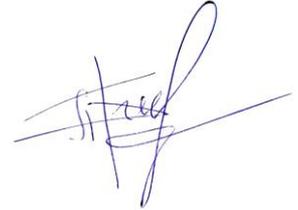


На правах рукописи

Прокудина Анастасия Викторовна



ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРА
КУСТОРЕЗА С ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЁННЫМИ НОЖАМИ ДЛЯ
ОСВЕТЛЕНИЯ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР НА ВЫРУБКАХ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства
и переработки древесины

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, Драпалюк Михаил Валентинович

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Состояние вопроса и задачи исследования	10
1.1 Обзор технологического оборудования для удаления древесно-кустарниковой растительности	10
1.2 Обзор методов моделирования, применяемых для лесных машин.....	25
1.3 Выводы по разделу.....	28
2 Методика имитационного моделирования динамических систем в программном комплексе MATLAB.....	29
2.1 Постановка задачи имитационного моделирования.....	29
2.2 Типовые блоки MATLAB для моделирования технологического оборудования на примере ротора кустореза.....	30
2.3 Методика формирования входных воздействий и снятия выходных параметров модели.....	35
2.4 Выводы по разделу.....	37
3 Обоснование конструкции роторного кустореза.....	38
3.1 Принципиальная и расчетная схема ротора кустореза.....	38
3.2 Проектирование в САПР цифровой трехмерной модели кустореза....	39
3.3 Имитационная модель кустореза в MATLAB и её хронология составления.....	64
3.4 Вычислительный эксперимент на имитационной модели для получения выходных параметров работы ротора.....	78
3.5 Выводы по разделу.....	88
4 Разработка лабораторного образца ротора кустореза.....	90
4.1 Программа лабораторных исследований ротора кустореза.....	90
4.2 Оборудование, применяемое в лабораторных исследованиях.....	90
4.3 Методика проведения лабораторных исследований.....	95

4.4 Результаты лабораторных исследований ротора кустореза и их анализ..	96
4.5 Оптимизация скорости подачи ротора с шарнирно-сочлененными ножами.....	105
4.6 Выводы.....	111
5 Техничко-экономическое обоснование нового кустореза.....	113
5.1 Функциональное моделирование технологической схемы работы базовой модели кустореза.....	113
5.2 Функциональное моделирование технологической схемы работы новой модели кустореза.....	117
5.3 Расчет экономической эффективности применения нового кустореза..	119
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	120
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ З.....	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Рациональное использование лесных ресурсов и их восстановление — одна из главных задач лесного сектора промышленности. В лесном хозяйстве актуальными являются исследования, способствующие сохранению и устойчивому развитию лесных экосистем и принципов работы с ними. Один из методов выращивания качественных лесных насаждений это осветление, процесс контролирования плотности насаждений и улучшения условий роста деревьев основной породы.

Механизированные операции могут повысить эффективность процесса осветления лесов, но их использование ограничено из-за высоких затрат и сложности работ. Нерегулярное проведение операции осветления приводит к интенсивному росту нежелательной растительности. Механизация процесса осветления позволит снизить временные затраты и повысить экономическую эффективность работ.

Большое количество исследователей занимались вопросами обоснования параметров конструкций и внедрением новых технологических подходов в процесс удаления нежелательной растительности. В ходе осветлений может быть задействовано как ручное оборудование с бензиновым или электроприводом, так установленное на навеске тракторов и приводимое в движение от гидросистемы или вала отбора мощности. Тракторные кусторезы с дисковыми рабочими органами, а также с инерционными ножами, установленными на роторах, получили наибольшее распространение в лесном хозяйстве России.

Использование фрез вызывает излишние энергетические затраты на тонком кустарнике, а при больших скоростях подачи приводит к неполному срезанию растительности из-за «приглаживания». Пильные цепи подвергаются значительным нагрузкам на изгиб во время контакта с тонкомерной древесиной, так как глубина пропила значительно меньше и нет поддерживающей силы со стороны ствола. На применение дисковых пил влияют рельеф почвы и состояние

вырубки, в то время как инерционно-рубящие элементы могут быть применены благодаря возможности компенсировать уклон и обходить непреодолимые препятствия за счет их шарнирного соединения.

Для разработки более совершенной конструкции кустореза с шарнирно-сочлененным ножевым рабочим органами необходимы дополнительные исследования, направленные на обеспечение более полного срезания гибкой поросли нежелательной древесно-кустарниковой растительности. В связи с чем, механизация осветлений позволяет повысить эффективность работ, поэтому разработка новой машины и рабочих органов кусторезов является актуальной задачей.

Диссертационные исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ, в рамках научного проекта № 20-38-90029, а также в рамках выполнении госбюджетной тематики ВГЛТУ, шифр: 116092210006, с 2021 по 2025 гг.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями рабочих процессов машин и орудий для удаления древесно-кустарниковой растительности занимались многие ученые такие как: И.М. Науменко, К. Б. Лосицкий, П.Н. Алентьев, И.М. Бартенев, М.В. Драпалюк, В.И. Казаков, М.В. Ивашнев, И.В. Григорьев, Д.В. Есков, П.Э. Гончаров, Л.Д. Бухтояров, С.В. Малюков и др.

Обзор теоретических исследований показал значительную проработку отдельных вопросов теории касемо сил резания кинематики и динамики, но исследования не сведены в единой математической среде, и потому их применение вызывает значительные сложности у инженеров. Назрела необходимость разработки методики, позволяющей объединить работу в системах автоматизированного проектирования конструкций с математической средой, позволяющей проводить имитационные эксперименты для обоснования параметров ротора кустореза.

Цель и задачи исследования.

Цель – обоснование параметров шарнирно-сочлененного рабочего органа кустореза для повышения эффективности осветления лесных культур на вырубках.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Создать новую конструкцию ротора кустореза с шарнирно-сочлененным ножевыми рабочими органами и трехмерную модель технологического оборудования.

2. Разработать имитационную модель технологического оборудования.

3. Определить конструктивные параметры и режимы работы технологического оборудования.

4. Усовершенствовать методику имитационного моделирования динамических систем – звеньев технологического оборудования для осветления лесных культур.

5. Провести оценку энергоёмкости и качества срезания поросли на различных режимах работы шарнирно-сочлененных ножевых рабочих органов.

Объектом исследования являются конструкция кустореза с шарнирно-сочлененными ножами и рабочие процессы при срезании поросли.

Предметом исследования являются кинематические и динамические характеристики конструкции и рабочего процесса кустореза.

Научная новизна работы:

1. Разработана новая конструкция ротора кустореза с шарнирно-сочлененными ножевыми рабочими органами и трехмерная модель технологического оборудования, отличающаяся рациональными параметрами геометрических и массовых характеристики всех звеньев конструкции механизма.

2. Имитационная модель рабочего процесса удаления поросли технологическим оборудованием, отличающаяся учетом конструктивных параметров и режимов работы нового ротора кустореза.

3. Конструктивные параметры и режимы работы кустореза, отличающиеся эффективностью срезания поросли.

4. Методика имитационного моделирования динамических систем в конструкции кустореза, отличающаяся учетом комплексной оценки мощности рабочего процесса, обеспечивающего повышение качества срезания поросли.

5. Техничко-экономические показатели эффективности рабочих процессов шарнирно-сочлененных ножевых рабочих органов, отличающейся снижением энергоёмкости и повышением качества срезания поросли.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении основных положений теории взаимодействия активного рабочего органа кустореза роторного типа с древесно-кустарниковой растительностью.

Практическая значимость работы состоит в разработке новой конструкции ротора кустореза, защищенной патентом, усовершенствовании технологического процесса и обосновании режима работы ротора кустореза, обеспечивающие повышение эффективности и качества срезания поросли. Разработанная имитационная модель динамической системы кустореза, позволяет с большей точностью исследовать процессы происходящих во время работы кустореза, установить зависимости между параметрами кустореза и показателями его рабочего процесса и определить требуемую для срезания поросли мощность

Полученные результаты работы внедрены в Тамбовском областном государственном учреждении «Челнавский лесхоз», Инжиниринговом центре и в учебном процессе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова».

Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследования.

В ходе теоретических исследований применялись методы имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB, с использованием положений из теоретической механики, теории машин и механизмов. Эксперимент проводился по общепринятой методике, обработка результатов вычислительного и лабораторного экспериментов проводилась с использованием методов математической статистики.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Рабочий процесс новой конструкции ротора кустореза с шарнирно-сочлененными ножевыми рабочими органами и трехмерная модель технологического оборудования, позволяющая получить рациональные значения геометри-

ческих характеристик всех звеньев кустореза.

2. Имитационная модель рабочего процесса удаления поросли технологическим оборудованием, позволяющая обосновать необходимую мощность для заданного рабочего процесса срезания поросли.

3. Обоснованные конструктивные параметры и режимы работы кустореза, позволяющие повысить эффективность срезания поросли.

4. Методика имитационного моделирования динамических систем в конструкции кустореза, позволяющая обосновать оптимальные параметры конструкции и рабочего процесса, обеспечивающие повышение качества срезания поросли.

5. Техничко-экономические оценка эффективности рабочих процессов шарнирно-сочлененных ножевых рабочих органов, с учетом пониженной энергоёмкости и повышения производительности срезания поросли.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность результатов, представленных в диссертационной работе, обосновывается проведенными теоретическими и экспериментальными исследованиями, высокой степенью сходимости результатов изучения рабочих процессов кустореза с шарнирно-сочлененными рабочими органами, применением современных методов статистической обработки данных.

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на конференциях: «Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе» (Воронеж, 2021 г.), «Повышение эффективности лесного комплекса» (Петрозаводск, 2021 г.), «Цифровые технологии в лесной отрасли» (Воронеж, 2022 г.), «Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса» (Воронеж 2022 г.), а также ежегодных научно-практических конференциях ВГЛТУ (2021–2023 гг).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует п. 5 «Компоновка, типы, параметры и режимы работы машин лесохозяйственных и лесопромышленных производств» паспорта специальности 4.3.4. «Технологии, машины и оборудование для лесного хозяй-

ства и переработки древесины».

Личный вклад автора заключается в проведении анализа литературных и патентных источников, разработке имитационной модели процесса удаления пороши в программном комплексе MATLAB, проведении вычислительных экспериментов и лабораторных исследований, изготовлении лабораторного стенда и опытного образца ротора со сменными рабочими органами, подготовке к публикациям основных научных статей.

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 11 работах, в т.ч. 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 статья в издании из базы Scopus, один патент на полезную модель.

Структура и объем работы. В структуру диссертации входит введение, пять глав основного текста, основные выводы и рекомендации, а также библиографический список и приложения. Общий объем работы составил 147 страниц печатного текста, из них основного текста – 121 страница, библиографический список и приложения – 26 страниц. Работа включает 117 рисунков, 9 таблиц и 114 использованных источника, 9 из которых иностранные.

1 Состояние вопроса и задачи исследования

1.1 Обзор технологического оборудования для удаления древесно-кустарниковой растительности

Удаление нежелательной древесно-кустарниковой растительности (ДКР) является актуальной проблемой для различных отраслей Российской Федерации. Процесс удаления ДКР применяется при подготовке и выполнении технологических операций лесовосстановления.

В нашей стране, а также за рубежом проводятся работы по созданию оборудования и специальных машин для удаления нежелательной ДКР. К данной технике относятся: кусторез, мульчерная машина или кусторезная машина, измельчитель.

Для удаления древесно-кустарниковой растительности применяется ручное и навесное оборудование.

Ручное оборудование делится на: механическое, аккумуляторное, электрическое и бензиновое. Механические различаются по рабочему органу, который может быть пассивным и активным.

Навесное оборудование, в свою очередь, разделяют по нескольким критериям:

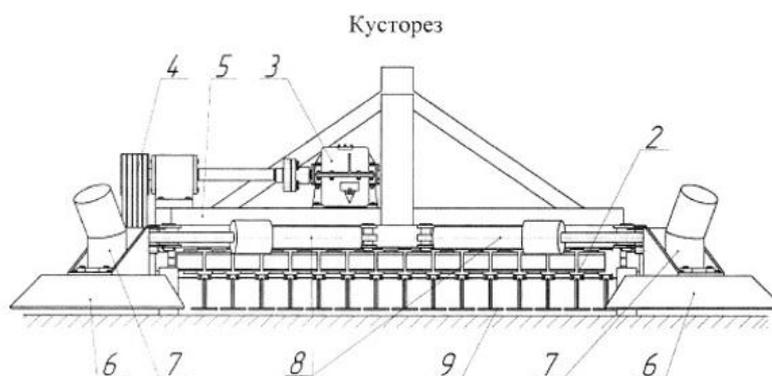
- принцип действия рабочего органа, которыми могут служить: ножи, фрезы, пилы, диски, оканчивающиеся ножами, ножевидные элементы, закреплённые посредством гибкой связи;
- агрегатирование;
- управление рабочим органом, например гидравлическое;
- мощность;
- объём обрабатываемой поверхности.

Характер и последовательность операций определяется выбором технологического процесса, который также имеет влияние на масштаб воздействия на

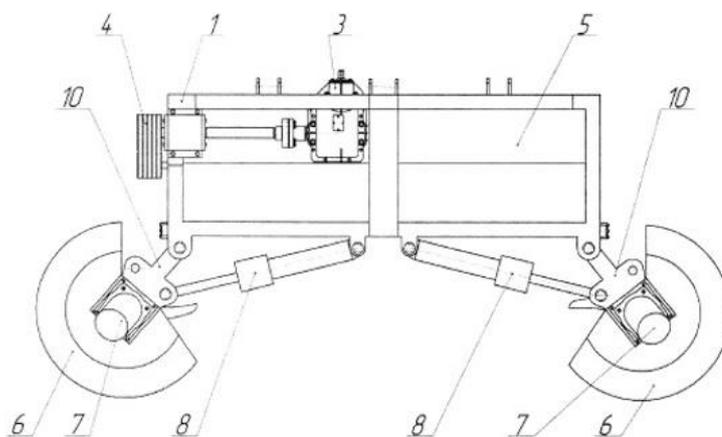
лесную среду, уровень производительности труда, конечный результат работ, затраты и т.п.

Технология рубок ухода за лесом является основанием для создания и применения комплекса машин с определенным принципом действия.

Мы будем рассматривать кусторезы с навесным оборудованием.



Фиг. 1



Фиг. 2

Рисунок 1.1 – Кусторез с жесткой рамой

Рассматривая кусторезы, можно выделить несколько различий:

- конструкция рамы (шарнирно-сочленённая, жесткая);
- гибкий рабочий орган ;
- рабочий орган со слабыми ножами;
- рабочий орган с сильными ножами.

На рисунке 1.1, заявка 2018117588 RU [36], мы видим кусторез, который включает раму 1 с механизмом навески на трактор, барабан 2 с жестко закрепленными ножами тарельчатого типа 9, одноступенчатый редуктор 3 с коническими шестернями, ременную передачу 4, защитный кожух 5, две боковые секции 6 в виде роторных косилок, два гидромотора 7, два гидроцилиндра 8, закрепленные на поворотных штангах 10. Помимо барабана с жестко закрепленными ножами тарельчатого типа, который уничтожает поросль в междурядье, имеются боковые секции, которые, в свою очередь, борются с растительностью в ряду. Гидроцилиндры устанавливаются на угол, достаточный для беспрепятственного выдвижения боковых секций. В крайнем положении боковых секций обеспечивается их перекрытие в горизонтальной плоскости с барабаном, что исключает пропуски несрезанной растительности. Такая конструкция кустореза позволяет повысить его производительность и качество удаления поросли, а гидропривод обеспечит компактность и простоту.

Как видно на рисунке 1.2, пат. 5775075 США, режущее устройство установлено на шарнирно-сочлененном узле стрелы, в котором второй элемент стрелы несет ось поворота, ориентированную перпендикулярно шарнирным соединениям первого и второго элементов стрелы, позволяя в целом вертикальное перемещение узла стрелы. На такой узел устанавливают режущий рабочий, а шарнирное соединение обеспечивает большой диапазон гибкости и универсальности. Ось поворота определяется гидравлическим поворотным приводом, установленным в центральной части второго элемента стрелы.

Дугообразное движение косы позволяет рабочему органу покрывать больший диапазон поверхности земли за каждый проход первичного двигателя, оставаясь в целом параллельно поверхности земли. Кроме того, гидравлический поворотный привод предназначен для создания механизма двустороннего резания, который действует независимо от того, с какой стороны работает режущая головка.

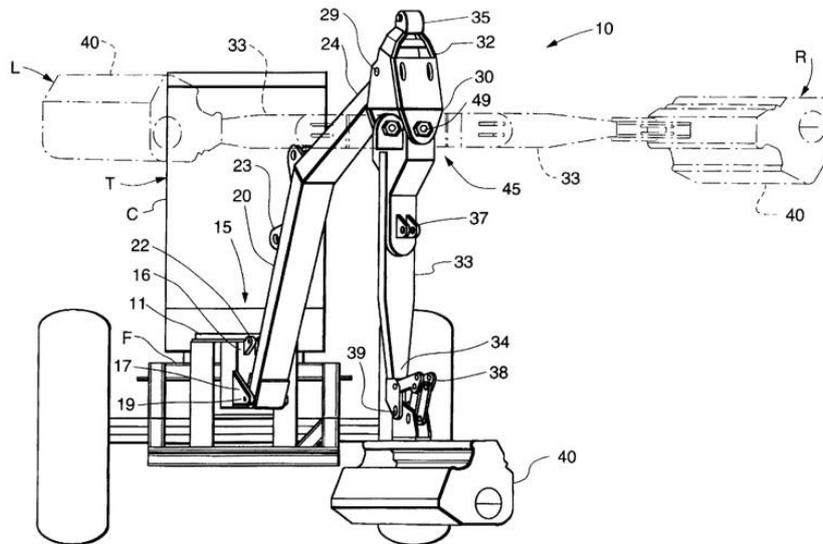


Рисунок 1.2 – Шарнирно-сочлененная стрела

В отличие от рамы заяв. 2018117588 RU, конструкция на рисунке 1.3, пат. 5775075 США [37], имеет больший износ трущихся деталей в поворотных механизмах при перемещении стрелы по ее диапазону, неравномерность среза поросли и возможные пропуски.

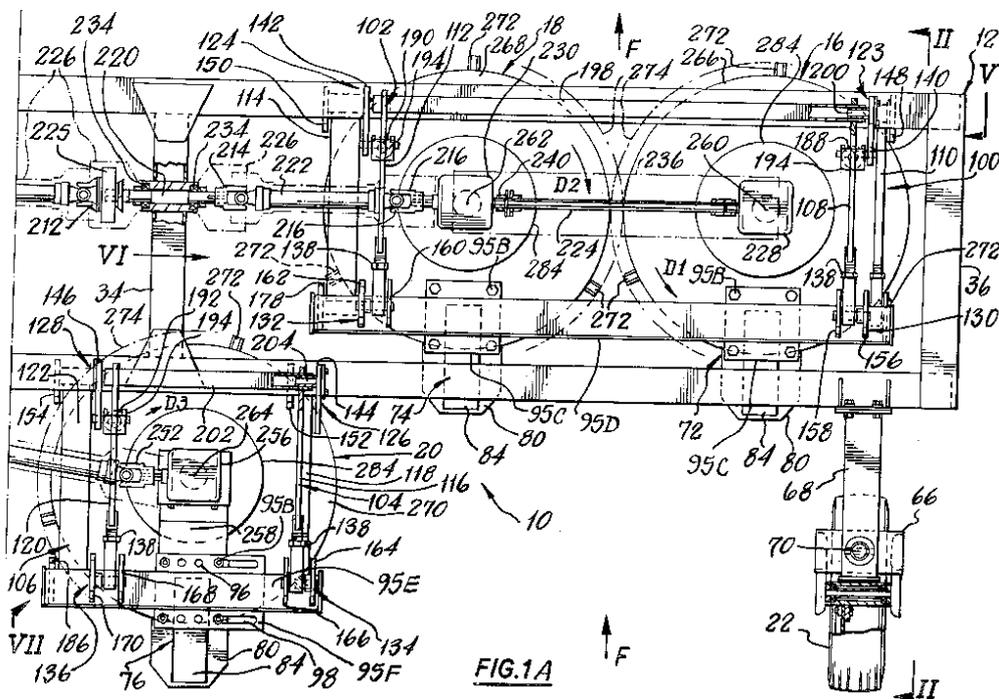


Рисунок 1.3 – Правая часть рамы косилки с тремя и более роторами

Данная косилка, содержащая три или более роторов, обладает большой шириной захвата. Конструкция состоит из двух двухроторных косилок. Это означает большую громоздкость, а следовательно, рама, на которой будут крепиться роторы, должна быть очень мощной.

Сельскохозяйственная роторная косилка содержит продолговатый прямоугольный жесткий каркас, узел бабки, первый, второй и третий режущий роторы и опорное колесо пат. US4192123A [43].

Узел передней бабки выполнен в виде жесткой рамы, содержащей поперечную балку квадратного сечения, из которой выступают нижние соединители для соединения с тягами трактора и верхний соединитель для соединения с верхней тягой трактора. Следует отметить, что высота тяговых звеньев предва-

рительно устанавливается во время кошения с помощью распорок, соединяющих нижние соединители и фиксированную точку на тракторе.

Рама содержит поперечные переднюю и заднюю балки и три проходящих вперед и назад элемента рамы, приваренных к ней, чтобы образовать жесткий каркас в сравнении с заяв. 2018117588 RU.

На своем левом конце рама имеет убирающуюся парковочную стойку и соединена с передней бабкой для поворота вокруг вертикальной оси и вокруг горизонтальной оси с помощью усиленного шарнирного узла. Шарнирный узел включает три шарнирных элемента, как видно на рисунке 1.3.

Первый и второй шарниры проходят в боковом направлении и соединяют шарнирный элемент с рамой. Третий шарнир соединяет шарнирный элемент с передней бабкой.

Проанализировав несколько рам, можно сказать, что конструкцию рамы необходимо выбирать, учитывая местность, на которой будет работать кусторез. Шарнирно-сочленённая рама удобнее при работе на склонах, а жесткая обеспечивает большую надёжность, но применима на участках с незначительным наклоном.

Конструкции гибких рабочих органов.

Для обрезки растительности разработан рабочий орган, рисунок 1.4, пат. US 4,054,992 45 [42]. Гибкий неметаллический элемент в виде струны имеет круглое сечение с одним или несколькими периферийными отверстиями, которыми он крепится к ротору установленному на валу электродвигателя. При вращении струны натягиваются и перерубают поросль.

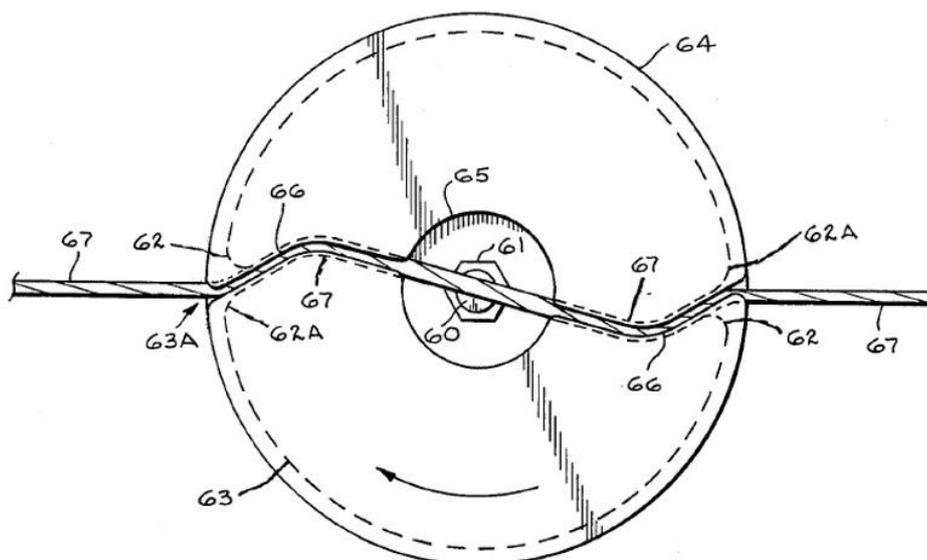


Рисунок 1.4 – Ротор с гибкой неметаллической струной

Данная простая и компактная конструкция применима к тонким сорнякам, при работе с более толстой порослью или попадании твердых каменных пород быстро происходит обрыв струны. Патент US 4,054,992 45, Oct. 25, 1977.

