

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)

13.03.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки / специальности)

Проектирование и эксплуатация автомобилей с гибридными силовыми установками

(направленность (профиль)/специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Разработка виртуальной лабораторной работы «Анализ кинематики карданного шарнира»

Обучающийся

А.И. Алексеев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, А.В. Зотов

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

Консультант

канд. пед. наук, доцент, С.А. Гудкова

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

Тольятти 2024

Аннотация

Бакалаврская работа посвящена разработке виртуальной лабораторной работы.

В работе предлагается методика разработки виртуальной лабораторной работы, которая позволит студентам и специалистам в области автомобильной техники проводить практические исследования на компьютере.

В ходе работы рассматриваются основные принципы работы карданной передачи, разрабатывается программное обеспечение для моделирования и анализа кинематических характеристик карданного вала. Предлагаемая виртуальная лабораторная работа позволит студентам углубить свои знания в области автомобилестроения и приобрести практические навыки работы с современными инженерными инструментами.

Выпускная квалификационная работа по созданию стенда в 3D посвящена разработке и визуализации трехмерной модели стенда для выставочных и презентационных целей. В работе использовались современные инструменты и методы компьютерного моделирования для создания реалистичной и функциональной конструкции стенда.

Целью работы является создание универсального стенда, который может быть использован для демонстрации различных продуктов, проектов или информационных материалов на выставках, конференциях и презентациях.

Результатом работы является разработанная и визуализированная 3D-модель стенда, которая может быть использована в рамках его выставочной и маркетинговой деятельности. Созданный стенд представляет собой эффективный инструмент для привлечения внимания к представляемым продуктам или информации и создания положительного впечатления у потенциальных клиентов и партнеров.

Abstract

Title of the thesis: Development of a virtual laboratory work "Analysis of the kinematics of the gimbal joint".

The final work consists of an introduction, three chapters, a conclusion, tables, a list of references, including foreign sources, and a graphic part in the form of screenshots of the stand in 3d. The key issue of the thesis is the design of a laboratory stand in 3D.

The aim of the work is to develop a movable 3 d model of a laboratory stand for further training of students

The thesis can be divided into the following logically interrelated parts: analysis of existing equipment, history of 3D modeling, construction of a 3D laboratory stand and its kinematics, methodological instructions for work and the order of execution, cost estimation of such a project.

At the end of the work, we show the successful operation of the stand in 3D to perform laboratory work on the topic "Analysis of the kinematics of the gimbal joint".

Summing up, we would like to emphasize that this work is relevant not only for such laboratory stands, but also in various physical and chemical experiments. Using 3D, it is possible to conduct experiments safely. Every full-time and part-time student will have full-time access.

Содержание

Введение	5
1 Обзор сведений о карданной передаче.....	6
1.1 История развития карданной передачи	6
1.2 Общие сведения о карданной передаче.....	7
1.3 Конструктивные особенности карданного вала.....	8
1.4 Особенности передачи крутящего момента	9
1.5 Обзор конструкции стенда для натуральных испытаний.....	11
2 3D-моделирование и кинематика в CATIA V5.....	13
2.1 Создание 3D-модели стенда в программе CATIA V5.....	13
2.2 Моделирование кинематики карданного шарнира.....	29
3 Методические указания к лабораторной работе «Анализ кинематики карданного шарнира».....	33
3.1 Цель работы.....	33
3.2 Кинематика карданного шарнира.....	33
3.3 Оборудование и материалы	38
3.4 Описание стенда	40
3.5 Порядок проведения работы	41
3.6 Содержание отчета.....	49
3.7 Контрольные вопросы	49
Заключение.....	51
Список используемой литературы	52

Введение

В современном мире компьютерные технологии играют все более важную роль в различных областях, включая инженерное образование. Одним из ключевых аспектов подготовки будущих инженеров является проведение лабораторных работ, позволяющих студентам применять теоретические знания на практике и углублять своё понимание изучаемых процессов и устройств.

Однако традиционные физические лабораторные стенды могут быть дорогостоящими, занимать много места и не всегда доступны для студентов. Виртуальные лабораторные работы, выполняемые с помощью компьютерных симуляций, предлагают альтернативное решение, позволяющее студентам проводить эксперименты в интерактивной цифровой среде. Такой подход имеет ряд преимуществ, включая доступность, гибкость и возможность многократного повторения экспериментов.

Карданный шарнир представляет собой механизм, используемый для передачи вращательного движения между несопряженными осями. Изучение кинематики данного механизма имеет большое значение в технической механике, машиностроении, автомобилестроении и других областях.

Виртуальная лабораторная работа представляет собой симуляцию реального эксперимента, позволяющую студентам и исследователям изучать и анализировать кинематику карданного шарнира без прямого доступа к физическому оборудованию. Такой подход позволяет значительно расширить возможности обучения и исследований, упростить доступ к материалам и повысить эффективность образовательного процесса.

Целью данной работы является создание интерактивной и понятной виртуальной лабораторной работы, который позволит студентам и специалистам изучать кинематику карданного шарнира, проводить требуемые эксперименты и измерения.

1 Обзор сведений о карданной передаче

1.1 История развития карданной передачи

Итальянский инженер Джироламо Кардано в 16 веке представил принцип работы механизма, который впоследствии был назван его именем – карданный вал. Изначально этот механизм использовался в различных сферах, таких как производство, шахты и сельское хозяйство. Однако в конце 19 века карданный вал был впервые внедрен в автомобили Renault, что привлекло внимание водителей и механиков.

История развития карданной передачи делится на три этапа.

«XIX век. Луи Рено стал первым, кто установил карданную передачу на автомобиль, заменив ею повсеместно используемую тогда цепную передачу крутящего момента. Чтобы подобная замена стала возможной, увлечённый механикой молодой человек, недавно вернувшийся с военной службы, в 1898 году на спор усовершенствовал модель трицикла De Dion-Bouton. Будущий легендарный изобретатель и промышленник из Франции добавил транспортному средству, ни много ни мало, четвёртое колесо. Обновлённый автомобиль имел абсолютно новую для того времени трансмиссию с трёхвальной коробкой передач. Карданный вал, добавленный в конструкцию, прекрасно справился с передачей крутящего момента на заднюю ось без провалов. Авто уверенно и плавно передвигалось по несовершенным дорогам, преодолевая даже крутые подъёмы» [10].

«XX век. Простота конструкции кардана, максимально понятный принцип его работы и доказанная эффективность последней поспособствовали активному внедрению механизма в производство заднеприводных и полноприводных автомобилей, а также мотоциклов» [18].

«Новым словом в совершенствовании трансмиссии стали запатентованные Карлом Вайссом в 1923 году шарниры равных угловых скоростей (ШРУС). Конструкция, состоящая из соединённых между собой

вилок с продольными канавками и перемещаемых внутри них четырёх шаров, была призвана стать альтернативой классического карданного вала.» [15].

«В качестве эксперимента ШРУС был установлен на автомобилях «ЗИЛ-131» и «ГАЗ-66». Испытания неидеальными дорогами и серьёзными нагрузками, к слову сказать, были пройдены на отлично. С 30-х годов XX века применение шарниров равных угловых скоростей в автомобилестроении по всему миру поставлено на поток».[4].

«Современные полноприводные автомобили примерно в 30 % случаев укомплектованы карданами со ШРУСами, установленными на обоих концах вала. Шарниры равных угловых скоростей достойно заменяют собой подвижное соединение в составе передающего механизма. Однако, в условиях бездорожья крестовины имеют неоспоримое преимущество» [20].

«XXI век. По прошествии времени принцип действия карданного механизма остался прежним. На данном этапе мы можем наблюдать лишь совершенствование отдельных элементов вала при неизменности конструкции кардана в целом» [7].

Сейчас применяется на автотранспорте, начиная от легковых автомобилей с задним или полным приводом и заканчивая спецтехникой. На сегодняшний день АвтоВАЗ использует карданную передачу на полноприводных автомобилях Нива Legend и Travel. «У Лады Нива Legend – постоянный полный привод, к которому в помощь штатно приставлены понижающая передача в раздаточной коробке, а также блокировка межосевого дифференциала».

1.2 Общие сведения о карданной передаче

«Карданная передача – это механизм в трансмиссиях автомобилей, который используется для передачи моментов между валами, оси которых не лежат на одной прямой и изменяют своё положение в пространстве.» [16].

«Карданная передача состоит из карданных валов, карданных шарниров, промежуточных опор, соединительных устройств.» [6].

«Карданная передача широко применяется в заднеприводных и полноприводных автомобилях для передачи крутящего момента от двигателя и коробки передач к задним колесам. Это обусловлено сложностью выравнивания мотора и элементов трансмиссии в одной плоскости из-за их различной высоты, а также изменчивости положения узлов в процессе движения из-за работы подвески» [17].

Ранее в автомобилях «использовались цепные и ременные передачи, которые были гибкими» [6], но не так надежными и требовали частого обслуживания, а также давали пробуксовки на неровных дорогах. Замена их карданным валом Луи Рено придала своим автомобилям преимущества в надежности и проходимости, поскольку карданный вал выдерживал большие нагрузки и требовал меньше внимания.

1.3 Конструктивные особенности карданного вала

«Карданный вал предназначен для передачи крутящего момента между агрегатами трансмиссии, удаленными друг от друга. Карданным валом соединяют вторичный вал коробки передач с ведущим валом главной передачи, размещенной в заднем мосте автомобилей с задним приводом, либо валы раздаточной коробки с валами главных передач в переднем и заднем мостах машин с полным приводом» [5].

Основная цель кардана заключается в передаче вращения, и его главная составляющая – длинная полая труба, известная как центральный вал. Внутренняя полость в центре создана для снижения веса конструкции. В случае длинных передач избегают проблем с биением и вибрациями, разделяя трубу на несколько частей и добавляя промежуточные валы.

В структуре карданного вала обязательно присутствует эластичная муфта, которая компенсирует качки автомобиля во время движения. Она

устанавливается там, где вал соединяется с коробкой передач. Гибкость этой детали защищает трансмиссию от ударов, вызванных тяжестью трубы. Для связи кардана с основной передачей в заднем редукторе применяется скользящая вилка, способная перемещаться вперед и назад, что позволяет изменять длину механизма в ограниченном диапазоне.

Для соединения валов между собой и с элементами трансмиссии используются жестко закрепленные вилки – одна на конце ведущего вала, другая на конце ведомого. Между ними располагаются крестовины с игольчатыми подшипниками в каждом из четырех наконечников. Кроме того, для крепления всей конструкции предусмотрены пазы и шлицы.

«Под карданным валом в автомобиле обычно устанавливается кронштейн безопасности, который предотвращает падение трубы на дорогу в случае обрыва одной из деталей механизма. Если в трансмиссии предусмотрено несколько валов, каждый из них должен проходить через опорный подшипник, который поддерживает конструкцию и стабилизирует ее вращение.» [24].

Помимо основных компонентов, у карданных валов есть и другие детали. Фланцы используются для надежного крепления к коробке передач и заднему редуктору. Сальники применяются для герметизации соединений и снижения вибраций. Предохранительные муфты служат для дополнительной защиты от растяжения и ударов. Кожухи предотвращают попадание пыли, грязи и камней внутрь.

С помощью «крестовин с игольчатыми подшипниками можно наклонять шарниры на углы от 20 до 30 градусов» [21], сохраняя относительно равномерную передачу крутящего момента.

1.4 Особенности передачи крутящего момента

«Ранее мы обсуждали применение промежуточных валов. Однако одноваловые карданные валы являются более простыми, дешевыми и

надежными. В то время как на больших расстояниях, например, в легковых автомобилях бизнес-класса, внедорожниках и грузовиках, они могут стать источником шума и сильных вибраций. Поэтому в современных автомобилях чаще используются многовальные конструкции. Хотя они дороже и требуют более сложного обслуживания, они работают намного более тихо и минимизируют сильные биения» [2], [3].

«Тип соединений в устройстве карданного вала также различается. Описанную ранее конструкцию с крестовинами часто называют шарниром неравных угловых скоростей, применяемым в асинхронных карданных валах. Скорость вращения их валов отличается от частоты вращения вилок на коробке передач и редукторе, что делает такие модели простыми и более дешевыми, но при этом шумными и вибрирующими. В синхронных карданных валах используются шарниры равных угловых скоростей, аналогичные тем, которые применяются в переднеприводных автомобилях, чтобы выравнивать частоту вращения» [19].

Наличие эластичной муфты делает карданный вал автомобиля полужестким, что повышает его надежность и снижает нагрузку на трансмиссию. Полностью жесткие карданные валы используются обычно в спецтехнике, где допускаются минимальные отклонения.

Открытые карданные валы, установленные под днищем или в специальном тоннеле внутри кузова, преобладают в легковых автомобилях, так как они легче, но более подвержены воздействию внешней среды. Закрытые карданные валы, расположенные внутри другой трубы, чаще применяются в грузовиках, так как они тяжелее, но обеспечивают более высокую надежность для трансмиссии, которая подвергается высоким нагрузкам.

1.5 Обзор конструкции стенда для натуральных испытаний

В настоящий момент в лабораторной работе «Анализ кинематики карданного шарнира» используется натурная модель стенда, представленная на рисунке 1.

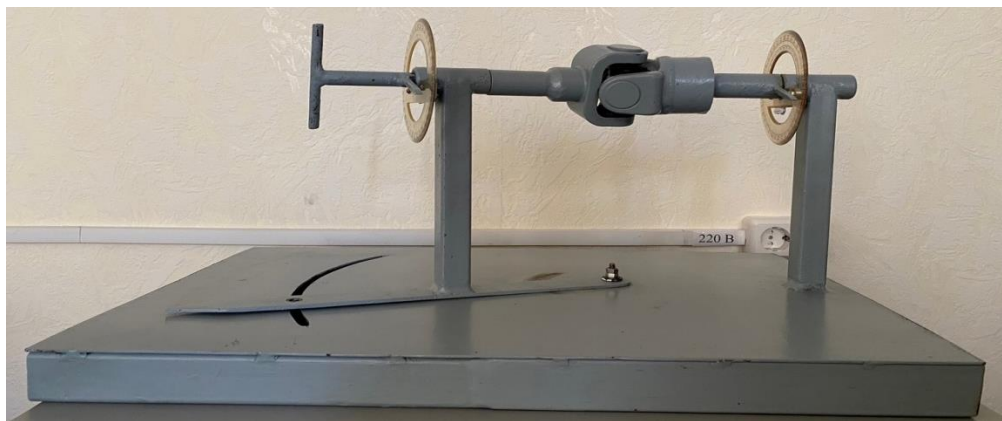


Рисунок 1 – Лабораторный стенд

Стенд состоит из карданного шарнира, ведомая вилка которого монтируется к неподвижной станине стенда. Ведущая вилка связана с указателем угла шарнира. К торцу ведущей вилки приварена ручка вращения шарнира. Измерения углов выполняют посредством транспортиров.

Принцип работы подобного стенда будет более подробно изложен дальше в следующих разделах данной бакалаврской работы.

В качестве выводов по разделу можно заключить, что актуальность использования карданной передачи все еще достаточно высокая. Обычно карданный вал используется в трансмиссии автомобиля, соединяя коробку передач с задним редуктором, который распределяет крутящий момент между колесами. Однако карданные валы также применяются в других узлах, таких как соединение рулевой колонки с рейкой, управляющей поворотом передних колес, а также в специализированной технике для привода навесного оборудования, например, насосов гидравлических контуров у грузовиков,

механизмов подъема бороны у тракторов и подметальных щеток уборочных машин.

Выполнение измерений с помощью транспорта, установленного на натурном стенде, дает большую погрешность, поэтому разработка виртуальной лабораторной работы необходима для повышения качества измерений.

2 3D-моделирование и кинематика в CATIA V5.

2.1 Создание 3D-модели стэнда в программе CATIA V5

Для создания 3D-модели деталей, сборки, а также, создание анимации движения кардана, в данной работе используется система автоматизированного проектирования (САПР) CATIA V5 и КОМПАС 3D. Данные программы по своему удобны, построение деталей (моделей) и сборка удобнее в CATIA, а для анализа кинематики этой модели удобнее использовать КОМПАС. Создание модели я начал с создания Sketch-эскиза (рисунок 2).

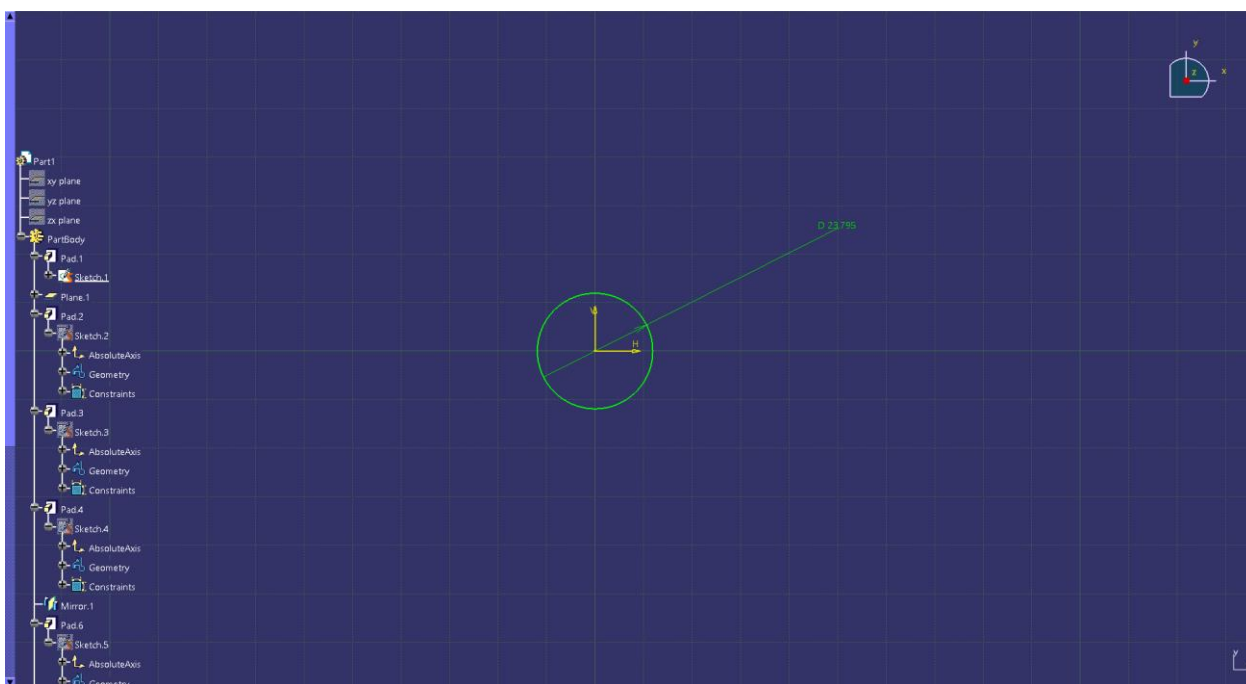


Рисунок 2 – Команда «Sketch1» эскиз

Затем с помощью команды Pad выдавливаем и задаем необходимую толщину детали (рисунки 3, 4).

