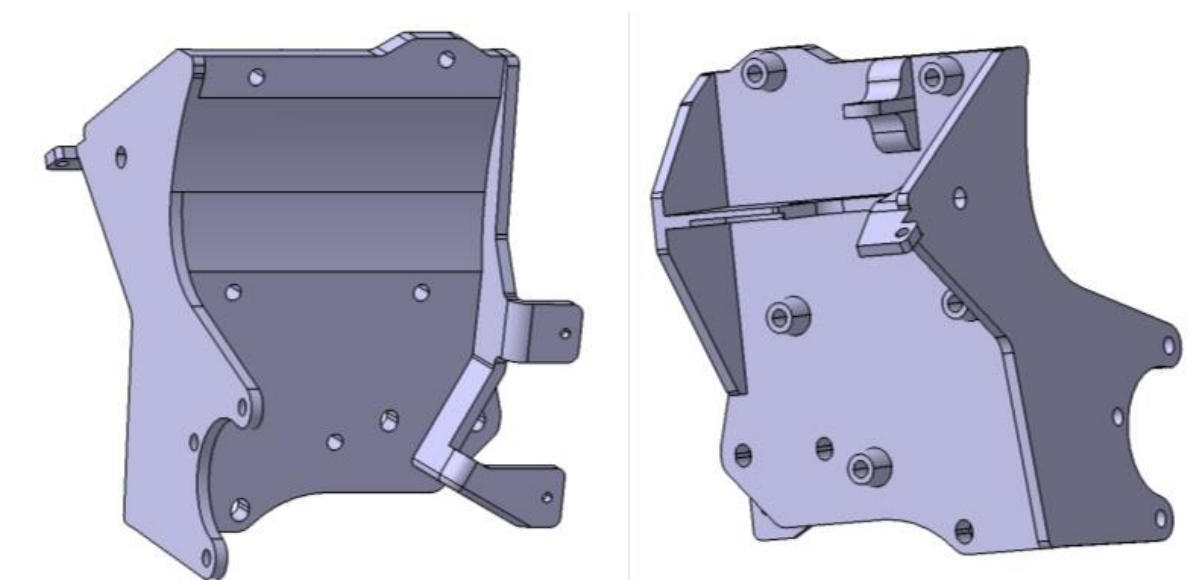


Рисунок 21 – Геометрия модели кронштейна до оптимизации

В первую очередь необходимо убрать лишний материал, облегчив вес конструкции кронштейна [5], для уменьшения затрат на материал на изготовления данной детали и экономии энергоресурсов.

Модальный анализ помог выявить возможности для улучшения структурной интеграции компонентов конструкции. Интеграция нескольких функций в одном элементе или использование более эффективных соединений может поспособствовать снижению веса.

На рисунке 22 показаны области, с которых происходит удаление материала в теле кронштейна вспомогательных агрегатов для облегчения веса конструкции. Снятие материала происходит до половины толщины основной стенки кронштейна, на 6 мм. Этим самым буквально создается выемка.

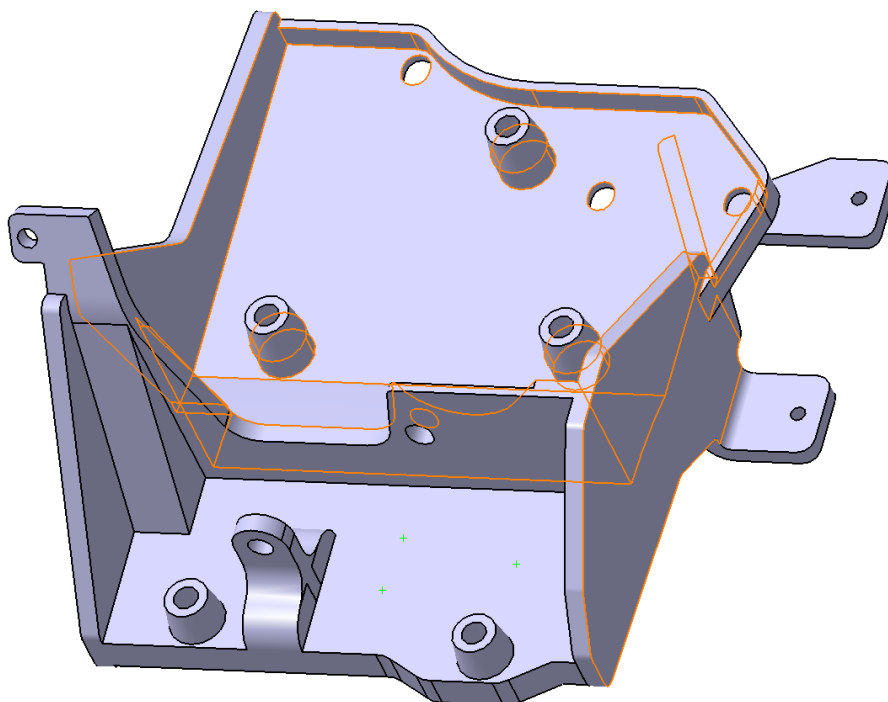


Рисунок 22 – Области удаления материала

На другой половине кронштейна выполняем те же самые действия – удаляем слой материала в конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов (рисунок 23). Для этого выбираем поверхность твердотельного элемента, из которого необходимо удалить материал. Далее задаем параметры толщины – значение толщины, которую необходимо удалить, и направление удаления (внутри или наружу).

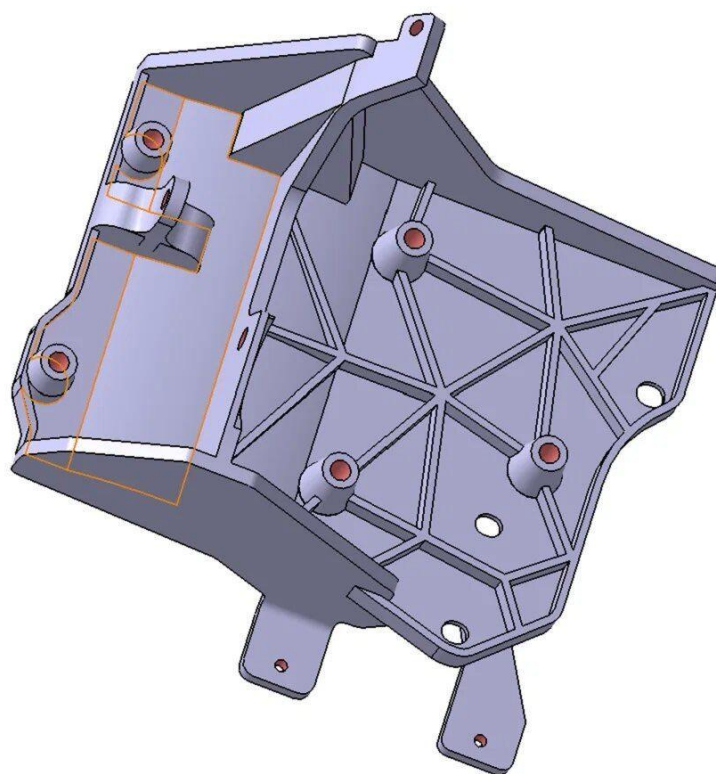


Рисунок 23 – Удаление материала на другой половине кронштейна

Создав выемки в твердотельной модели, возрастают риски на потерю жесткости конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов до неприемлемых результатов, что в дальнейшем может привести к возникновению резонанса с частотой двигателя и шансу разрыва или облома самой конструкции кронштейна. Для предотвращения их появления добавим ребра жесткости шириной 3 мм.

Создание ребер жёсткости (рисунок 24) позволяет увеличить жесткость конструкции за счёт добавления дополнительных элементов. Для создания ребер жесткости сначала выбирается поверхность твердотельного элемента, к которому собственно и необходимо добавить ребра жёсткости. Далее выбирается тип ребра жесткости (например, прямое, косое, поперечное), а также размеры и положение ребра на поверхности или теле. Следующим шагом необходимо указать местоположение и ориентацию ребер жёсткости на поверхности или теле.

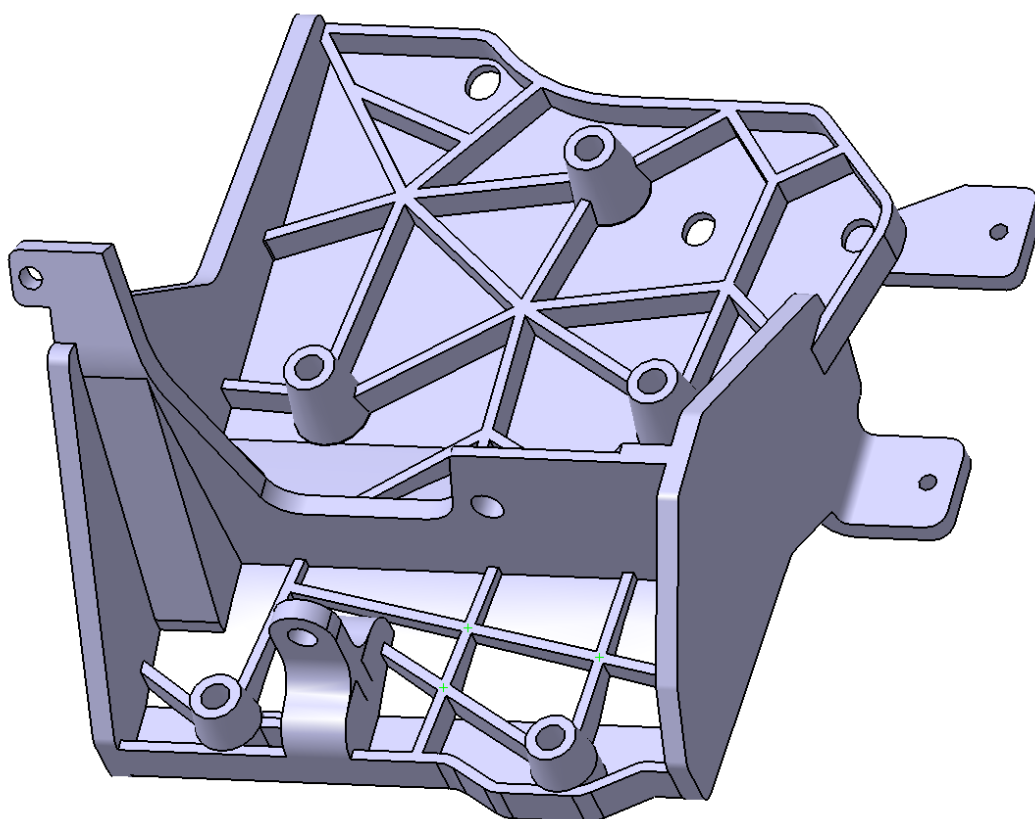


Рисунок 24 – Добавление ребер жесткости

Была выбрана простая сетка для укрепления конструкции кронштейна из-за вынужденного удаления слоя материала, что приводит к соблюдению баланса прочности конструкции и веса готового изделия.