Кусторез с металлическим цепным рабочим органом показан на рисунке 1.5. В состав сельскохозяйственного устройства заявки US 2018/0192571 A1 входит механический редуктор, соединенный между вращающимся валом и приводным валом к трактору или другой двигательной установке [40]. Механическая коробка передач настроена на вращение вращающегося вала так, что множество сегментов цепи распрямляются и ударяют поверхность земли

Регулируемая фрикционная муфта присоединяется к коробке передач. Цепи находятся в удлиненном корпусе.

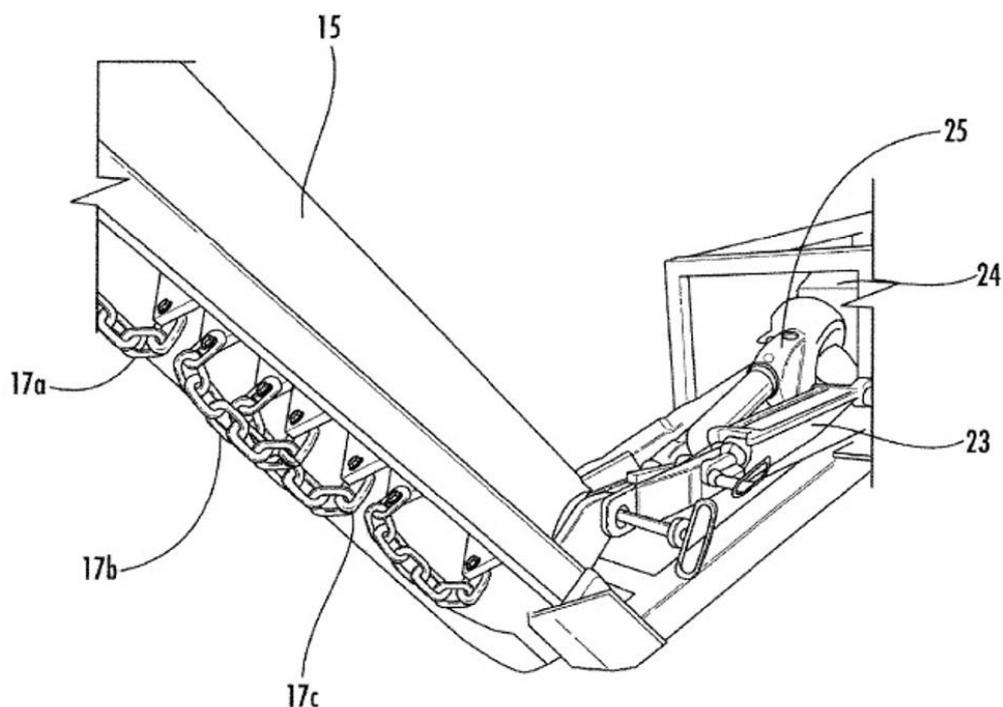


Рисунок 1.5 – Ротор с металлической цепью, закрепленной с двух концов

В заявке US 2018/0192571 A1 мы видим, что, в отличие от пат. US 4,054,992 45, сегменты цепей взаимодействуют не только с порослью, в результате чего происходит переламывание растений, но и с землёй – снятие верхнего слоя почвы. Но также, как и в пат. US 4,054,992 45, где происходит обрыв струны, в данном устройстве происходит частый обрыв цепей при ударе о поверхность земли. Заявка US 2018/0192571 A1, 12.07.2018.

Конструкции ножевых шарнирно-сочленённых рабочих органов

Рассмотрим вариант рабочего органа с шарнирно-сочлененным лезвием. Как показано на рисунке 1.6, пат. WO1997017831A1, опора ножа для лезвия имеет структуру, называемую «моноблочной конструкцией», отличающуюся тем, что она содержит две пластины [38].

Оси и пластины образуют сплошную металлическую среду в виде одной детали без сборочного устройства, т.е. без выступов, получаемых любыми способами плавления металлов.

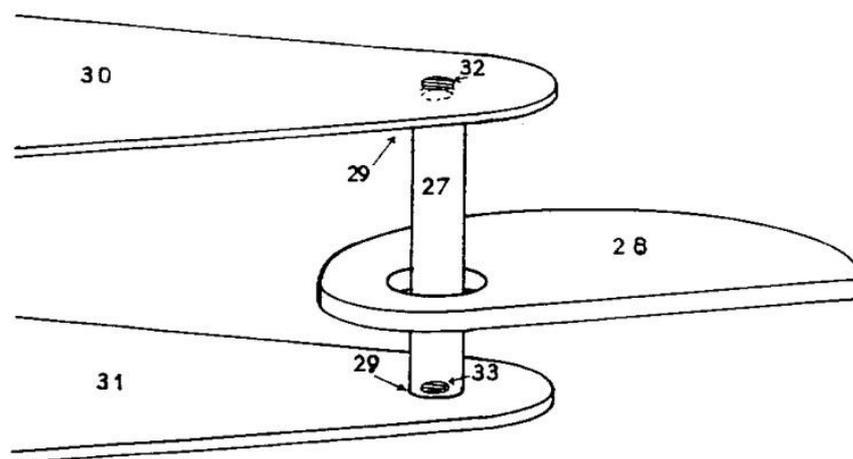


Рисунок 1.6 – Ротор с лезвиями, вращающимся вокруг своей оси

Эти режущие лезвия с шарнирно-сочлененными ножами подвергаются очень сильным и очень близким ударам, а также сильному истиранию всех их частей, соприкасающихся с препятствиями и землей, причем наиболее уязвимыми являются выступающие части. Вращение ножей происходит с высокой скоростью, поэтому под воздействием ударов при встрече с порубочными остатками происходит интенсивный износ режущих лезвий и истирание мест посадки, из-за чего велик шанс поломки такого ротора. При поломке лезвие может вылететь в окружающее пространство, что опасно для оператора и его окружения. Это причина того, почему такие конструкции используют мало либо не используют вовсе. Патент WO1997017831A1. 22.05.1997.

На рисунке 1.7 показан ротор с лезвиями пат. US4403743A, он включает вал, вращающийся вокруг его оси, к которому прикреплены держатели лезвий. Каждый держатель лезвия расположен радиально относительно оси вала. Блокирующий вращение лезвия вокруг своей оси элемент установлен в каждом держателе лезвия [44].

К каждому элементу, блокирующему вращение, прикреплено одно лезвие. Вращение вала вызывает вращение держателей лезвий, что, в свою очередь, приводит к вращению элементов блока и лезвий.

Конструкция кустореза включает в себя ряд дисков, расположенных в осевом направлении на валу и связанных между собой множеством продольных стержней, на которых установлены ряды лезвий.

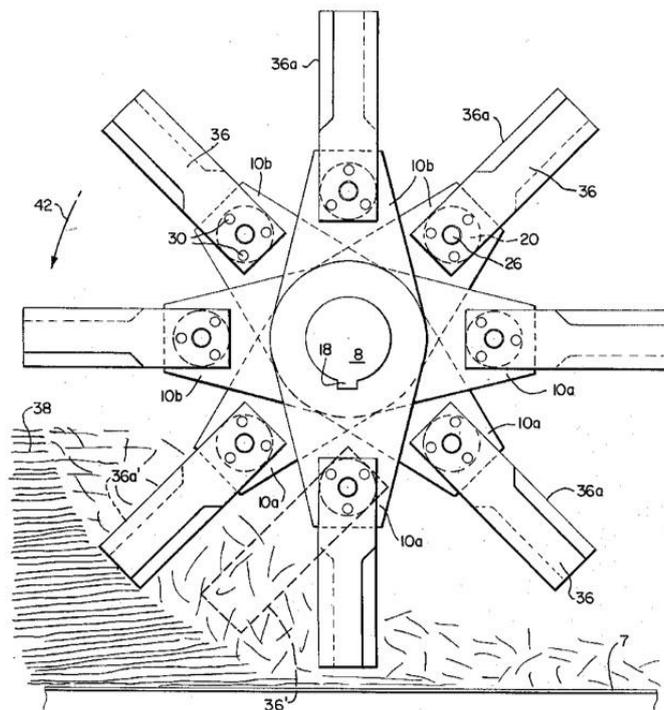


Рисунок 1.7 – Ротор с лезвиями, жестко закрепленными в блокирующих втулках

При эксплуатации таких узлов, имеющих жестко закрепленные лезвия, происходят столкновения с твердыми материалами, что приводит к поломке ножей, как и в пат. WO1997017831A1 и в заявке US006321518B1.

Мульчер заяв. US006321518B1 [45] состоит из множества вращающихся бойков и цилиндрического трубчатого ротора, закрепленного в подшипниковом узле на каждом из концов для вращения вокруг горизонтальной оси (рисунок 1.8). Крепления бойков установлены на внешней поверхности ротора, а установочные карманы позволяют им вращаться через внутреннюю часть ротора. При вращении барабана происходит вращение бойков, которые прикреплены шарнирно к валу барабана.

Таким образом, при взаимодействии бойков с сорняком и порослью происходит перерезание. Но из-за тонкой конструкции осей они часто обламываются. Заявка 09/473,744, 28.12.1999, US006321518B1.

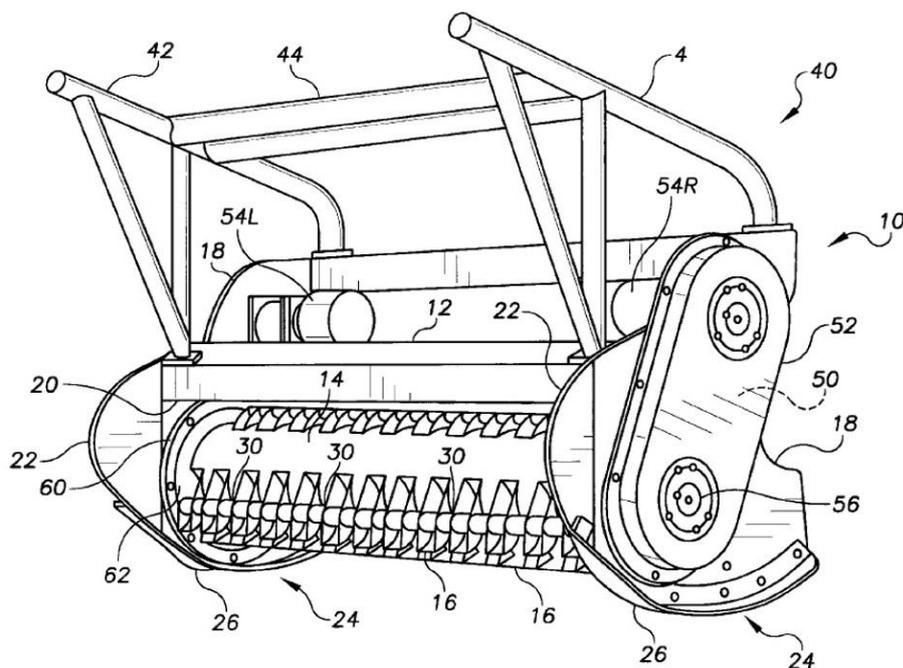


Рисунок 1.8 – Общий вид мульчера

На рисунке 1.9 представлены лезвия для роторно-ножевой машины измельчительного, косилочного, кусторезного типа заяв. FR2776953B1. Резак, установленный горизонтально или вертикально, содержит держатель лезвия, вращающийся вокруг оси, имеющий лезвия, которые установлены между фланцами, прикрепленными к держателю лезвия, так что они могут свободно поворачиваться вокруг оси при столкновении с препятствием. Предусмотрены упоры для позиционирования режущего лезвия так, чтобы его центр тяжести был смещен вниз по потоку от линии, соединяющей две оси.

При резке на нож действуют две силы: центробежная сила и сила, оказываемая ветвями на лезвие ножа. Таким образом, он отклоняется назад в плоскости режущего элемента в направлении, противоположном направлению вращения. За счёт использования легированной стали такие ножи очень прочны. Заявка FR2776953B1 12.10.2001.

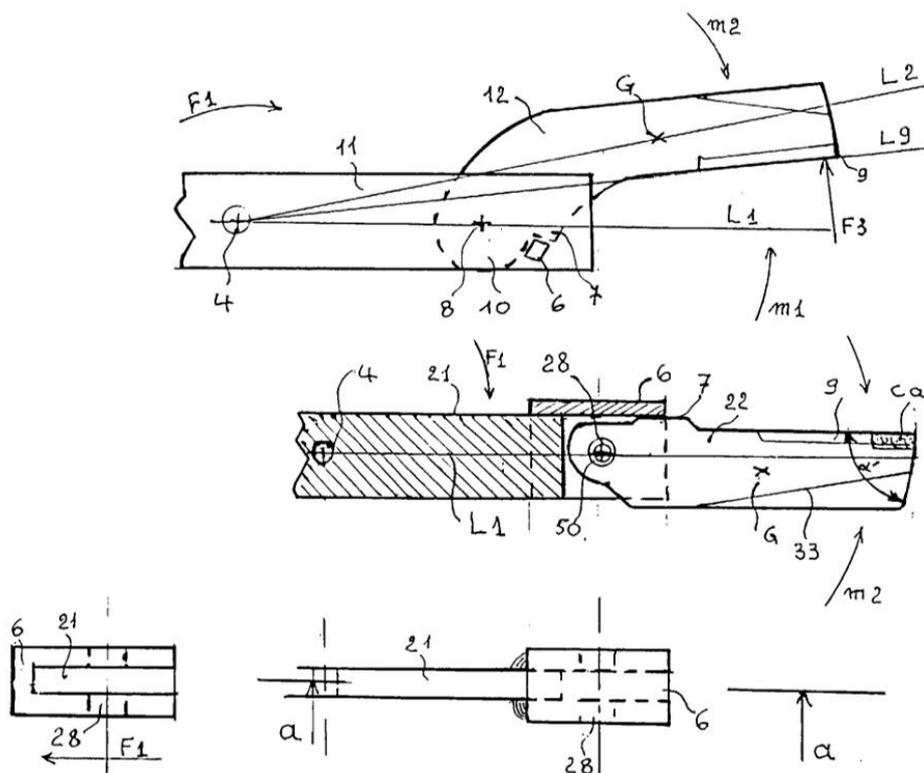


Рисунок 1.9 – Виды ножей, присоединяемых шарнирно к ротору кустореза

На рисунке 1.10 представлен рабочий орган, состоящий из двух ножей, прикреплённых шарнирно. В состоянии покоя ножи опущены, а в рабочем положении они выпрямляются и вращаются.

Диск с ножами расположен горизонтально относительно земли. Устройство предназначено для удаления не только поросли, кустов, но и небольших деревьев, т.к. имеет прочные ножи, поэтому его можно использовать для расчистки заросших площадей.

Устройство пат. 2,751,737 [41] относится к такому типу, в котором рабочий орган выполнен в виде горизонтально вращающегося диска с ножами, над которым установлен защитный элемент, частично окружающий диск и крепящий к себе раму. Предохраняющая рама проходит достаточно низко, чтобы заставить всю машину подняться вверх по препятствиям, таким как пни, скалы и тому подобное, в результате чего вращающийся диск, его вал и приводной механизм защищены от повреждений, которые в противном случае могли бы произойти.

Ножи на диске расположены так, что лезвия при зацеплении с объектом, подлежащим разрезанию, перемещаются в осевом направлении относительно объекта, обеспечивая не только прямое ударное резание, но и распил, сглаживание и улучшение режущего действия лезвий.

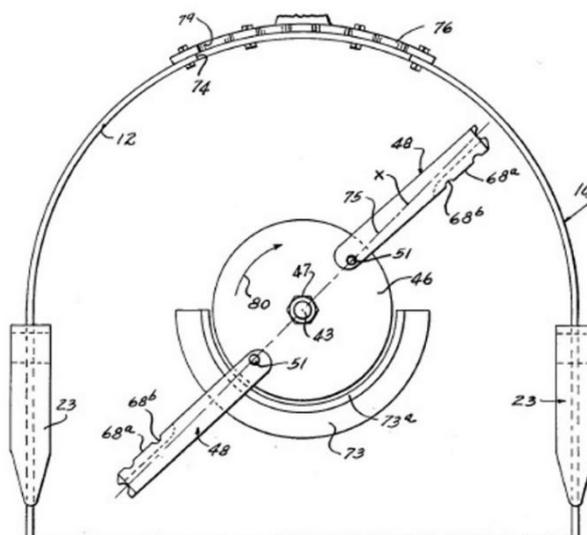


Рисунок 1.10 – Ротор с двумя ножами, обладающими режущими кромками и защитной рамой

Данное устройство с рамой может навешиваться на трактор как спереди, так и сзади.

Вертикально расположенный выходной вал, ведущий от коробки передач, выступает под корпусом и несет режущий механизм. Вал поддерживается соответствующим подшипником, прикрепленным к корпусу, и предназначен для приведения в движение со скоростью, подходящей для конкретных целей. Рядом с нижним концом вала расположен диск из толстого металла толщиной порядка 15-20 мм. Диск без возможности вращения прикреплен к валу с помощью гайки. К диску рядом с его периферией шарнирно прикреплена пара режущих лезвий. Согласно пат. 2,751,737 видно, что лопасти снабжены установочным отверстием, режущая часть имеет кромки, которые при взаимодействии с участком, подлежащим срезанию, обеспечивают пропил и перерезание. Патент 2,751,737 June 26, 1956.

Косилка роторная навесная Заря-1 [108] (рисунок 1.11) является одним из навесных орудий к мотоблоку НМБ-1. Предназначена для скашивания как обычной травы, так и грубостебельной и травяной растительности с повышенной урожайностью, произрастающих в том числе и на малых участках, обочинах дорог, на склонах крутизной до 15° при боковом наклоне не более 8° , высотой не более 60 см.

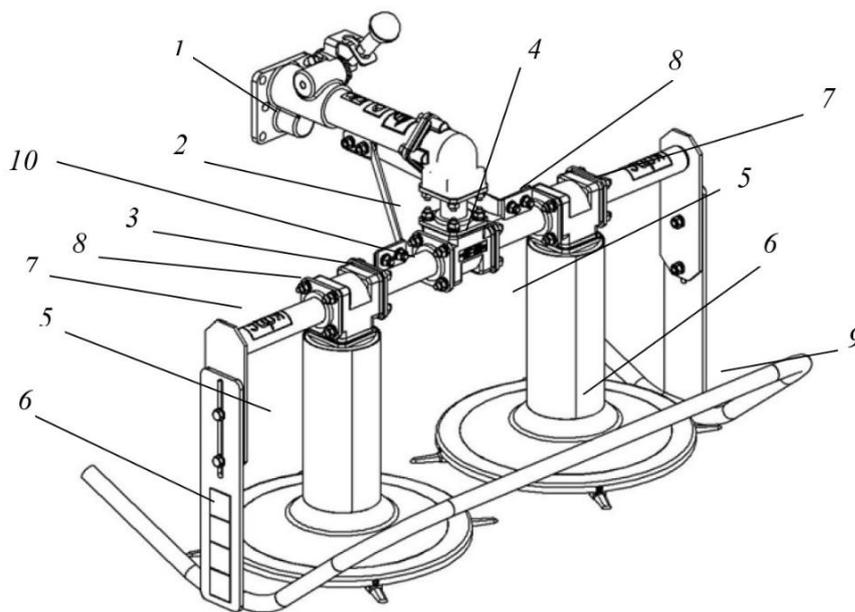


Рисунок 1.11 – Косилка роторная навесная Заря-1

Кроме того, она используется как газонокосилка для скашивания зерновых культур и мелкого одиночного кустарника. Косилка состоит из следующих основных частей: 1- трансмиссия верхняя, 2- трансмиссия средняя, 3- трансмиссия левая, 4- трансмиссия правая, 5- трансмиссия нижняя, 6- диск с ножами, 7- корпус трансмиссии, 8, 10- корпус редуктора, 9- лыжи в сборе.

Косилка монтируется на мотоблок НМБ-1 путем присоединения трансмиссии верхней к мотоблоку и крепится гайками. Данная косилка навешивается только с одной стороны, в отличие от пат. 2,751,737 . Трансмиссия верхняя снабжена рычагом включения (выключения) косилки. При перемещении рычага в переднее положение включаются в работу трансмиссии косилки, которые пе-

редают крутящий момент от вала отбора мощности коробки передач к режущим дискам. Заявка 2018117588, 11.05.2018 RU (11) 184 195(13) U1.

Кусторез с помощью навески соединён к тяговому трактору (рисунок 1.12). Привод передается от вала отбора мощности и далее через ременную и коническую передачи к рабочим органам. Кусторез состоит из бруса с вращающимися вокруг осей роторами.

На роторах установлены ножи в виде лезвий. Перевод в транспортное и рабочее положение происходит за счет тягового гидроцилиндра [39].

Приведенные конструкции в целом охватывают основные принципы построения конструкций кусторезов.

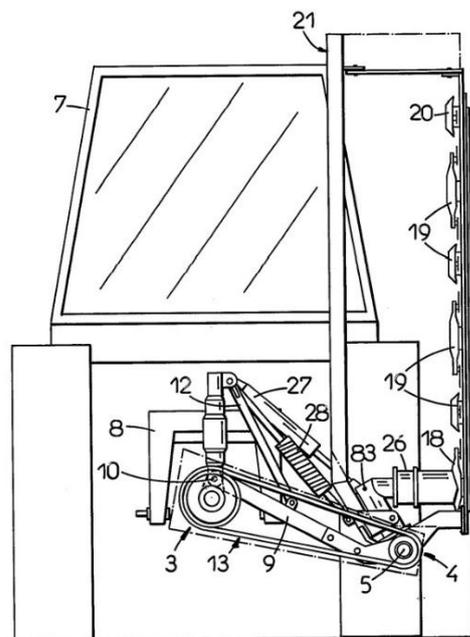


Рисунок 1.12 – Кусторез с шарнирно-сочлененной рамой и роторами

На наш взгляд, наиболее перспективными являются конструкции, позволяющие работать как на склонах, так и на прямых участках – шарнирно сочлененная рама. Для снижения энергоёмкости процесса удаления древесно-кустарниковой растительности целесообразно использовать лезвия, обеспечивающие резание со скольжения. Таким образом, за прототип принимаем конструкцию, показанную на рисунке 1.12.

1.2 Обзор методов моделирования, применяемых для лесных машин

При моделировании лесных машин применяются методы физического и математического моделирования. В настоящее время можно выделить следующие этапы моделирования лесных машин:

1. Построение параметрической 3D модели звеньев, объединение их в сборки с указанием сопряжений и получение модели в системах автоматизированного проектирования (Solidworks, Компас, Autocad и пр.).

2. Получение массовых и геометрических характеристик звеньев машины (центра масс, моментов инерции, координат) для использования их в математических расчетах.

3. Составление аналитических и имитационных моделей с помощью языков программирования и готовых сред разработки, таких как Matlab, Matcad и пр. и последующее проведение компьютерного эксперимента в них для обоснования параметров машин.

4. Разработка физической модели машины, проведение эксперимента и сравнение полученных данных с математическими моделями. И далее создание опытного образца.

Вопросам моделирования машин и технологических процессов посвящены работы авторов А.А. Самарского, В.П. Тарасика, А.В. Александрова, А.А. Пижурин [66, 80, 2, 48].

Использованию для моделирования программных средств, таких как MATLAB, Matcad, Solidworks, посвящены работы А.Н. Тимохина, Н.Г. Чикурова, Д.В. Бурькова, С.В. Поршнева, В.В. Побединского, И.И. Борисова [82, 94, 7, 49, 6].

После разработки структуры математической и имитационной модели необходимо установить начальные и граничные условия её функционирования. Для этого нами были проанализированы разработки в областях, которые касаются работы кустореза [54].