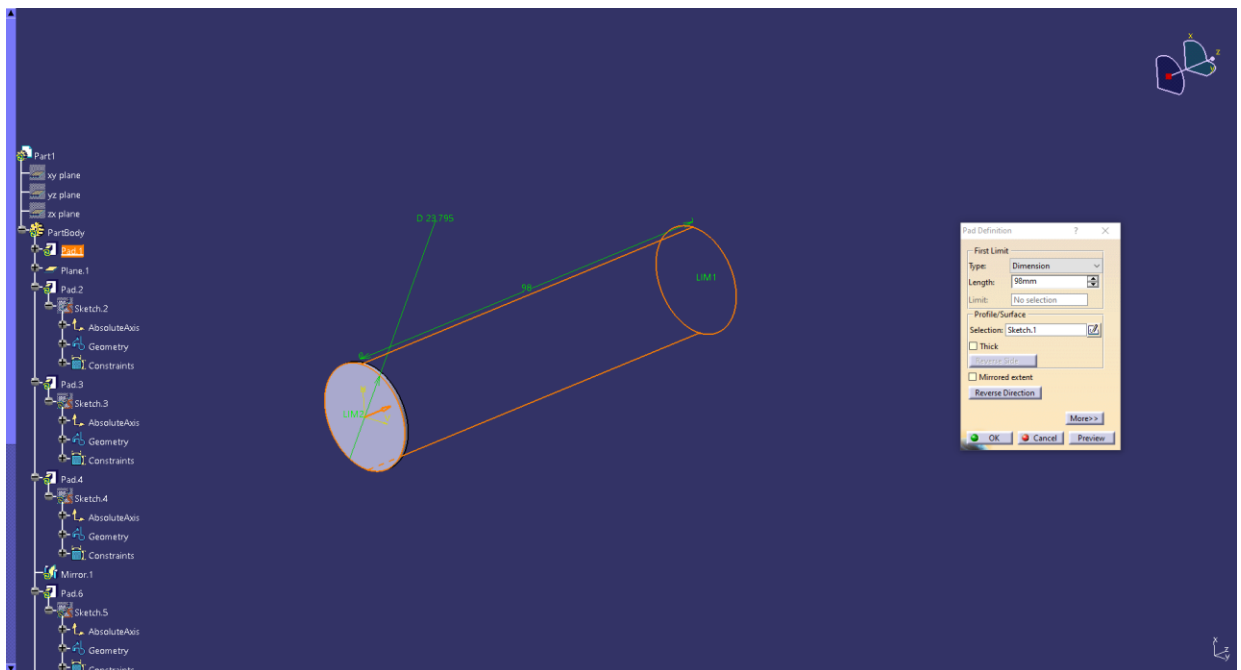


Рисунок 3 – Команда «PAD1» выдавливание

Нажимаем кнопку «показать» а после чего ОК тем самым завершим операцию выдавливания.

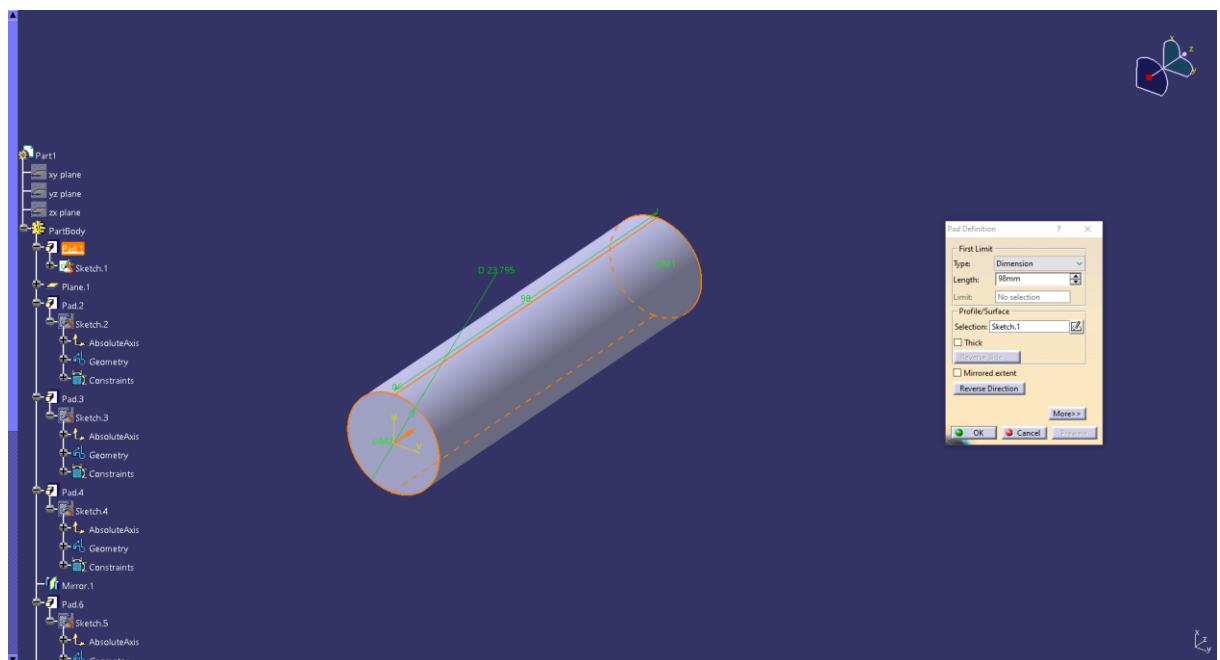


Рисунок 4 - Завершенная команда «PAD1» выдавливание

Далее выбираем перпендикулярную плоскость для построения схожей части. Выбираем на нужном нам расстоянии, чтобы PAD был в одну сторону (рисунок 5). И выдавливаем так же, как и первую (рисунки 6, 7).

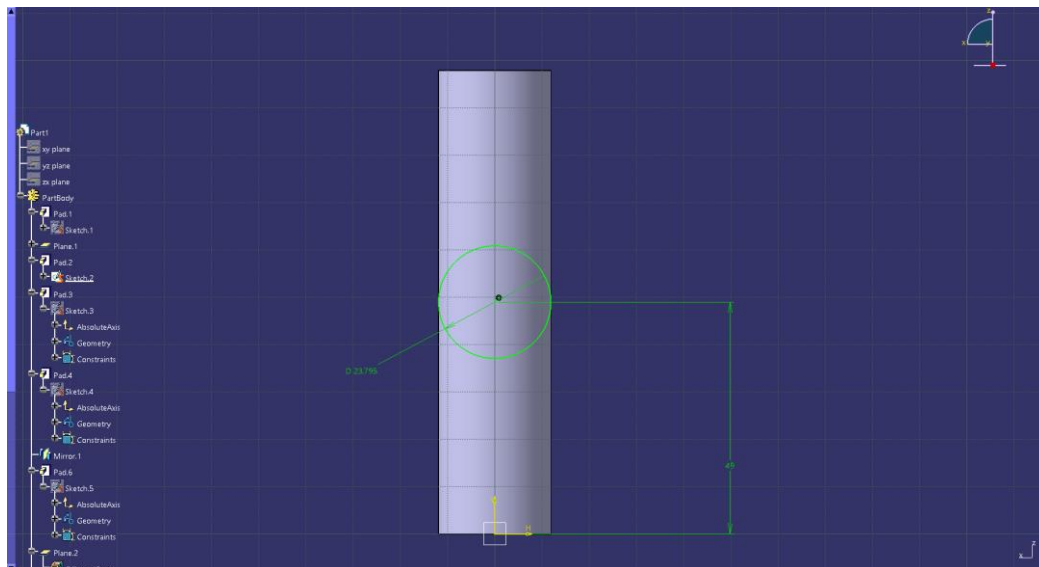


Рисунок 5 – Команда «Sketch2» эскиз

После создания правильного эскиза нажимаем функцию «выдавить».

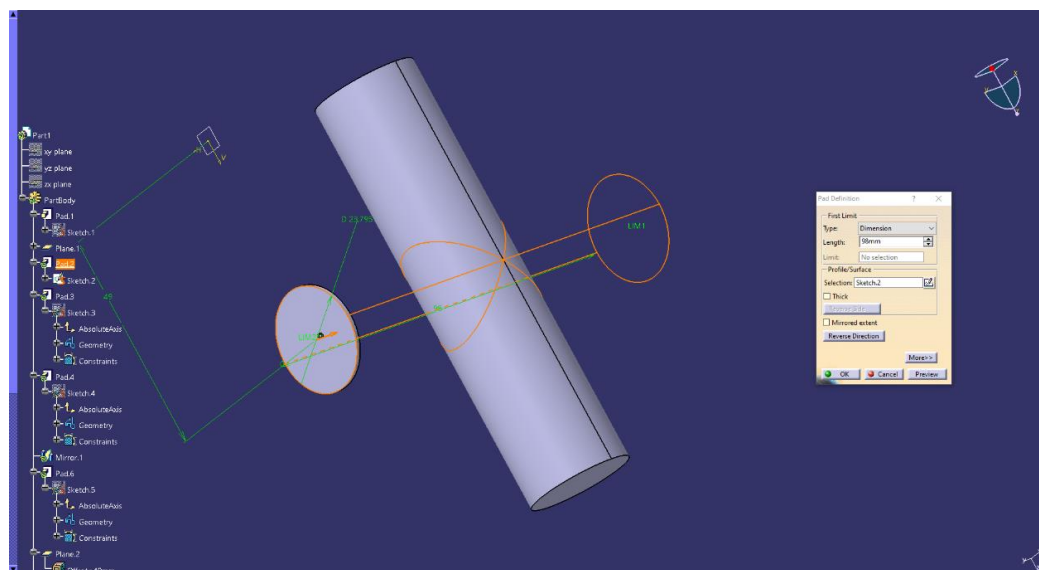


Рисунок 6 – Команда «PAD2» выдавливание

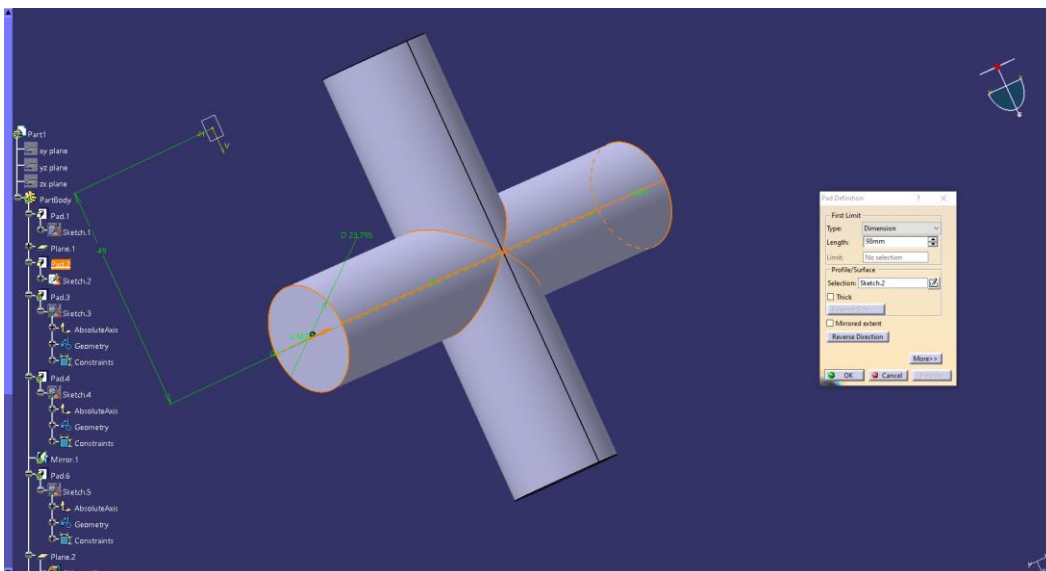


Рисунок 7 – Завершенная команда «PAD2» выдавливание

Далее приступаем к построению центра нашего изделия. Для этого нужно выбрать плоскость ровно по центру и нарисовать третий эскиз Sketch3 (рисунок 8). И повторяем команду Pad и выдавливаем (рисунки 9, 10).

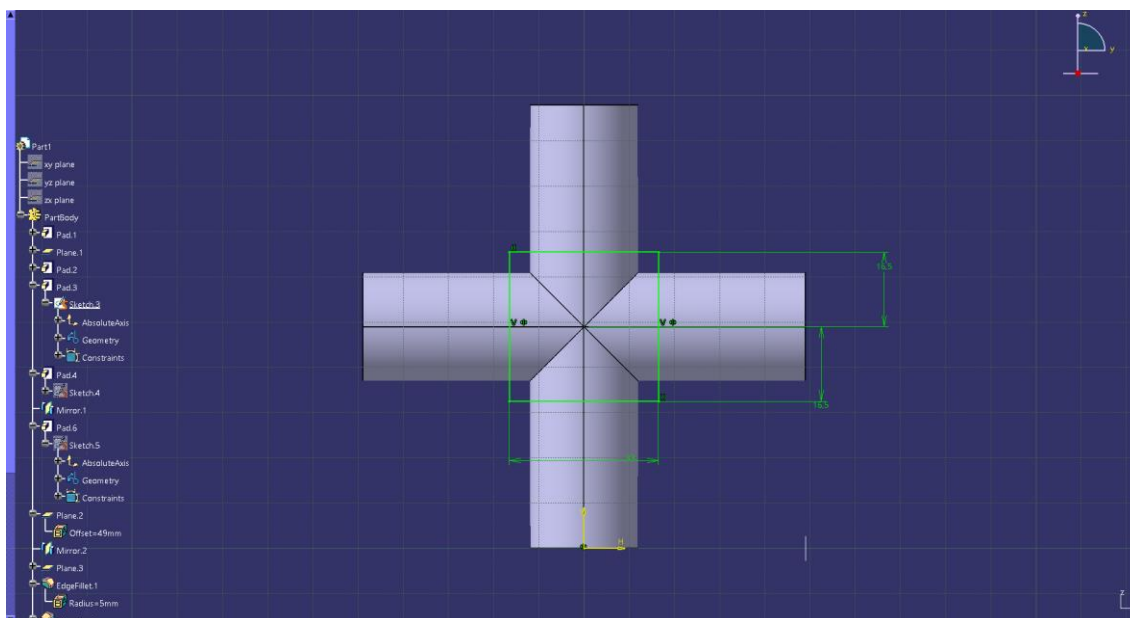


Рисунок 8 – Команда «Sketch3» эскиз

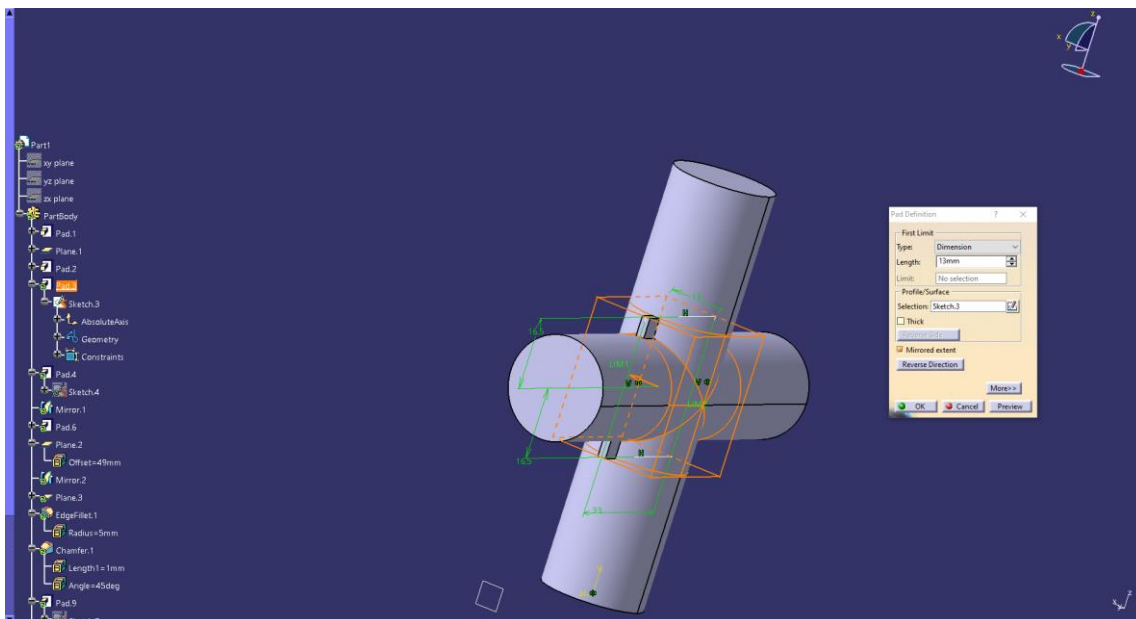


Рисунок 9 – Команда «PAD3» выдавливание

Завершаем команду «выдавить» и приступаем к следующему шагу.

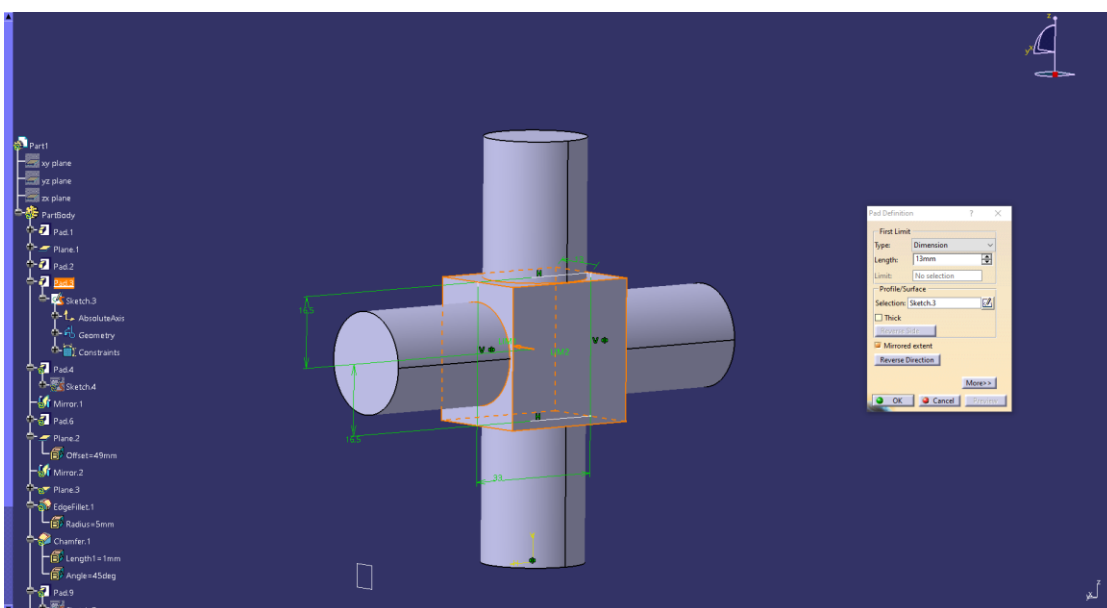


Рисунок 10 – Завершенная команда «PAD3» выдавливание

После чего начинаем детализировать наше изделие. Начинаем рисовать на одном из уже созданных цилиндров утолщение, затем с помощью функции

mirror отражаем ее на другую сторону. И повторяем это для двух других цилиндров (рисунки 11-14).