К ребрам жесткости кронштейна были также добавлены бобышки (рисунок 25) для лучшей проливаемости кронштейна литьем под давлением. Это необходимо чтобы при заливке алюминиевый сплав растекался равномерно без застоев и больших перепад температур. Это может позволить устранить образования облоя или раковин. Сложная геометрия кронштейна может затруднить проливаемость расплавленного алюминиевого сплава. Геометрические особенности, такие как острые углы, узкие проходы или перегородки, могут привести к образованию воздушных ловушек или пористости в отливке.

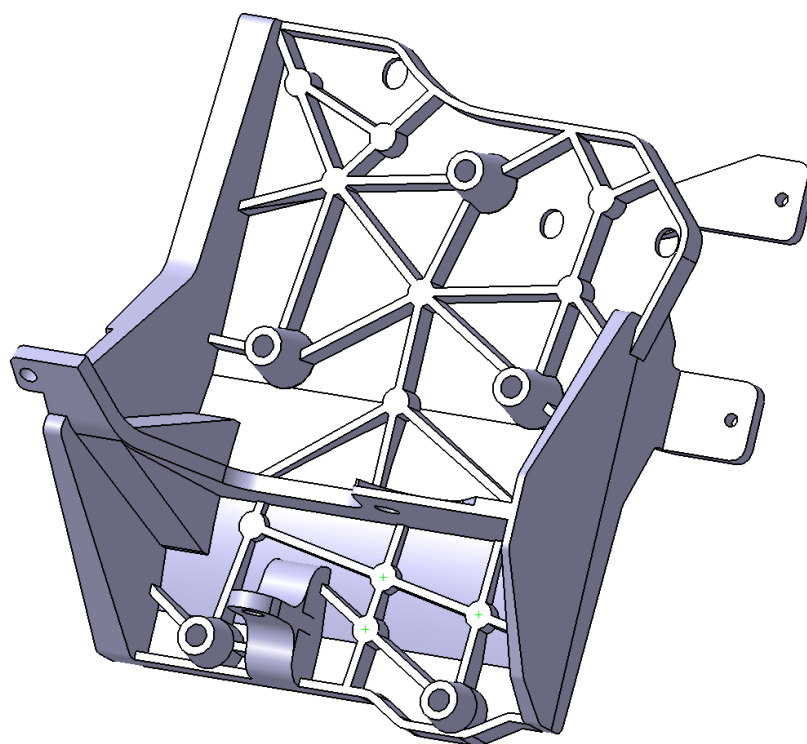


Рисунок 25 – Бобышки в пересечении ребер жесткости

Было произведено изменение литейных уклонов (рисунок 26) на детали кронштейна вспомогательных агрегатов. Данное изменение в конструкции кронштейна затрагивает технологичные участки, исполняющие роли крепления агрегатов к конструкции кронштейна.

Изменения уклонов коснулись плоскостей под крепления определенных агрегатов (насоса ГУР, натяжного механизма, компрессора кондиционера), необходимо было переработать места, выполнив плоскости конструкции кронштейна в программе моделирования под фрезерную обработку.

Уклоны в кронштейне могут оказать существенное влияние на его проливаемость при литье под давлением. Слишком крутые уклоны могут создавать заметные изменения в направлении потока расплавленного металла. Это может привести к образованию воздушных ловушек или пористости в кронштейне. Уклоны могут создавать затруднения при заполнении формы расплавленным металлом, особенно в узких или глубоких областях кронштейна. Это может привести к образованию задиров или недозаполнений

в отливке. Чем круче уклоны, тем больше сопротивление потоку расплавленного металла. Это может потребовать повышения давления литья для обеспечения достаточного проникновения металла в уклоненные области кронштейна. Уклоны могут создавать неравномерное заполнение формы расплавленным металлом, что может привести к неоднородной структуре и плохому качеству отливки.

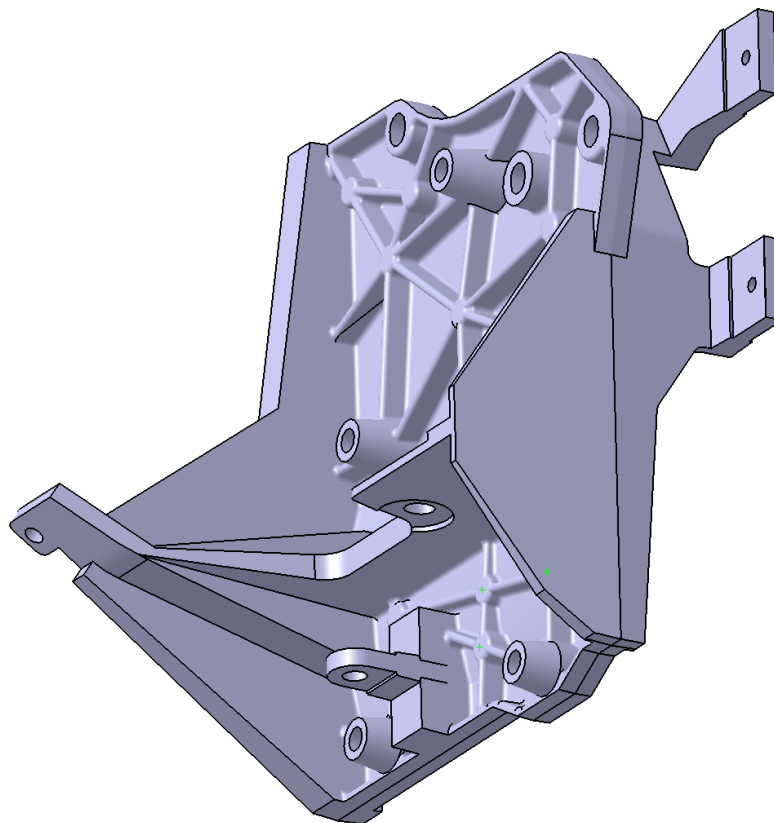


Рисунок 26– Добавление уклонов

Изменив углы наклона (рисунок 26) детали кронштейна вспомогательных агрегатов, изменилась и линия разъема (рисунок 27) детали из пресс-формы или дубликата пресс-формы. Линия разъема определяет границу между двумя или более частями формы, которые могут быть отделены друг от друга после литья. Это позволяет легче извлекать изделие из формы и упрощает процесс обработки и сборки. Линия разъема должна быть

размещена таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение материала при литье.

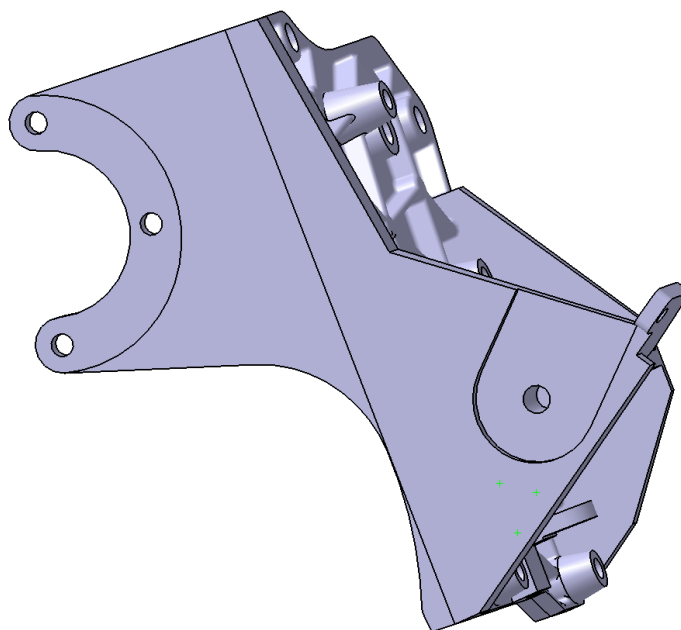


Рисунок 27 – Изменение плоскостей крепления деталей

Это помогает предотвратить возникновение неравномерностей в стенках кронштейна и других дефектов отливки. Хорошо спланированная линия разъема помогает минимизировать видимые следы на поверхности отливки. Она может быть размещена в незаметных местах или в областях, которые впоследствии будут обработаны или скрыты. Линия разъема должна иметь достаточный размер и форму для обеспечения легкости отделения формы после литья. Это может включать в себя использование прямых линий, кривых или комплексных геометрических форм в зависимости от конкретных требований производства. При проектировании линии разъема необходимо учитывать технологические ограничения процесса литья под давлением, такие как доступность инструментов для извлечения изделий из формы и возможность создания сложных форм.

На рисунке 28 показаны места оптимизации конструкции с измененными углами наклона и доработку мест крепления натяжного механизма и насоса ГУР.