Научные основы резания и разрушения древесных материалов заложены в трудах А. Л. Бершадского, Н. Е. Резника, С. А. Воскресенского, В. И. Любченко. Н. М. Вальщиков, Э. П. Лицман, Н. П. Рушнов, К. Ф. Горохов исследовали процессы резания древесины с толстой стружкой. В. Г. Нестеренко, В. П. Возный, Ф. Е. Захаренков, Е. В. Кириллов, Р. М. Некрасов, Ю. В. Плотников, Б. А. Преловский, Н. А. Шипилин внесли вклад в исследование процесса срезания сучьев [5, 4, 59, 10, 65, 23, 32, 98,].

Исследованию процесса резания стволовой древесины перпендикулярно и вдоль направления волокон посвящены работы Н. Ф. Курапцева, В. А. Азаренка, В. В. Захарова, Е. Г. Ивановского, В. Д. Крыльцова, В. Г. Кочегарова, Б. А. Леонова, П. М. Мазуркина, А. Н. Коршунова, В. В. Овчинникова, Ю. М. Петрова [26, 1, 19, 20, 25, 24, 27, 29, 31, 33, 47].

Таким образом изученность темы подтверждается научными трудами авторов, которые мы используем для обоснования теоретических подходов к проблеме исследования, а также методологии моделирования, применяемых для лесных машин.

Кочегаров В.Г [24] в своих трудах рассматривал современные технологические процессы, машины и оборудование лесосечных и лесовосстановительных работ. Также затронуты конструктивные и эксплуатационные особенности зарубежных лесосечных машин.

Обзор и анализ машин и механизмов для обрезки сучьев проводил Преловский Б.А. [53]. Представлена классификация по конструкциям и технологическим параметрам. Рассмотрены ускоренные итерационные методы решения уравнений.

Шегельман И.Р. [96] предложил общую компоновку машины для срезания и измельчения древесно-кустарниковой растительности (ДКР), которая позволяет увеличить её надёжность при работе.

На исследованиях Захаренкова Ф.Е. [18] базируется установление аналитических зависимостей силовых параметров процесса резания от геометрических параметров резца, размеров и физико-механических свойств древесины оснований ветвей.

Опираясь на основные положения теории резания древесины Бершадского А.Л. [5], разработанной на основании обобщения экспериментальных и производственных наблюдений, мы рассматривали процессы резания и фрезерования ДКР, используя представленные формулы, определяли силы резания и методику расчёта оптимальных режимов резания.

В своих «Основах научных исследований» Мазуркин П.М [29] ориентировал на получение знаний по основным историческим аспектам, теоретическим положениям, технологиям, операциям, практическим методам и приемам проведения научных исследований, а также научного поиска, анализа, экспериментирования с использованием информационных технологий на базе современных достижений отечественных и зарубежных ученых.

В работах Резника Н.Е. [59] обобщены научно-теоретические и экспериментальные основы процесса резания лезвием с учётом современных достижений в этой области знаний. Разновидности процесса резания лезвием рассматриваются на основе дифференциации технологических факторов. При этом наиболее важное значение придаётся кинематической трансформации угла заточки и кромки лезвия.

Вальщиков Н.М, Лицман Э.П. [9, 65] осветили основные положения теории резания древесины в рубительных машинах, привели примеры конструкций и рассмотрели вопросы технологического расчёта основных параметров рубительных машин, дали рекомендации по расчёту на прочность и жёсткость основных элементов конструкции.

Ивашнев М.В. [22, 21] внес значительный вклад в формирование научных основ и технических решений для создания машин, обеспечивающих эффективное удаление древесно-кустарниковой растительности при непрерывном движении базового трактора для восстановления и реконструкции лесных участков и угодий, при проведении лесопожарных, лесохозяйственных работ, культур технических работ, строительстве, эксплуатации и ремонте линейных объектов.

1.3 Выводы по разделу

1. Основными узлами машин для удаления ДКР являются жесткая либо шарнирно-сочлененная рама и рабочий орган в виде ротора с гибким либо жестким режущим элементом, который приводится во вращение от механической либо гидравлической передачи.

2. Проведенный анализ конструкций указывает на предпочтение использования шарнирно-сочлененной рамы и шарнирно-сочлененного рабочего органа при проектировании кустореза, т.к. такая конструкция рамы расширяет область применения (работа на склонах), а ножи ротора обладают возможностью отклонения от непреодолимых препятствий.

3. Обзор теоретических исследований показал значительную проработку отдельных вопросов теории касаво сил резания кинематики и динамики, но исследования не сведены в единой математической среде, и потому их применение вызывает значительные сложности у инженеров.

4. Назрела необходимость разработки методики, позволяющей объединить работу в системах автоматизированного проектирования конструкций с математической средой, позволяющей проводить имитационные эксперименты для обоснования параметров конструкции кустореза.

2 Методика имитационного моделирования динамических систем в программном комплексе MATLAB

2.1 Постановка задачи имитационного моделирования

Имитационное моделирование применяется для широкого круга задач: проектирование машин и механизмов, определение параметров функционирования оборудования, их анализ и оптимизация.

На примере рассматриваемого нами кустореза постановка задачи выглядит следующим образом.

1. Используя современные средства автоматизированного проектирования САПР Solidworks, мы проектируем детали механизма, собираем их в сборки, указывая геометрические параметры, массу и сопряжения звеньев.

2. С помощью приложения Motion Solidworks указываем направление силы тяжести, движители и расставляем датчики, после чего проводим компьютерный эксперимент и получаем параметры функционирования модели механизма.

3. Для более подробного исследования кинематики и динамики кустореза конвертируем модель из Solidworks в MATLAB Simulink. В этом случае модель будет представлена в виде блоков, которые содержат информацию о деталях (их геометрические параметры, массу, расположение в пространстве и пр.). Моделирование системы будет происходить на основе законов теоретической механики, которые будут заданы дифференциальными уравнениями, но не в их классическом виде, а в виде диаграммы блоков.

4. На основании разработанной имитационной модели в MATLAB Simulink проводим компьютерный эксперимент и используем полученные результаты для анализа и определения параметров функционирования конструкции кустореза.

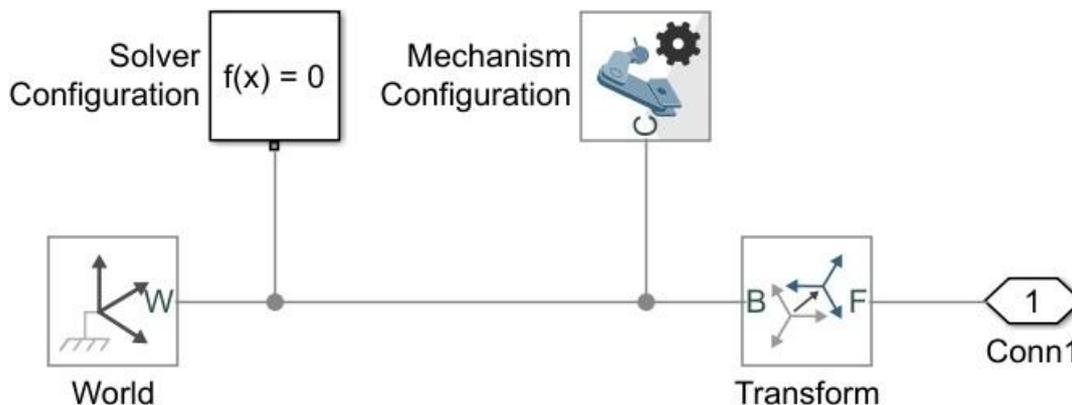


Рисунок 2.2 – Блоки, входящие в подсистему Initial setting

Блок World задает жесткое подключение объекта к мировой системе координат с начальным положением $X=0, Y=0, Z=0$. В блоке Solver Configuration настраиваются параметры решателя для расчета модели (в нашем случае они взяты по умолчанию). В блоке Mechanism Configuration настраиваются параметры направления силы тяжести для всего механизма (в нашем случае $Gravity = [0 - 9.80665 0]$ м/с²). Блок Transform определяет изменение положения объекта, присоединённого к порту F, относительно объекта у порта B. Для нашего случая характеризует положение объекта Os относительно МСК. Настройки блока Transform для рассматриваемого ротора: метод поворота Arbitrary Axis (поворот объекта вокруг осей x, y, z), метод перемещения Cartesian (перемещение по декартовым координатам x, y, z) величины значений поворота и сдвига заданы переменными `smiData.RigidTransform(39).angle`, рад, `smiData.RigidTransform(39).translation`, мм соответственно. Численные значения считываются после конвертации файла сборки 3D модели из САПР Solidworks. Блок Conn1 предназначен для связывания и передачи сигнала из подсистемы в модель.

На блок F1 подается сигнал из подсистемы Initial setting, а с блока F выходит обработанный сигнал из подсистемы Os. Внутри подсистемы Os находится блок ReferenceFrame, задающий систему координат для 3D объекта Solid-Os, показанного на рисунке 2.3.

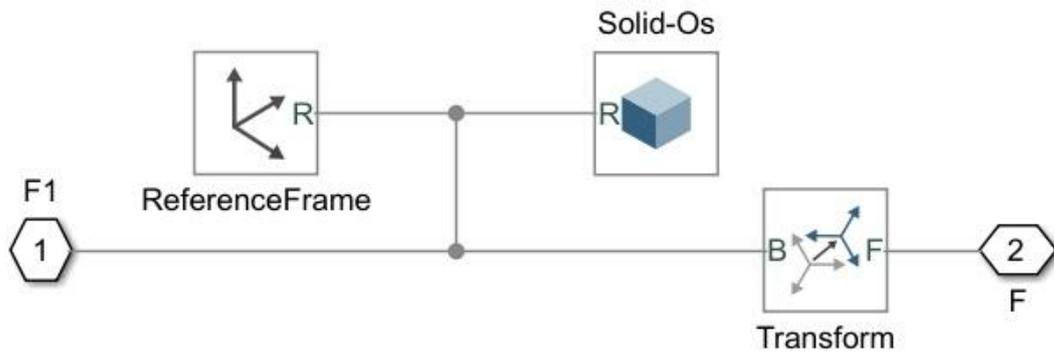


Рисунок 2.3 – Блоки, входящие в подсистему Os

На блок F1 подается сигнал из подсистемы Initial setting, а с блока F выходит обработанный сигнал из подсистемы Os. Внутри подсистемы Os присутствует блок Transform, предназначенный для ориентации объекта ось, и блок ReferenceFrame, задающий систему координат для 3D объекта Solid-Os, показанного на рисунке 2.4.

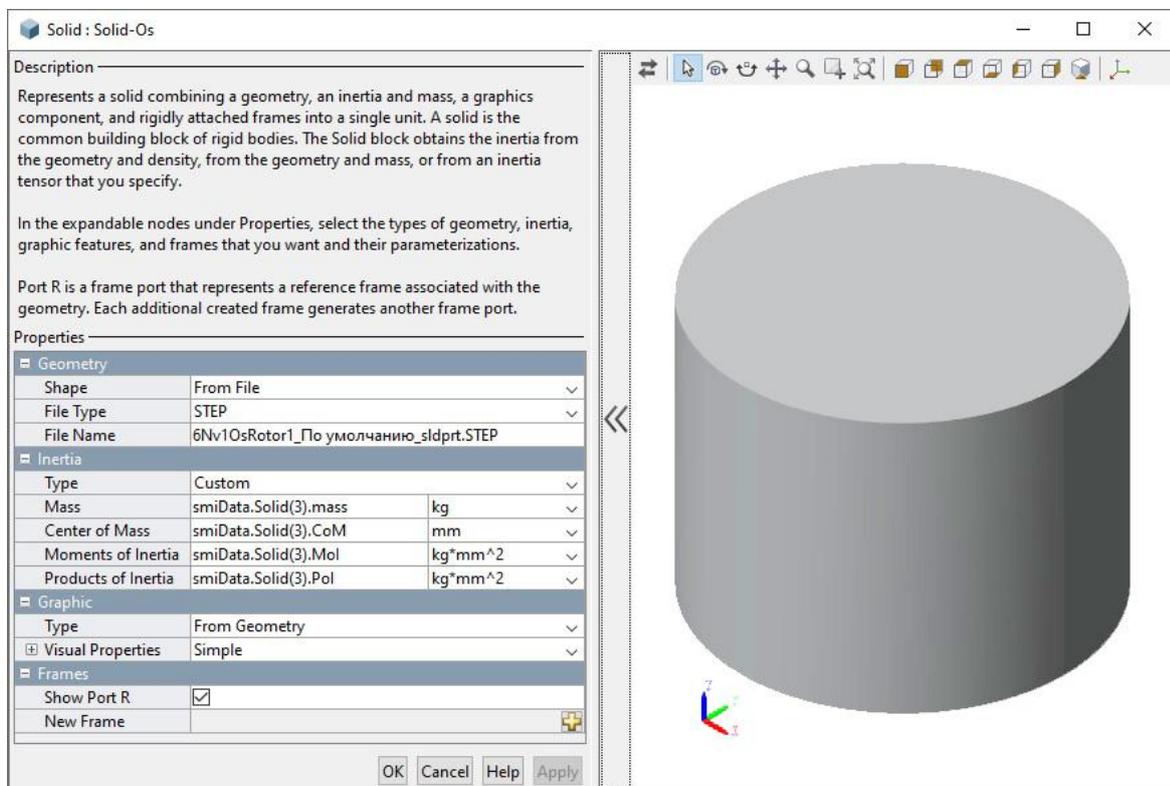


Рисунок 2.4 – Блок Solid-Os, входящий в подсистему Os

В блоке Solid-Os используются характеристики объекта, полученные на основании его 3D модели в САПР Solidworks (после считывания файла с расширением step), а именно центр масс, моменты инерции вокруг главных и вспомогательных осей и масса тела.

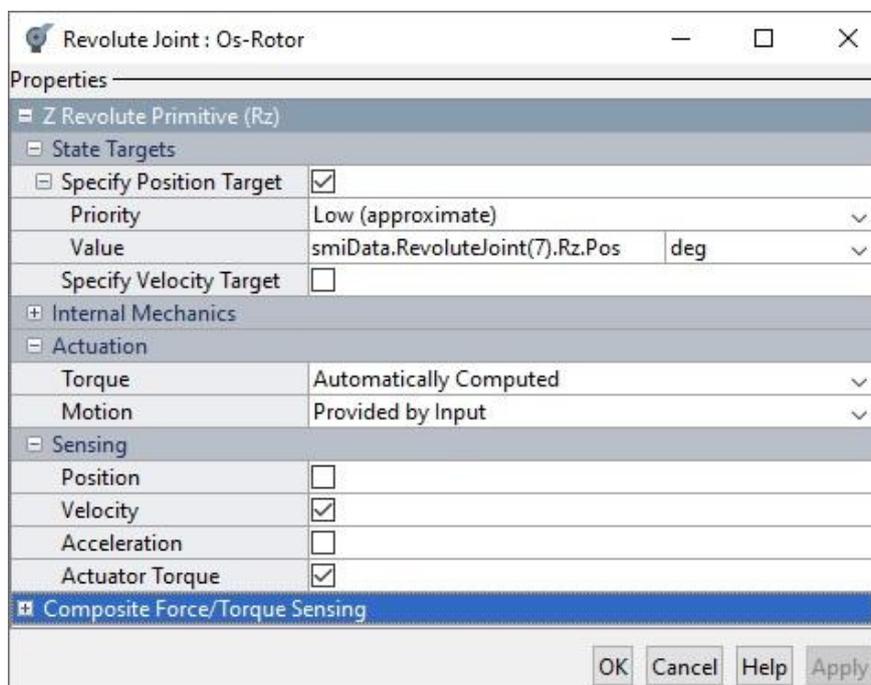


Рисунок 2.5 – Блок Revolute Joint: Os-Rotor, входящий в подсистему Os

Для того чтобы задать вращение ротора кустореза относительно оси, используем блок Revolute Joint:Os-Rotor (рисунок 2.5). Этот блок представляет собой настраиваемую кинематическую пару с одной степенью свободы. Начальный угол поворота берем из 3D сборки Solidworks (переменная `smiData.RevoluteJoint(7).Rz.Pos`). Для возможности отслеживания скорости и крутящего момента ставим напротив них галки. Усилие в кинематической паре рассчитывается автоматически на основании модели, а движение задаем извне с помощью подсистемы Angular.

Методика проектирования подсистемы Rotor аналогична подсистеме Os с тем лишь отличием, что у Rotor большее число точек крепления звеньев, а значит, требуется большее число блоков Transform, чтобы сдвинуть систему координат для каждого места крепления, и большее число портов вывода сигналов.

При проектировании подсистемы Noz1, описывающей шарнирное сочленение лезвия с ротором, мы используем блоки Revolute Joint (вращательную кинематическую пару с одной степенью свободы) для настройки соединения ножа с втулкой и ротором и блок Cylindrical Joint (цилиндрическую кинематическую пару с двумя степенями свободы) для настройки соединения лезвия с втулкой. Блоки Transform используем для перемещения систем координат мест приложения сигналов. Твердые тела (нож и втулку) описываем с помощью блоков Solid с именами Noz и Vtulka соответственно. К каждому твердому телу прилагается его система координат ReferenceFrame 1,2. На нож действует сила резания, поэтому предусмотрен порт SilaRez и демпфер – порт Pruzhina.

Чтобы превратить сигнал в механическую силу, используем блок External Force and Torque, в котором ставим галку напротив силы по оси OX (рисунок 2.6). Величину силы рассчитываем по известным теоретическим формулам и подаем согласно алгоритму.

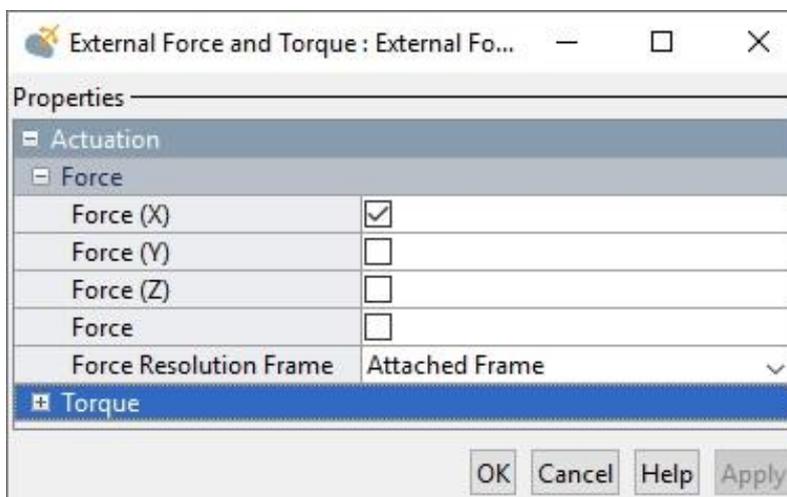


Рисунок 2.6 – Настройка блока External Force and Torque

Чтобы сгладить реакцию от подачи, силы используем в качестве демпфера блок Spring and Damper Force.

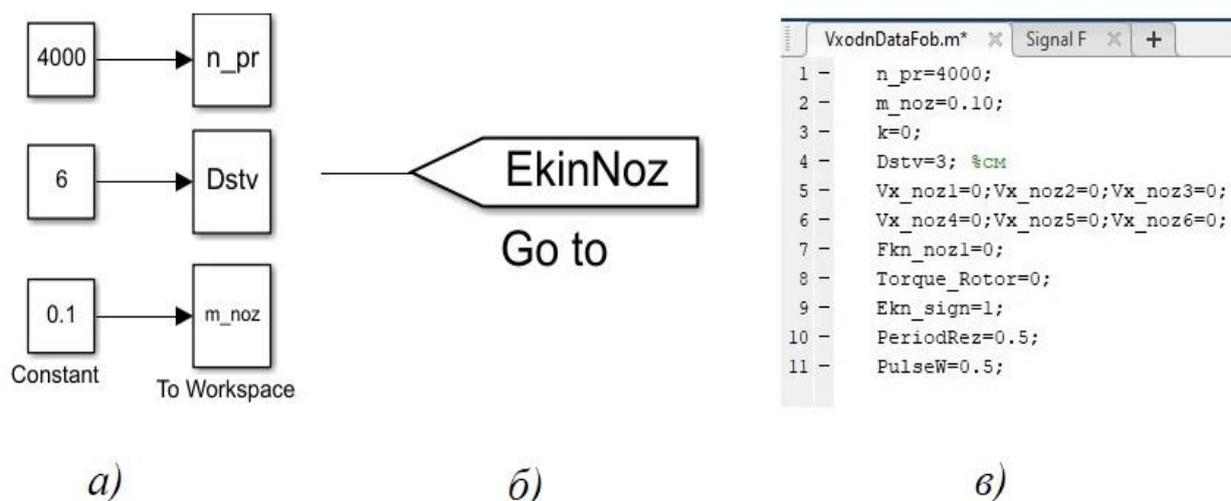
2.3 Методика формирования входных воздействий и снятия выходных параметров модели

Для использования переменных при расчете имитационной модели были задействованы следующие методы.

1. Использовались блоки Constant и To Workspace для того, чтобы на визуальной форме модели водить числовые значения и записывать их в соответствующих переменных (рисунок 2.7, а).

2. Использовался блок Goto block, с помощью которого передавались глобальные переменные, которые напрямую не соединены сигналом (рисунок 2.7, б).

3. Начальные значения переменных задавались в программном файле VxodnDataFob.m (рисунок 2.7, в).



а – интерактивный; *б* – передача сигналов без связи на форме; *в* – ввод данных в скрипте

Рисунок 2.7 – Методы ввода данных

Для того чтобы задать входные воздействия и привести механизм в действие, у кинематической пары Os-Rotor был включен режим – задание входного движения (порт q). Для того чтобы снять показания, был включен режим фиксации скорости и крутящего момента (порты t, w).

Чтобы задать входное воздействие на порт q, была спроектирована система Angular. В ней с помощью блока Signal Builder был задан нормализованный сигнал. С помощью блока Gain этот сигнал был умножен на формулу для расчета угловой скорости. С помощью блока Integrator с настройками по умолчанию из скорости мы получили значения углов поворота ротора. С помощью блока Simulink-PS Converter сигнал был переведен в формат угла и передан на порт q кинематической пары.

Для снятия выходных параметров модели были использованы блоки Scope, на которые подавался сигнал, предварительно переведенный из физического в выходной с помощью блоков PS-Simulink. Для расчета мощности использовали блок Product, который перемножил скорость и крутящий момент. Все фиксируемые на дисплее значения также были сохранены в переменные рабочей области с помощью блоков To Workspace.

Для снятия кинематики твердого тела используем блок Transform Sensor. Установим галки напротив перемещения по X,Y и напротив скорости (рисунок 2.8).

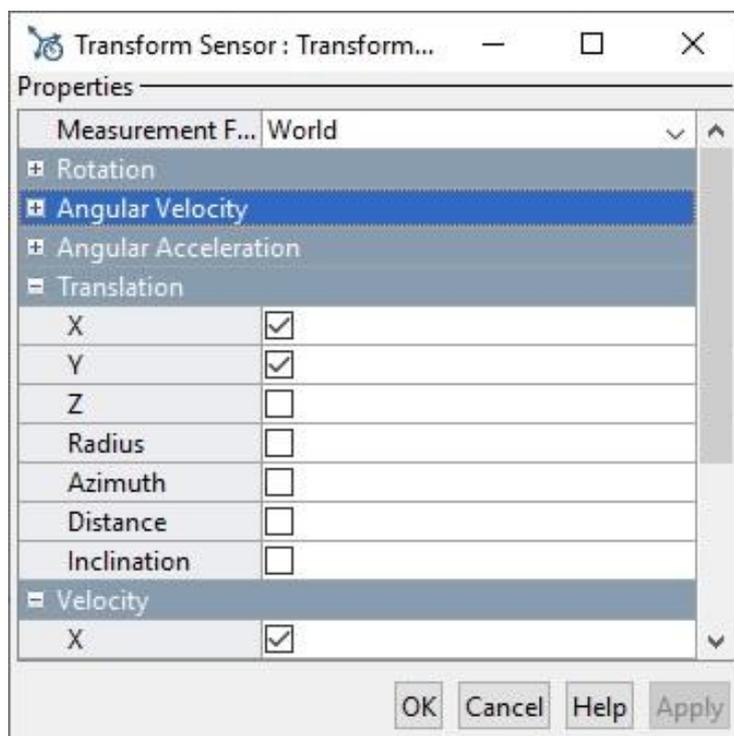


Рисунок 2.8 – Снятие координат кромки лезвия и его скорости

Для того чтобы увидеть на виртуальном осциллографе сразу два значения X и Y , используем блок Mux, который соединит два сигнала. Для расчета формулы на форме модели используем блокFcn. Так как процесс резания зависит от ряда факторов и привязан к модельному времени, частоте вращения и прочим показателям, то для корректного формирования силы резания, необходимо написать подпрограмму на языке матлаб, для этого используем блок MATLAB Function: Signal F.