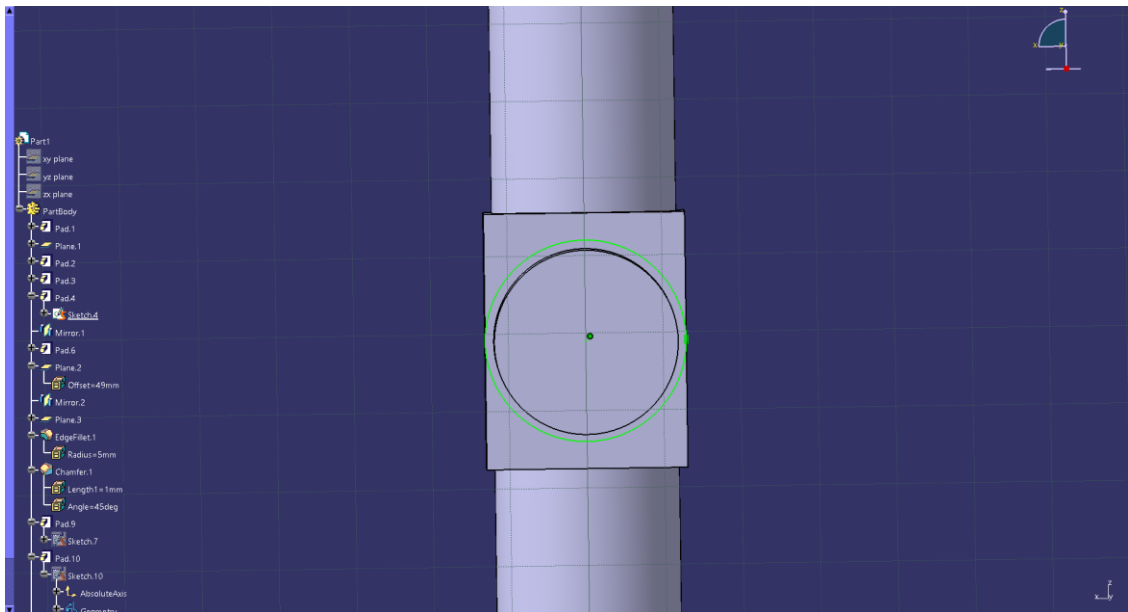


Рисунок 11 – Команда «Sketch4» эскиз

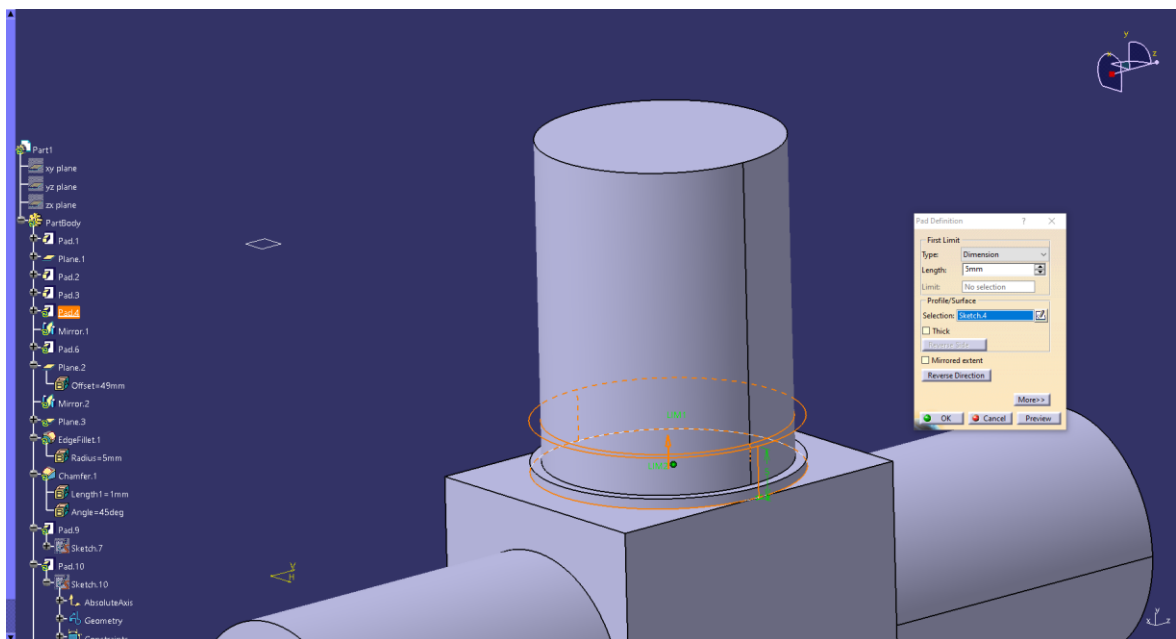


Рисунок 12 – Команда «PAD4» выдавливание

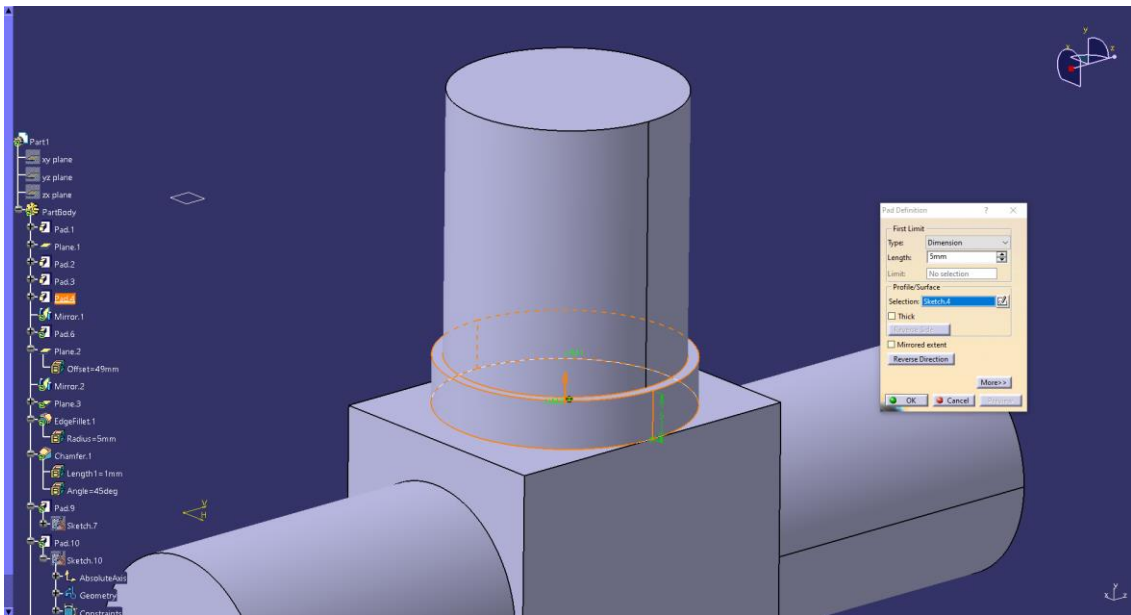


Рисунок 13 – Завершенная команда «PAD4» выдавливание

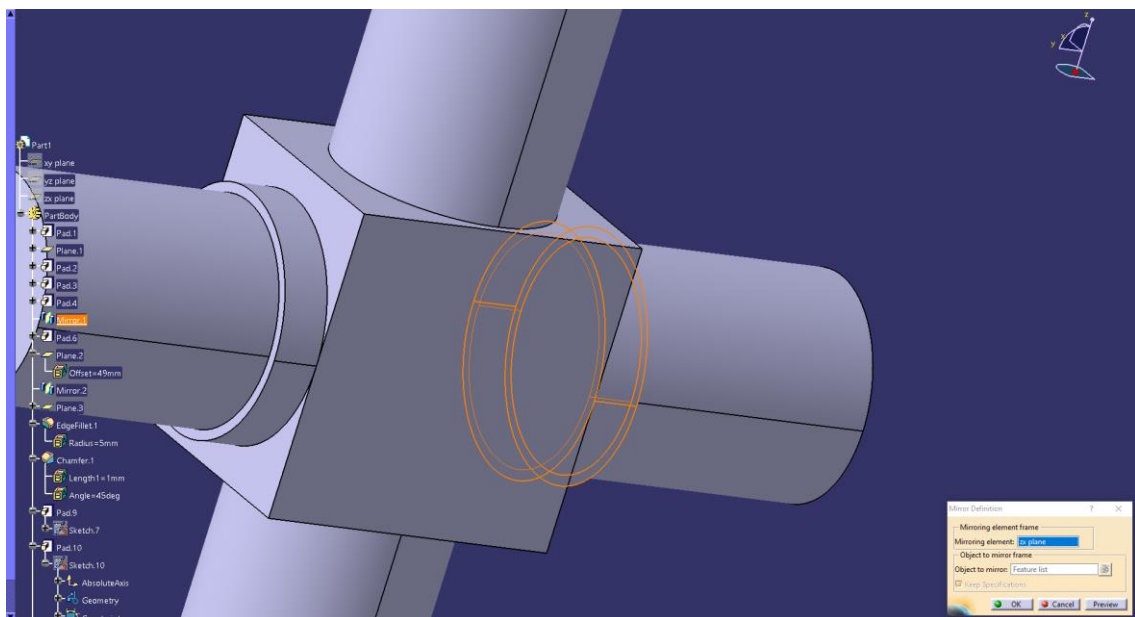


Рисунок 14 – Команда «Mirror» отзеркаливание

После выполненной нами работы необходимо сделать кромочное скругление и фаску. Для этого выбираем функцию «EdgeFillet», выбираем грани, которые нам нужны с зажатой кнопкой Ctrl на клавиатуре и задаем радиус, выделенные грани подсвечиваются красным (рисунок 15).

Команда для фаски очень схожа на скругление. Выбираем команду «Chamfer» и так же, как у «EdgeFillet» выбираем грани, которые нам нужны. Указываем длину фаски в мм и угол в градусах, единицы измерения выбраны автоматически (рисунки 16, 17).

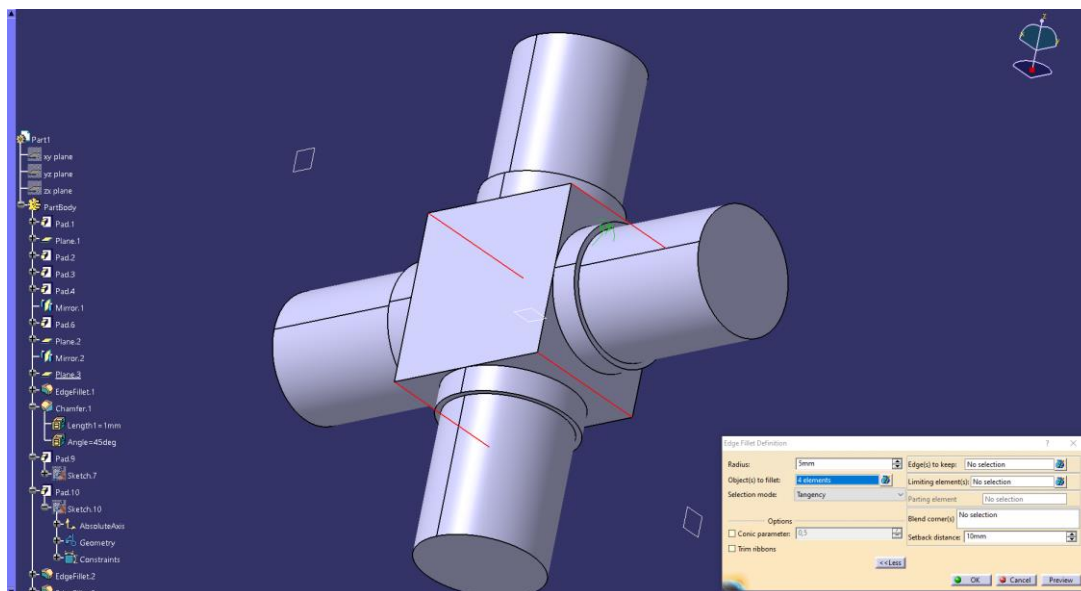


Рисунок 15 – Команда «EdgeFillet1» фаска

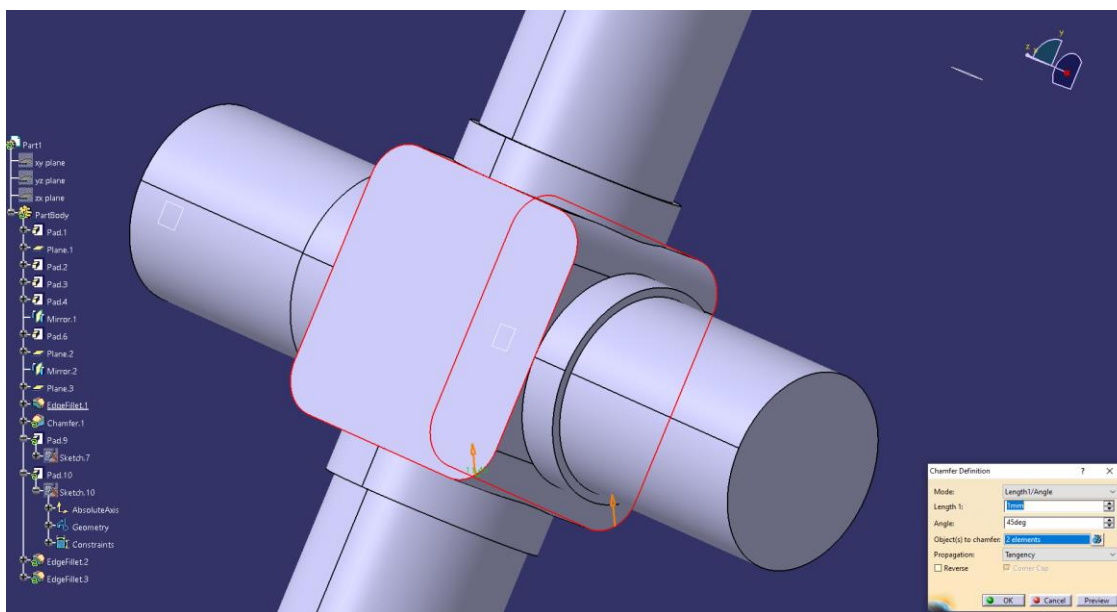


Рисунок 16 – Команда «Chamfer» скругление

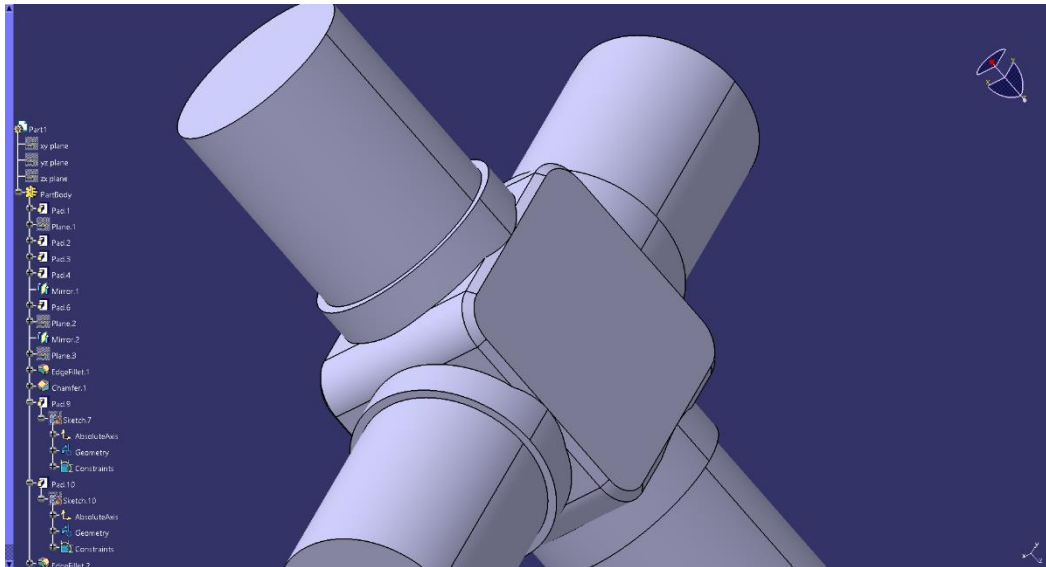


Рисунок 17 – Результат команд «EdgeFillet» и «Chamfer» кромочное скругление и фаска

Приступим к созданию тавотницы. Тавотница – это специальный узел нужный для заправки смазочных масел с помощью шприца под давлением. Вернемся к «Sketch 7», который мы построим на одной из ровных поверхностей. После построения эскиза выдавливаем и придаем ему форму, а также добавляем кромочное скругление (рисунки 18-23).