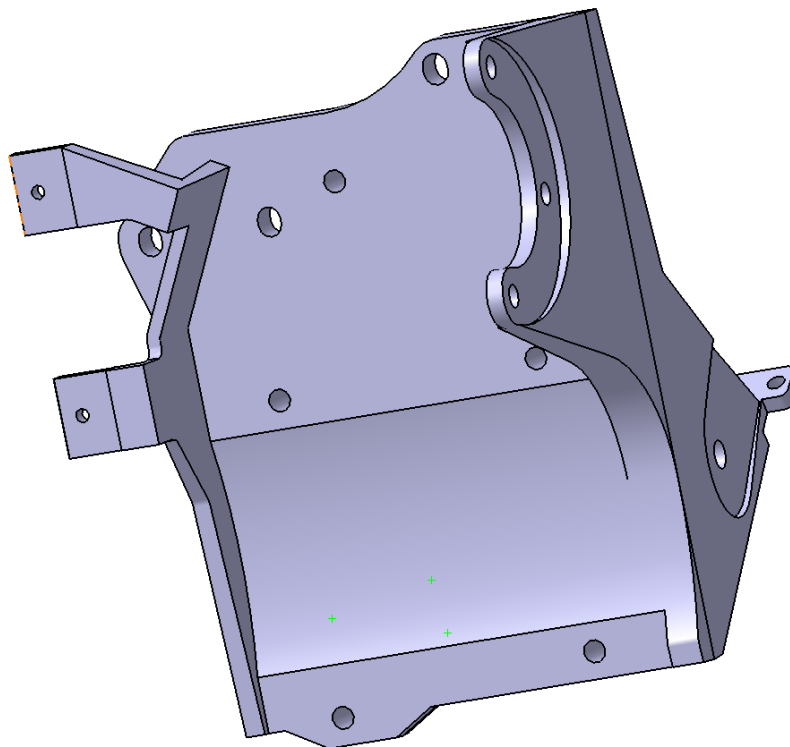


Рисунок 28 – Обеспечение технологичности

На рисунке 29 дополнительно отображены места крепления абсорбера, выполненные под фрезерную обработку.

Фрезерная обработка кронштейна вспомогательных агрегатов – это процесс удаления материала с помощью фрезерования для создания необходимой формы и размеров кронштейна. Необходимо обеспечить возможность фрезерной обработки этих элементов конструкции.

В завершении оптимизации конструкции кронштейна обязательно необходимо предусмотреть радиусы скруглений острых кромок, так как при изготовлении детали литьем под давлением острые кромки должны отсутствовать, их буквально нельзя выполнить в пресс-форме, но имеется возможность задать значение их скругления. На рисунке 28 отображен этап

скругления ребер жесткости. Готовая деталь не должна иметь острых кромок и заусенцев кроме тех мест, где выполняется фрезерная обработка – при оптимизации конструкции кронштейна это было учтено.

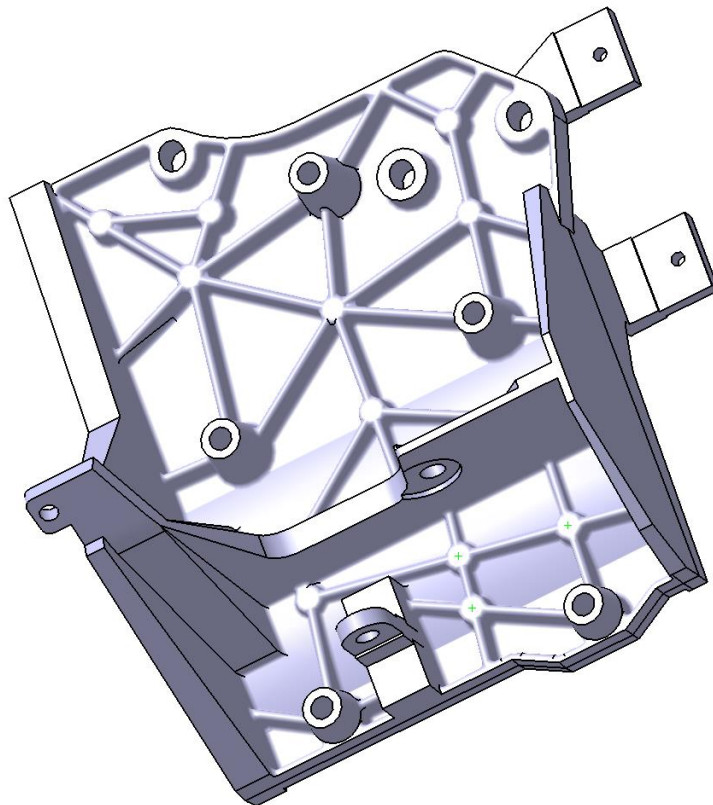


Рисунок 29 – Добавление скруглений

Оптимизированная конструкция может быть более прочной и надежной благодаря эффективному использованию материала, укреплению уязвимых участков и минимизации возможности образования дефектов.

Путем уменьшения избыточного материала и оптимизации геометрии конструкции было достигнуто существенное снижение веса кронштейна, что важно для улучшения топливной эффективности автомобиля.

На рисунках 30 и 31 отображены вид спереди и вид сзади оптимизированной конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов. На данной конструкции был убран слой материала для облегчения конструкции, что привело к уменьшению массы с 2 до 1,589 кг.

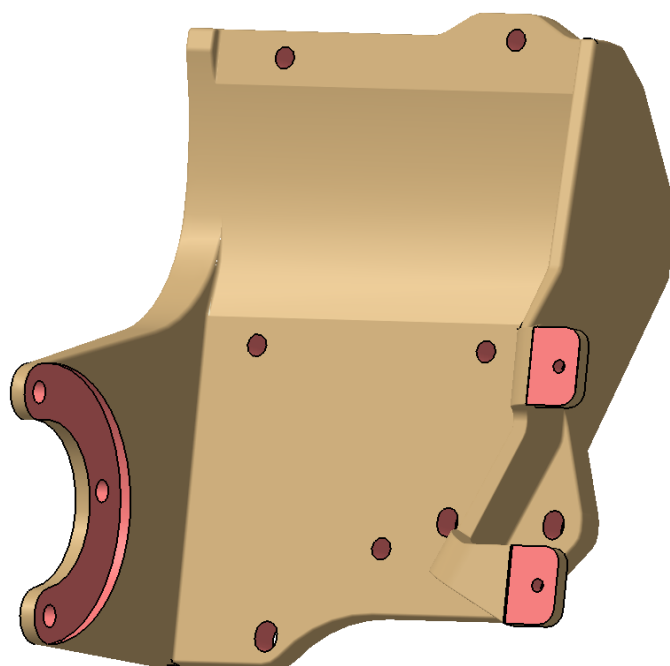


Рисунок 30 – Вид спереди оптимизированной конструкции

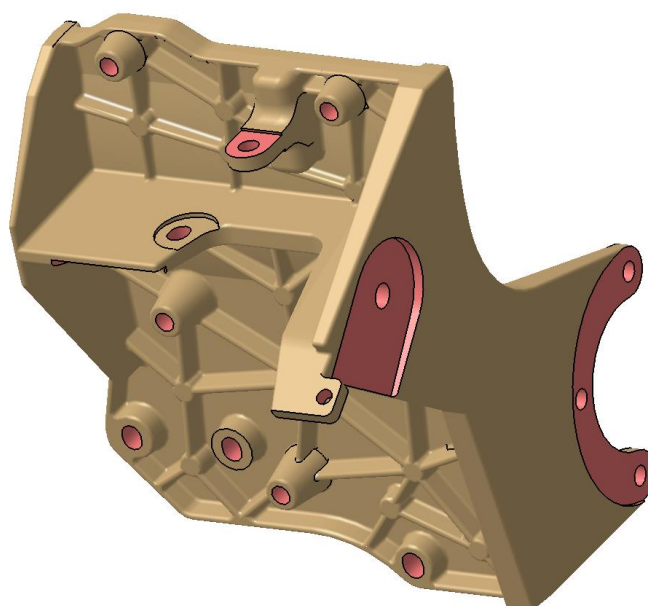


Рисунок 31 – Вид сзади оптимизированной конструкции

Были добавлены ребра жесткости, изменены углы наклона и радиусы скруглений кромок кронштейна. Также были добавлены фаски для дальнейшего облегчения резьбовых соединений.

В конструкции для простой наглядности был применен двухцветный окрас:

- песчаный цвет для отображения поверхностей, получаемых литьем под давлением;

- красный цвет для отображения мест механической обработки.

Оптимизированная конструкция приобрела более эстетичный внешний вид и лучше соответствует функциональным требованиям, что важно для удовлетворения потребностей клиентов и повышения конкурентоспособности продукции.

Следующим этапом данной работы будет модальный анализ конструкции, нахождение собственной частоты колебаний кронштейна на различных модах. Модальный анализ выполним в пакете автоматизированного проектирования аналогично пункту 3.

4.2 Модальный анализ оптимизированной конструкции кронштейна

Оптимизировав конструкцию кронштейна вспомогательных агрегатов, для достижения выполнения цели работы необходимо произвести анализ частоты свободных колебаний кронштейна.

Первый этап в проведении расчета на прочность – загрузить геометрическую модель кронштейна привода вспомогательных агрегатов.

Далее задаем свойства материала детали.

При выборе материала для модального анализа учитывается несколько ключевых аспектов, включая:

- механические свойства материала: материал должен обладать достаточной прочностью, жесткостью и устойчивостью к динамическим нагрузкам, чтобы обеспечить надежную работу конструкции при различных условиях эксплуатации [29].

– плотность материала: материал должен иметь оптимальную плотность, чтобы обеспечить низкий вес конструкции при сохранении необходимых механических свойств.

– доступность и стоимость: материал должен быть легкодоступным для производства и экономически выгодным для использования. Стоимость материала может существенно влиять на общие затраты на производство конструкции.

– технологические особенности: материал должен быть пригодным для используемых технологий обработки и производства. Это включает в себя возможность литья, обработки, сварки и других технологических операций.

– коррозионная стойкость и долговечность: в зависимости от условий эксплуатации, материал должен быть устойчив к коррозии, износу и другим вредным воздействиям, чтобы обеспечить долгий срок службы конструкции [16].

Учитывая эти факторы, инженеры выбирают материал, который наилучшим образом соответствует требованиям проекта и обеспечивает оптимальные характеристики конструкции при модальном анализе.