2.4 Выводы по разделу

1. Описанные этапы постановки задачи имитационного моделирования с использованием САПР Solidworks и ПО MATLAB Simulink позволят инженерам, не изучая большой перечень программ и языков программирования, решить задачу по проектированию и обоснованию параметров разрабатываемых конструкций машин.

2. Описанные типовые блоки и их настройки позволяют задать необходимые возмущающие параметры и получить выходные значения функционирования имитационной модели разрабатываемой конструкции машины.

3. Использование встроенного в MATLAB языка программирования позволяет описать широкий круг процессов и подать его как сигнал на тот или иной блок.

3 Обоснование конструкции роторного кустореза

3.1 Принципиальная и расчетная схема ротора кустореза

В настоящее время разработка машин для удаления ДКР ведется в системах автоматизированного проектирования (САПР), поэтому целесообразно в этой же среде создать и имитационную модель, что сократит затраты на НИР и позволит инженеру-конструктору оперативно получить расчетные характеристики процесса работы его кустореза [14].

В результате патентного поиска за прототип конструкции нами был выбран патент № EP0337909A1 [39]. В результате структурного анализа механизма были выделены его основные звенья и составлена кинематическая схема (рисунок 3.1).

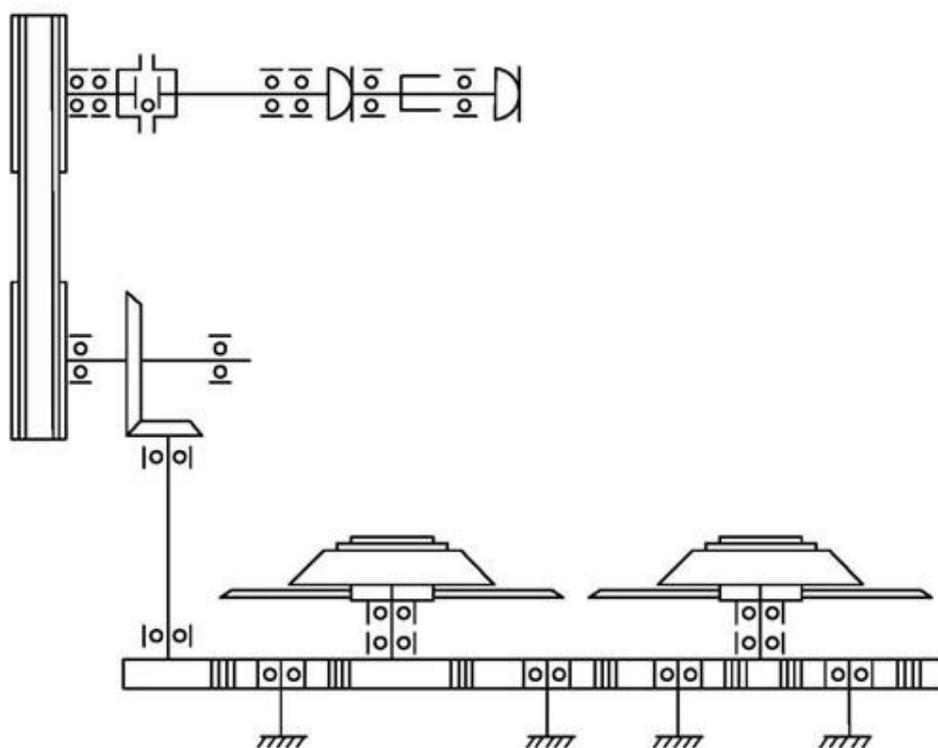
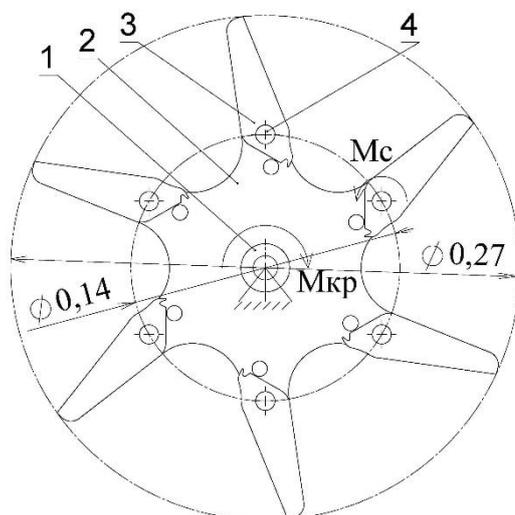


Рисунок 3.1 – Кинематическая схема привода кустореза с шарнирно-сочлененными рабочими органами

Кусторез навешивается на заднюю навеску трактора, приводится во вращение от вала отбора мощности через ременные и коническую передачи. Рабочий орган представлен роторами с шарнирно-сочлененными ножами. Кинематическая схема работы приведена на рисунке 3.2.



- 1 – неподвижная ось ротора; 2 – маховик ротора; 3 – нож ротора;
4 – втулка крепления ножа ротора

Рисунок 3.2 – Кинематическая схема ротора

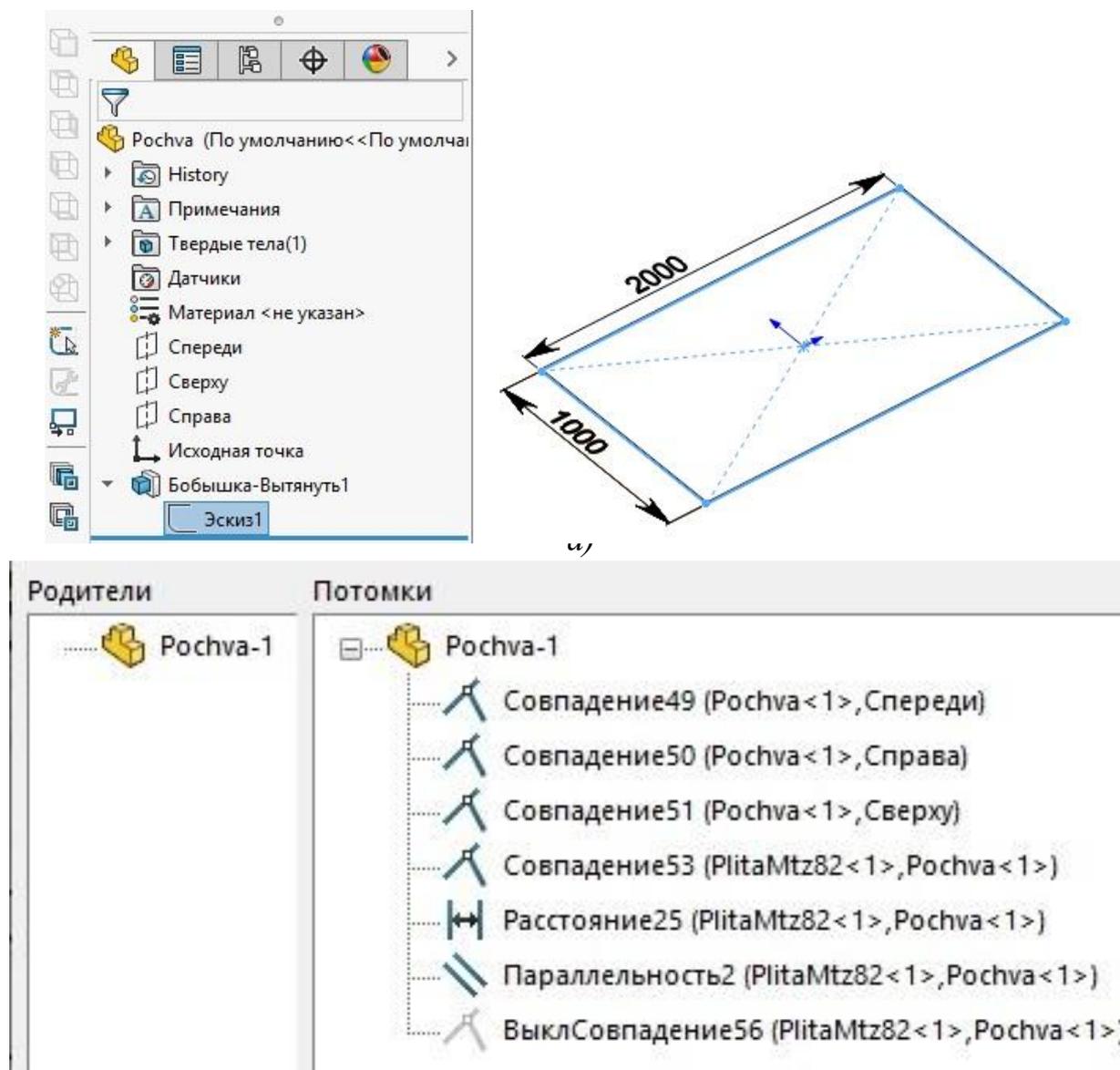
Кусторез предназначен для срезания древесно-кустарниковой растительности диаметром до 2 см. Линейная скорость на лезвиях 20 м/с. Срезанный кустарник не подвергается измельчению, а оставляется на поверхности земли.

3.2 Проектирование в САПР цифровой трехмерной модели кустореза

Проектирование деталей рамы в Solidworks

Для того чтобы движение машины было сориентировано относительно почвы, необходимо задать саму почву (рисунок 3.3). Представим её в виде пластины размерами 2000x1000x10 мм. Для того чтобы почва была неподвижна, добавим сопряжения с тремя плоскостями, проходящими через начало координат (спереди, справа, сверху). Переднюю плоскость плиты навески расположим параллельно плоскости ZOХ почвы. Высоту навески над почвой зададим с помо-

щью сопряжения Расстояние25. Для установления плиты в начальное положение относительно почвы (к её левой границе) добавим сопряжение боковой грани плиты и почвы.

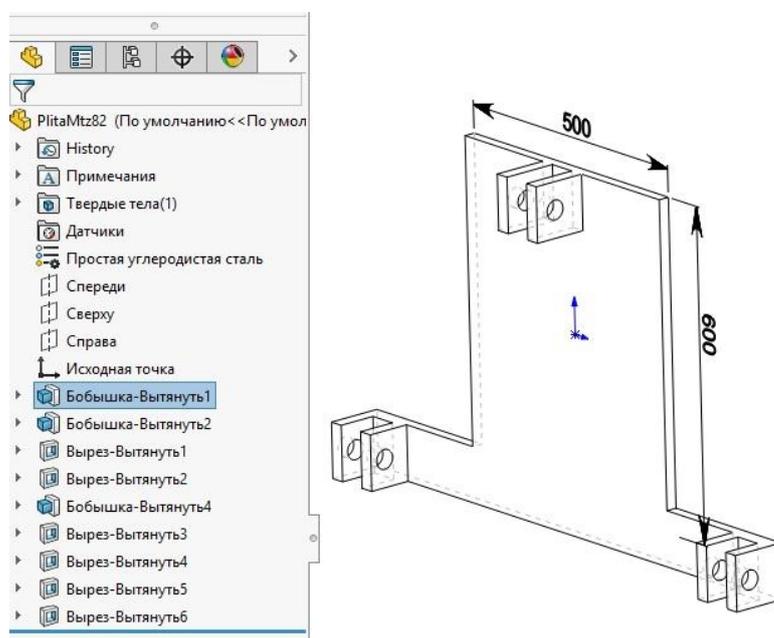


a – 3D модель почвы; *б* – сопряжения почвы

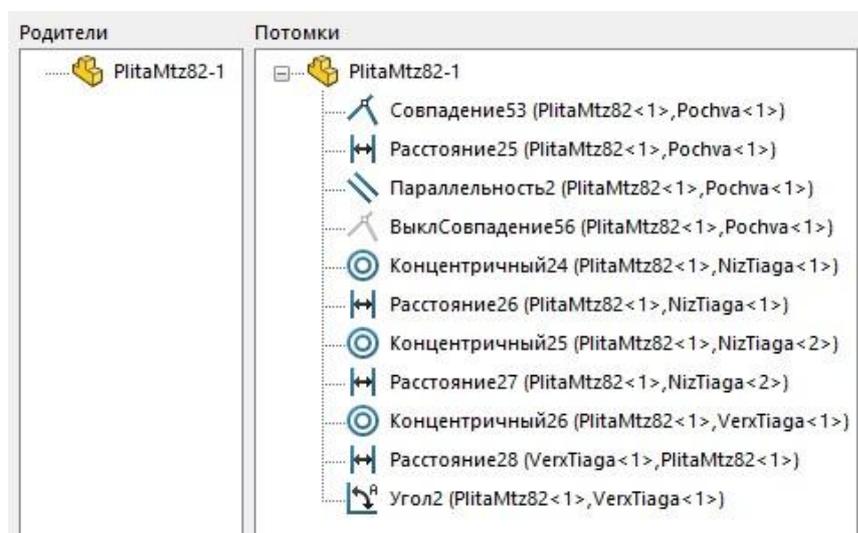
Рисунок 3.3 – 3D модель почвы и её сопряжения

Для задания начального положения включаем сопряжение, сборка перемещается в нулевое положение, далее выключаем сопряжение, чтобы при воздействии двигателя оно не препятствовало работе машины.

Навесное оборудование устанавливается на навеске трактора, создадим 3D модель плиты навески (рисунок 3.4).



а)



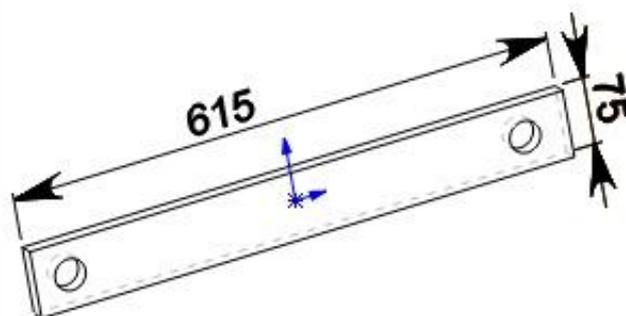
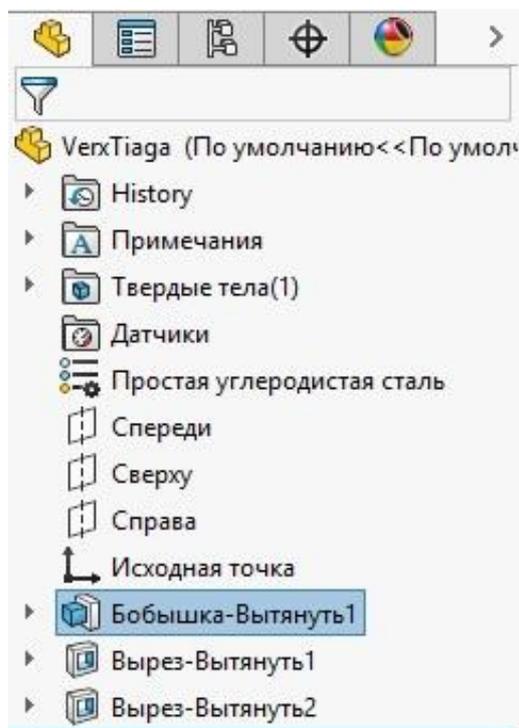
б)

а – 3D модель плиты навески; б – сопряжения плиты навески

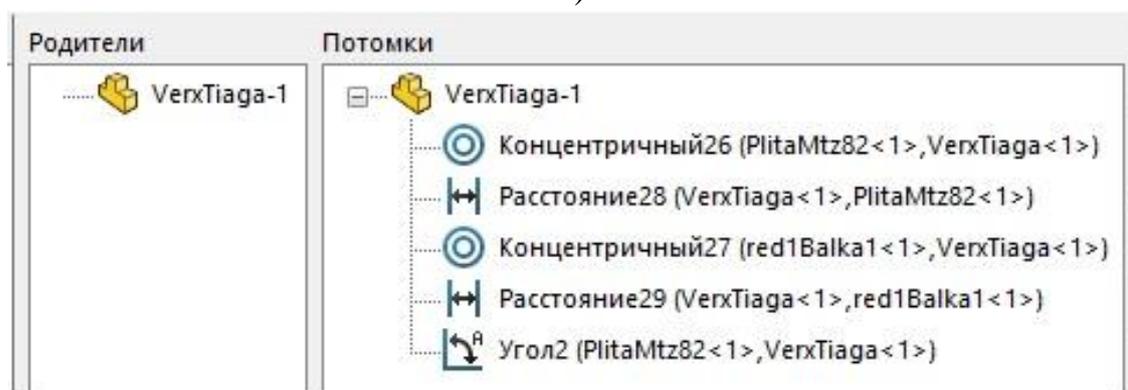
Рисунок 3.4 – 3D модель плиты навески и её сопряжения

Первые четыре сопряжения: совпадение53, расстояние25, параллельность2 и совпадение56 на плите относятся к почве и уже были описаны (далее по тексту сопряжения указываются полностью для детали, но описываются только один

раз при первом упоминании). Три сопряжения concentricity 24, 25, 26 соединяют плиту и тяги, три сопряжения расстояние 26, 27, 28 выставляют тяги по середине проушин, угол2 регулирует наклон навески относительно почвы.



а)



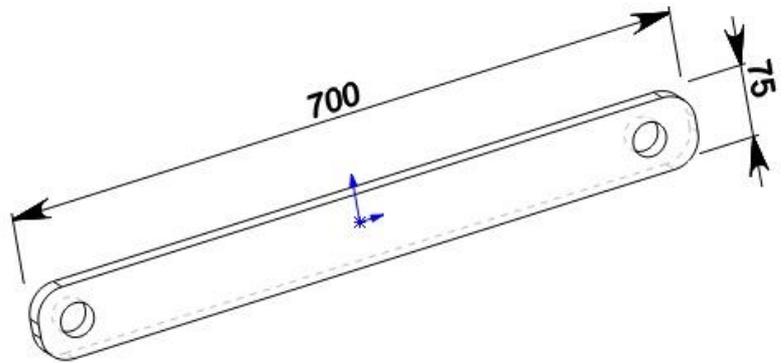
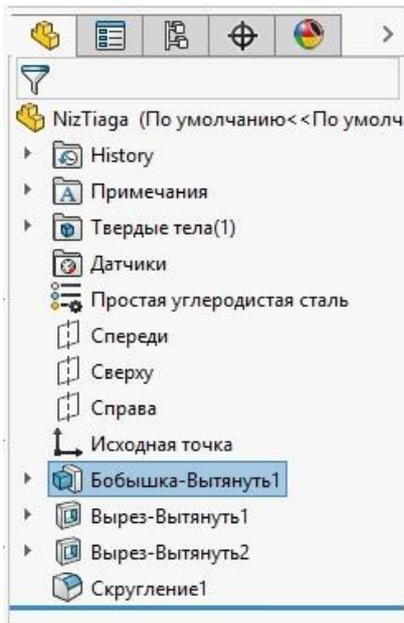
б)

а – 3D модель верхней тяги; б – сопряжения верхней

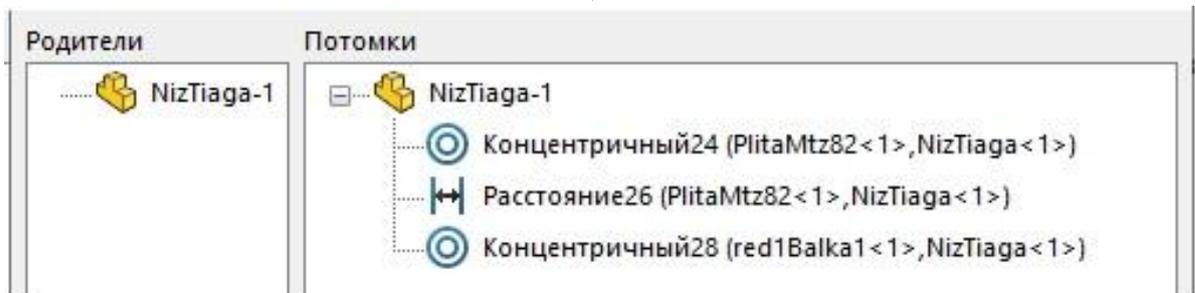
Рисунок 3.5 – 3D модель верхней тяги и её сопряжения

На плите шарнирно установим одну верхнюю (рисунок 3.5) и две нижних (рисунок 3.6) тяги.

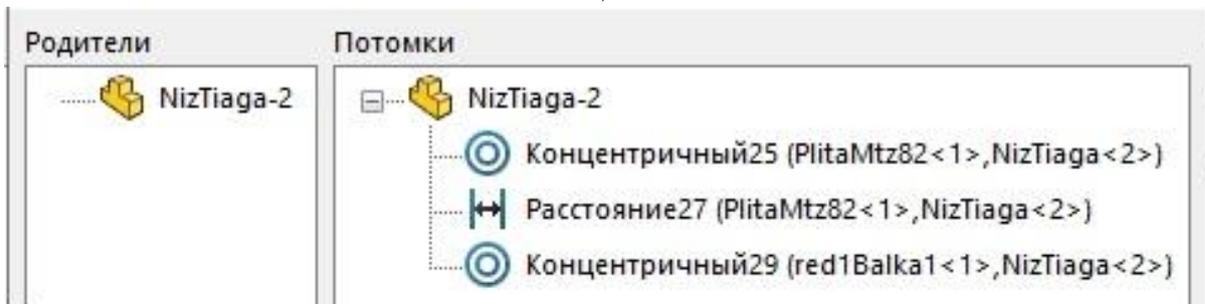
Сопряжение concentricity27 служит для соединения верхней тяги с балкой1, расстояние29 выставляет тягу по середине проушины балки 1.