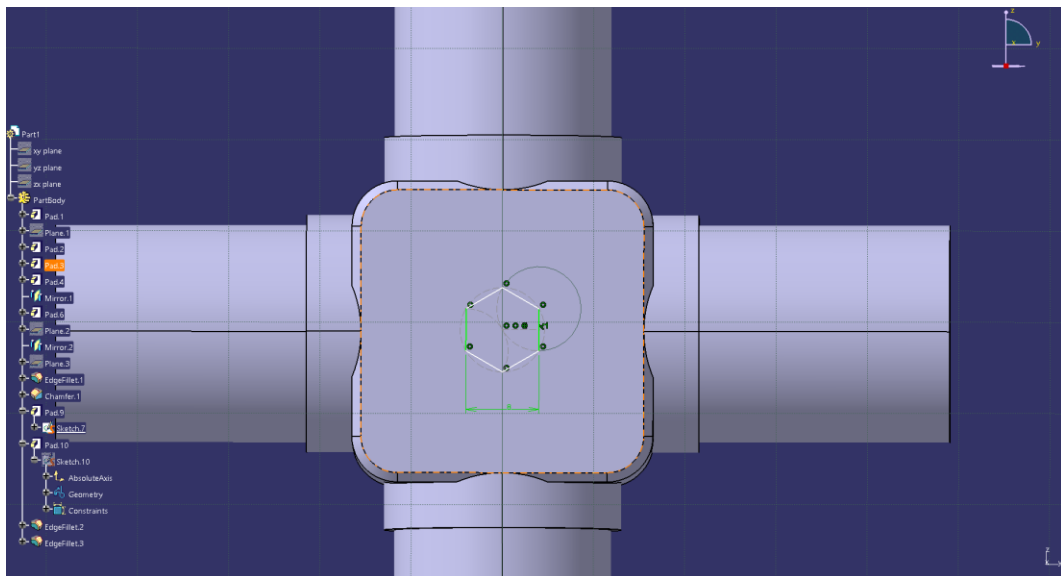


Рисунок 18 – Команда «Sketch7» эскиз

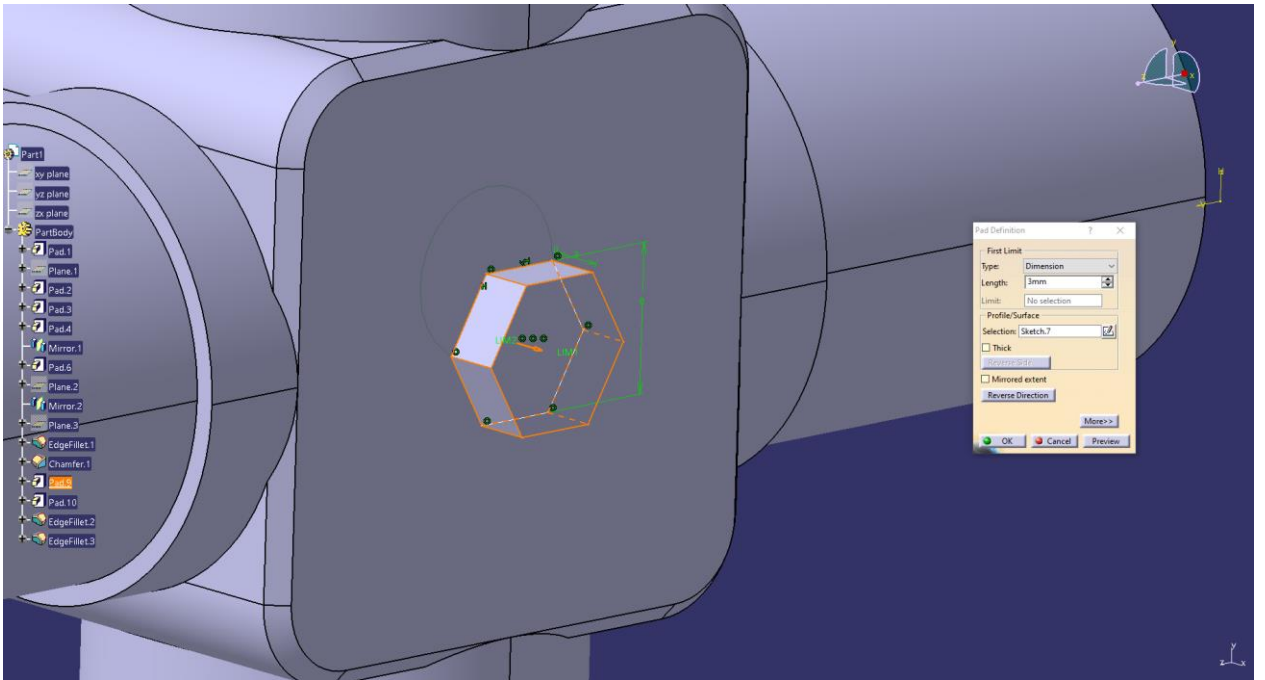


Рисунок 19 – Завершенная команда «PAD5» выдавливание

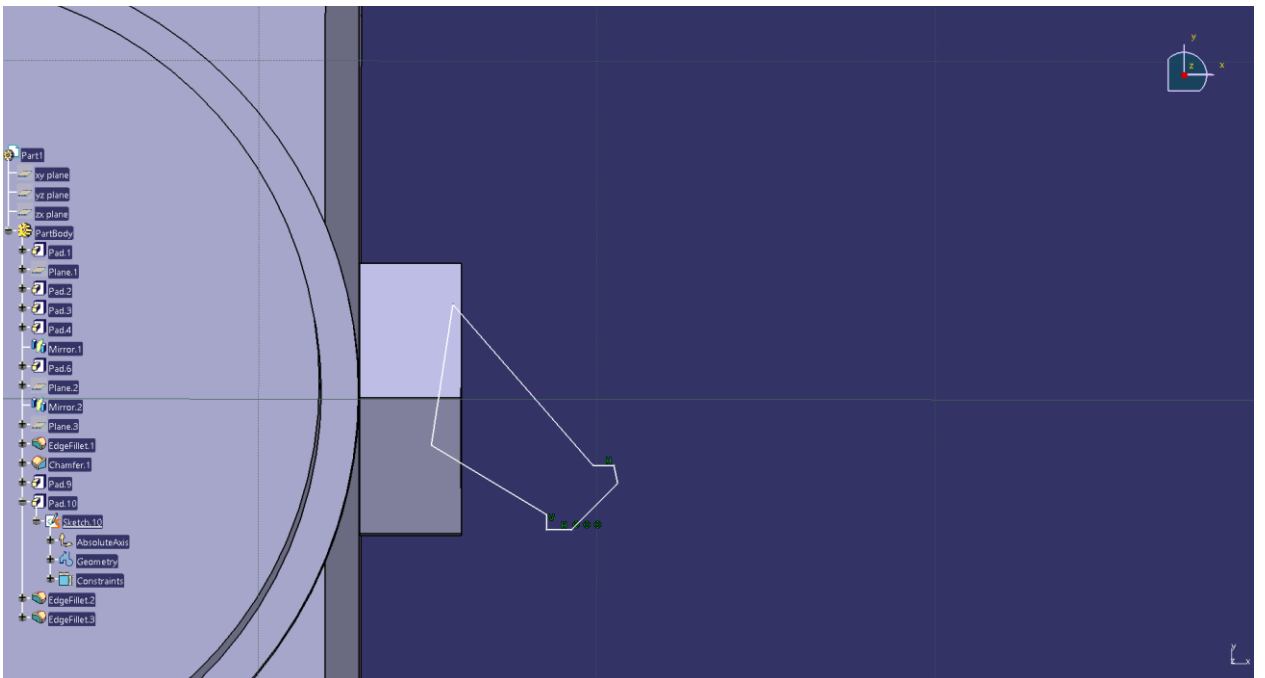


Рисунок 20 – Команда «Sketch8» эскиз

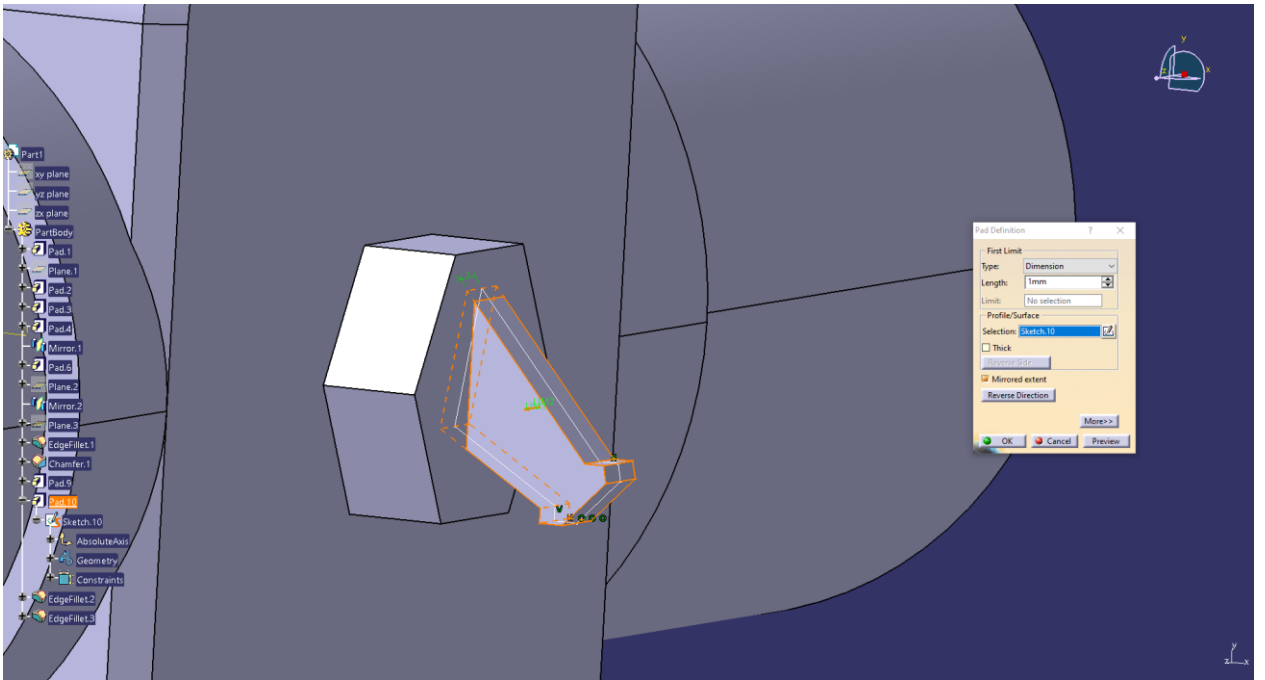


Рисунок 21 – Завершенная команда «PAD5» выдавливание

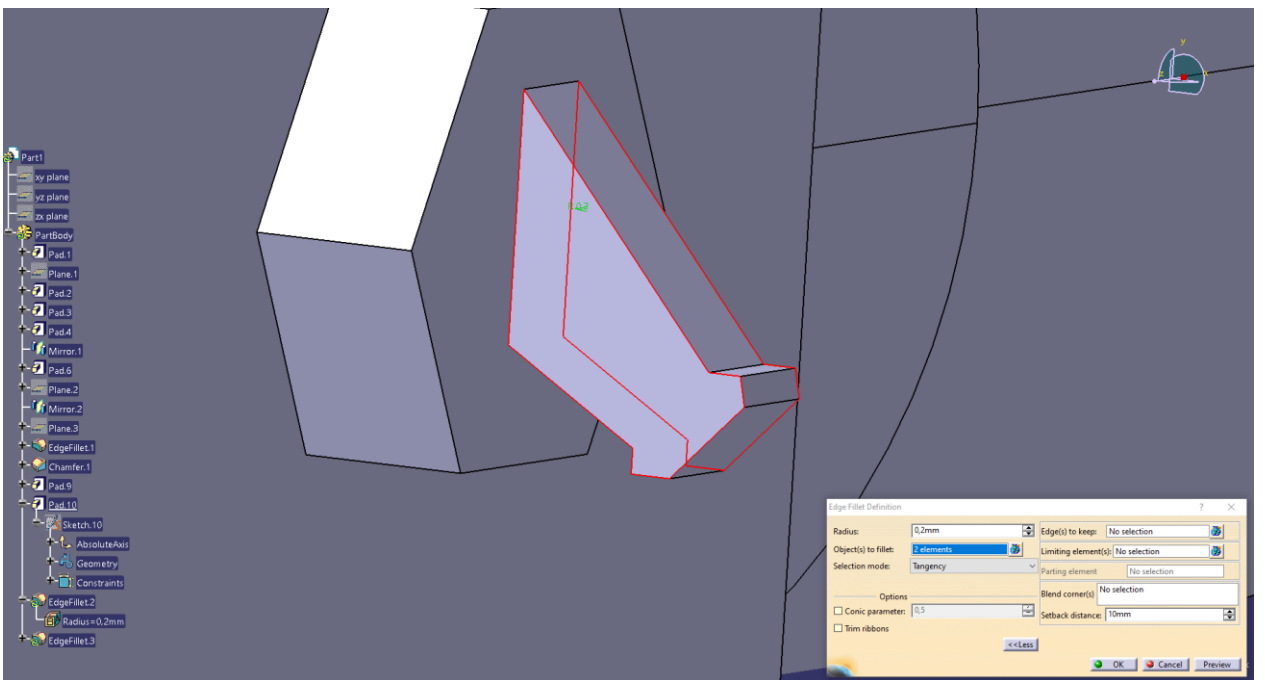


Рисунок 22 – Команда «EdgeFillet2» кромочное скругление

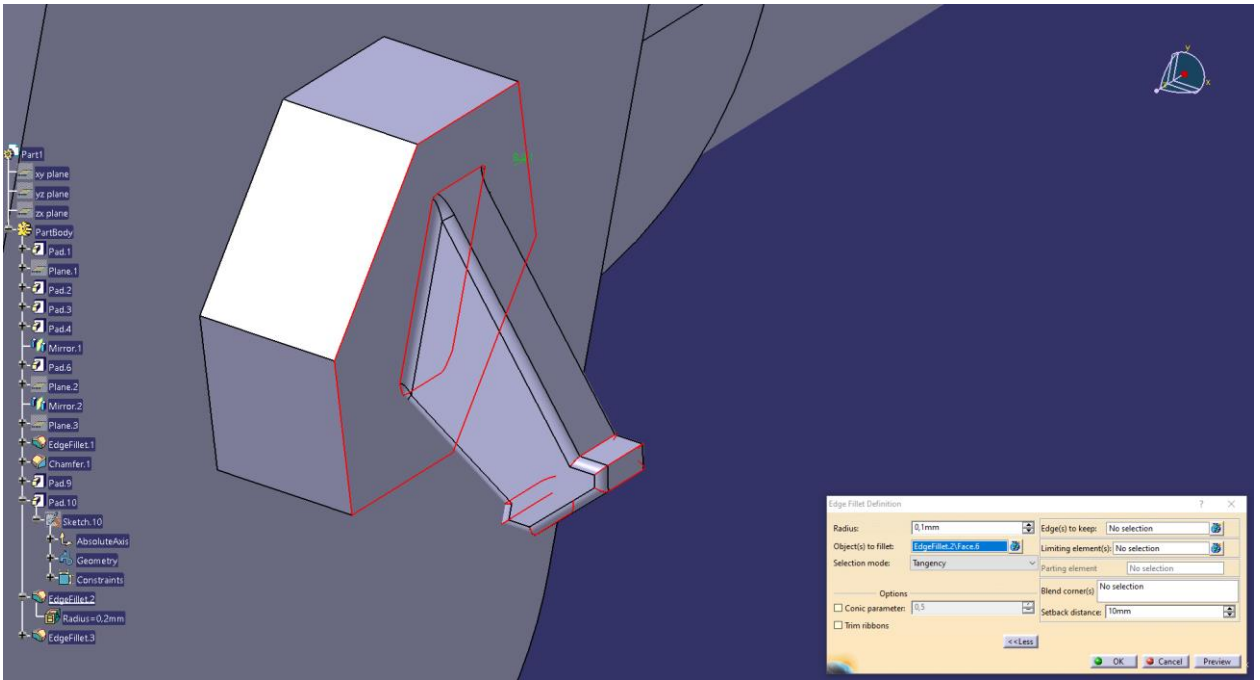


Рисунок 23 – Команда «EdgeFillet» кромочное скругление

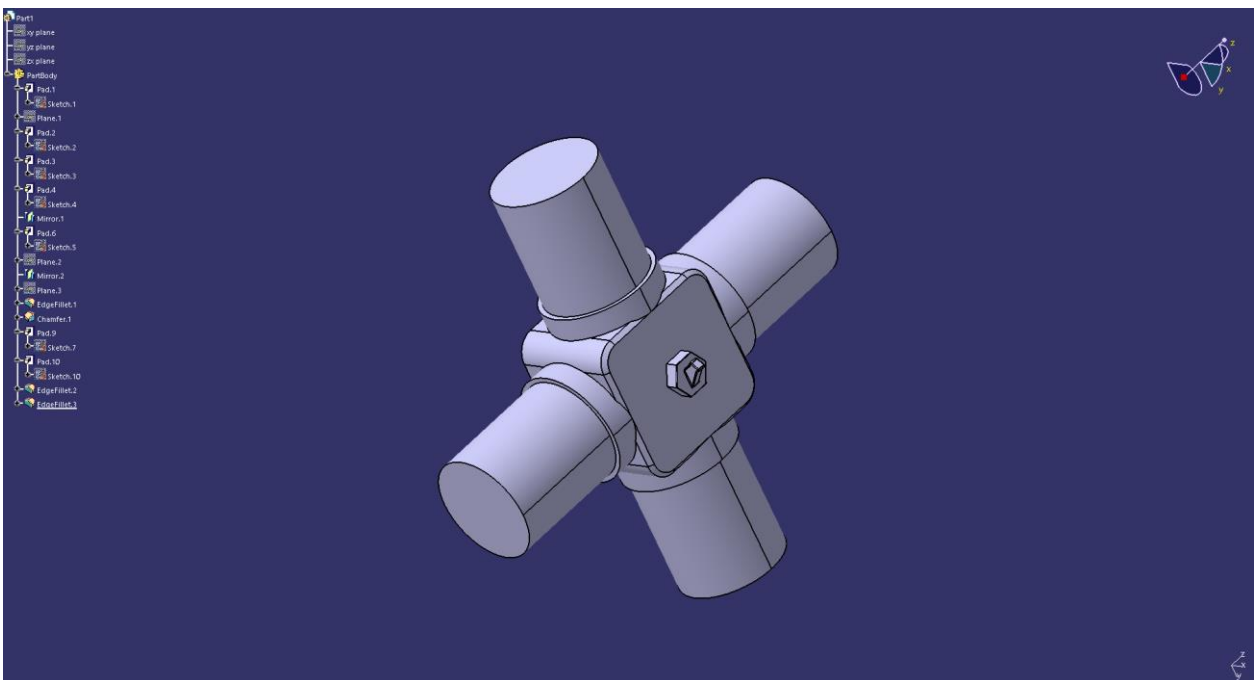


Рисунок 24 – Готовая модель крестовины

Закончив создание крестовины, приступаем к созданию остальных деталей карданного шарнира по этому же принципу (рисунки 25-29).