Характеристики алюминиевого сплава АК12М2 приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Характеристики сплава АК12М2

Свойство	Значение
Плотность, кг/м ³	2770
Предел текучести при растяжении, Па	$2,8 \cdot 10^8$
Предел текучести при сжатии, Па	$2,8 \cdot 10^8$
Предел прочности при растяжении, Па	$3,1 \cdot 10^8$
Удельная теплоемкость, Дж/кг·С°	875

Выбор материала конструкции кронштейна был сделан по аналогии с предыдущим модальным анализом.

Сплав АК12М2 – это алюминиевый сплав [21], который широко используется в промышленности, включая автомобильное производство, из-за своих высоких механических свойств и превосходной обрабатываемости.

Сплав АК12М2 представляет собой высококачественный материал с хорошей прочностью, обрабатываемостью и коррозионной стойкостью, что делает его широко используемым в различных отраслях промышленности, включая автомобильное производство.

Для оптимизированной конструкции кронштейна была создана сетка конечных элементов размером в 5 мм. Данный параметр был определен в связи с хорошими показаниями выходных результатов. На рисунке 32 изображена модель конструкции кронштейна с нанесенной сеткой конечных элементов.

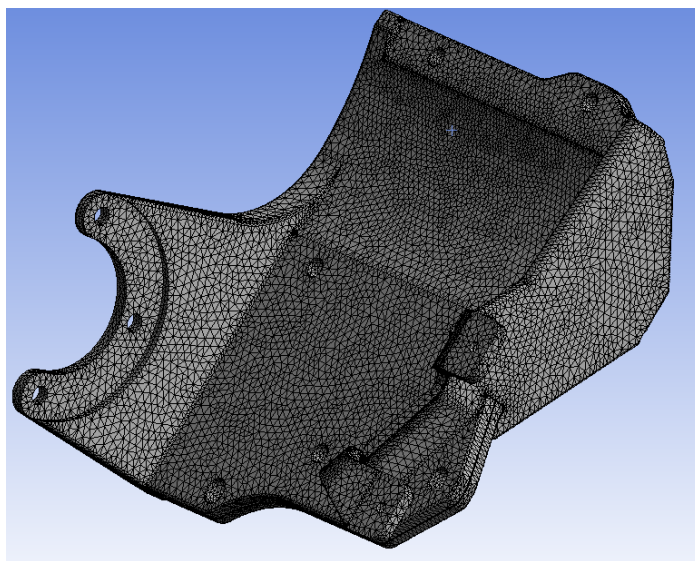


Рисунок 32 – Созданная сетка

Сетка была построена элементами типа тетраэдр с увеличением количества элементов на переходных радиусах. На рисунке 33 показана более детальная конечно-элементная сетка.

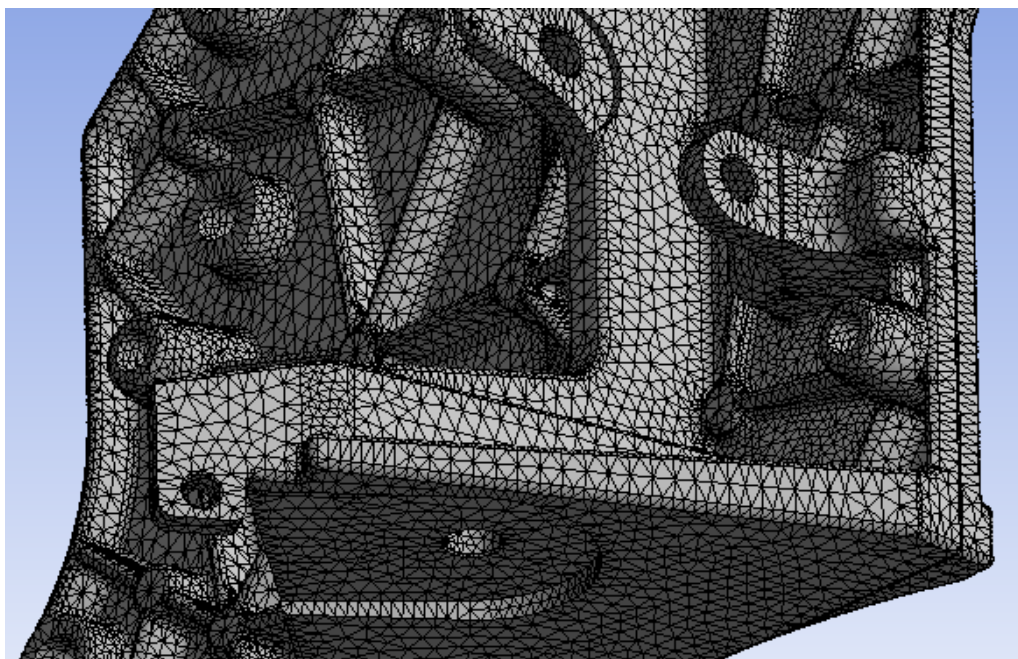


Рисунок 33 – Детальное отображение сетки

В проведении расчета на прочность конструкции кронштейна конечным результатом должно быть нахождение собственной частоты колебаний кронштейна. Просматривая формы и частоты собственных колебаний, можно прогнозировать динамический отклик конструкции на внешнее возбуждение в различных направлениях.

По аналогии с третьим пунктом данной работы следует закрепить модель за отверстия установки на блок цилиндров двигателя внутреннего сгорания для дальнейшего анализа на собственную частоту колебаний.

Выбираем «Fixed support» и указываем внутренние поверхности стенок отверстия крепления кронштейна вспомогательных агрегатов (рисунок 34).

Необходимо так же, как и в пункте 3, совершить преднагрузку конструкции. На рисунке 35 показаны навесные агрегаты, входящие в состав вспомогательных агрегатов двигателя ВАЗ 21214.

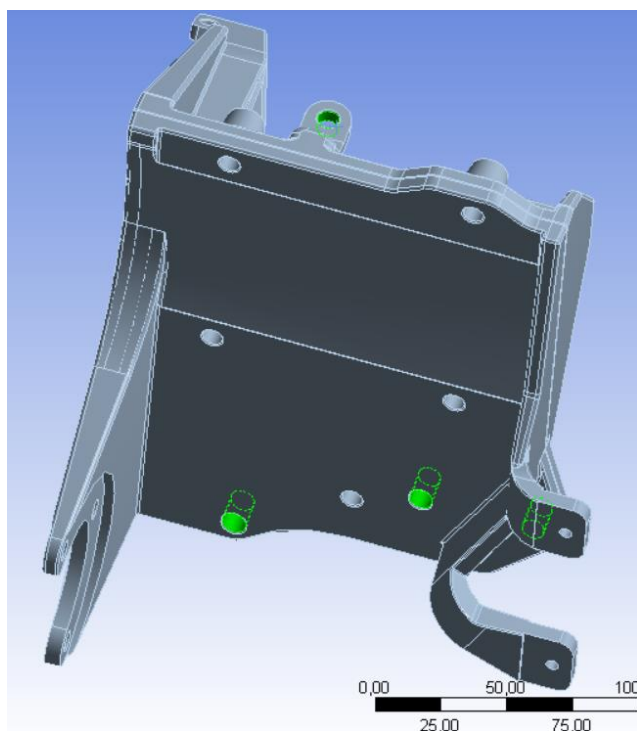


Рисунок 34 – Закрепление кронштейна

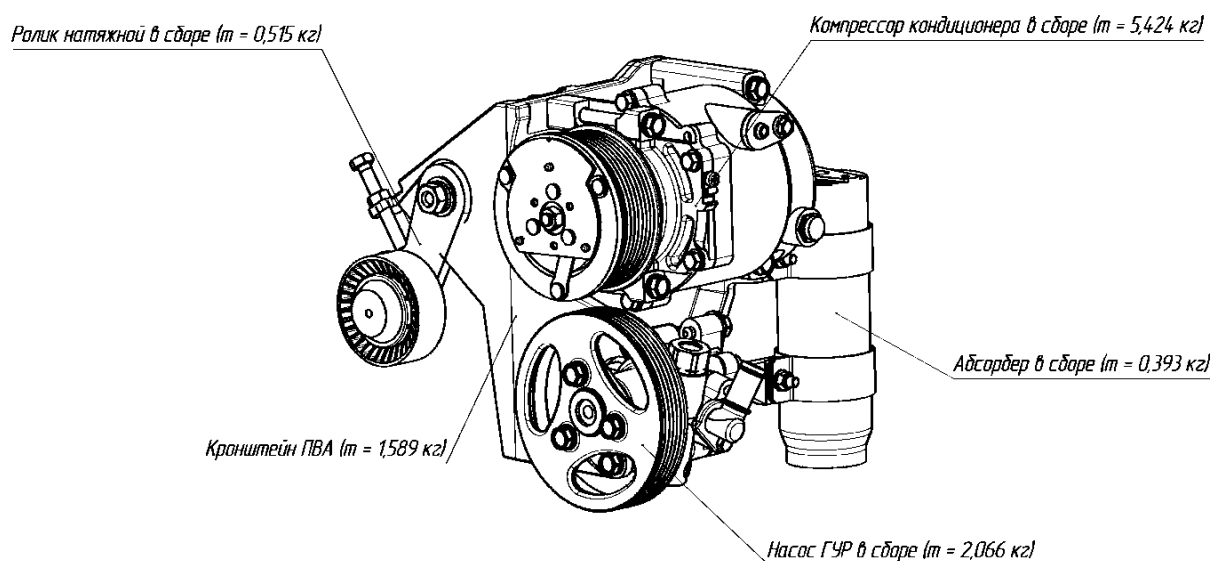


Рисунок 35 – Привод вспомогательных агрегатов

Преднагрузка остается неизменной для точек центра тяжести навесных агрегатов (приложение А). Все силы, воздействующие на кронштейн вспомогательных агрегатов, отображены на рисунке 36.