а)



б)



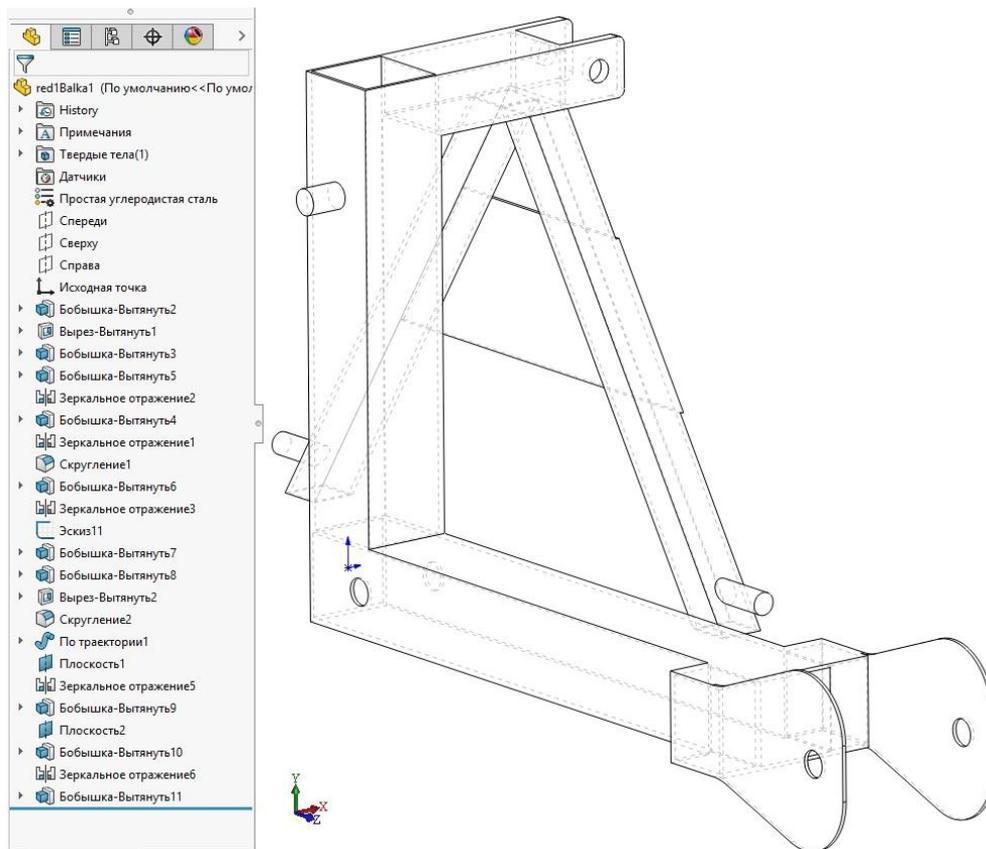
в)

а – 3D модель нижней тяги; б – сопряжения нижней левой тяги;

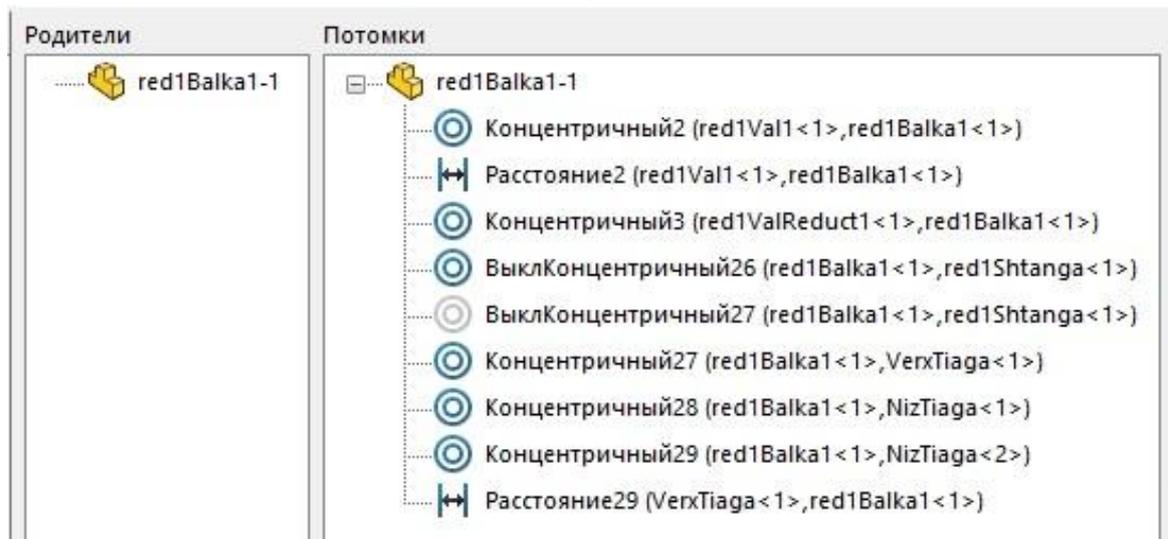
в – сопряжения нижней правой тяги

Рисунок 3.6 – 3D модель нижней тяги и её сопряжения

Две нижние тяги являются одинаковыми. Обе соединяют через концентрическое сопряжение плиту навески с балкой1, а расстояния 27, 28 выставляют тяги посередине проушин.



а)



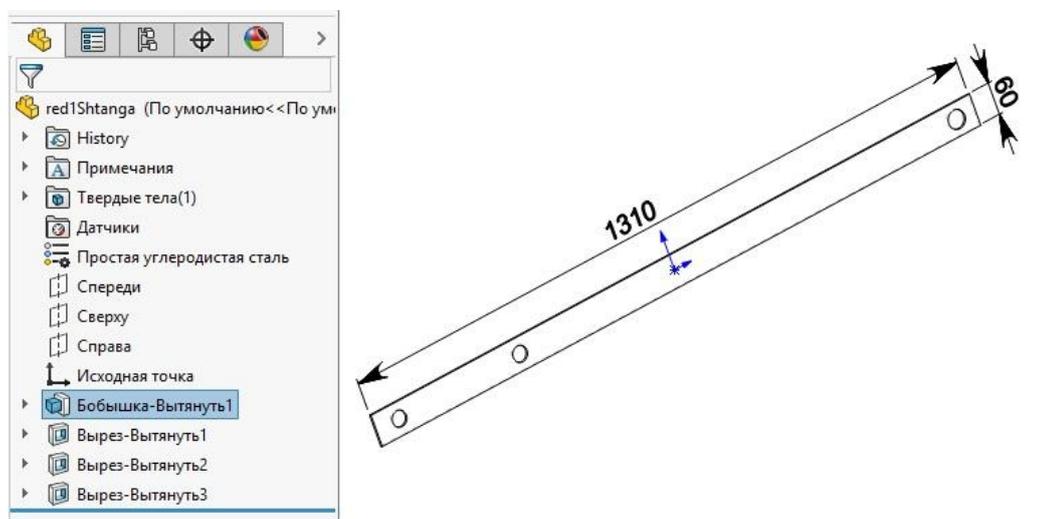
б)

а – 3D модель балки1; б – сопряжения балки1

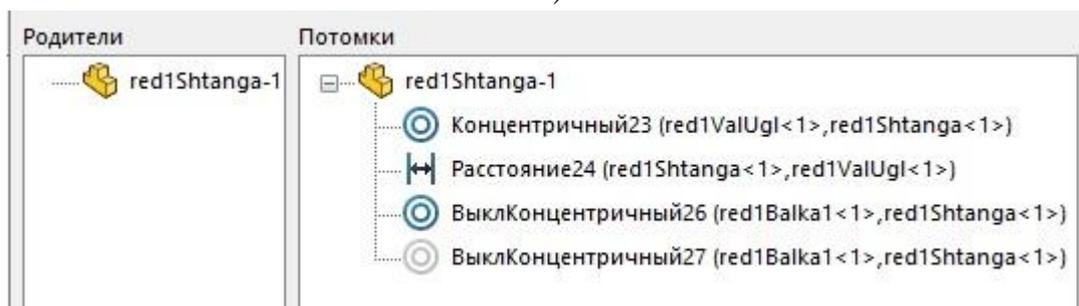
Рисунок 3.7 – 3D модель балки1 и её сопряжения

Балка1 представляет собой сварную конструкцию из пластин, балок проушин и пальцев (рисунок 3.7). Она выполнена одной деталью, чтобы не создавать лишних соединений при последующем импорте в систему MATLAB.

Сопряжение концентричность2 выставляет ведущий вал шкива относительно его посадочного отверстия в балке1, расстояние2 определяет величину между ближайшей гранью балки и внешней гранью вала, на котором установлен ведущий шкив. Сопряжение концентричность3 выставляет относительно посадочного отверстия ведомый вал ременной передачи, который также является ведущим валом конического редуктора. Расстояние29 выставляет верхнюю тягу по центру проушины. Для изменения угла наклона балки рабочего органа используются два отверстия на регулировочной штанге, которые задействуются путем включения соответствующего концентрического сопряжения26 или 27.



а)



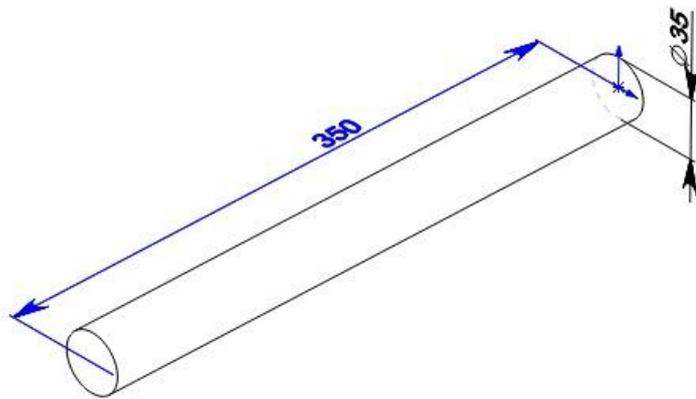
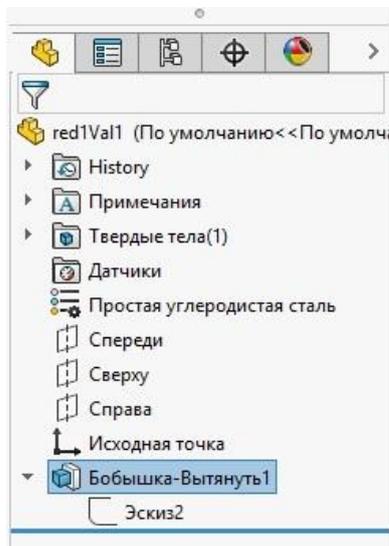
б)

а – 3D модель штанги; б – сопряжения штанги

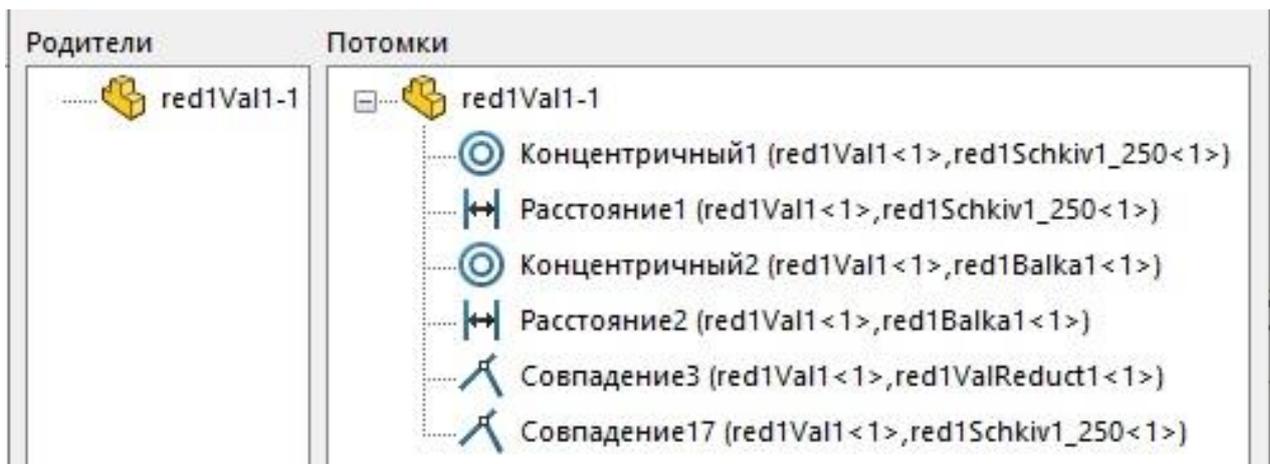
Рисунок 3.8 – 3D модель штанги и её сопряжения:

Штанга, регулирующая угол наклона рабочего органа, расположена на расстоянии24 от грани оси, ближайшей к шкиву, и сопряжена концентрично23 с ней (рисунок 3.8).

От вала отбора мощности трактора вращение через муфту передается на ведущий вал шкива (рисунок 3.9).



а)

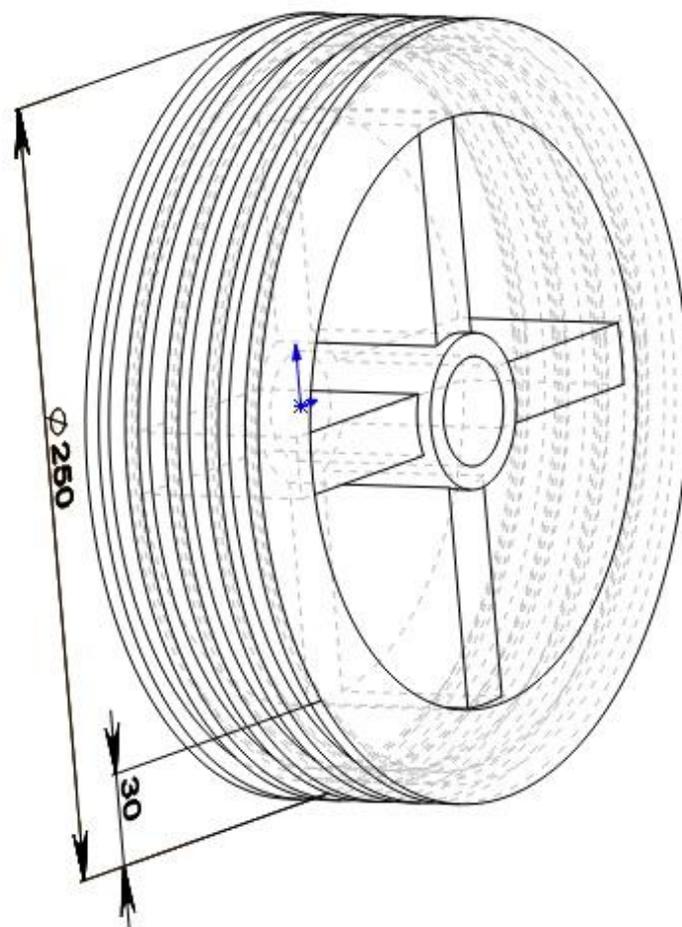
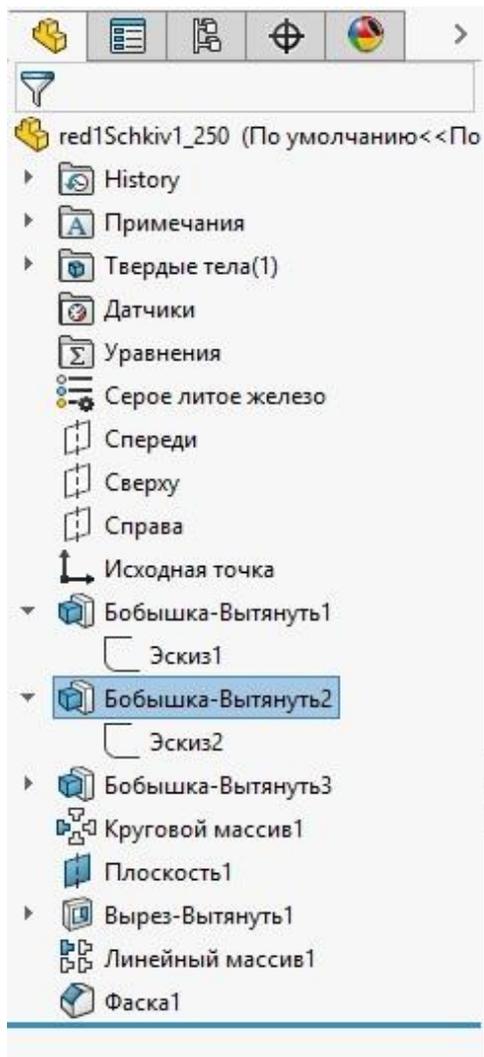


б)

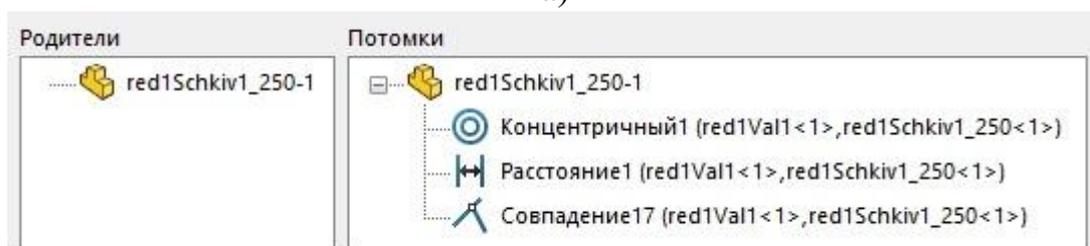
а – 3D модель ведущего вала шкива; б – сопряжения ведущего вала

Рисунок 3.9 – 3D модель ведущего вала шкива и его сопряжения

Сопряжение концентричность1 выставляет шкив относительно ведущего вала. Расстояние1 определяет величину от внешней грани шкива и внешней грани вала. Совпадение17 плоскостей симметрии вала и шкива исключает их вращение относительно друг друга. Совпадение3 устанавливает одинаковый вылет ведущего и ведомого вала для исключения перекоса ремней на шкивах (рисунок 3.10).



а)

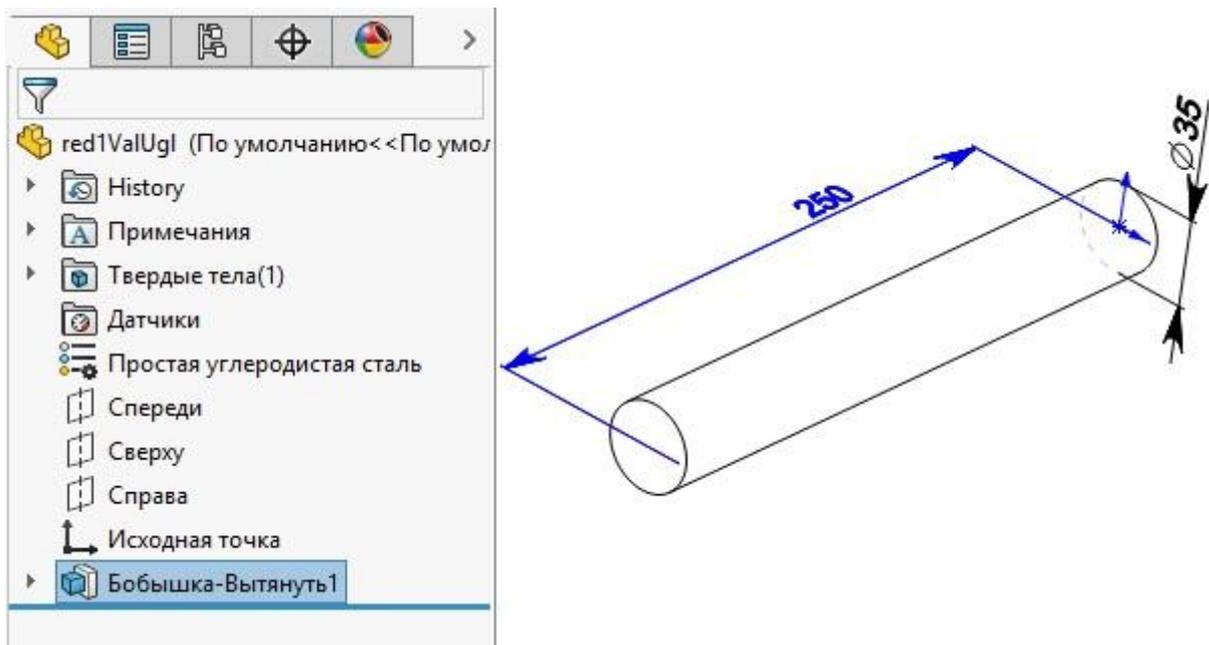


б)

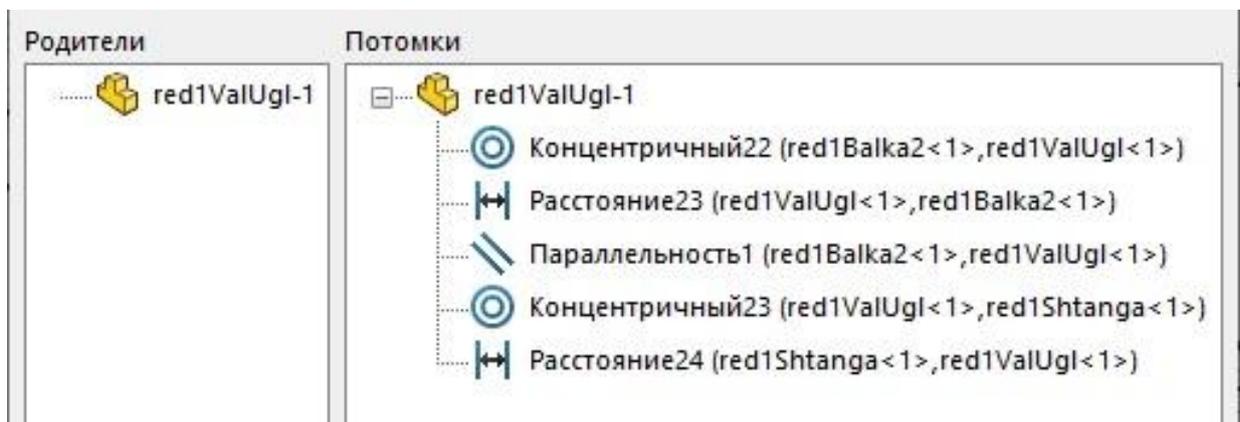
a – 3D модель ведущего шкива; *б* – сопряжения ведущего шкива

Рисунок 3.10 – 3D модель ведущего шкива и его сопряжения

Для поворота балки2 относительно вала конического редуктора используем ось, установленную в верхней части фланца балки2 (рисунок 3.11).



а)

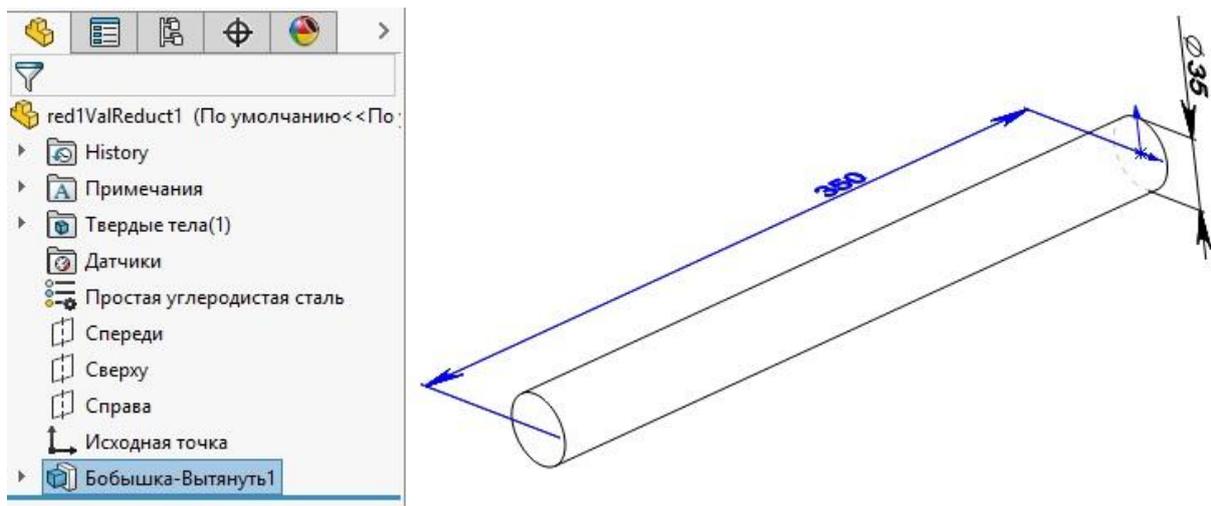


б)

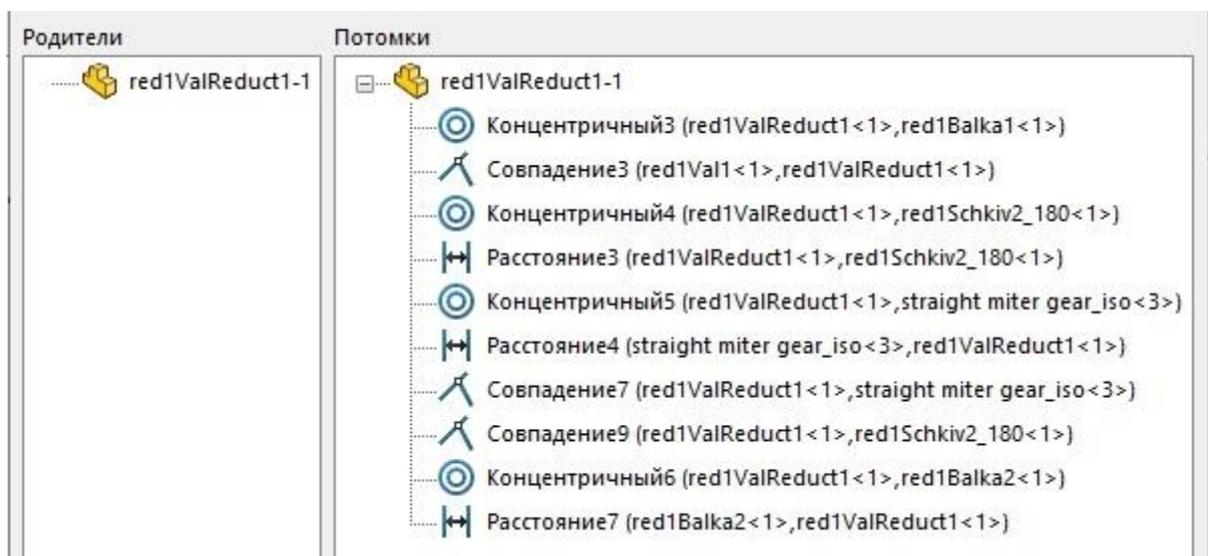
а – 3D модель ведущего шкива, б – сопряжения ведущего шкива

Рисунок 3.11 – 3D модель оси штанги и её сопряжения

Сопряжение концентричность 22, 23 выставляет ось относительно посадочных отверстий в балке2 и штанге соответственно. Расстояния 23,24 определяют величину между гранями балки, штанги и оси. Сопряжение параллельность1 для плоскости, проходящей через ось симметрии, и оси штанги и балки2 связывает вращение оси с движением балки.