Рисунок 25 – Уплотнительное кольцо

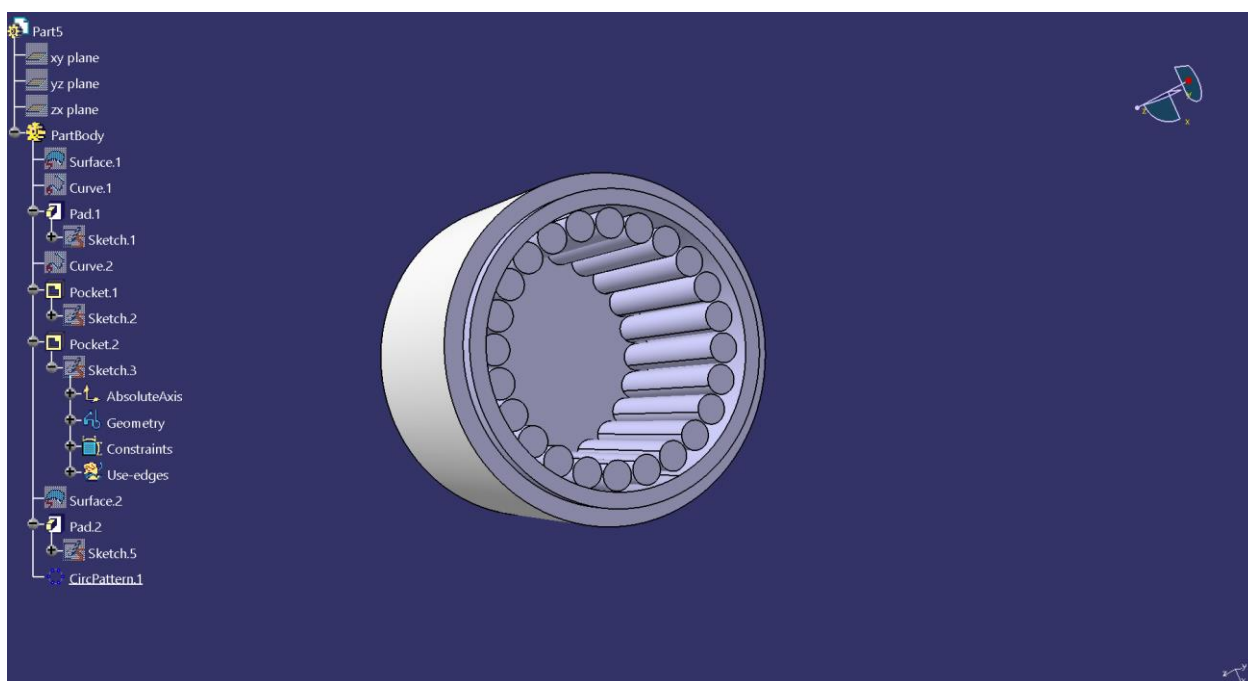


Рисунок 26 – Игольчатый подшипник

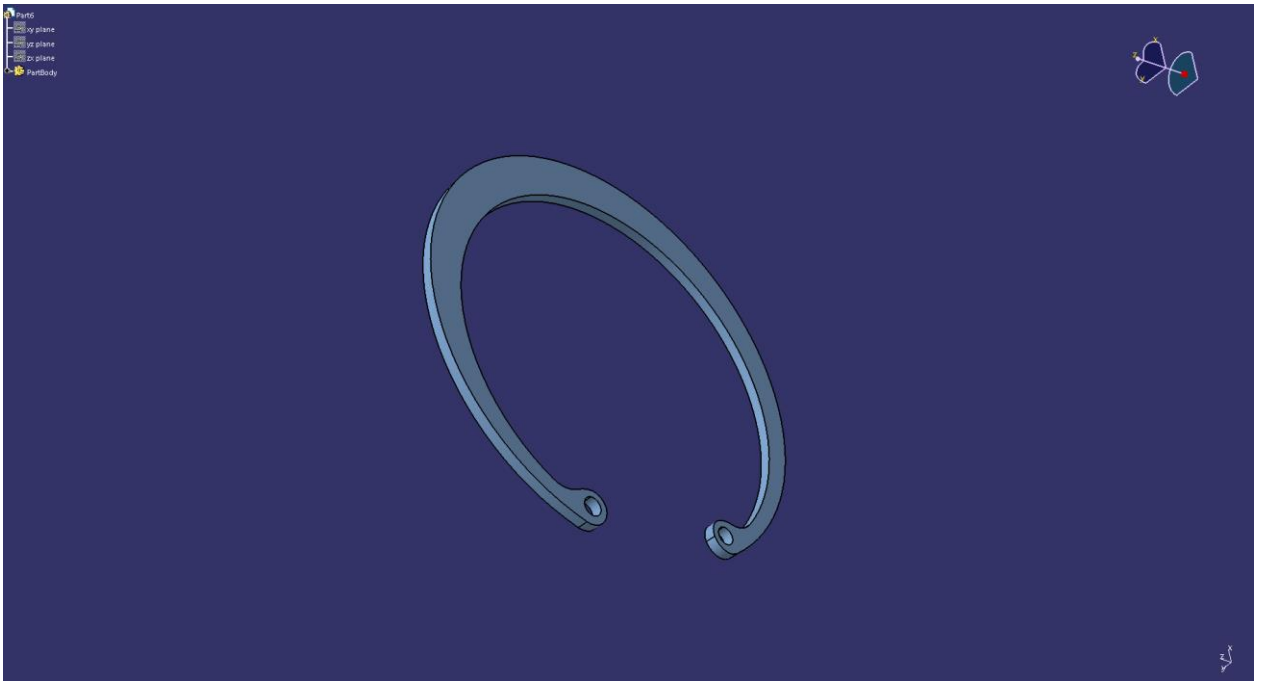


Рисунок 27 – Стопорное кольцо

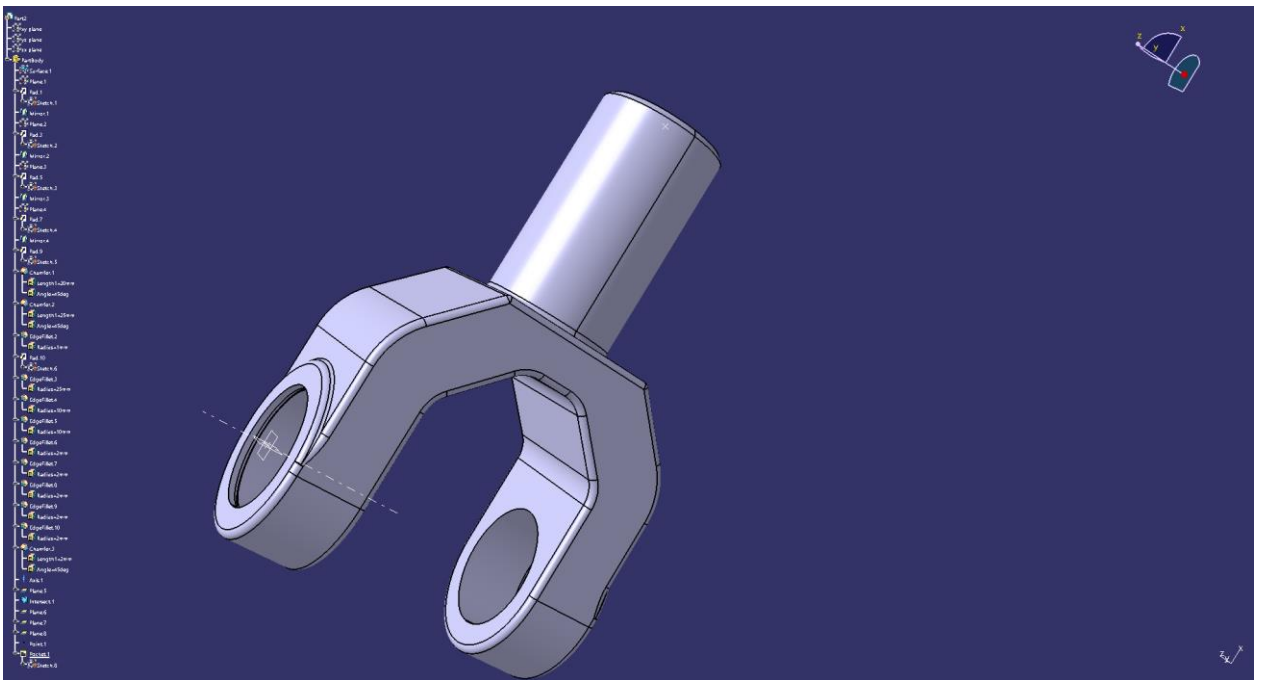


Рисунок 28 – Вилка карданного вала

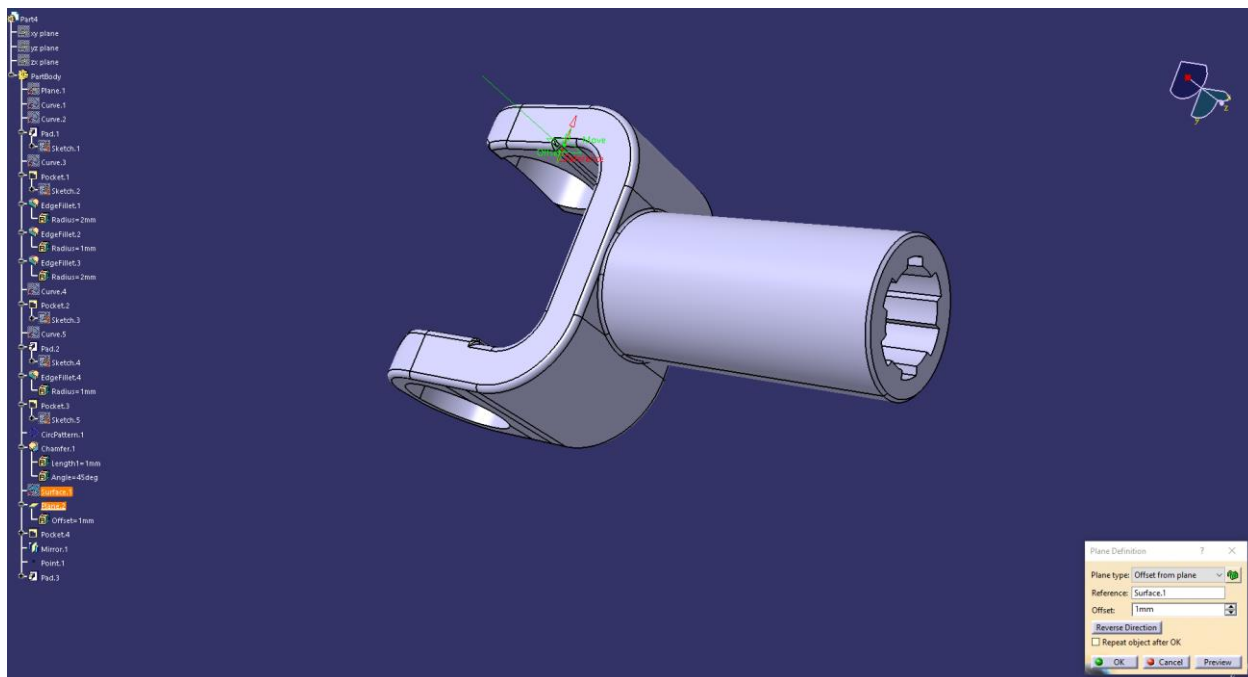


Рисунок 29 – Шлицевая вилка

Далее из созданных деталей делаем сборку и учитываем заранее количество деталей, так как некоторые нужно будет добавить в количестве нескольких штук (рисунок 30).

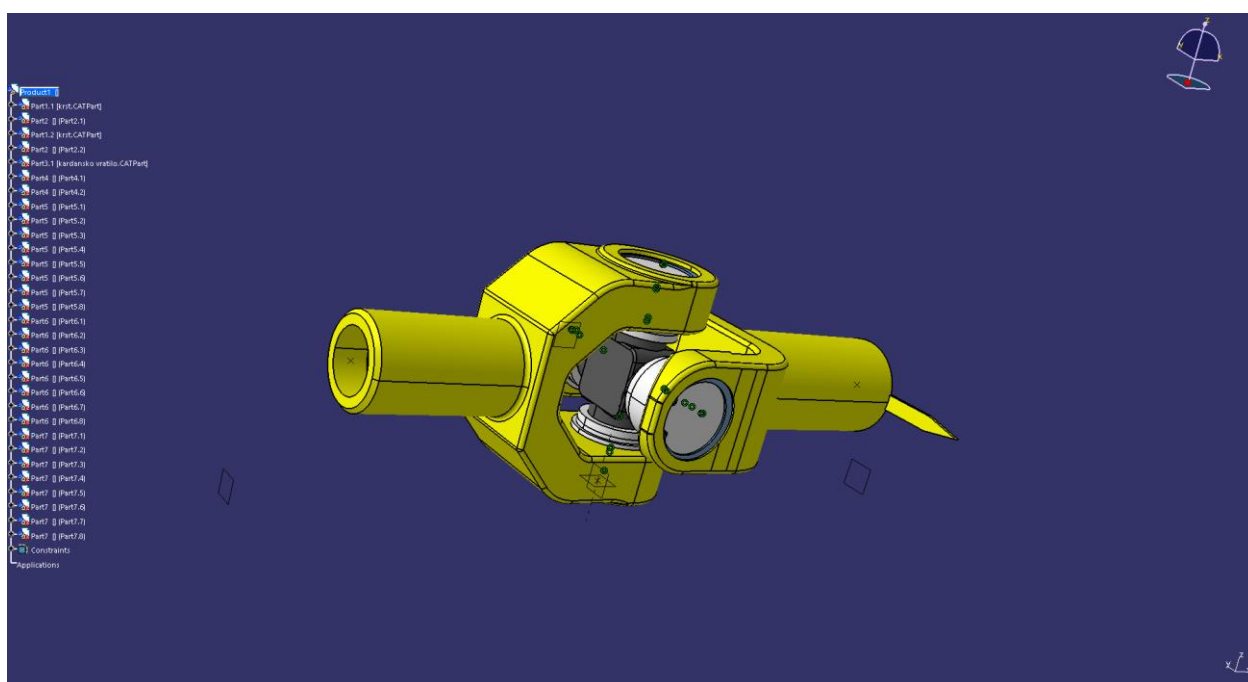


Рисунок 30 – Готовая сборка карданного шарнира

После сборки карданного шарнира, создаем к нему стенд для лабораторной работы (рисунок 31).

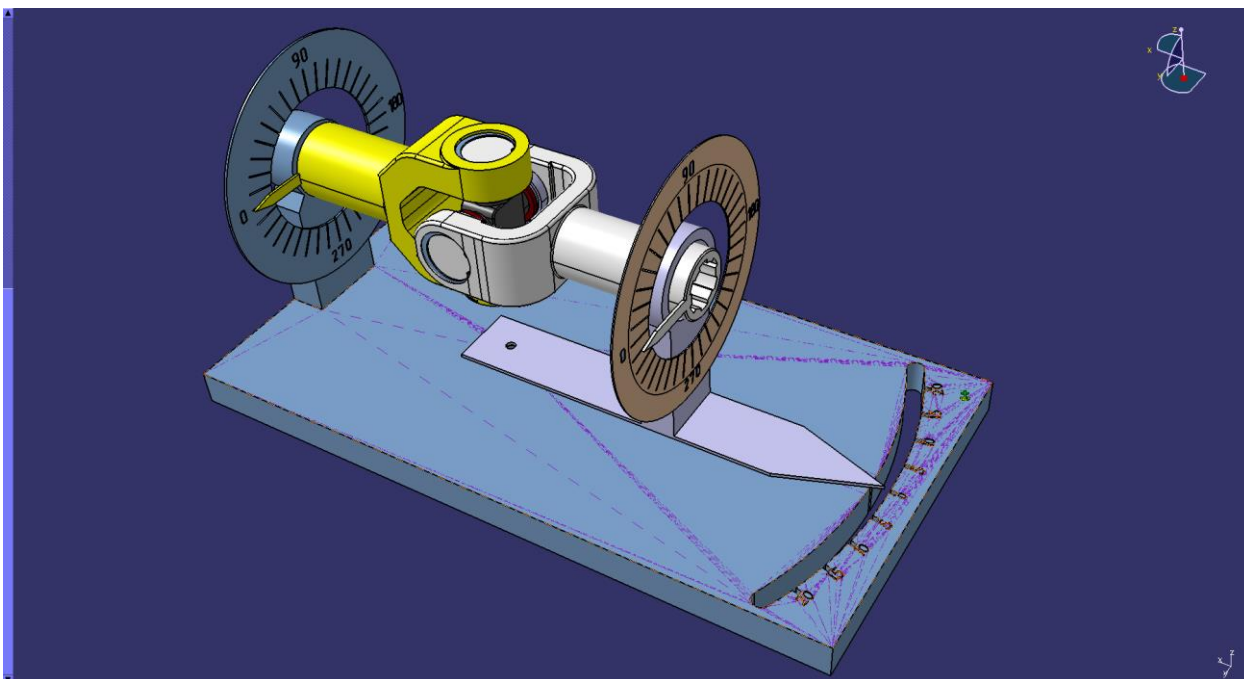


Рисунок 31 – Собранный стенд в 3D

Спроектированная модель стенда Анализ кинематики карданного шарнира в CAD программе CatiaV5, позволяет более детально изучить принципы работы карданного шарнира, обнаружить возможные проблемы и недочёты в конструкции, а также улучшить процесс проектирования.

2.2 Моделирование кинематики карданного шарнира

Для создания кинематики карданного шарнира использовалась так же программа CATIA V5. В ней мы выбирали объекты, которые двигались и те, которые оставались статичными. Далее после выбранных нами привязок активируем компас (рисунок 32).

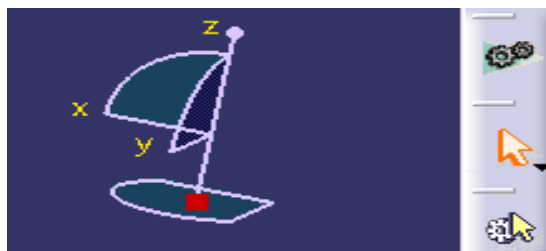


Рисунок 32 – Компас

И ставим на центр вращения стрелки (рисунки 33, 34).

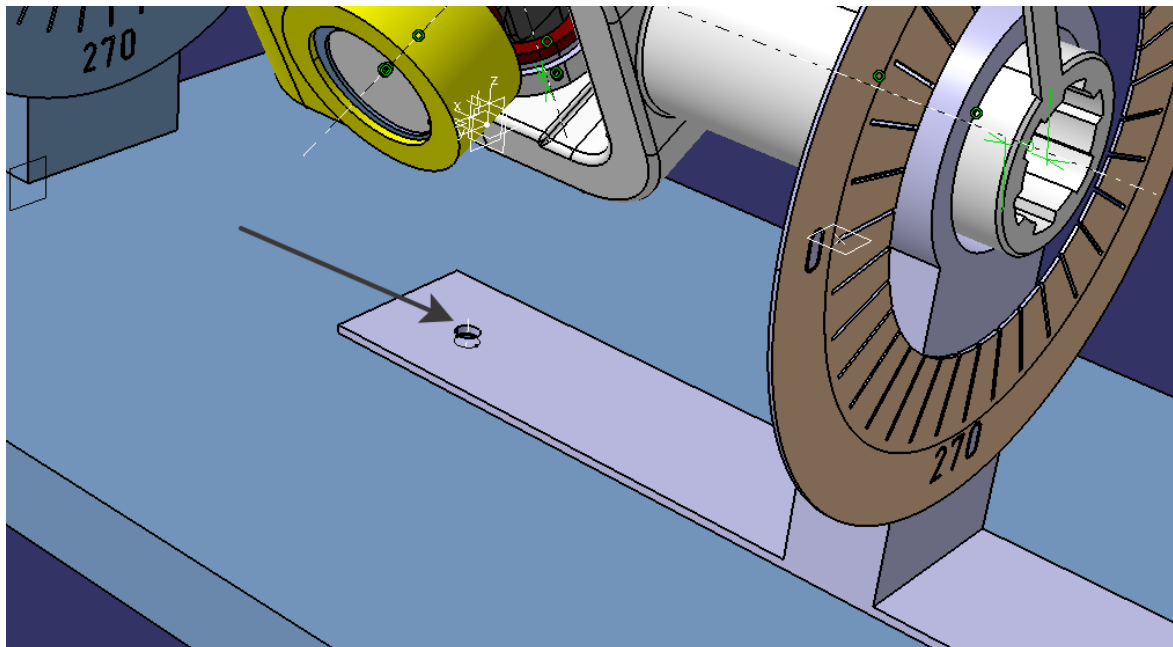


Рисунок 33 – Центр вращения стрелки

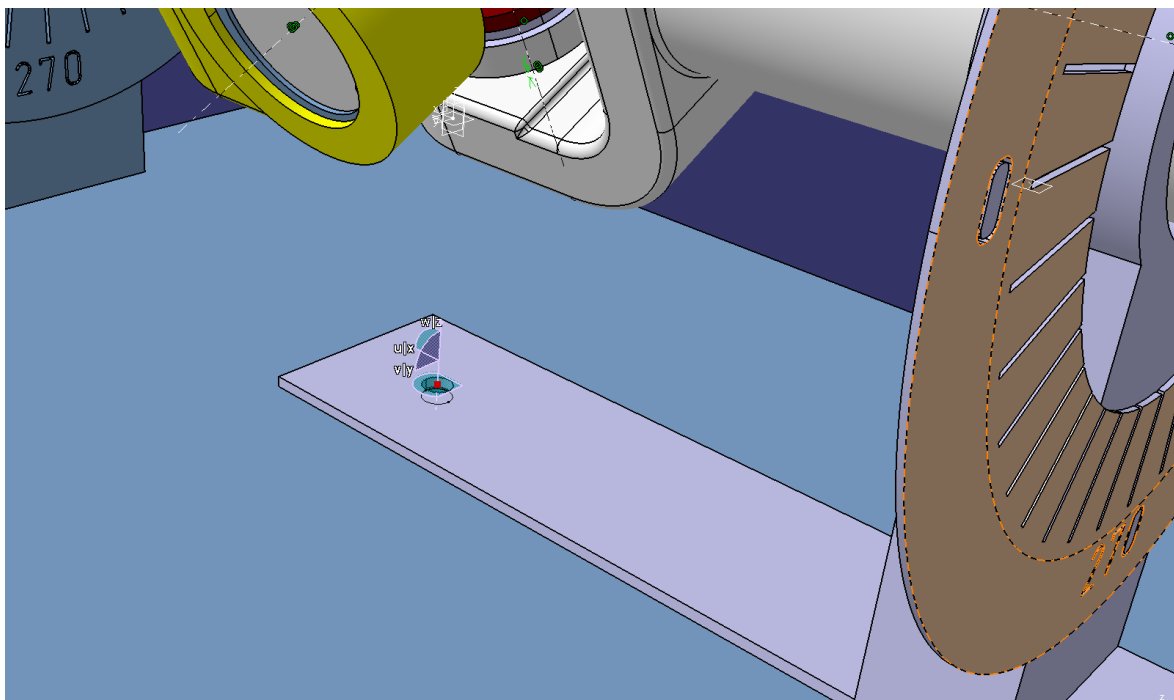


Рисунок 34 – Компас в центре вращения стрелки

После этого выбираем требуемый угол в диапазоне от 5 до 20 градусов в одну и другую стороны (рисунок 35).