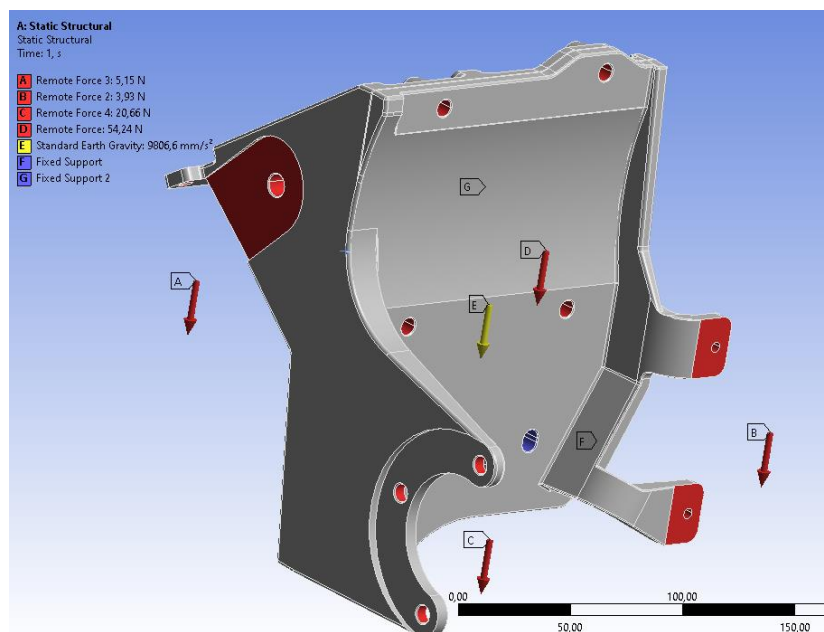


Рисунок 36 – Нагрузка и места ее приложения

Зафиксировав кронштейн за четыре необходимых отверстия под болты М8 (рисунок 34), имеется возможность для проведения модального анализа. Необходимо выбрать задачу «Total Deformation».

Существует направленная деформация «Directional Deformation» и «Total Deformation». «Directional Deformation» – направленная деформация действует в направлениях X, Y и Z, «Total Deformation» – это квадратный корень из суммы квадратов направлений X, Y и Z.

«Полные деформации в модальном анализе показывают, как изменяется форма и размеры конструкции под воздействием динамических нагрузок или вибраций» [17]. Когда конструкция подвергается воздействию внешних сил, возникают колебания, которые могут вызывать изменения в её форме и размерах. Полные деформации предоставляют информацию о максимальном уровне изменений, которые происходят в различных точках конструкции в процессе вибраций или динамических нагрузок [30].

На рисунке 37 отображена первая собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом оптимизированной конструкции. Собственная частота на моде 1 составила 481 Гц.

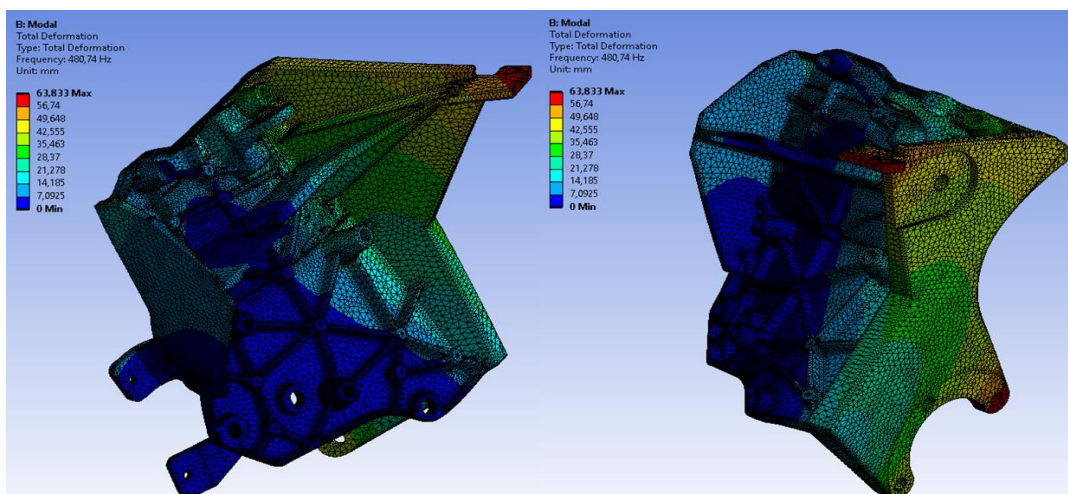


Рисунок 37 – Мода 1 оптимизированной конструкции

На рисунке 38 отображена вторая собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом оптимизированной конструкции. Собственная частота на моде 2 составляет 794 Гц.

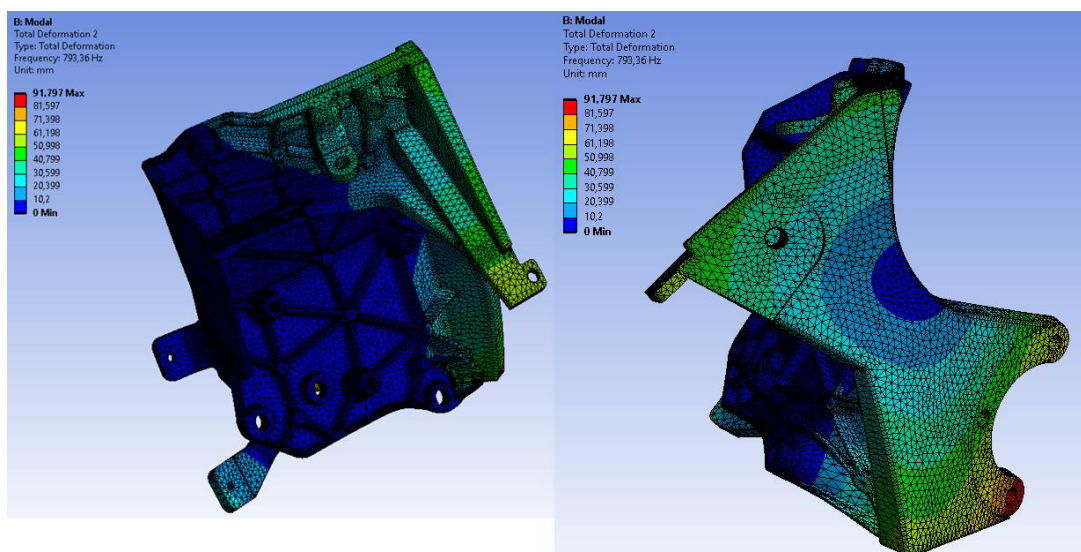


Рисунок 38 – Мода 2 оптимизированной конструкции

На рисунке 39 отображена третья собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом оптимизированной конструкции. Собственная частота на моде 3 составляет 813 Гц.

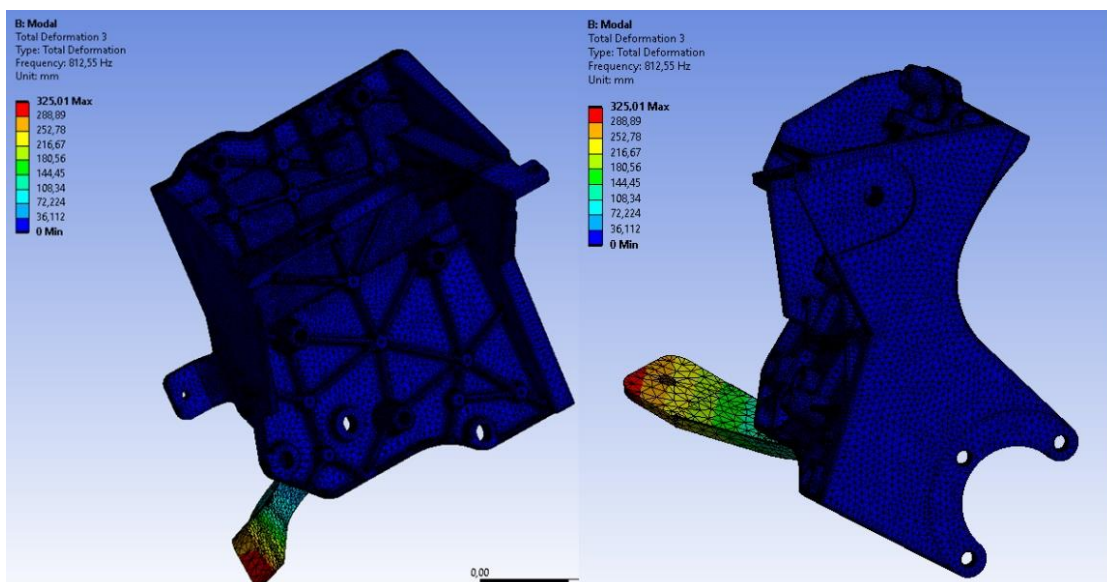


Рисунок 39 – Мода 3 оптимизированной конструкции

На рисунке 40 отображена четвертая собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом оптимизированной конструкции. Собственная частота на моде 4 составила 1256 Гц.

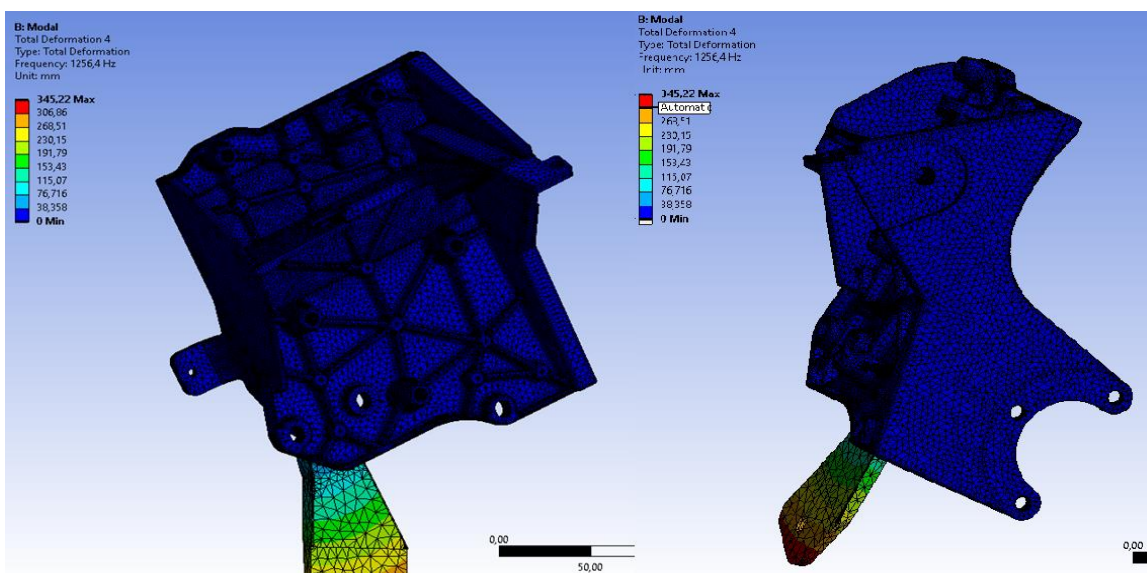


Рисунок 40 – Мода 4 оптимизированной конструкции

На рисунке 41 отображена пятая собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом оптимизированной конструкции. Собственная частота на моде 5 составляет 1406 Гц.