а)



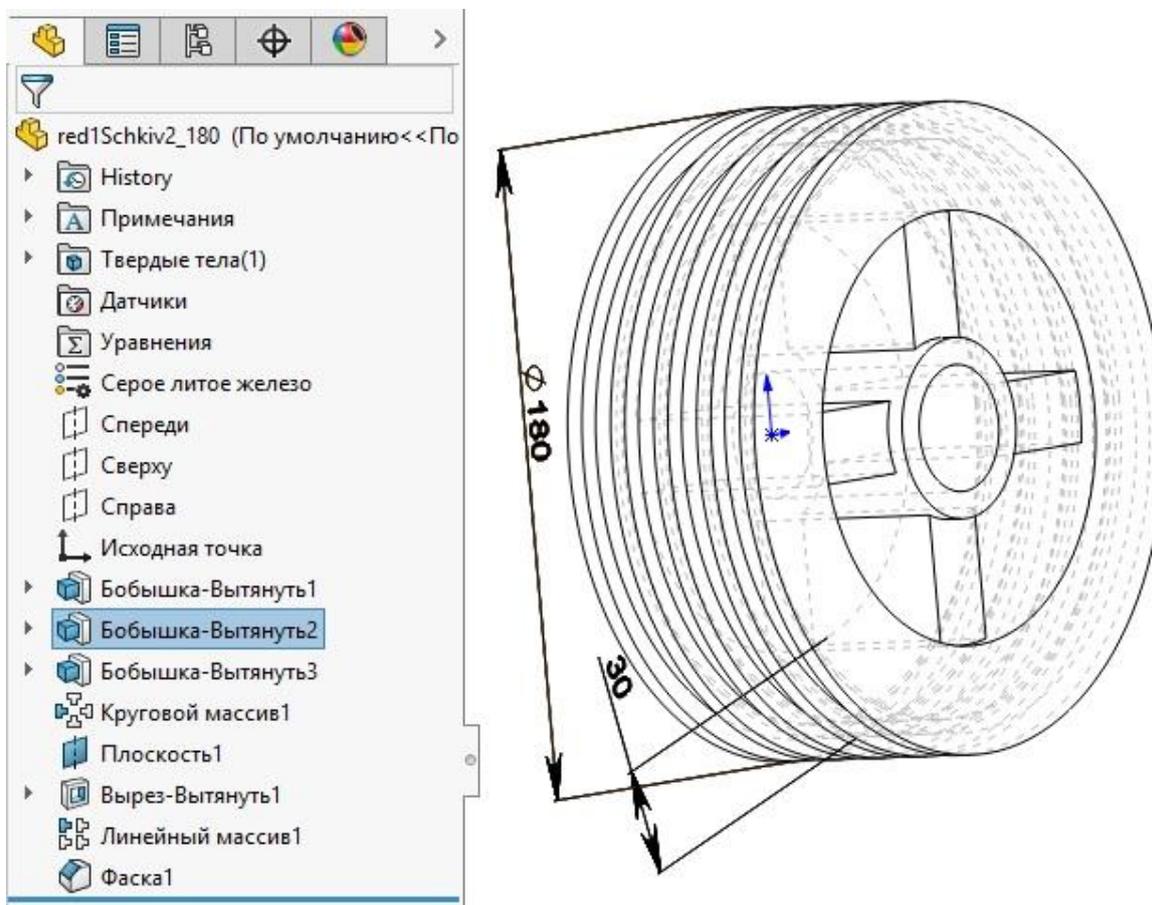
б)

а – 3D модель ведомого вала; б – сопряжения ведомого вала

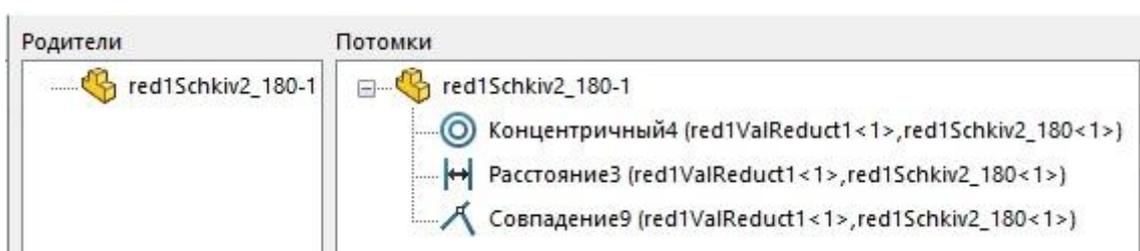
Рисунок 3.12 – 3D модель ведомого вала ременной передачи рамы и его сопряжения

На ведомом валу (рисунок 3.12) ременной передачи рамы установлен шкив2 (рисунок 3.13) и ведущее зубчатое колесо конической передачи. Сопряжения концентричность 4, 5 выставляют ведомый шкив и ведущее зубчатое колесо относительно ведомого вала ременной передачи (ведущего вала конической передачи), а концентричность 6 выставляет ведомый вал относительно посадочного отверстия в балке 2. Расстояние 4 определяет положение ведущего конического колеса на валу относительно его внешней грани, а расстояние 7 – вылет

вала относительно внешней грани балки2. Сопряжения совпадения 7, 9 для плоскостей зубчатого колеса, шкива и вала, на котором они расположены, исключает их вращение относительно друг друга.



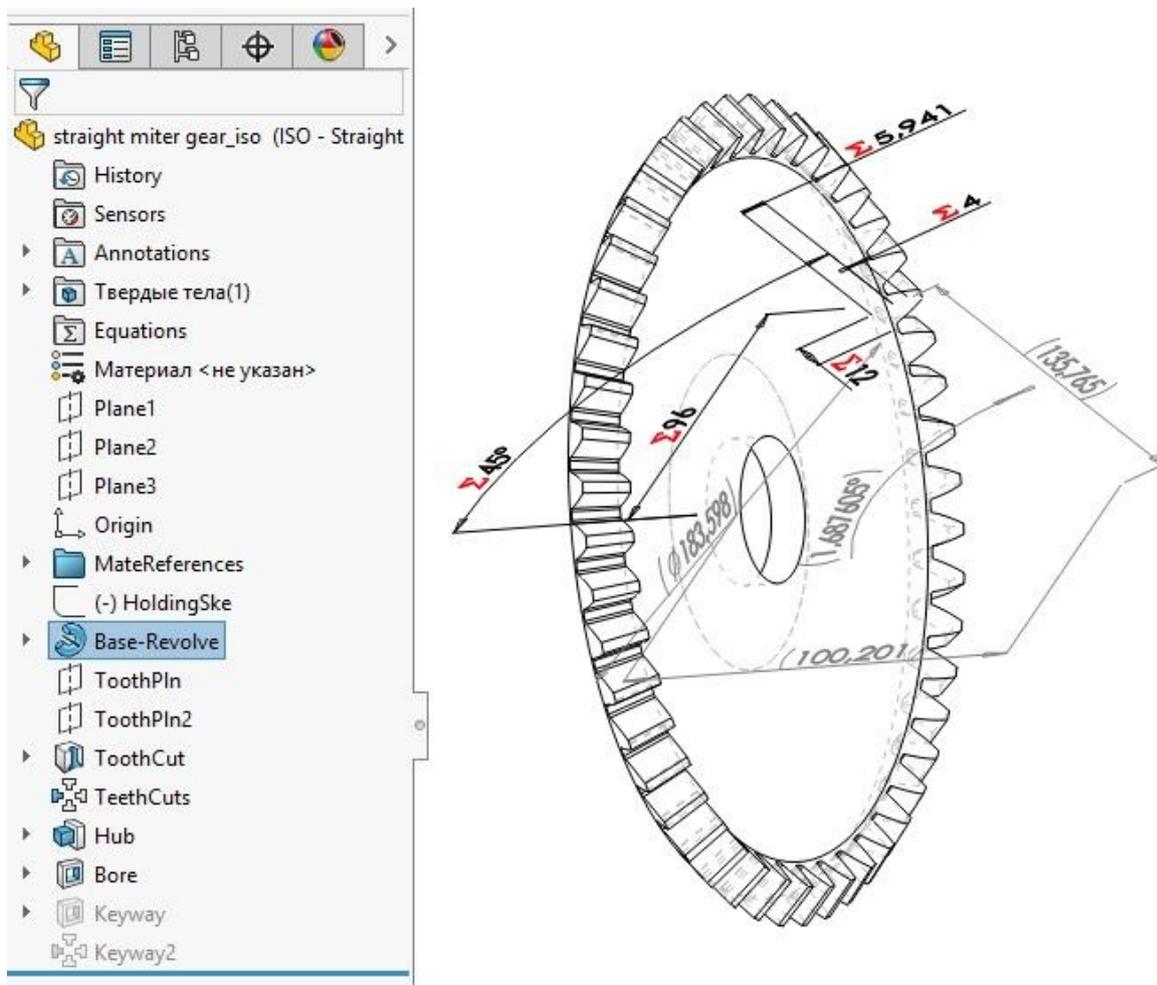
а)



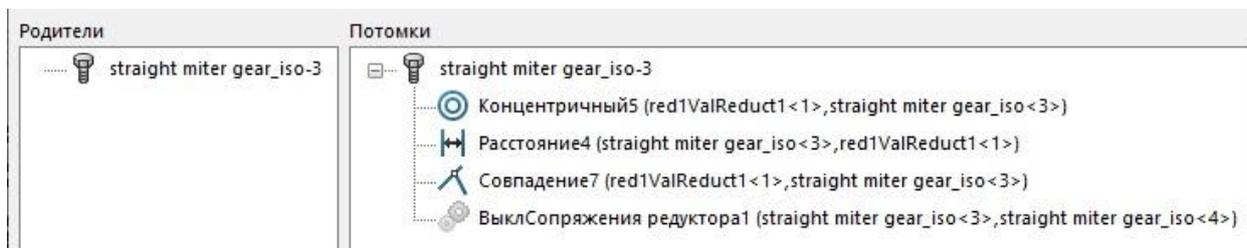
б)

а – 3D модель шкивов 1, 2, 3, 4; б – сопряжения ведомого шкива

Рисунок 3.13 – 3D модель шкивов 1, 2, 3, 4 ременной передачи



а)

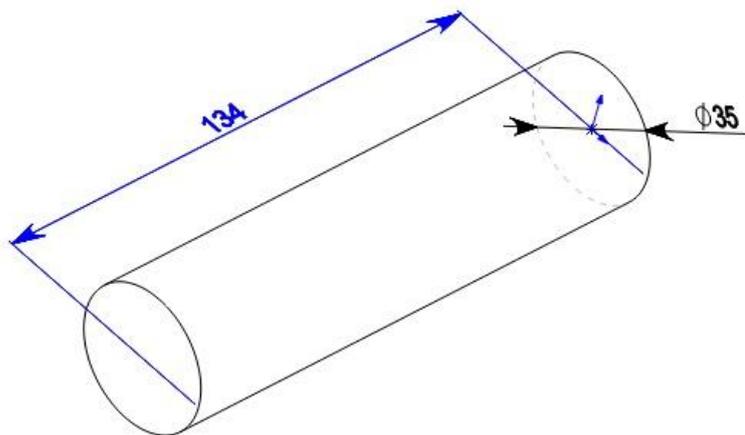
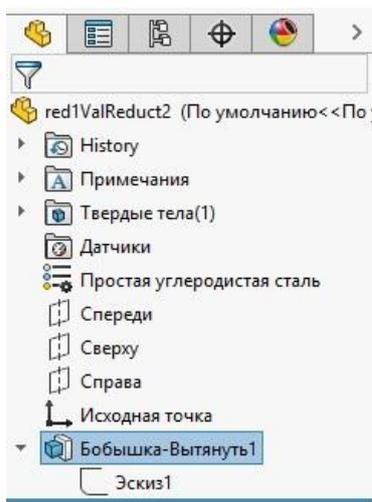


б)

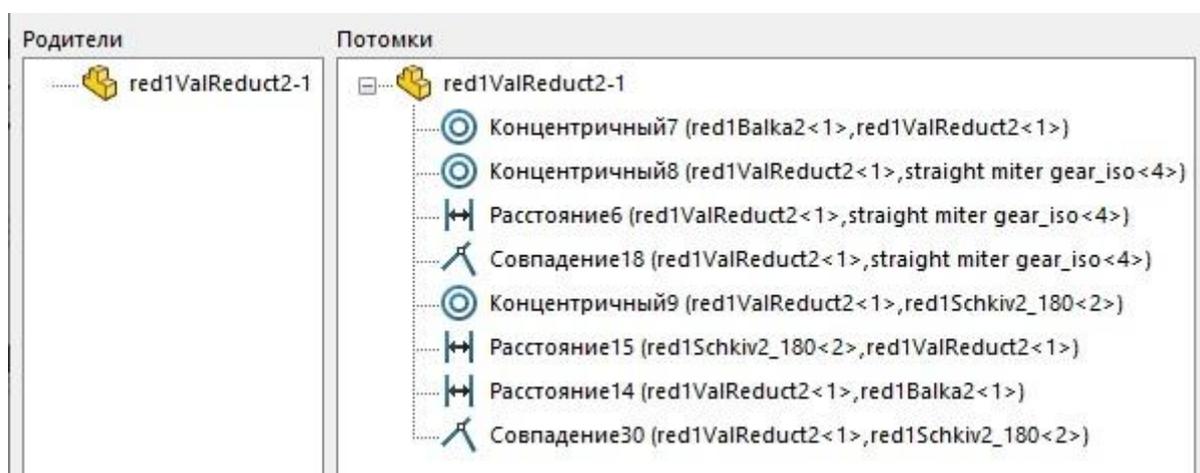
а – 3D модель ведущего колеса; б – сопряжения ведущего колеса

Рисунок 3.14 – 3D модель ведущего колеса конической передачи и его сопряжения

Для имитационного моделирования в среде Solidworks Motion между ведущим и ведомым коническим зубатым колесом добавлено сопряжение редуктора с передаточным отношением $u=2$. Для корректного переноса модели в систему MATLAB Simulink предусмотрено его выключение.



а)



б)

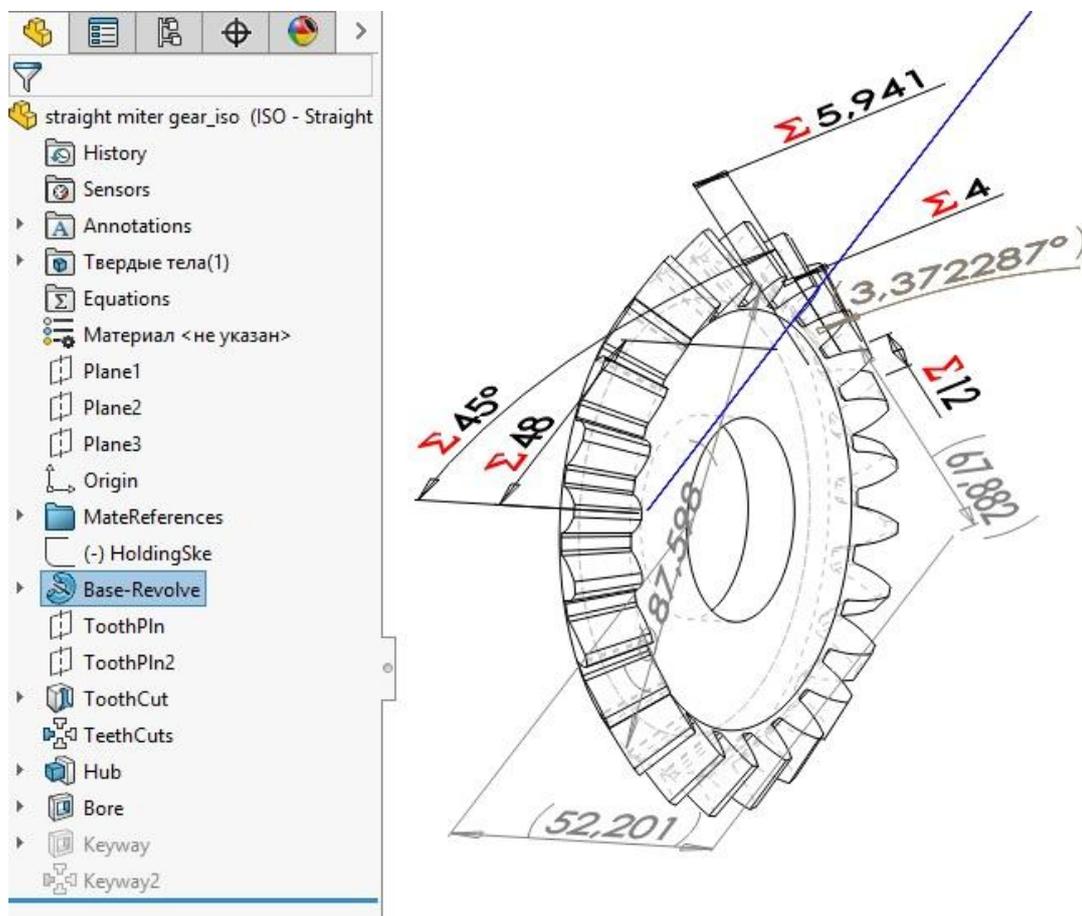
а – 3D модель ведомого вала; б – сопряжения ведомого вала

Рисунок 3.15 – 3D модель ведомого вала конической передачи

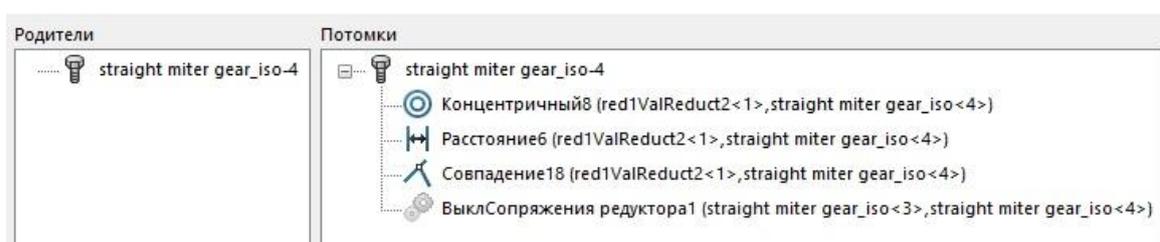
и его сопряжения

На ведомом валу (рисунок 3.15) конической передачи расположено ведомое зубчатое колесо (рисунок 3.16) и ведущий шкив2 (рисунок 3.17) ременной передачи рабочего органа. Сопряжения концентричность 7,8,9 выставляют ведомый вал конической передачи относительно посадочного отверстия в балке2, а также относительно зубчатого колеса и ведущего шкива2 ременной передачи рабочего органа соответственно. Сопряжения совпадения 18,30 для плоскостей зубчатого колеса, шкива и вала, на котором они расположены, исключает их вращение относительно друг друга. Сопряжение расстояние14 определяет вылет

ведомого вала конической передачи за границы балки, расстояние 15 определяет зазор между гранями шкива 2 и балки 2 , а расстояние 6 – зазор между гранью зубчатого ведомого колеса и ведомого вала.



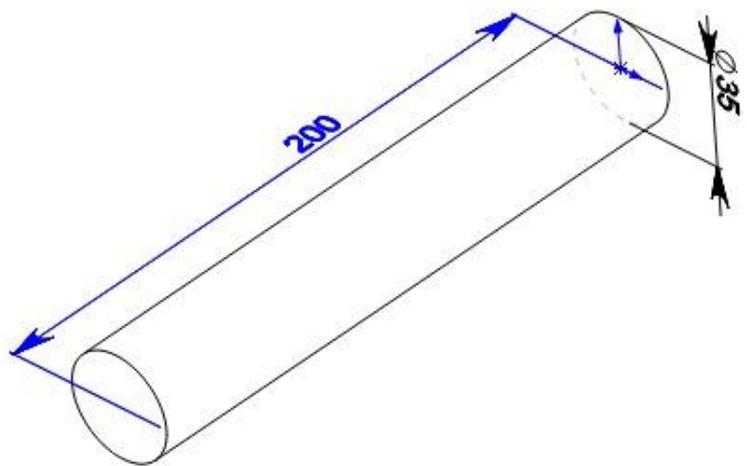
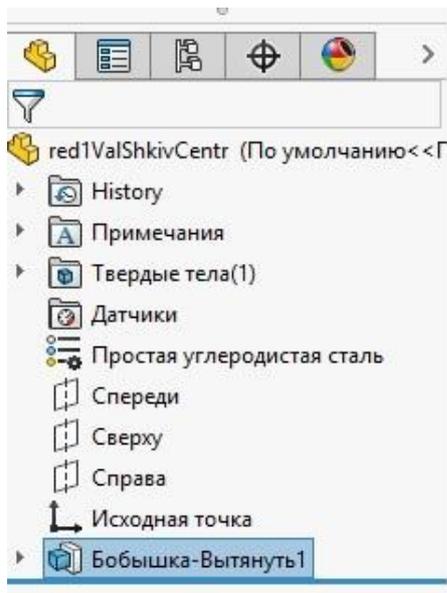
а)



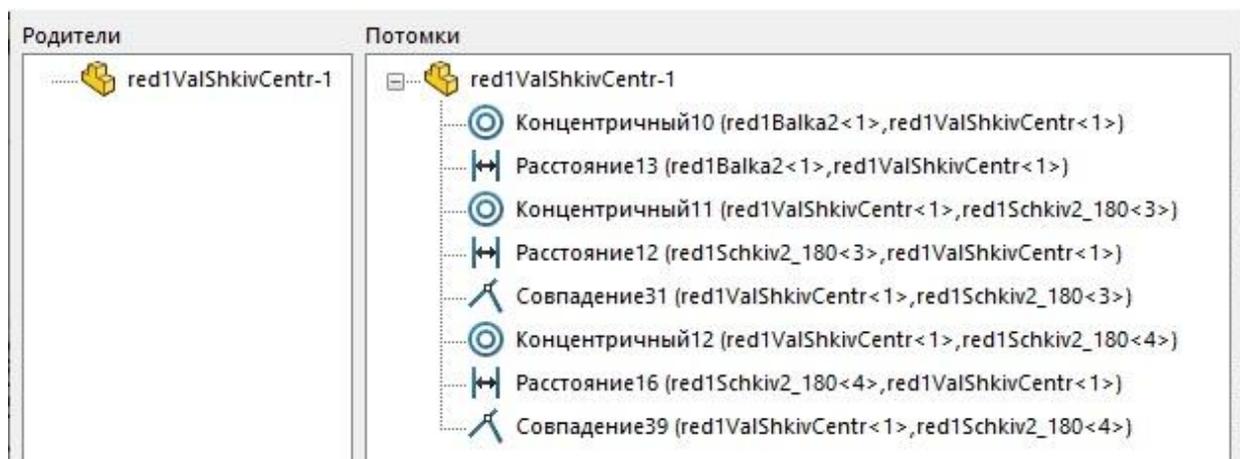
б)

a – 3D модель ведомого зубчатого колеса; b – сопряжения ведомого зубчатого колеса

Рисунок 3.16 – 3D модель ведомого зубчатого колеса конической передачи и его сопряжения:



а)



б)

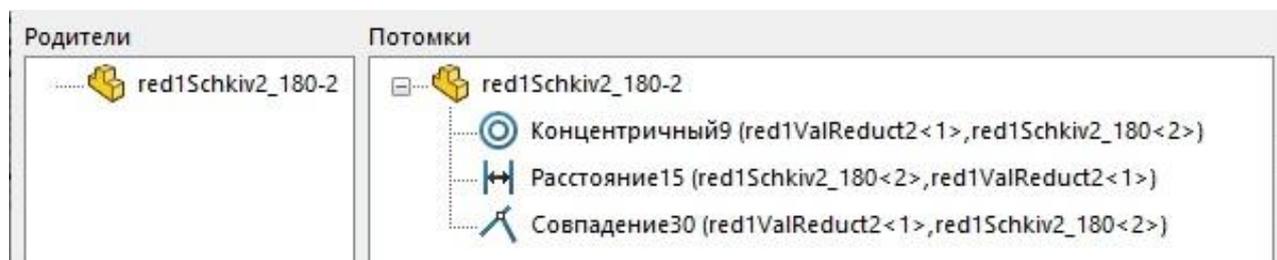
а – 3D модель центрального вала; б – сопряжения центрального вала

Рисунок 3.17 – 3D модель центрального вала ременной передачи
рабочего органа и его сопряжения

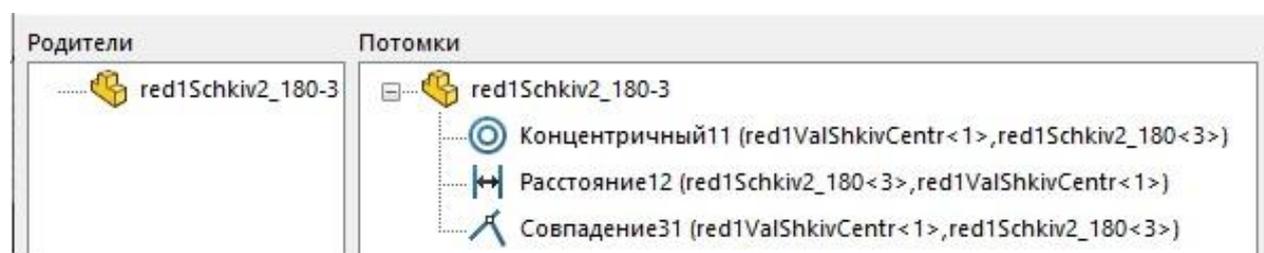
На центральном валу рабочего органа (рисунок 3.17) расположен шкив3, который приводит во вращение этот вал, и шкив4, который передает вращение на левый и правый валы. Сопряжения концентричность 10, 11, 12 выставляют центральный вал относительно двух шкивов и посадочного отверстия в балке2. Расстояния 13, 12, 16 определяют соответственно вылет вала за грань балки2, зазор между нижним шкивом3 и балкой 2 и расстояние от внешней грани вала до грани верхнего шкива4. Сопряжения совпадения 31, 39 для плоскостей шкивов и

вала, на котором они расположены, исключает их вращение относительно друг друга.