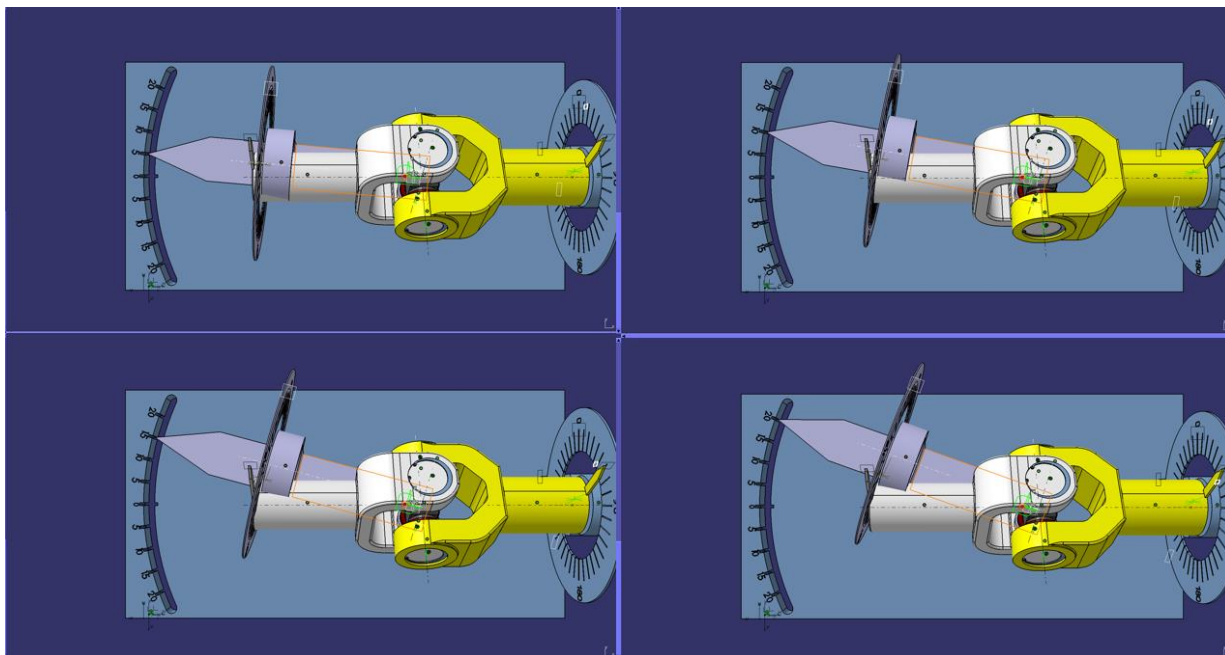


Рисунок 35 – Изменение угла на каждые 5 градусов

Далее начинаем вращение карданного вала. Для этого выбираем функцию «Manipulation» (рисунок 36).



Рисунок 36 – Значок функции «Manipulation» манипуляция

В окне, которое появилось, выбираем нужное нам действие (рисунок 37).

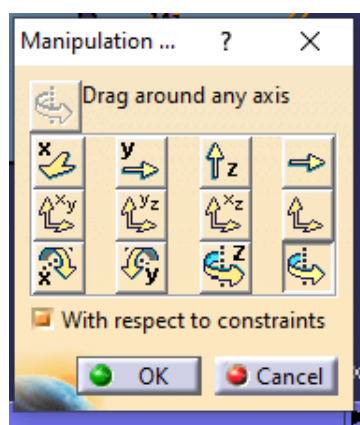


Рисунок 37 – Меню «Manipulation» манипуляция

Выбираем ось и начинаем вращение карданного вала (рисунок 38).

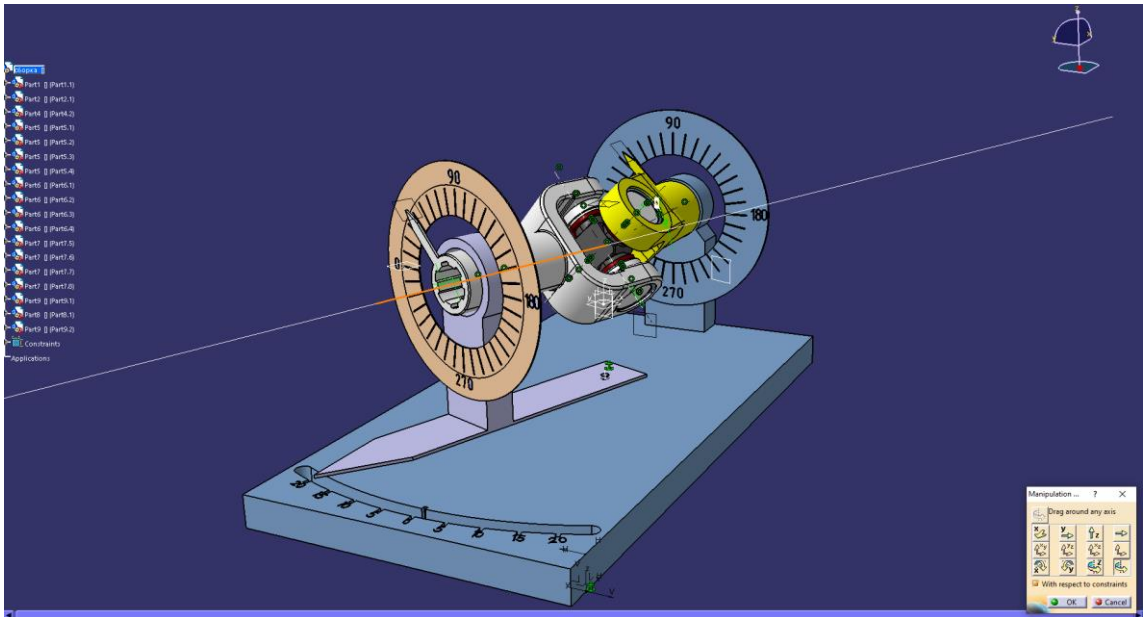


Рисунок 38 – Функция «Manipulation» манипуляция

В качестве вывода по разделу можно заключить, что 3D-модель станда для анализа кинематики карданного шарнира полностью готова, и можно приступать к выполнению лабораторной работы.

3 Методические указания к лабораторной работе «Анализ кинематики карданного шарнира»

3.1 Цель работы

Освоение экспериментального анализа кинематических характеристик карданного шарнира.

3.2 Кинематика карданного шарнира

«Карданные механизмы (карданы) представляют собой устройства, которые способны передавать вращающий момент или вращательное движение от одного вала к другому при фиксированных или переменных углах пересечения их осей» [26].

«Карданный шарнир, показанный на рисунке 39 представляет собой соединение, имеющее переменную скорость. Он состоит из двух вилок, соединяемых посредством крестовины, концы которой установлены в четырех подшипниках» [28].

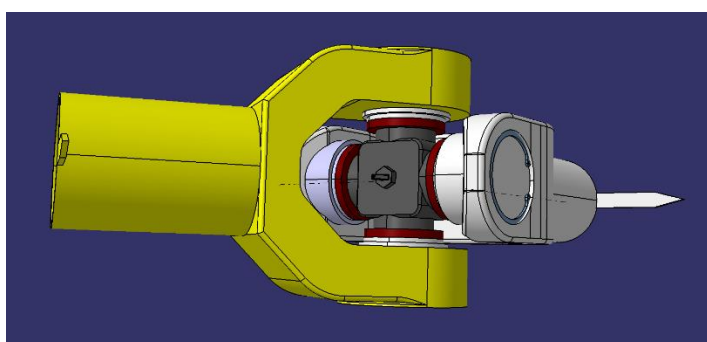


Рисунок 39 – Карданный шарнир

Основным преимуществом карданного шарнира являются его относительная низкая стоимость, простота конструкции, исключая

необходимость сложной механической обработки, большой срок службы и удобство технического обслуживания.

Кинематика карданного механизма является совершенно необычной: при работе под углом возникает нестационарное (неоднородное) движение. При вращении ведущей вилки с постоянной угловой скоростью, ведомая вилка вращается неравномерно: угловые перемещения, скорости и ускорения переменны.

Движению карданного шарнира свойственны следующие характеристики.

Средние значения углового перемещения и скорости постоянны. Это означает, что «если ведущая вилка совершает один оборот, то ведомая поворачивается на один оборот. Однако в течение этого оборота возрастающее угловое перемещение и мгновенные значения угловой скорости и ускорения передаются через шарнир не стабильными по величине» [9].

Угловое перемещение ведомой вилки за время одного оборота дважды опережает и дважды отстаёт от ведущей.

Полагая, что вращение ведущей вилки является постоянным, получим, что «ведомая вилка будет иметь максимальное отклонение выходной угловой скорости относительно ведущей, когда последняя лежит в плоскости угла шарнира, а также, когда она перпендикулярна» [23] (нормальна) этой плоскости. Ведомая вилка имеет ту же самую мгновенную угловую скорость что и ведущая при отклонении до 45 градусов от плоскости, образуемой углом шарнира в случае малых углов последнего.

«Максимальное мгновенное угловое ускорение и замедление ведомой вилки наблюдается в тот момент, когда ее скорость совпадает со скоростью ведущей вилки» [8]. Максимальные значения ускорения и замедления совпадают с ее максимальным отставанием или опережением соответственно.

Угловые перемещение, скорость и ускорение ведомой вилки с увеличением угла шарнира возрастают, причем со значительно большей скоростью.

Одной из важнейших характеристик карданного шарнира, определяющей возможность применения шарнира в том или ином механизме, является максимальный рабочий угол карданного шарнира θ_{\max} . Он определяется как наибольший угол между осями ведущей и ведомой вилок шарнира, при котором происходит передача крутящего момента шарниром без биения вилок друг о друга и заклинивания шарнира.

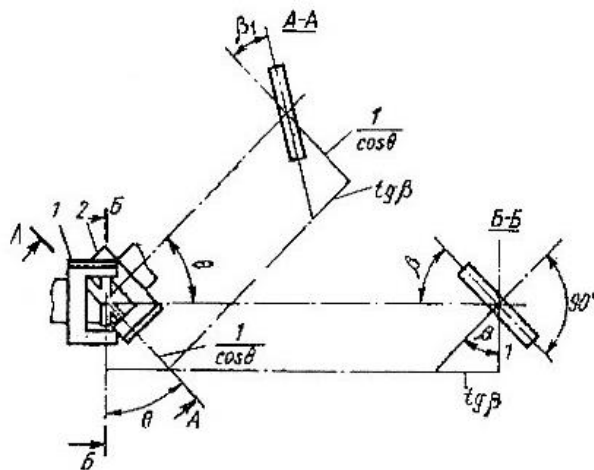
На рисунке 40 показаны основные соотношения углов, характерные для работы карданного шарнира. Основные соотношения между углами β и β_1 :

$$\tan \beta_1 = \cos \theta \cdot \tan \beta \quad (1)$$

где β – угол поворота ведущей вилки относительно положения, при котором она перпендикулярна к плоскости, образуемой углом шарнира;

β_1 – угол поворота ведомой вилки относительно плоскости, образуемой углом шарнира;

θ – угол шарнира.



1 – ведущая вилка, 2 – ведомая вилка

Рисунок 40 – Основные соотношения углов, характеризующие работу карданного шарнира

Продифференцировав это выражение по времени, после упрощений получим:

$$w_1 = w \cdot \cos \theta / (1 - \sin^2 \beta \cdot \sin^2 \theta) \quad (2)$$

где w – угловая скорость ведущей вилки (для данного анализа она принимается постоянной);

w_1 – выходная угловая скорость ведомой вилки.

«Выходное угловое ускорение можно найти, продифференцировав по времени предыдущее уравнение. После упрощения будем иметь:» [27].

$$\varepsilon_1 = 2w \cdot \cos \beta \cdot \cos \theta \cdot \sin \beta \cdot \sin^2 \theta / (\sin^2 \beta - \sin^2 \theta - 1)^2 \quad (3)$$

где ε_1 – выходное угловое ускорение ведомой вилки (входное угловое ускорение ведущей вилки для данного анализа принимается равным к нулю)

«Амплитуду колебаний, возникающих при вращении карданного шарнира, работающего при некотором угле, можно определить как максимум разности углов β и β_1 » [25], пользуясь выражением:

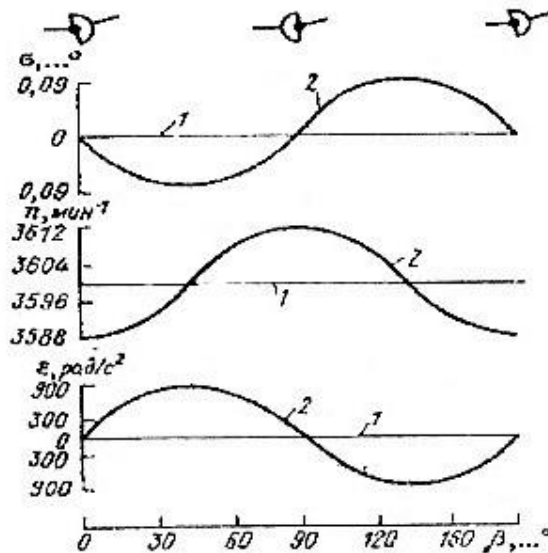
$$A = \arctg(1/\cos\theta)^{1/2} - \arctg(\cos\theta)^{1/2} \quad (4)$$

Угол запаздывания или опережения ведомой вилки определяется выражением:

$$\sigma = \beta_1 - \beta. \quad (5)$$

Полученные уравнения хорошо описывают реальное движение, угловую скорость и ускорение карданного шарнира, работающего при том или ином угле.

Характеристики карданного механизма с углом $4^{\circ}30'$ при частоте вращения 3600 мин^{-1} , рассчитанные по этим уравнениям показаны на рисунке 41.



1 – ведущая вилка, 2 – ведомая вилка

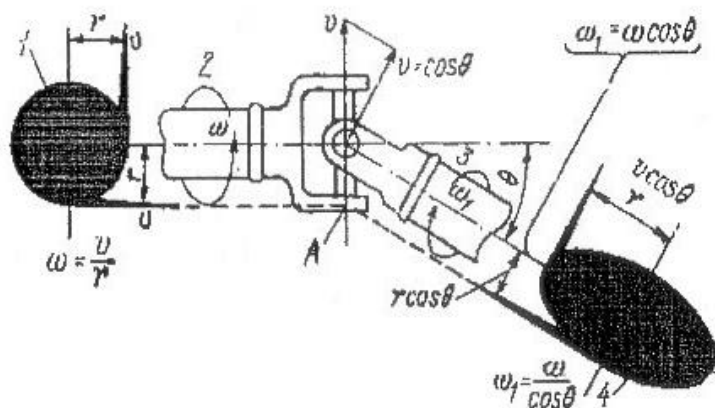
Рисунок 41 – Характеристики вращения карданного механизма с углом $4^{\circ}30'$ при частоте вращения 3600 мин^{-1} .

Видно, что характеристики движения в том случае, когда механизм работает с некоторым углом, за время одного оборота меняются дважды.

Упрощенный подход к определению характеристик движения карданного шарнира, работающего с постоянной угловой скоростью вращения, иллюстрирует рисунок 42.

«Для анализа изменений угловой скорости прежде всего рассмотрим движение точки A , расположенной на крестовине. При этом мы ведем наблюдение вдоль оси вращения со стороны ведущей вилки. Точка A вращается вокруг оси по круговой орбите радиусом r с постоянной скоростью» [1], которую можно представить вектором скорости v постоянной длины.

Следовательно, входная скорость ведущей вилки определится из равенства $w = v/r$.



1 – перемещение точки A относительно ведущей оси, 2 – ведущая вилка, 3 – ведомая вилка, 4 – перемещение точки A относительно ведомой точки

Рисунок 42 – Определение характеристик вращения карданного механизма

«При наблюдении же вдоль оси вращения со стороны ведомой вилки круговая орбита точки A трансформируется в эллиптическую с радиусом большей оси r и меньшей $r \cdot \cos\theta$ ». Если точка A занимает показанное на рисунке положение, то ее расстояние от оси вращения ведомой вилки равно $r \cdot \cos\theta$, а v – вектор линейной скорости вокруг этой оси» [11]. Следовательно, вращение ведомой вилки через входную угловую скорость выразится уравнением:

$$w_1 = v/r \cdot \cos\theta = w/\cos\theta \quad (6)$$

«Если ведущая вилка повернута на 90° от показанного на рисунке 42 положения, то расстояние от точки A до оси вращения ведомой вилки равно r , а $v \cos\theta$ – вектор линейной скорости вращения вокруг этой же оси.

Следовательно, в данный момент времени угловая скорость ведомой вилки может быть выражена через входную угловую скорость уравнением:» [12]

$$w_1 = v \cos\theta / r = w \cos\theta \quad (7)$$

«Таким образом, при повороте ведущей вилки с постоянной скоростью на 90° мгновенная выходная угловая скорость ведомой вилки» [13] изменится с $w/\cos\theta$ на $w \cos\theta$. Последние величины представляют собой соответственно максимальное и минимальное значение угловой скорости ведомой вилки. «Следовательно, выходная скорость претерпевает непрерывные два полных цикла изменения за каждой оборот ведущей вилки» [14].

«Изменение угловой скорости как ведомой, так и ведущей вилки за один полный оборот карданного механизма в полярной системе координат приведено на рисунке 43. Поскольку предполагается, что ведущая вилка имеет постоянную угловую скорость, то ее полярная диаграмма будет иметь форму окружности. Диаграмма же ведомой вилки представляет собой эллипс, который пересекает эту окружность в четырех точках. Последнее означает, что в течении одного оборота имеются четыре мгновенных положения. В которые угловые скорости обеих вилок будут одинаковыми. В остальное время ведомая вилка вращается либо быстрее, либо медленнее ведущей» [22].

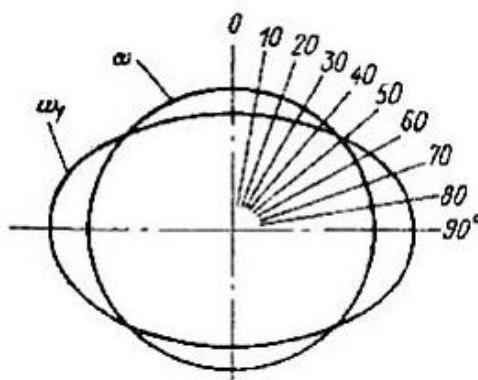


Рисунок 43 – Изменение угловой скорости карданного шарнира в полярной системе координат

В лабораторной работе необходимо будет построить диаграммы изменения угла запаздывания или опережения, угловой скорости, ускорения ведомой вилки при равномерном вращении ведущей вилки. Общий вид диаграмм соответствует представленным на рисунке 41.

3.3 Оборудование и материалы

Системные требования для Компас 3D:

- операционная система: Windows 7 или выше;
- оперативная память: 16 Гб;
- минимум 256 Гб свободного места на жестком диске;

3.4 Описание стенда

В лабораторной работе используется полноразмерная 3D-модель лабораторного стенда, показанный на рисунке 44.