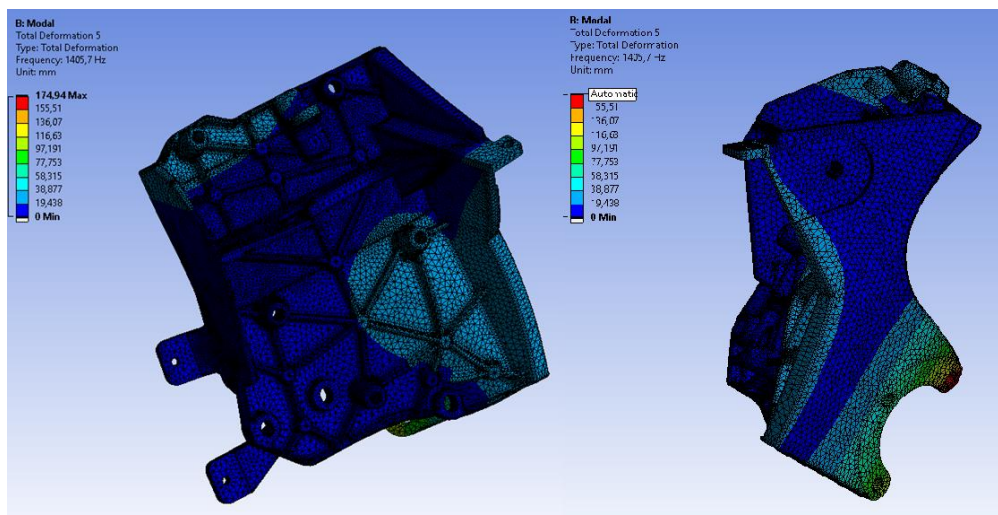


Рисунок 41 – Мода 5 оптимизированной конструкции

На рисунке 42 отображена шестая собственная частота, возникающая в результате колебаний, выявленная модальным анализом оптимизированной конструкции. Собственная частота на моде 6 составляет 1435 Гц.

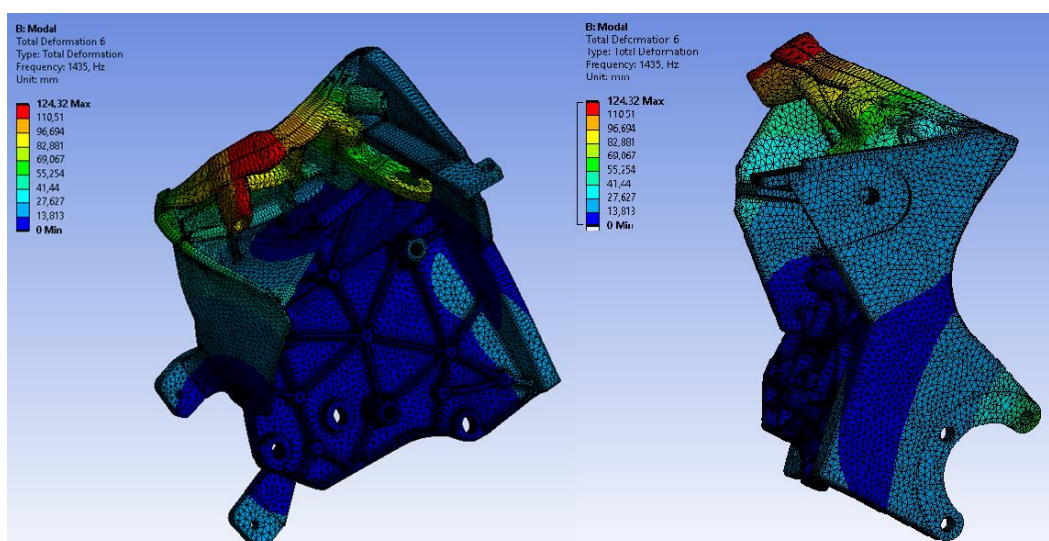


Рисунок 42 – Мода 6 оптимизированной конструкции

Форма кронштейна была искусственно отмасштабирована для наилучшего отображения направления деформаций конструкции вследствие возникающих колебаний. По данным показателям можно судить о поведении конструкции кронштейна на той или иной частоте.

Эти деформации важны для оценки поведения конструкции в различных режимах работы. Результаты полной деформации используются для определения областей, где возможно разрушение или необратимая деформация от действия нагрузок.

Значение первой собственной частоты колебаний оптимизированной конструкции кронштейна снизилось с 605 до 481 Гц по сравнению с анализом базовой конструкции кронштейна.

Резонанс кронштейна вспомогательных агрегатов при вхождении в резонанс с двигателем является таким явлением, когда частота собственных колебаний кронштейна совпадает с частотой вращения вала двигателя или с его гармониками [22]. Это может привести к увеличению амплитуды колебаний и динамических нагрузок на кронштейн и сопутствующие детали.

Таким образом, оптимизированная конструкция кронштейна привода вспомогательных агрегатов автомобиля LADA «Niva Legend» также прошла проверку методом конечных элементов на исследование частоты собственных колебаний.

Первые шесть значений на каждой моде оптимизированной конструкции кронштейна представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Показатели частот собственных колебаний оптимизированной конструкции

Номер моды	Частота собственных колебаний, Гц
1	481
2	794
3	813
4	1256
5	1406
6	1435

Можно заключить, что необходимые расчеты были проведены в полном объеме.

По данным показателям следует, что первые две частоты свободных колебаний не превышают частоты вхождения в резонанс с двигателем –250 Гц, хотя их величина и ближе по сравнению с базовым вариантом конструкции, но запас достаточно серьезный.

Эффективное управление резонансом кронштейна вспомогательных агрегатов с двигателем играет ключевую роль в обеспечении безопасности, надежности и долговечности работы технических систем [14].

Конечным этапом при анализе оптимизированной конструкции кронштейна должен быть прочностной анализ. Проведение прочностного анализа конструкции кронштейна важно для обеспечения его надежности и безопасности в условиях эксплуатации. Прочностной анализ позволит убедиться, что кронштейн способен выдержать все внешние нагрузки, которым он может подвергаться в условиях эксплуатации автомобиля. Это важно для предотвращения возможных аварий и обеспечения безопасности водителя и пассажиров.

4.3 Расчет на прочность оптимизированной конструкции кронштейна

Средние нагрузки, которые вспомогательные агрегаты оказывают на кронштейн, могут варьироваться в зависимости от конкретной конструкции автомобиля, типа двигателя, модели и условий эксплуатации. Однако, в данном случае, имеются конкретные навесные агрегаты, воздействующие на кронштейн:

Компрессор кондиционера: нагрузка на кронштейн компрессором кондиционера составляет 54,24 Н. Этот агрегат создает давление для сжатия и циркуляции хладагента, и его нагрузка может меняться в зависимости от

состояния работы системы кондиционирования и температуры окружающей среды.

Абсорбер. Нагрузка на кронштейн абсорбером составляет 3,93 Н. Он предназначен для смягчения вибраций и уменьшения шума, которые генерирует двигатель во время его работы.

Ролик натяжной. Нагрузка на кронштейн натяжным роликом составляет 5,15 Н. Данный агрегат играет важную роль в обеспечении правильного натяжения ремня, который передает крутящий момент от двигателя к вспомогательным агрегатам, таким как генератор, насосы или компрессоры.

Насос гидроусилителя руля: Нагрузка на кронштейн насосом гидроусилителя руля составляет 20,66 Н. Этот агрегат создает давление для гидравлической системы усиления руля, облегчая водителю процесс управления.

Для расчета на прочность конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов необходимо выполнить прочностной анализ в программе автоматизированного проектирования.

Запас прочности кронштейна вспомогательных агрегатов на автомобиле обычно определяется в соответствии с требованиями к безопасности и надежности конструкции. Этот запас прочности обеспечивает дополнительную гарантию того, что кронштейн сможет выдержать все нагрузки, с которыми он может столкнуться в течение срока службы автомобиля.

Запас прочности обычно выражается в виде коэффициента, который показывает, насколько нагрузка, которую кронштейн может выдержать, превышает фактически ожидаемую нагрузку. Например, если кронштейн спроектирован с коэффициентом запаса прочности 2, это означает, что он может выдержать в два раза большую нагрузку, чем предполагается в обычных условиях эксплуатации.

Коэффициент запаса прочности может быть разным для различных производителей и моделей автомобилей, и его выбор зависит от многих

факторов, включая конструкцию, материалы, условия эксплуатации и требования к безопасности. Обычно инженеры стремятся выбирать запас прочности таким образом, чтобы кронштейн оставался надежным и безопасным при различных условиях эксплуатации, включая дополнительные нагрузки, возникающие в результате вибраций, ударов и других внешних воздействий.

Прочностной расчет проводили, отталкиваясь от условий эксплуатации. Кронштейн фиксировали по отверстиям крепления к блоку цилиндров двигателя. Нагрузка на кронштейн была приложена, как при модальном анализе к точкам центра тяжести вспомогательных агрегатов. (силы тяжести компрессора кондиционера, абсорбера, ролика натяжного и насоса гидроусилителя руля).