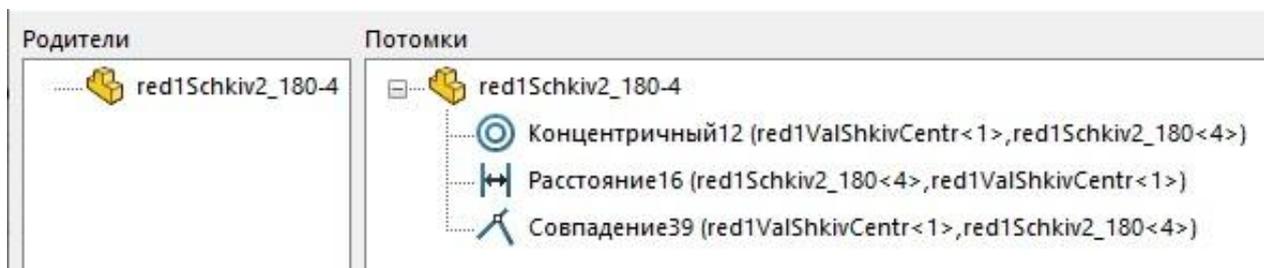
Шкивы 2, 3, 4 являются копиями детали шкив1 (см. рисунок 3.13), поэтому их 3D модель мы повторно не приводим, а указываем только сопряжения с деталями (рисунок 3.18).



а)



б)



в)

а – сопряжения на шкиве 2; б – сопряжения на шкиве 3;

в – сопряжения на шкиве 4

Рисунок 3.18 – Сопряжения на шкивах 2, 3, 4

Общий вид спроектированной 3D модели кустореза показан на рисунке 3.19.

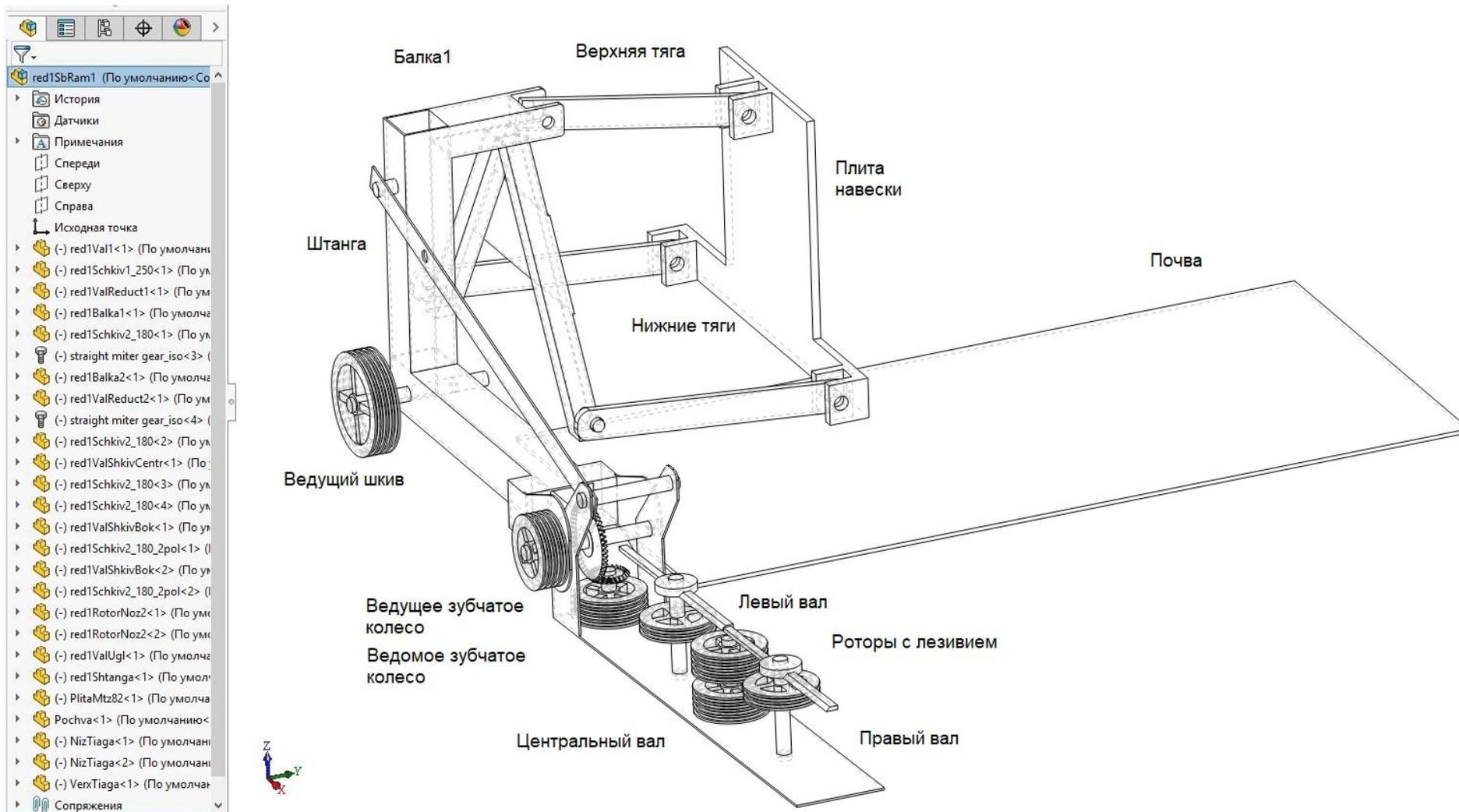
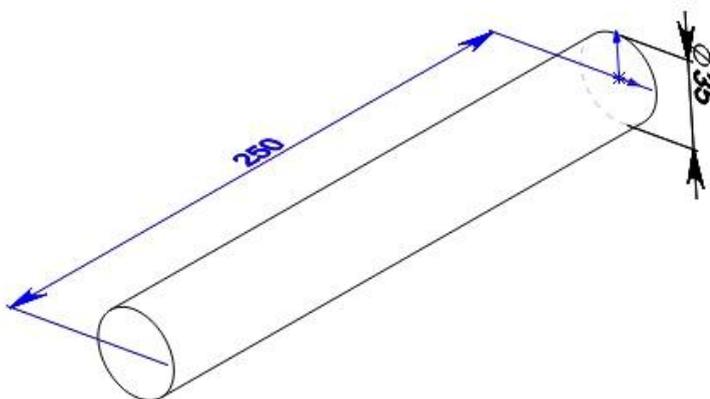
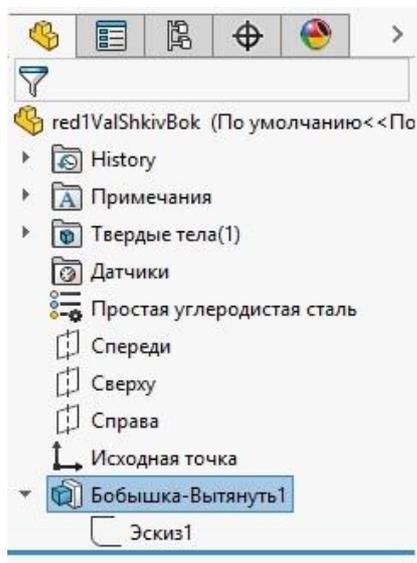


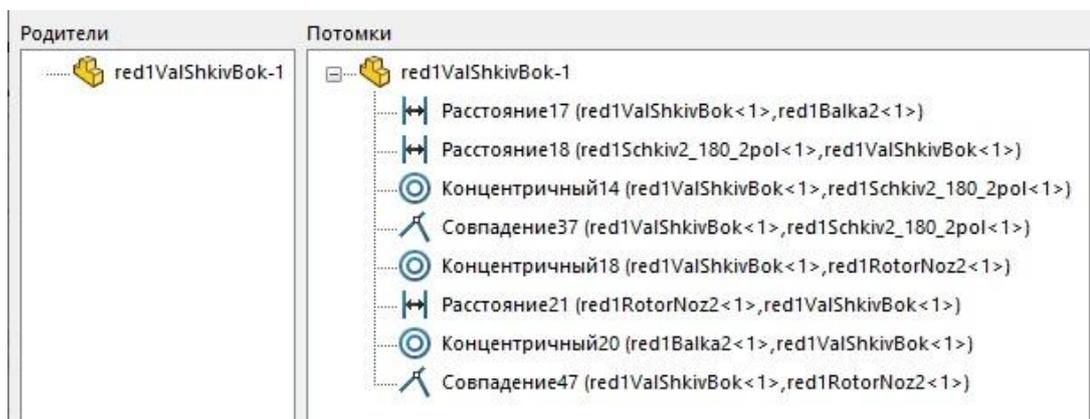
Рисунок 3.19 – Общий вид рамы кустореза и дерево его проектирования

Проектирование деталей ротора в Solidworks

На левом валу (рисунок 3.20) расположен ведомый шкив5 (рисунок 3.21), который приводит его во вращение, и ротор с лезвиями (рисунок 3.22).



а)



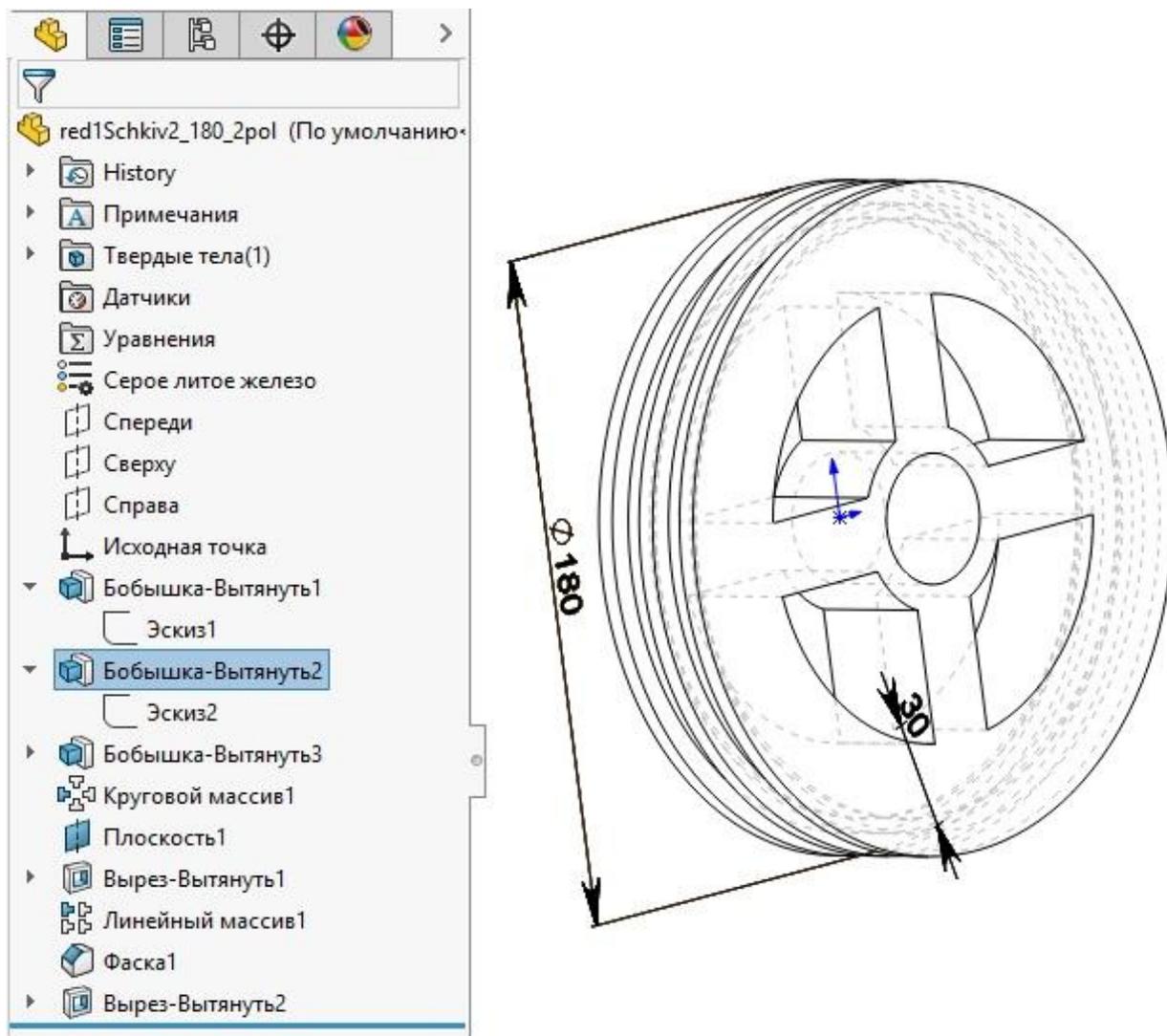
б)

а – 3D модель левого вала; б – сопряжения левого вала

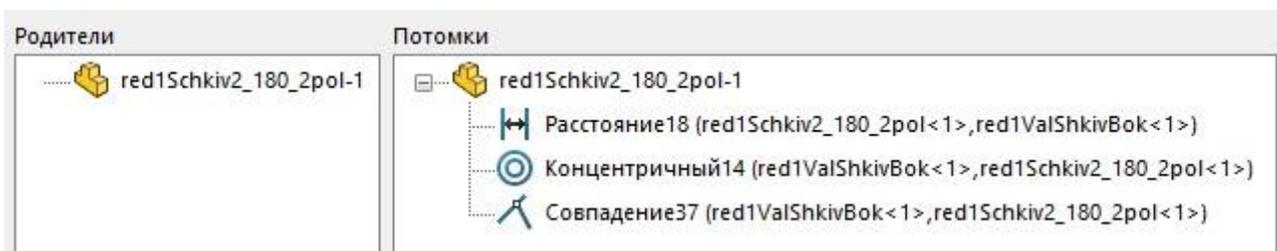
Рисунок 3.20 – 3D модель левого бокового вала ротора и его сопряжения

Сопряжения расстояния 17, 18, 21 определяют соответственно вылет вала за грань балки 2, расстояние от левого шкива5 до грани вала и расстояние от противоположной грани вала до ротора с лезвием. Сопряжения концентричность 20,18, 14 выставляют левый вал относительно посадочного от-

верстия в балке 2, ротора с лезвием и шкива5 соответственно. Сопряжения совпадения 37, 47 для плоскостей ротора, шкива и левого вала, на котором они расположены, исключает их вращение относительно друг друга.



а)

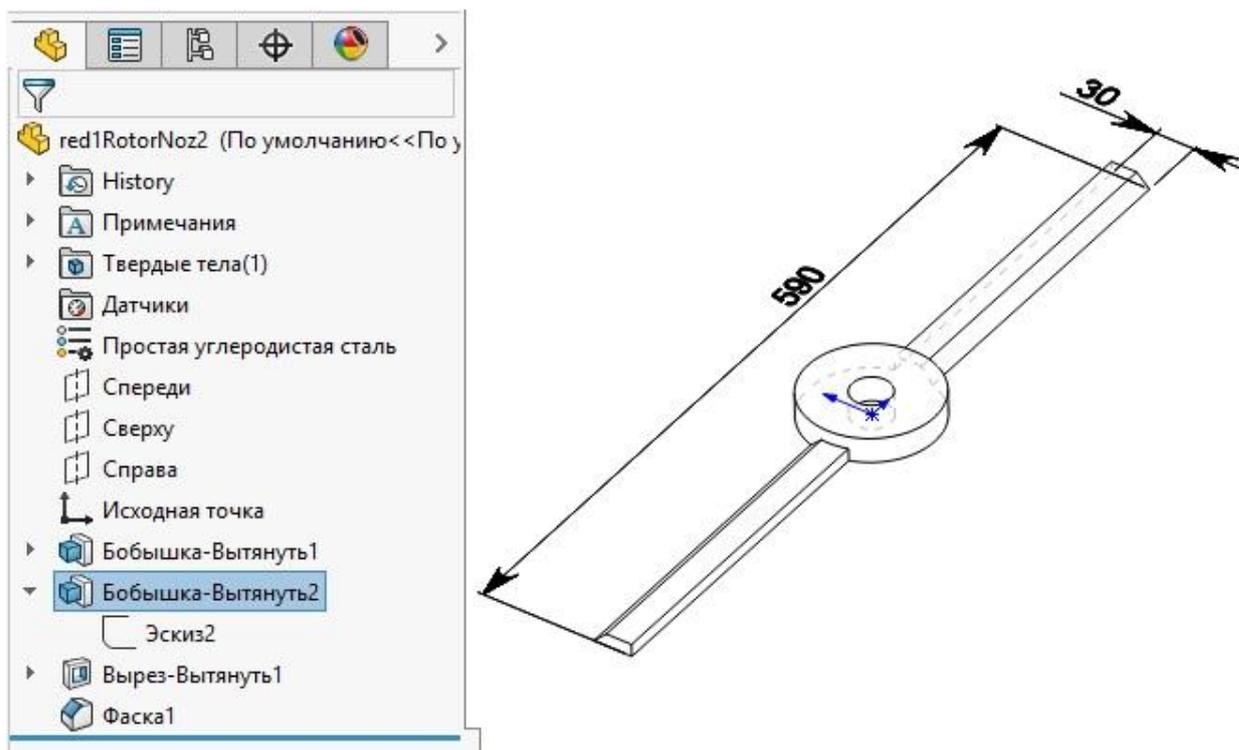


б)

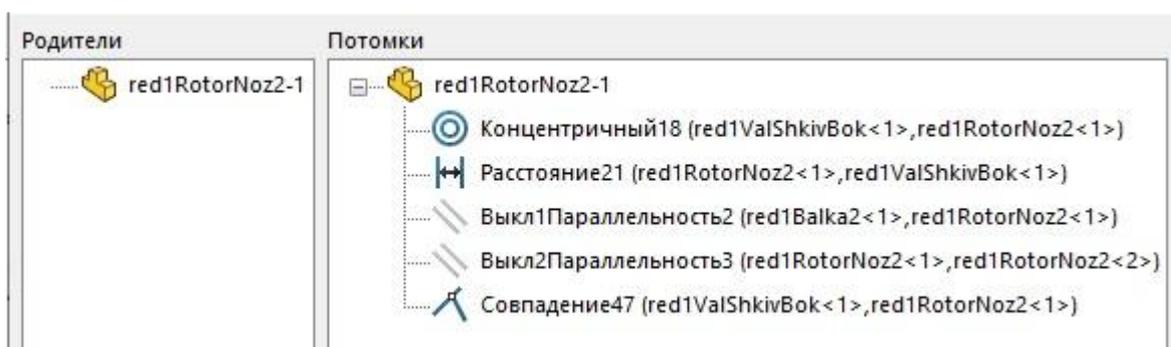
а – 3D модель левого вала; б – сопряжения левого вала

Рисунок 3.21 – 3D модель ведомого шкива5 и его сопряжения

Для расположения лезвий ротора в начальное положение предусмотрены сопряжения параллельности 2,3 первого лезвия относительно балки2 и относительно второго лезвия соответственно. После выставления лезвий в начальном положении сопряжения выключаются, чтобы не препятствовать вращению ротора с лезвиями.



а)



б)

а – 3D модель ротора с лезвиями; б – сопряжения ротора с лезвиями

Рисунок 3.22 – 3D модель ротора с лезвиями

Симметрично относительно центрального вала расположен правый вал с аналогичным шкивомб, ротором с лезвиями и сопряжениями, отличающийся лишь величиной расстояния 20, которое определено так, чтобы ременная передача попадала на верхние пазы центрального шкива (рисунок 3.23)

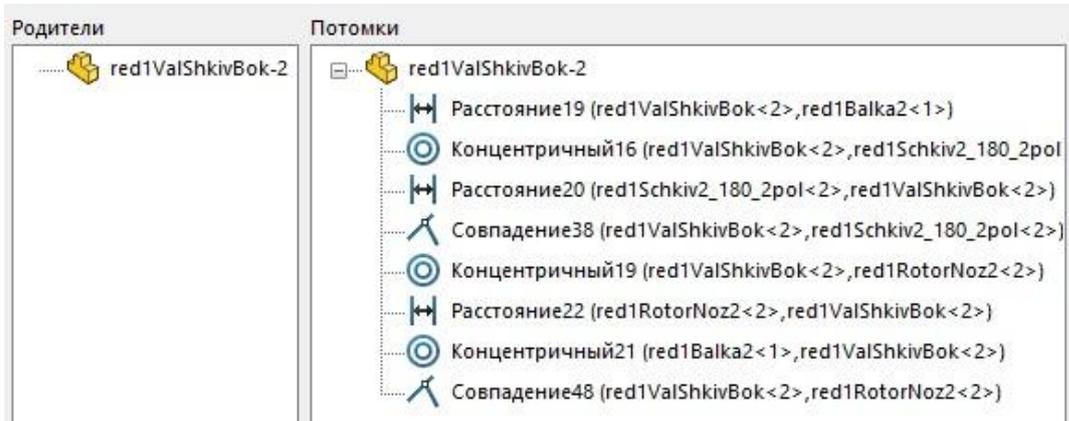


Рисунок 3.23 – Сопряжения правого шкиваб

На валу ротора предусмотрим установку разных типов рабочих органов. Для этого спроектируем модель ротора с шарнирно-сочленёнными лезвиями (рисунок 3.24).