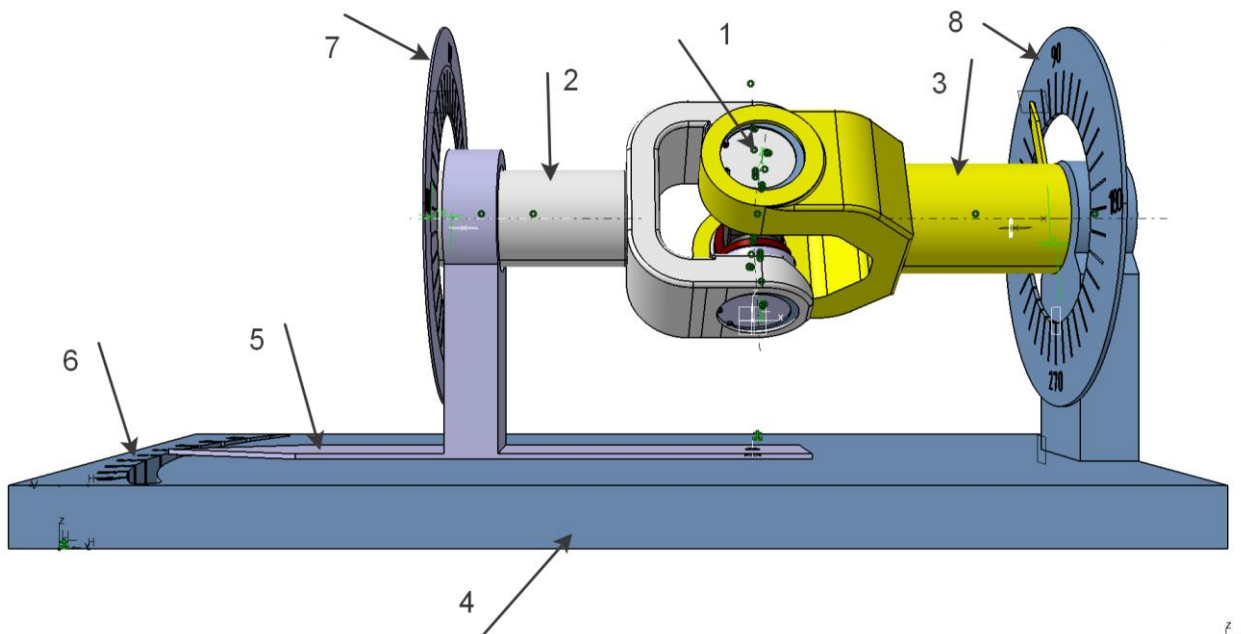


Рисунок 44 – Схема стенда для определения кинематики карданного шарнира

Стенд состоит из карданного шарнира 1, ведомая вилка 3 которого монтируется к неподвижной станине 4 стенда. Ведущая вилка 2 связана с указателем угла шарнира 5. Угол шарнира задается поворотом ведущей вилки. Величины углов шарнира нанесены на циферблате 6. Указатель 5 фиксируется при установке определенного угла шарнира. Углы вращения ведущей и ведомой вилок определяются по показаниям транспортов 7 и 8 соответственно.

3.5 Порядок проведения работы

Запускаем программу (САТИА или КОМПАС) и открываем наш лабораторный стенд (рисунок 45).

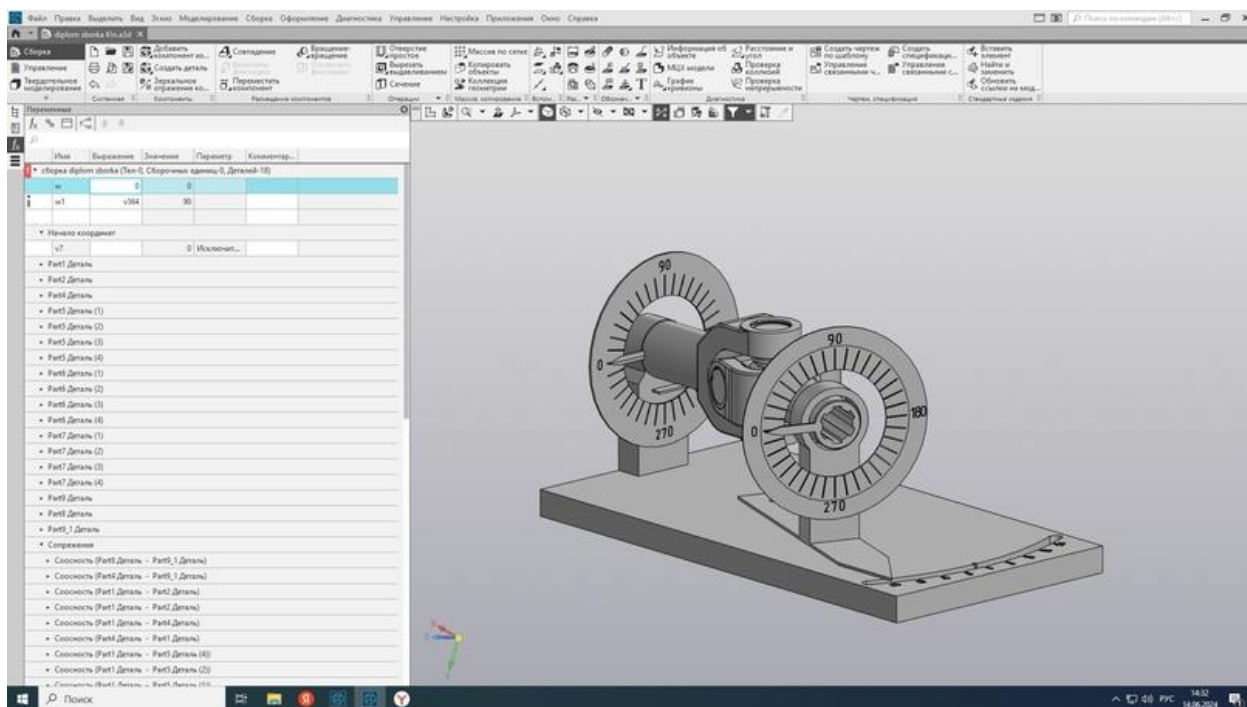


Рисунок 45 – Виртуальный лабораторный стенд

В данном файле уже всё готово к работе и необходимо действовать только с двумя переменными. Для начала перейдем в раздел переменные, которые находятся справа от дерева проекта и обозначены буквами f_x . Затем

нам необходимо вбивать в таблицу значения угол поворота ведущей вилки и снимать угла поворота ведомой вилки, как показано на рисунке 46.

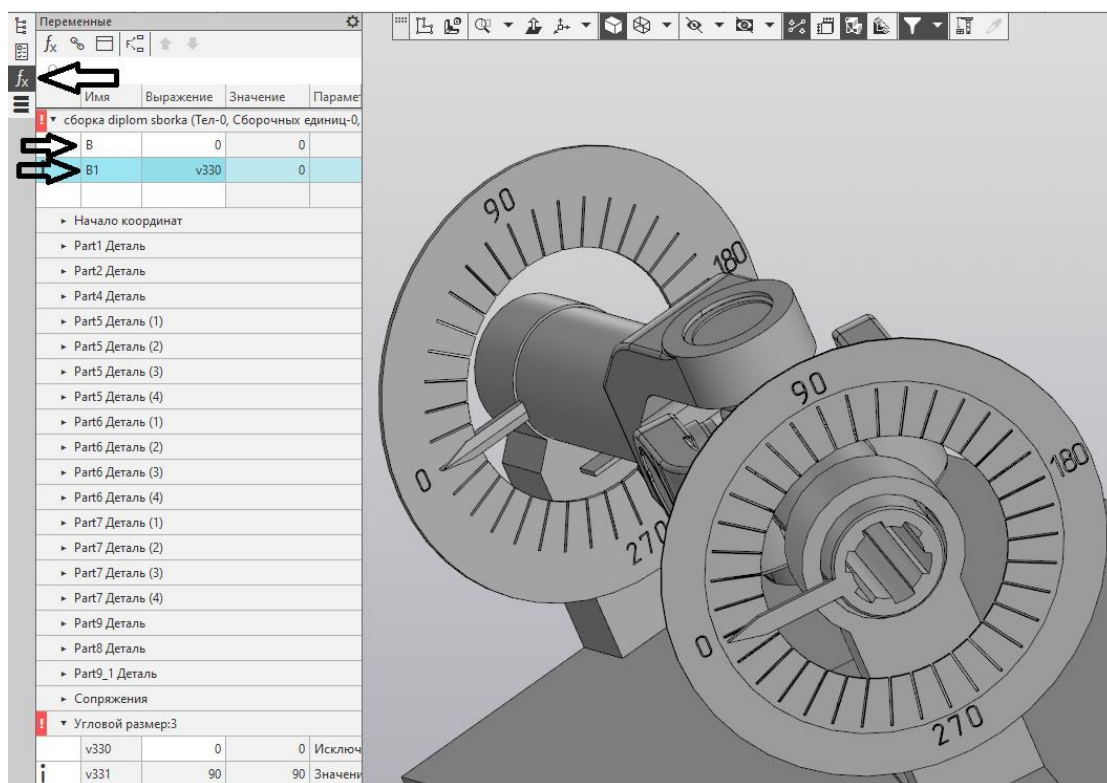


Рисунок 46 – Углы поворота ведущей и ведомой вилок

Далее необходимо работать в выбранном окне как указано на рисунке 47. В нем нам необходимо работать с двумя переменными β и β_1 – вбивать значение в ячейку β , после чего обновить сборку (кнопка F5), тем самым карданный вал будет прокручен на значение введенного угла. Измерения необходимо проводить каждые 10° . Примеры представлены на рисунках 47-56.

Тем самым мы сможем точно измерить расхождения между вилками карданного вала. Самое большое расхождение будет на угле в 45° , а к 90° расхождение уйдет и на обеих вилках углы будут равны 90° . И так будет происходить каждые 45° и тем самым график получится в виде синусоиды.

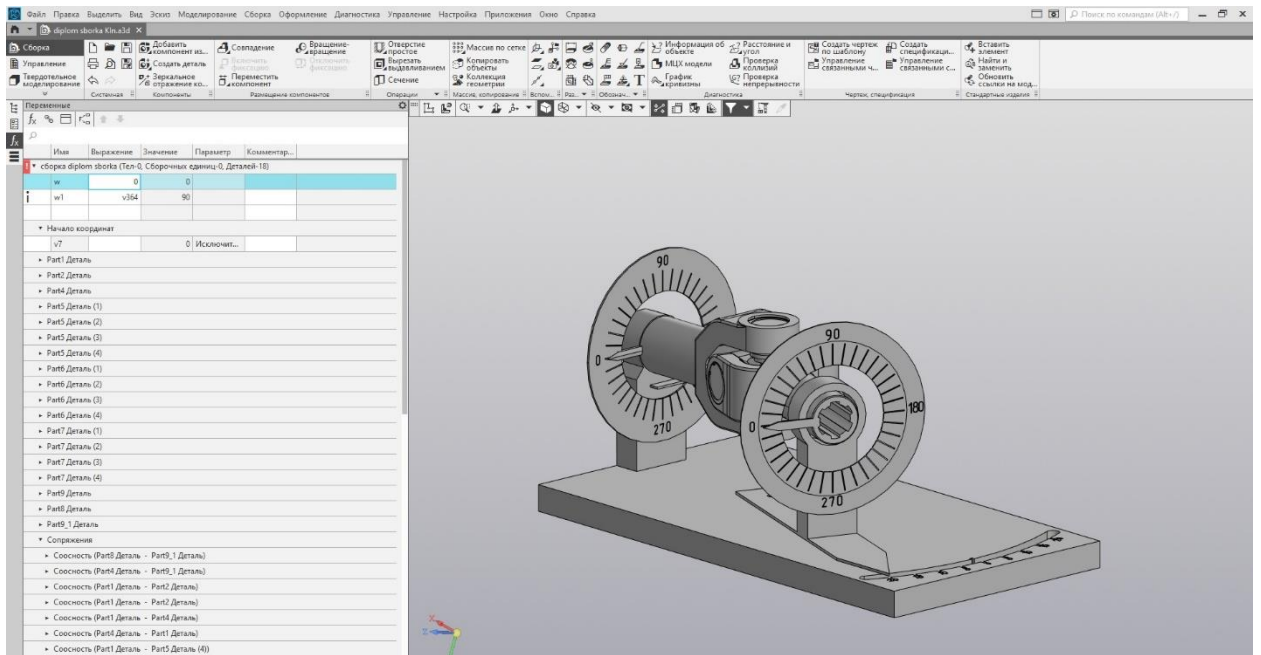


Рисунок 47 – Карданный шарнир в положении 0°

После изначального положения механизма на 0°, меняем его на 10° как показано на рисунке 48.

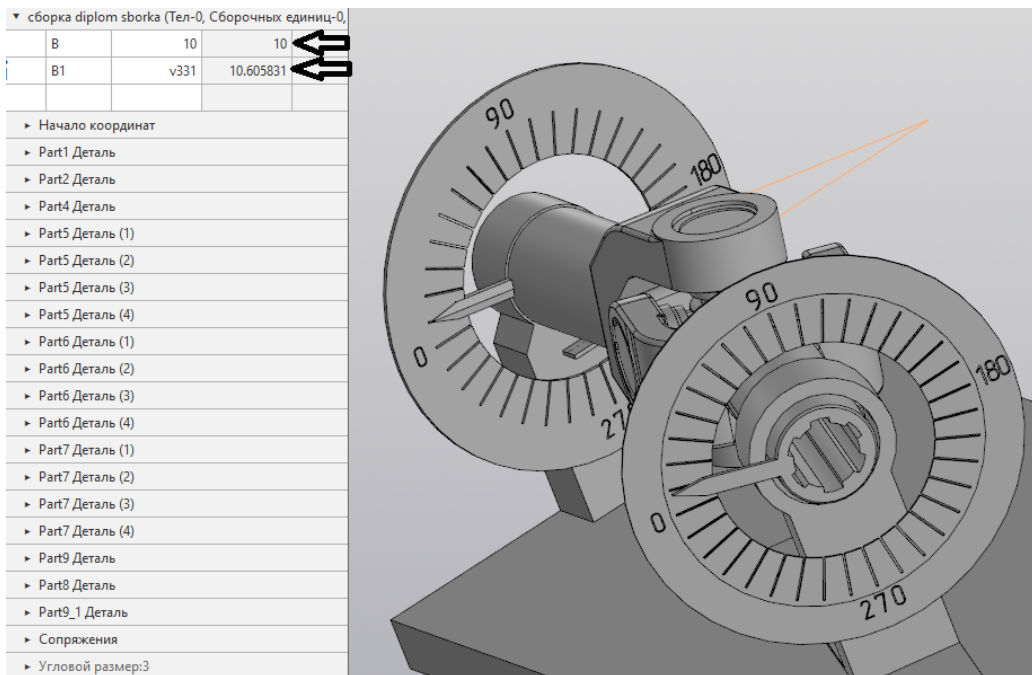


Рисунок 48 – Карданный шарнир в положении 10°

Выписываем показатель β_1 в сводную таблицу и затем меняем β из положения в 10° в положение 20° как показано на рисунке 49.

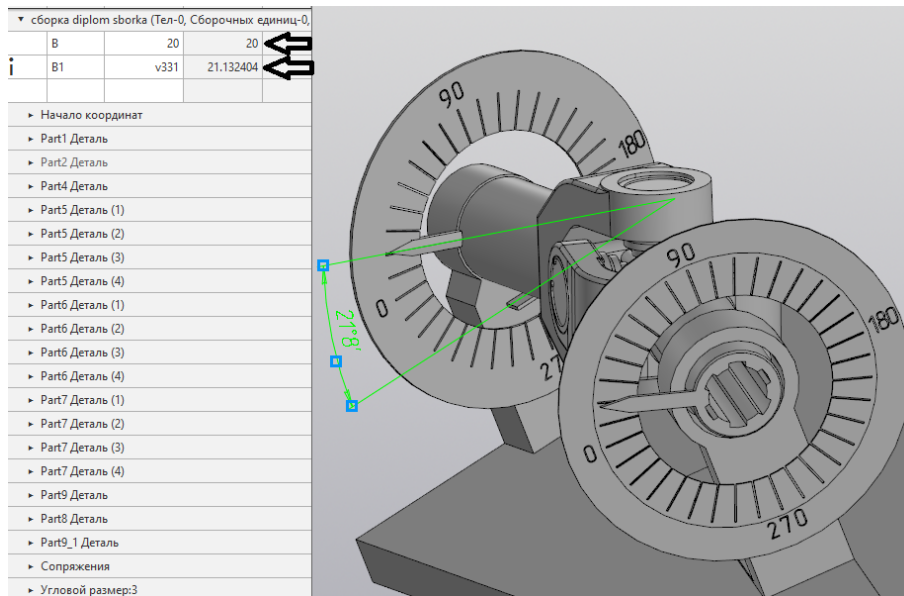


Рисунок 49 – Карданный шарнир в положении 20°

Повторяем процедуру вращения на 10° как показано на рисунке 50 и видим, что отклонение становится больше.

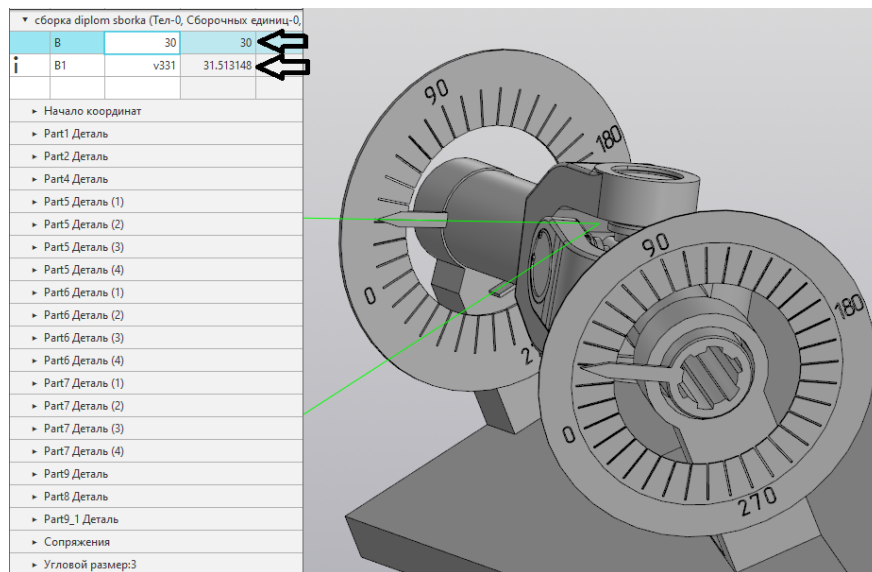


Рисунок 50 – Карданный шарнир в положении 30°

Записываем расхождение и продолжаем вращать карданный вал, вбивая значение в таблицу меняя β из значения 30° на 40° . как показано на рисунке 51.