На рисунке 43 изображены суммарные деформации (деформации были увеличены для наилучшего их отображения) оптимизированной конструкции кронштейна в статической нагрузке.

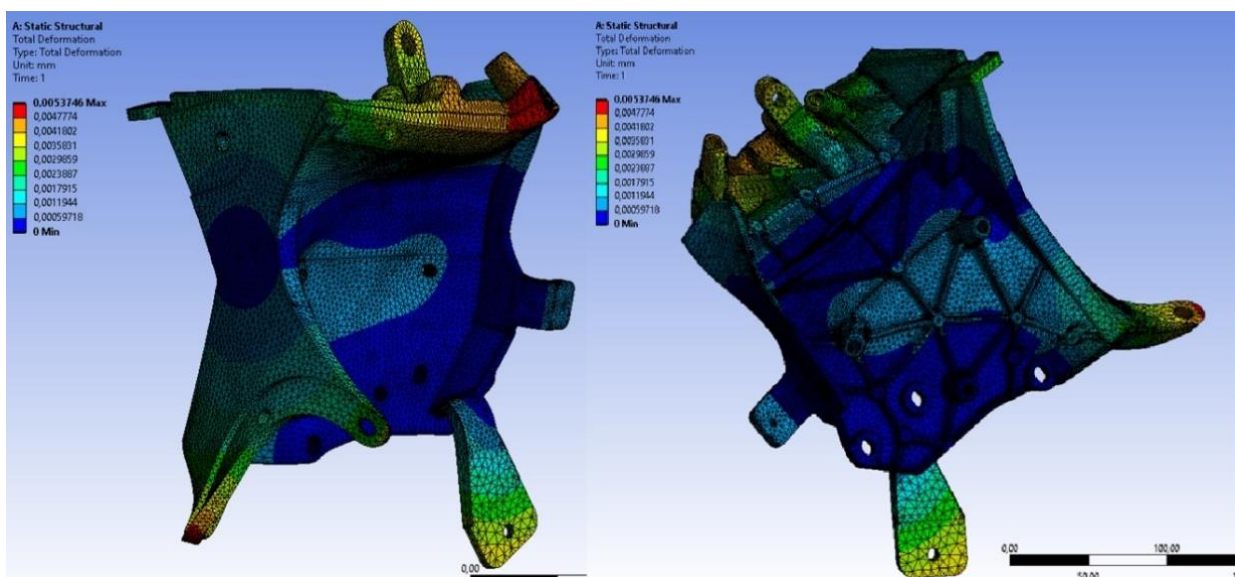


Рисунок 43 – Суммарные деформации кронштейна

Полная деформация при анализе кронштейна вспомогательных агрегатов в «Static Structural» представляет собой совокупную деформацию,

которая включает в себя все виды деформаций, возникающие в конструкции под воздействием внешних нагрузок. Анализ включает в себя как упругие, так и пластические деформации.

В контексте «Static Structural» полная деформация является результатом применения статической нагрузки на конструкцию и может включать:

- упругие деформации: деформации, которые возникают в материале конструкции и исчезают при снятии нагрузки. Эти деформации могут быть рассчитаны с использованием законов Гука для упругих материалов.

- пластические деформации: деформации, которые остаются в материале конструкции после снятия нагрузки и связаны с превышением предела текучести материала.

- изгибные, торсионные и сдвиговые деформации: это различные типы деформаций, которые могут возникать в конструкции в ответ на различные виды статических нагрузок, такие как изгиб, вращение и сдвиг.

Полная деформация представляет общую картину изменений формы и размеров конструкции под воздействием нагрузки. Это важный показатель для оценки поведения конструкции, он может быть использован для оптимизации конструкции, улучшения прочности и долговечности конструкции, а также для обеспечения её соответствия требованиям проекта и теориям прочности.

Эквивалентные напряжения при анализе кронштейна вспомогательных агрегатов в «Static Structural» являются ключевым результатом, который показывает напряженно-деформированное состояние конструкции под воздействием внешних нагрузок. Эти напряжения представляют собой усредненные значения напряжений в конструкции и позволяют инженерам оценить уровень напряжений в различных областях исследуемого изделия.

Эквивалентные напряжения предоставляют информацию о максимальных напряжениях в конструкции и могут быть использованы для определения критических областей, подверженных повреждению или разрушению, а также для оценки общей прочности и надежности конструкции. Эти данные помогают инженерам принимать обоснованные решения о

дизайне и усовершенствовании конструкции с целью минимизации напряжений и повышения её производительности и долговечности.

На рисунке 44 представлен результат эквивалентных напряжений.

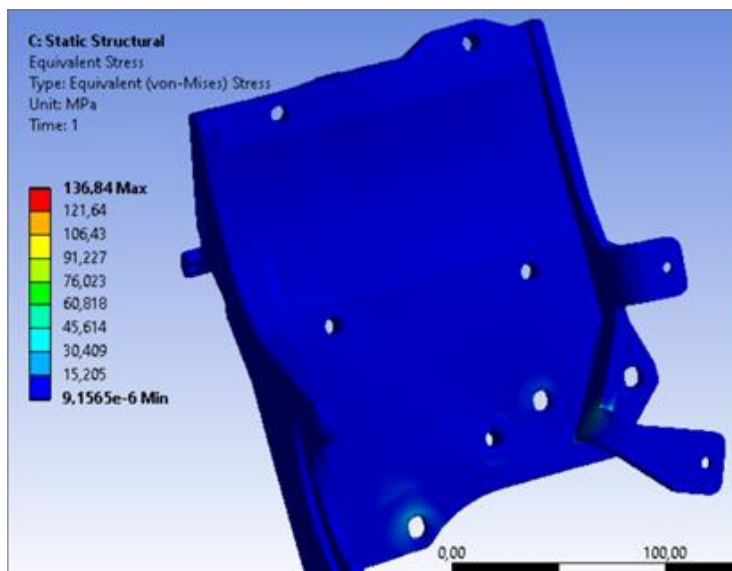


Рисунок 44 – Эквивалентные напряжения кронштейна

Наибольшие перемещения составили 0,05 мм; максимальные напряжения составили 136,8 МПа.

Рассчитаем коэффициент запаса прочности n по формуле:

$$n = \frac{Q_t}{Q} \quad (1)$$

где Q_t – предел текучести;

Q – максимальное напряжение, возникающее при расчете.

Так как предел текучести алюминиевого сплава АК12М2 равен 280 МПа, то подставляя данные в формулу, можно найти коэффициент запаса прочности: $n \sim 2$.

Полученный коэффициент запаса прочности соответствует рекомендуемому коэффициенту запаса прочности – 2.

В заключение проведения прочностного расчета кронштейна следует подвести итоги полученных результатов и сделать соответствующие выводы.

Прочностной анализ оптимизированной конструкции кронштейна подтверждает её высокую надежность и соответствие требованиям безопасности. Результаты демонстрируют эффективное сопротивление конструкции внешним нагрузкам, обеспечивая стабильность и долговечность в условиях эксплуатации.

В качестве выводов по четвертому разделу можно отметить, что в работе был проведен модальный анализ и прочностной расчет оптимизированной конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов с целью оценки их динамических и прочностных характеристик. Результаты обеих аналитических процедур подтвердили, что конструкция соответствует требуемым стандартам и нормам безопасности.

В ходе модального анализа были определены собственные частоты колебаний конструкции, а также наиболее критические формы колебаний. Рассчитанные значения частот были сопоставлены с требованиями проекта, и результаты показали, что частоты находятся в безопасном диапазоне, не совпадающем с частотами возбуждения двигателя. Это позволяет исключить возможность резонанса и связанных с ним проблем.

Прочностной расчет включал оценку напряжений, деформаций и деформационных усилий в конструкции под статическими нагрузками. Результаты расчетов показали, что напряжения и деформации остаются в пределах допустимых значений для материалов, используемых в конструкции. Это гарантирует, что конструкция обладает достаточной прочностью и устойчивостью при работе в условиях эксплуатации.

Заключение

В данной магистерской диссертации были решены все поставленные задачи:

– выполнен анализ требований к эксплуатационным свойствам кронштейна вспомогательных агрегатов.

– проведен расчет базовой конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов.

– произведена оптимизация конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов по результатам анализа расчёта базовой конструкции.

– подтверждены конструкторские решения, внедренные в оптимизированной конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов соответствующими расчетами и анализом.

В ходе модального анализа были определены собственные частоты колебаний конструкции, а также выявлены наиболее критические формы колебаний. Рассчитанные значения частот были сопоставлены с требованиями проекта, и результаты показали, что частоты (481 Гц по 1 моде и выше) находятся в безопасном диапазоне, не совпадающем с частотами возбуждения двигателя (250 Гц). Это позволяет исключить возможность резонанса и связанных с ним проблем.

То есть, исследования позволили подтвердить соответствие кронштейна вспомогательных агрегатов всем необходимым техническим требованиям и стандартам, а также обеспечить безопасность и надежность его работы.