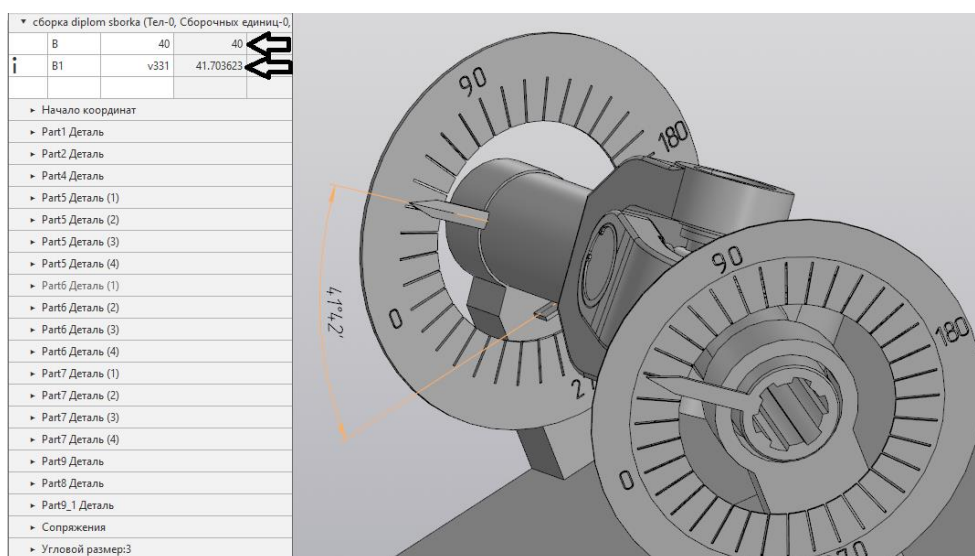


Рисунок 51 – Карданный шарнир в положении 40°

После выполненного вращения можем наблюдать, что расхождение между β и β_1 увеличилось. Снова вращаем карданный шарнир из положения в 40° в положение в 50° (рисунок 52) и полученные данные вносим в таблицу.

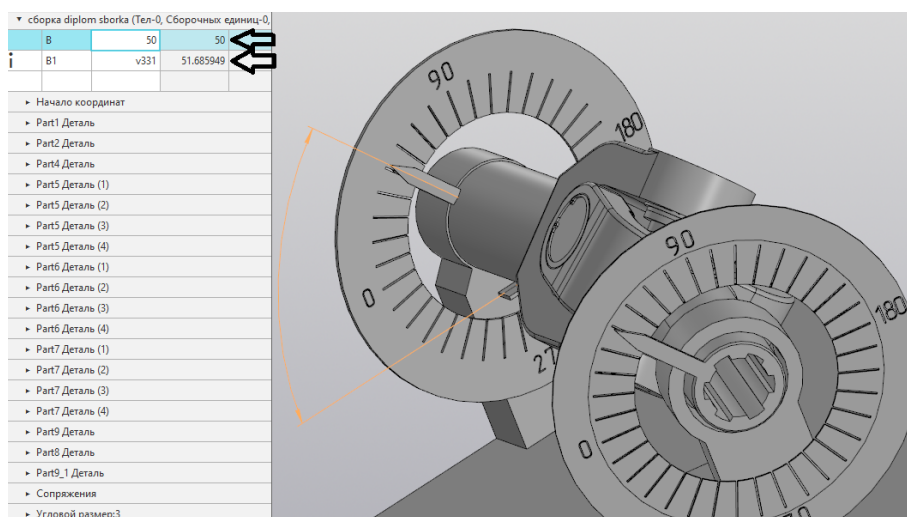


Рисунок 52 – Карданный шарнир в положении 50°

После того как карданный шарнир поменял своё положение из 40° в 50° мы видим, что расхождения до положения в 40° возростали, а сейчас начали убывать. Продолжаем вращать карданный шарнир из положения 50° в положение 60° , как показано на рисунке 53.

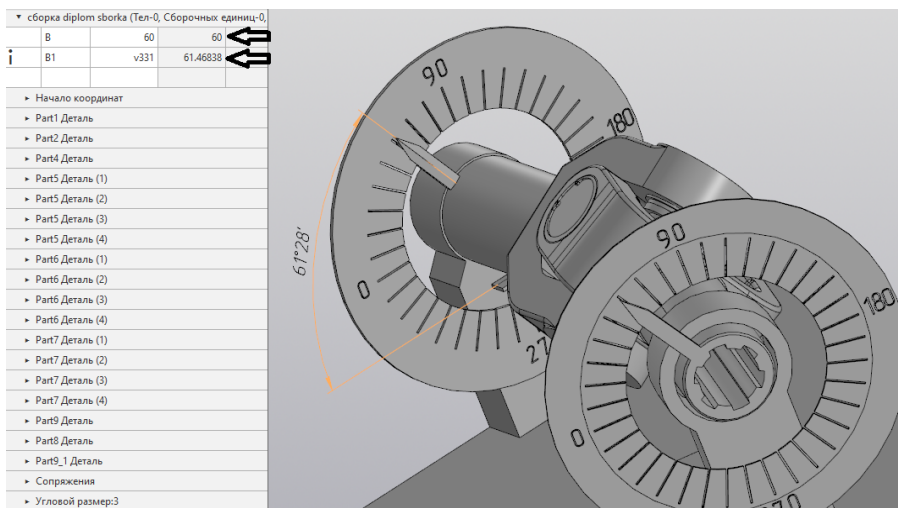


Рисунок 53 – Карданный шарнир в положении 60°

Повторно наблюдаем что отклонение убывает и становится меньше и продолжаем дальше вращать карданный вал на 10° чтобы он встал на 70° как показано на рисунке 54.

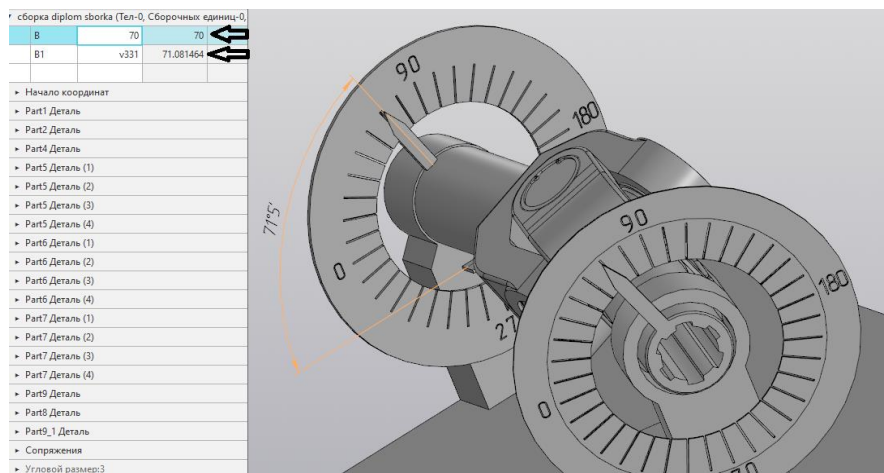


Рисунок 54 – Карданный шарнир в положении 70°

Вбиваем в таблицу полученные данные и продолжаем вращать карданный вал с шагом в 10° меняя его в положение на 80° как показано на рисунке 55.

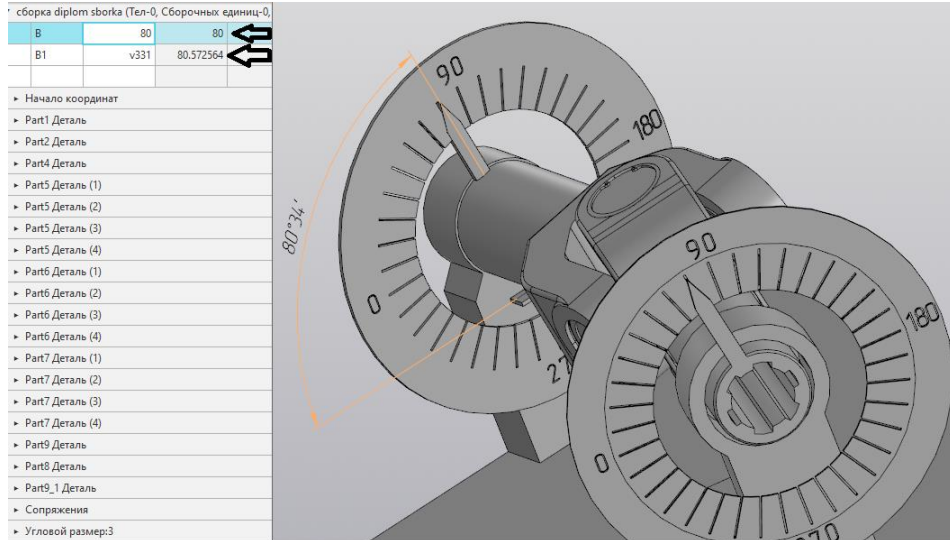


Рисунок 55 – Карданный шарнир в положении 80°

Вращаем до 90° как показано на рисунке 56. Расхождение карданного вала сходит на нет. Заносим в таблицу полученные данные.

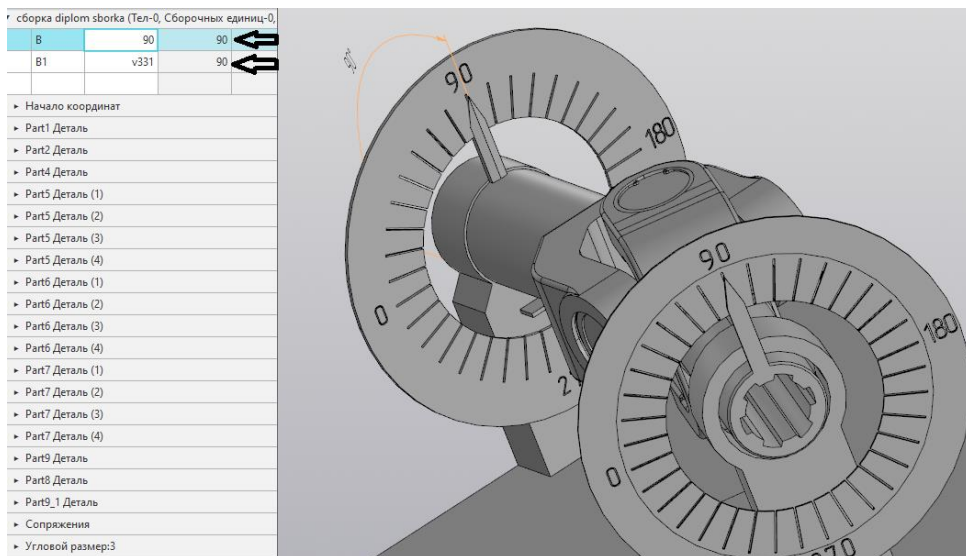


Рисунок 56 – карданный шарнир в положении 90°

Результаты измерений вносим в сводную таблицу по примеру таблицы 1, только для всего диапазона углов.

Таблица 1 – Результаты измерений углов

β	β_1
0°	0°
10°	10,605831°
20°	21,132404°
30°	31,513148°
40°	41,703623°
50°	51,685949°
60°	61,46838°
70°	71,081464°
80°	80,572564°
90°	90°

Далее выполняем необходимые расчеты по формулам 1-7. и чертим графики зависимостей по примеру рисунка 41.

Для этого необходимо выполнить следующие пункты:

- определить максимальный рабочий угол шарнира θ_{max} ;
- определить значение угла β_1 для каждого значения угла β , изменяющегося в диапазоне от 0° до 180° с шагом 10°, при величинах угла $\theta = 0^\circ$ и $\theta = \theta_{max}$. Построить диаграмму изменения угла σ ;
- рассчитать значение w_1 по заданному преподавателем значению w для тех же значений угла β , что и в предыдущем пункте. Построить диаграмму изменения w_1 ;
- рассчитать значение ε_1 . построить диаграмму изменения ε_1 ;
- сделать выводы о неравномерности вращения ведомой вилки при вращающейся с постоянной скоростью ведущей.

Вывод по проделанной работе.

3.6 Содержание отчета

В отчете по лабораторной работе должны быть следующие разделы:

- цель лабораторной работы;
- схема стенда;
- таблицы с результатами определения значений β_1 , расчетов значений w_1, ε_1 ;
- диаграммы изменений $\sigma, w_1, \varepsilon_1$;
- выводы по работе.

3.7 Контрольные вопросы

- Что такое карданный шарнир?
- Назовите преимущества карданного шарнира.
- Какова особенность кинематики карданного шарнира?
- Дайте определение максимального рабочего угла шарнира.
- Что показывает угол опережения или запаздывания ведомой вилки?
- Запишите соотношение между углами поворота вилок карданного шарнира.
- Конструкция стенда для определения кинематики карданного шарнира.
- Каким образом строится диаграмма изменения угловой скорости ведомой вилки карданного шарнира?
- Каким образом строится диаграмма изменения углового ускорения ведомой вилки карданного шарнира?
- Как изменяется угловая скорость ведомой вилки за один оборот равномерного вращения ведущей вилки?
- Как меняются кинематические характеристики ведомой вилки с увеличением угла шарнира?

– Когда угловое ускорение и замедление ведомой вилки достигают максимального значения?

– При каком положении ведомой вилки относительно плоскости угла шарнира разница угловых скоростей вилок шарнира максимальна? Равна нулю?

– Как выглядит диаграмма изменения угловой скорости ведущей и ведомой вилок в полярной системе координат? Какую информацию о кинематике шарнира можно получить из этой диаграммы?

В качестве вывода по разделу можно заключить, что подготовлены все необходимые материалы для организации и проведения виртуальной лабораторной работы по анализу кинематики карданного шарнира. Преимуществами данной работы являются повышенная точность измерений и возможность проведения работы без привязки к лабораторному стенду в аудитории университета.

Заключение

По итогу бакалаврской работы был разработан виртуальный лабораторный стенд для анализа кинематики карданного шарнира.

В ходе выполнения данной работы можно сделать следующие выводы:

1. Визуализация: 3D-модель позволяет визуализировать стенд в реальном масштабе, что помогает понять его конструкцию, расположение компонентов и возможные проблемы или улучшения.

2. Проверка компонентов: путём создания 3D-модели вы можете убедиться, что все необходимые компоненты будут уместаться на стенде и работать совместно без конфликтов.

3. Оптимизация дизайна: анализ 3D-модели может помочь в оптимизации дизайна стенда, сделав его более удобным для использования, экономичным и эргономичным.

4. Визуальное представление: 3D-модель может быть полезна для коммуникации с коллегами или заказчиками, предоставляя им ясное представление о том, как будет выглядеть готовый продукт.

5. Итеративный процесс: работа с 3D-моделью может способствовать итеративному процессу улучшения стенда, позволяя быстро вносить изменения и тестировать новые идеи.

Результаты данной работы представляют собой готовый продукт – виртуальную лабораторную работу, которая может быть использована в процессе обучения студентов инженерных специальностей.

3D Стенд был выполнен в двух CAD программах, таких как: CATIA v5 и КОМПАС-3D v22. Имеет рабочую кинематику, которая позволяет выполнить лабораторную работу в компьютерном классе или дистанционно для студентов обучающихся на заочной форме обучения и более углубленно изучить, и провести анализ кинематики карданного шарнира.

Список используемой литературы

1. 3D-моделирование в КОМПАС-3D версий v17 и выше. Учебное пособие для вузов / Чагина А. В., Большаков В. П. 64 с
2. Анурьев В.И., Справочник конструктора-машиностроителя / В.И. Анурьев; В 3-х т. Т. 1. – М: Машиностроение.
3. Анурьев В.И., Справочник конструктора-машиностроителя / В.И. Анурьев; В 3-х т. Т. 2. – М: Машиностроение.
4. Бочаров Н. Ф. Конструирование и расчет машин высокой проходимости: учебник для втузов 1983.
5. Бухарин Н. А. Автомобили. Конструкция, нагрузочные режимы, рабочие процессы, прочность агрегатов автомобиля: учеб. пособие для вузов 1973.
6. Гладов Г.И., Петренко А.М. УЧЕБНИК устройство автомобилей 2011.
7. ГОСТ 33669-2015 Автомобильные транспортные средства передачи карданные автомобилей с шарнирами неравных угловых скоростей Общие технические условия
8. ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Общие требования и правила составления. – Москва: ИПК Изд-во стандартов, 2004.
9. ГОСТ Р 2.521-2021 Единая система конструкторской документации ЭЛЕКТРОННАЯ КОНСТРУКТОРСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ Требования к форматам представления трехмерных геометрических моделей
10. Гришкевич А. И. [и др.]. Проектирование трансмиссий автомобилей: Справочник / – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.
11. Гурин В.В. и др.; Учебник для бакалавриата и магистратуры: Детали машин. Курсовое проектирование. Часть I. / Издательство Машиностроение, 1986.

12. Дзюбан А.М., Учебно-методическое пособие к выполнению выпускной квалификационной работы бакалавров / ФГБОУ ВО «Тольяттинский Государственный Университет» 2018 – 51с.

13. Кузнецова Л.В. Кузнецова, Косенко, Николаев: Проектирование и 3D моделирование в средах CATIA V5, ANSYS и Dymola 7.3. Учебное пособие

14. Лукин П. П. Конструирование и расчет автомобиля: учебник для студентов вузов / П. П. Лукин, Г. А. Гаспарянц, В. Ф. Родионов. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.

15. Лукин П. П. Конструирование и расчет автомобиля: учебник для студентов вузов / П. П. Лукин, Г. А. Гаспарянц, В. Ф. Родионов. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.

16. Некрасов В.И. Карданная передача: учебное пособие: для студентов вузов, обучающихся по специальности "Автомобиле- и тракторостроение" /; Министерство образования Российской Федерации [и др.]; [науч.ред. С.С. Гулезов]. - Курган: Издательство Курганского государственного университета, 2013. - 135, [1] с

17. Осепчугов В. В. Автомобиль: Анализ конструкции, элементы расчета: учебник для студентов вузов / В. В. Осепчугов, А. К. Фрумкин. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

18. Проектирование трансмиссий автомобилей: Справочник / А. И. Гришкевич [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.

19. Соломатин Н.С.– Испытания узлов, агрегатов и систем автомобиля учебное пособие: для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 190109 "Наземные транспортно-технологические средства"

20. Фаробин Я. Е. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине "Теория эксплуатационных свойств АТС" для студентов специальности "Автомобили и автомобильное хозяйство". – М.: МАДИ, 1992. – 64 с.

21. ISO 10303-21. ISO 10303-21 defines the encoding mechanism for representing data conforming to a particular schema in the EXPRESS data modeling language specified in ISO 10303-11.

22. Jaguar Land Rover is researching innovation new plastic recycling technology [Электронный ресурс]. URL: (дата обращения 19.06.2024).

23. Hu. 2022. Speech emotion recognition model based on attention cnn bi-gru fusing visual information. Eng. Lett. 30.

24. Mike Braeckel Fuel Resistant Plastics /Mike Braeckel, Dwight Smith, Joseph G. Tajar and John Yourtee/ Advanced Materials & Processes [Электронный ресурс] - August 2000 - pages 37ff-<https://studylib.net/doc/18400417/fuel-resistant-plastics>.

25. Mallick R., Yebda T., Benois-Pineau J., et al. 2022. Detection of Risky Situations for Frail Adults with Hybrid Neural Networks on Multimodal Health Data. IEEE MultiMedia 29 (1): 7–17. DOI: 10.1109/MMUL.2022.3147381 EDN: UZEJJO

26. Montagnier, O., Hochard, C.: Optimisation of hybrid high-modulus/high-strength carbon fibre reinforced plastic composite drive shafts. Mater. Des. 46, 88-100 (2013).

27. Polymer selection helps automotive fuel-system components survive for the life of the vehicle [Электронный ресурс]. URL: <https://www.machinedesign.com/archive/article/21814328/plastics-for-the-long-haul> (дата обращения 19.06.2024).

28. Worgan G.P., Smith D.R.: Carbon fiber drive shaft. Patent US 4089190 A (1978).