Таким образом, результаты данной исследовательской работы свидетельствуют об успешном опыте оптимизации конструкции кронштейна вспомогательных агрегатов и готовности к внедрению в действующие производственные процессы.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Машиностроение, 2006. 968 с.
2. Асташев В. К., Бабицкий В. И., Быховский И. И. и др. Защита от вибраций и ударов. Под ред. К. В. Фролова. – Москва: Машиностроение, 1981. – 456 с.: ил.
3. Вырубов Д. Н., Ефимов С. И., Иващенко Н. А., Круглов М. Г., Леонов О. Б., Орлин А. С., Роганов С. Г., Симаков Ф. Ф., Чайнов Н. Д., Чистяков В. К. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания»/ Д. Н. Вырубов, С. И. Ефимов, Н. А. Иващенко и др.: Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. -384 с., ил.
4. Гусев А.Ф. Прикладная теория колебаний: учебное пособие / А. Ф. Гусев, М. В. Новоселова. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. – 160 с.
5. Гурьянов А. И. Совершенствование конструкции кронштейна крепления силового агрегата автомобиля в САПР: магистерская диссертация. Тольятти, 2021. 75 с.
6. Дунаев П. Ф., Леликов О. П. Конструирование узлов и деталей машин: Учеб. Пособие для техн. спец. вузов. – 5-е изд., перераб и доп. – М.: Высш. шк., 1998. – 447 с., ил.
7. Карелина М. Ю., Атаманенко Н. В., Костюк И. В., Никитин С. В., Рогов В. Р., Черепнина Т. Ю. Прикладная механика. В 3 ч. Часть 3. Детали машин и основы конструирования механизмов: учеб.-метод. пособие / М. Ю. Карелина [и др.] – М.: МАДИ, 2020. – 212с.
8. Крайнев А. Ф. Идеология конструирования. М.: Машиностроение: Машиностроение-1, 2003. – 386 с.
9. Куклин Н. Г., Куклина Г. С. Детали машин: Учебник для заочных

техникумов / При участии О. Н. Росковой. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Высш. Школа, 1979. – 311 с, ил.

10. Луканин В. Н., Алексеев И. В., Шатров М. Г. и др. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 2. Динамика и конструирование: Учеб. Под ред. В. Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 1995 – 319 с.: ил.

11. Мамет О. П. Краткий справочник конструктора-станкостроителя. Изд. 3-е, переработанное и дополненное. «Машиностроение», 1968. – 688 с., ил., табл.

12. Масино М. А. и др. Автомобильные материалы: Справочник инженера-механика / Масино М. А., Алексеев В. Н., Мотовилин Г. В. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1979. – 288с, ил., табл.

13. Мишин И. А. Долговечность двигателей. Л., «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1976. 288 с. с ил.

14. Новиков М. П. Основы технологии сборки машин и механизмов – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с., ил.

15. Орлин А. С., Алексеев В. П., Вырубов Д. Н., Костыгов Н. И., Круглов М. Г., Крутов В. И., Крылов А. Н., Леонов О. Б., Мизернюк Г. Н., Роганов С. Г. Двигатели внутреннего сгорания. Системы поршневых и комбинированных двигателей. Изд. 2-е. Коллектив авторов. М., «Машиностроение», 1973, 480 с.

16. Певзнер Я. М., Гридасов Г. Г., Конев А. Д., Плетнёв А. Е. Колебания автомобиля. Под ред. Я. М. Певзнера. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.

17. Перекрестов А. М. Оптимизация конструкции кронштейна привода вспомогательных агрегатов // Техника и технология современных производств. 2024.

18. Перекрестов А. М. Ремни привода вспомогательных агрегатов автомобилей // Механики XXI века №22. 2023.

19. Перекрестов А. М. Технологический процесс изготовления кронштейна вспомогательных агрегатов автомобиля LADA Niva Legend: ВКР: 15.03.05. М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Тольяттинский гос. ун-т, Тольятти, 2023. – 57 с.

20. Путьев П. А., Шенбергер П. Н. Основы САПР: учебно-методическое пособие для студентов. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2018. 42 с.
21. Сплав АК12М2 [Электронный ресурс]. – URL: <https://ruskijmetall.ru/splav-ak12m2/> (дата обращения 15.05.2024).
22. Тольский В. Е., Корчемный Л. В., Латышев Г. В., Минкин Л. М. Колебания силового агрегата автомобиля – М., Машиностроение, 1976, 266 с, с ил.
23. Усачев П. Н. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. М.: Машиностроение, 1988. 544с.
24. Шароглазов Б. А. Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчёт процессов: учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания»/ Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков; под ред. засл. деят. Науки РФ, профессора, доктора технических наук Б.А. Шароглазова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. - 525 с.
25. B. Mashadi, Ehsan Zakeri. Dynamic analysis and design of front engine accessory drive system // International journal of automotive engineering. 2011.
26. C. Matthews. Engineer`s data book/ C. Matthews. -2nd edition. – London: Proffesional Engineering Publishing, 2000. -238 p.
27. Mrs. Atole Minakashi B., Mr. Shrivastav Vishal M. Static and Modal Analysis of AC mounting bracket used in Cars for Weight Optimization // International journal of Current Research in Multidisciplinary (IJCRM). 2017.
28. Rahul Rameshwar Kagde. Design Analysis and Optimization of Engine Mounting Bracket // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2021.
29. Robert Bosch GmbH. Bosch Automotive Handbook – 5th edition. SAE International, 2000. 962 p.
30. Vsevolod I. Feodosiev. Advanced Stress and Stability Analysis – t Springer, 2005. 432 p.

Приложение А

Точки центра тяжести

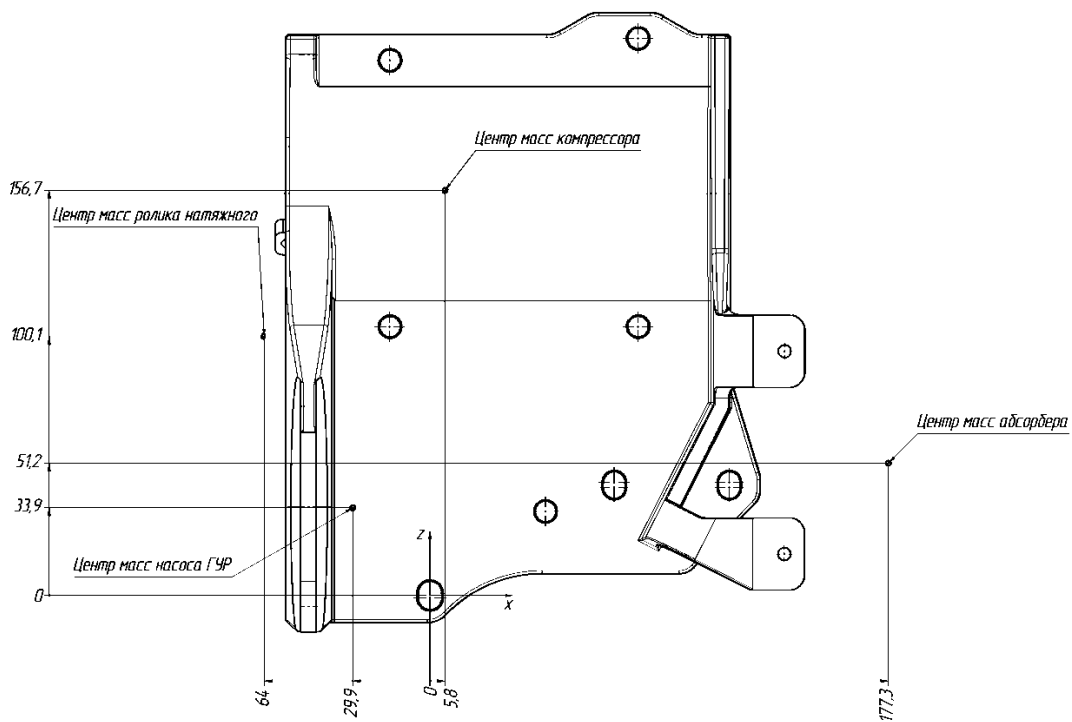
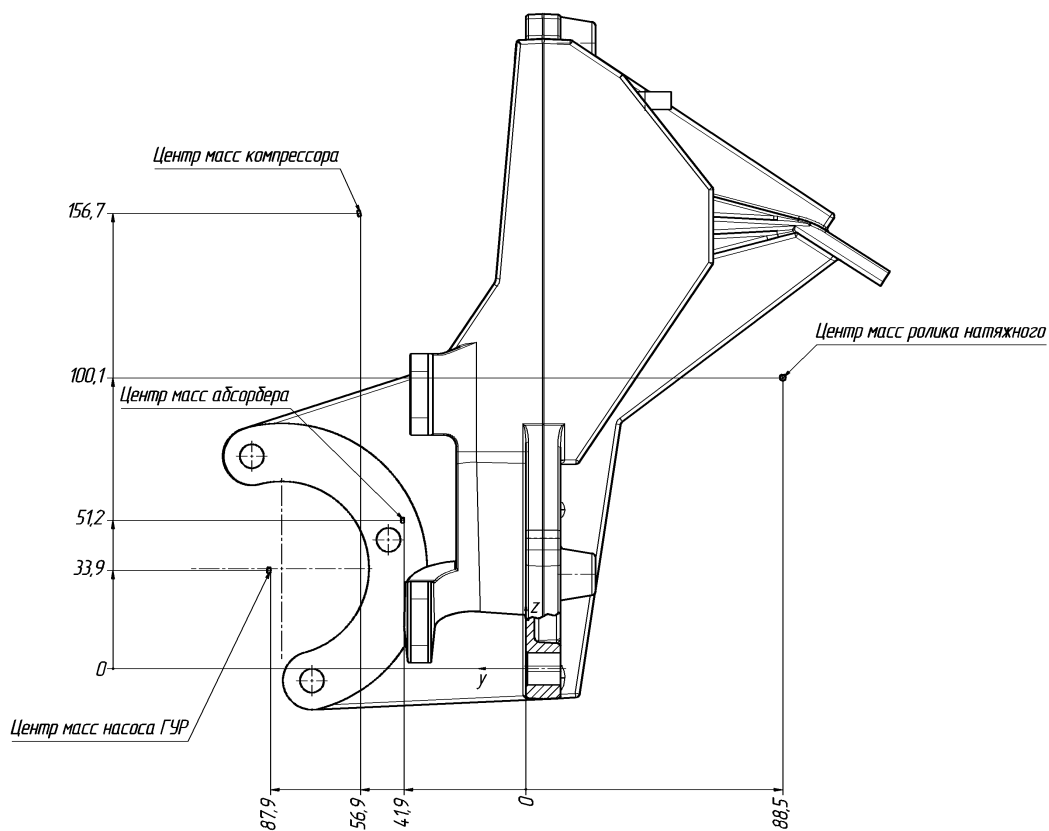


Рисунок А.1 – Точки центра тяжести