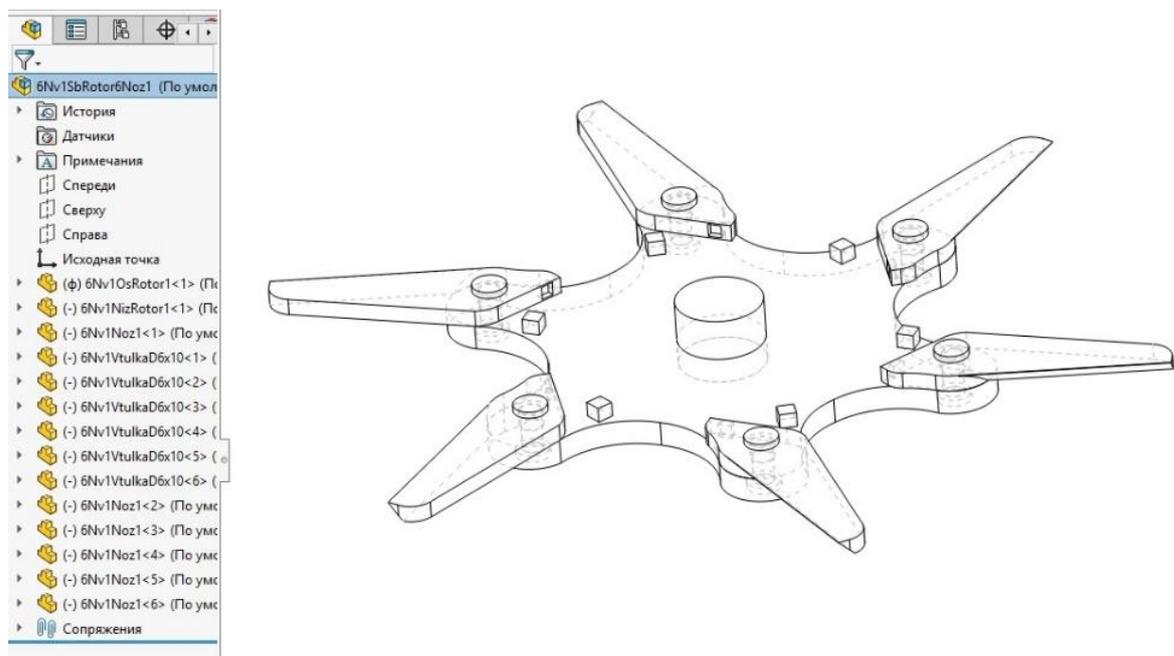
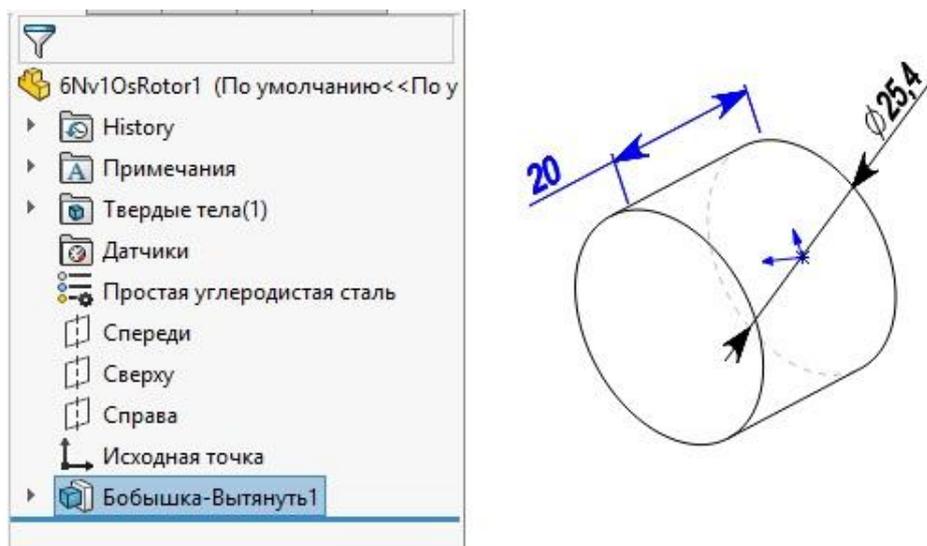
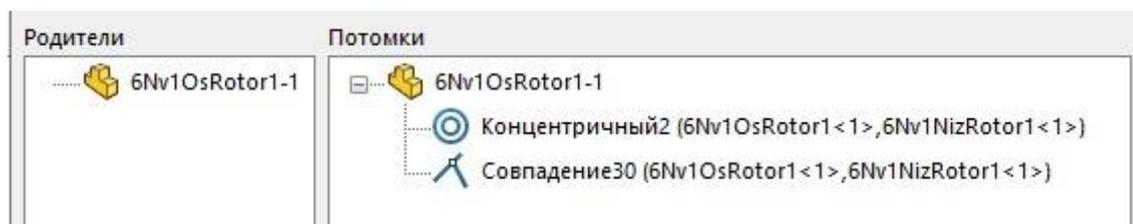


Рисунок 3.24 – Общий вид ротора с шарнирно-сочлененными лезвиями

Ось ротора неподвижно закреплена относительно начальной системы координат с возможностью перенесения этой системы координат на левый и правый валы. Сопряжение концентричность 2 располагает ось относительно посадочного отверстия ротора, а сопряжение совпадение 30 выставляет грани оси и ротора на один уровень (рисунок 3.25).



а)



б)

а – 3D модель оси ротора; б – сопряжения оси ротора

Рисунок 3.25 – 3D модель оси ротора и её сопряжения

Ротор (рисунок 3.26) имеет посадочное отверстие под центральную ось и шесть посадочных отверстий под оси втулок лезвий, а также шесть технологических бобышек для крепления виртуальных пружин и демпферов.

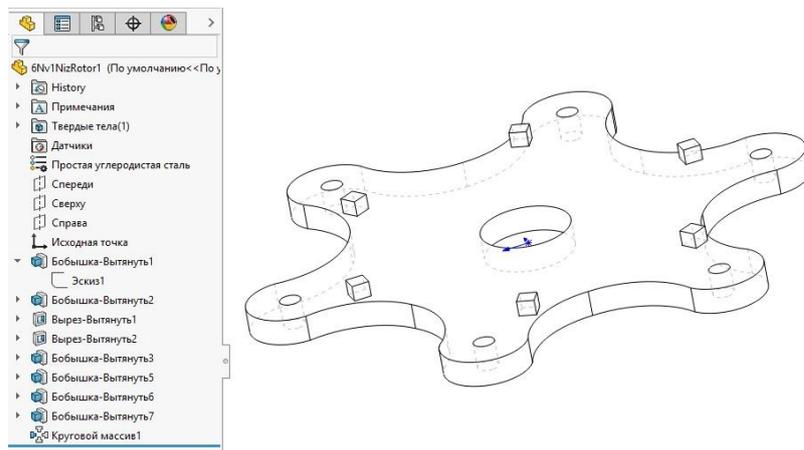
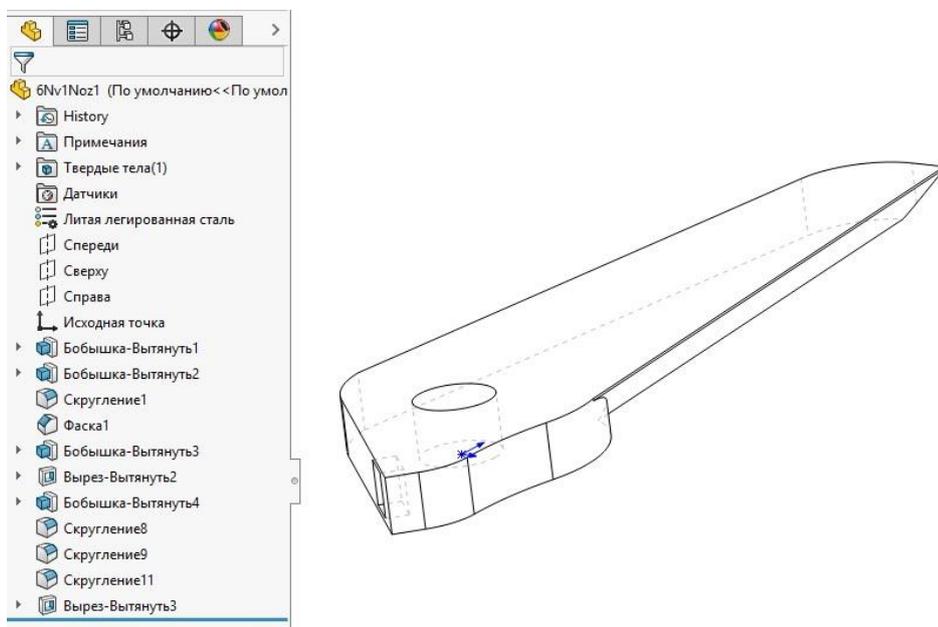
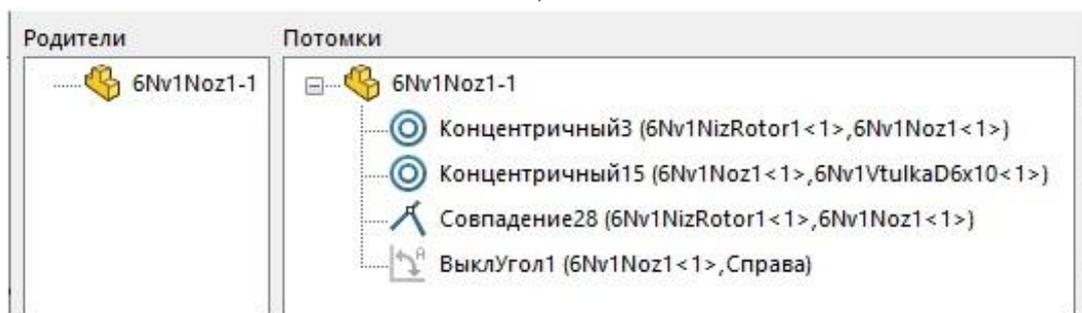


Рисунок 3.26 – 3D модель ротора с шестью посадочными отверстиями под лезвия



а)



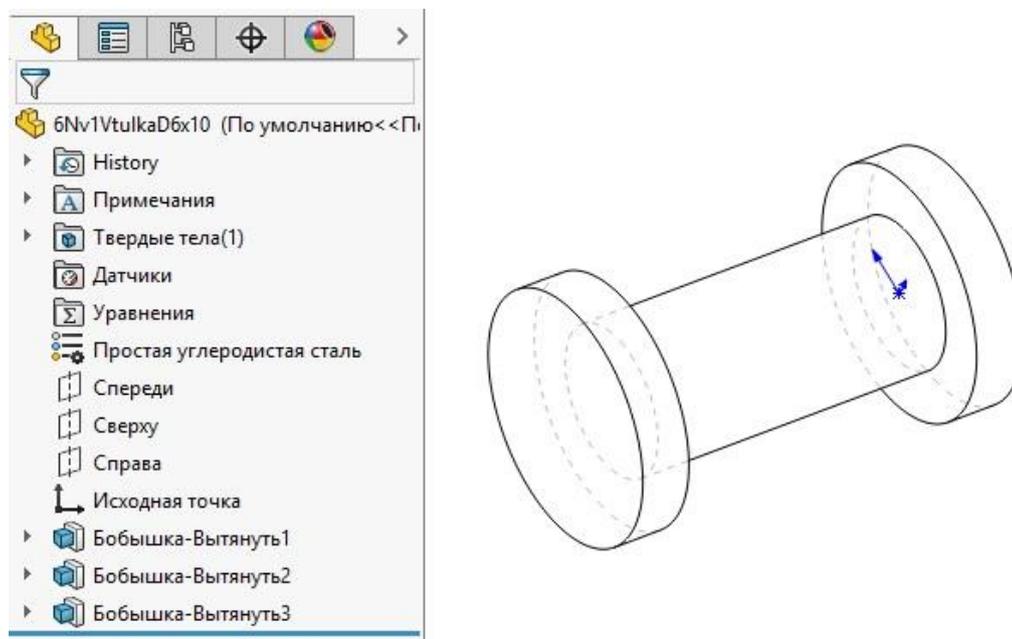
б)

а – 3D модель лезвия; б – сопряжения лезвия

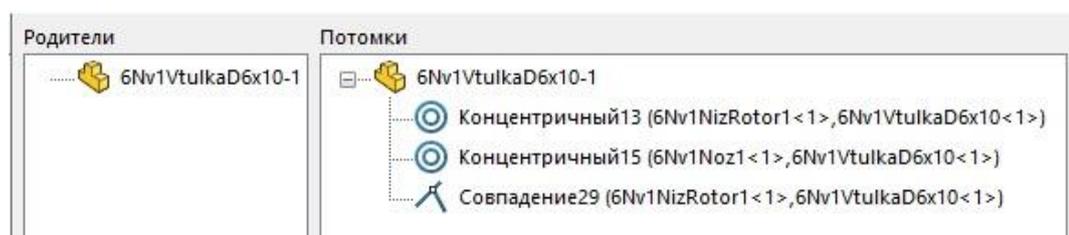
Рисунок 3.27 – 3D модель лезвия и его сопряжения

Лезвие с помощью сопряжений концентричность 3, 15 выставляется относительно отверстия в роторе и втулки, удерживающей его, а с помощью

сопряжения совпадение 28 нижняя горизонтальная грань лезвия располагается на верхней горизонтальной грани ротора. Для установки лезвия в начальное положение добавлено сопряжение угол1, после установки оно выключается, чтобы не мешать вращению.



а)



б)

а) 3D модель втулки, б) сопряжения втулки

Рисунок 3.28 – 3D модель втулки и её сопряжения

Сопряжение концентричность13 выставляет втулку относительно посадочного отверстия в роторе, а совпадение29 располагает внутреннюю горизонтальную грань втулки на нижней горизонтальной стороне ротора.

Остальные пять лезвий и втулок крепятся на роторе аналогично.

3.3 Имитационная модель кустореза в среде MATLAB и её

хронология составления

Имитационная модель рамы

Имитационная модель представлена в виде блок-схемы на рисунке 3.29. Для создания точки отсчета в начале мировой системы координат (0,0,0) расположим объект *Poshva_1* (подключенный через порт F), описывающий ровный слой почвы, относительно которого движется трактор с кусторезом. Через порт F1 к почве подключим объект *PlitaMtz82_1*, описывающий раму трактора. Порты F, F1 описывают проушины для подключения посредством кинематических пар *Revolute6,7* двух нижних тяг *NizTiaga_1,2*, через порт F4 подключена верхняя тяга *VerxTiaga_1*. Все три тяги подключены через кинематические пары *Cylindrical1,2* и *Revolute9* и порты F2,F3,F5 к балке – *Balka1_1*. К балке подключены вал для ведущего шкива *Val_1* через порт F1, вал ведомого шкива, на котором расположено ведущее зубчатое коническое колесо *ValReduct1_1*, и вал *ValUgl_1*, к которому посредством кинематических пар *Cylindrical3*, *Revolute8* крепится штанга *Shtanga_1*, регулирующая наклон рабочих органов. Вал ведущего шкива приводится в движение с помощью подсистемы *Angular*, в которой заданы характеристика разгона и величина оборотов вала отбора мощности трактора. От ведущего шкива на ведомый вращение передается за счет клиноременной передачи *CableProperties1*, диаметр ведущего шкива - 250 мм, ведомого - 180 мм. С ведущего вала конического редуктора считываем угловую скорость в рад/с, берем производную и получаем угол поворота, который подаем на вход ведомого вала конического редуктора. Число зубьев ведущего конического колеса – 48, модуль 4, число зубьев ведомого – 24, модуль 4, передаточное отношение равно 2. Со шкива, расположенного на ведомом валу конической передачи, передаем вращение клиноременной передачей *CableProperties2* на центральный вал *ValSchkiCentr_1* (диаметры шкивов 180 мм). На центральном валу расположен шкив *Shkiv2_180_4*, от которого вращение передаем на левый и правый шкивы через ременные передачи *CableProperties3*. Эти шкивы приводят во вращение валы *ValShkivBok_1,2*, на которых они установлены, что, в свою очередь, приводит во вращение ножевые рабочие органы *RotorNoz2_1,2*.

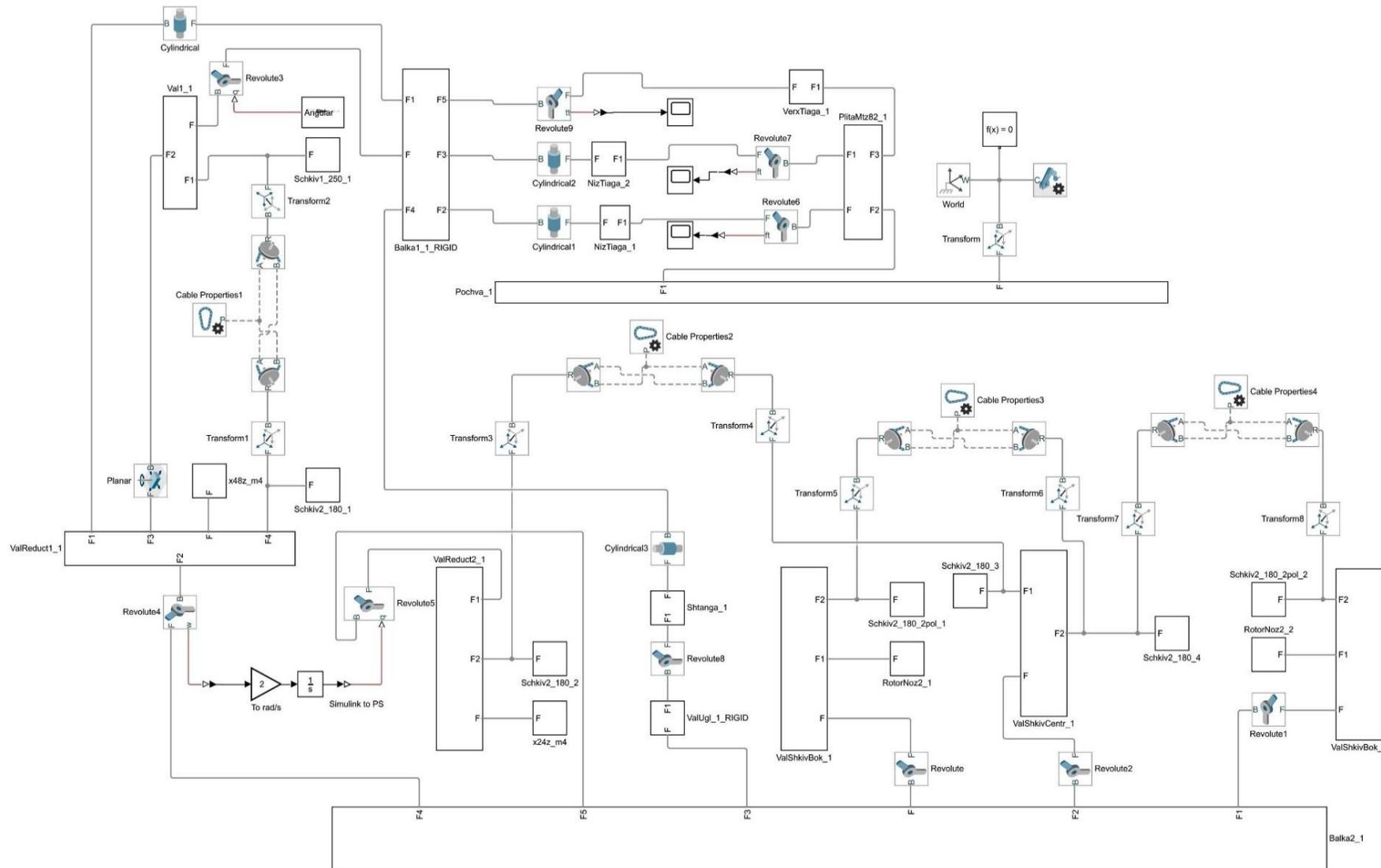


Рисунок 3.29 – Визуальная форма модели рамы кустореза в приложении Simulink пакета MATLAB

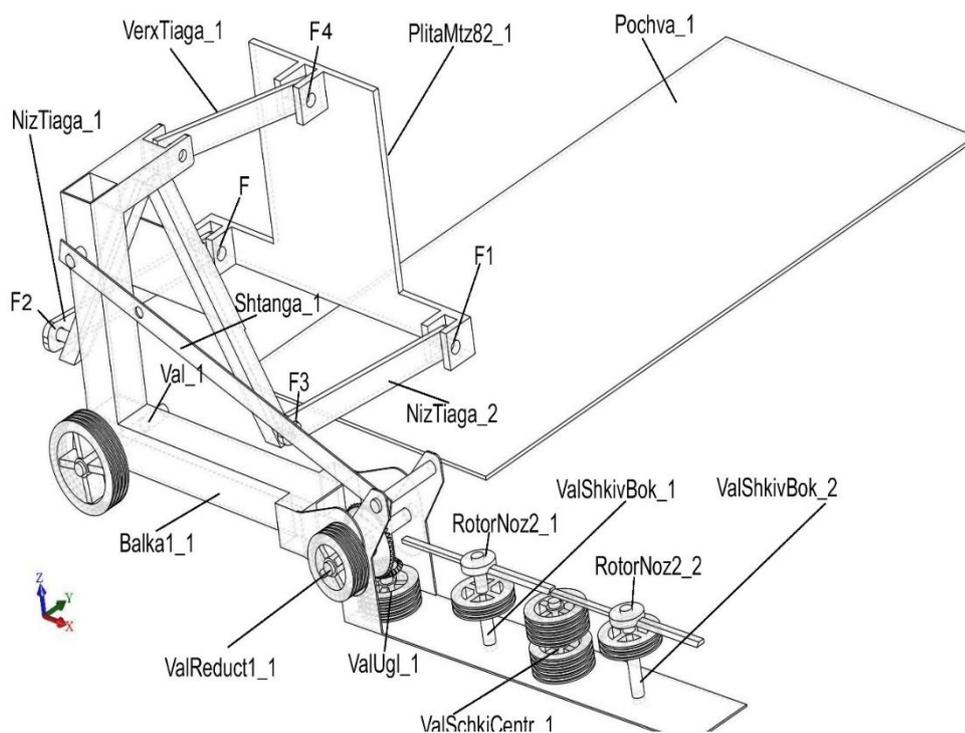


Рисунок 3.30 – 3D Модель кустореза, полученная в системе Simulink пакета MATLAB

Общий вид кустореза показан на рисунке 3.30.

Имитационная модель ротора

Используя подход, описанный в п. 3.2, составим имитационную модель ротора с шарнирно сочлененными лезвиями. На рисунке 3.31 показан общий вид ротора.



Рисунок 3.31 – Общий вид ротора кустореза

Используем характеристики ротора, полученные при его проектировании (п. 3.2). Сведем их в таблицу 3.1

Таблица 3.1 – Массовые характеристики ротора

№ п.п.	Наименование параметра	Обозначение	Название звена	
			Маховик	Нож
1	Масса, кг	m	0.692	0.0425
2	Объем м ³	V	0.00009	0.00001
3	Центр тяжести, м	x	0	-0,07918
		y	0	0,03992
		z	0.00375	0,01010
4	Основные оси инерции и моменты инерции кг·м ²	I _x	(1, 0, 0)	(0.98, -0.19, -0.0038)
		I _y	(0, 1, 0)	(0.19, 0.98, 0.026)
		I _z	(0, 0, 1)	(-0.0012, -0.025, 0.99)
		P _x	0.00085	0
		P _y	0.00085	0.00002
		P _z	0.00169	0.00002

Имитационная модель ротора представлена в виде блок-схемы на рисунке 3.32.

В подсистеме Initial setting задана неподвижная система координат, направление и значение силы тяжести. К выходу неподвижной системы координат неподвижно подсоединено цилиндрическое звено – Os с заданными геометрическими и массовыми характеристиками (см. табл. 3.1). Ось вращательной кинематической пары Os-Rotor с одной степенью свободы соединена с ротором портом F6.

На вход кинематической пары q подается угол вращения из подсистемы Angular (рисунок 3.33).

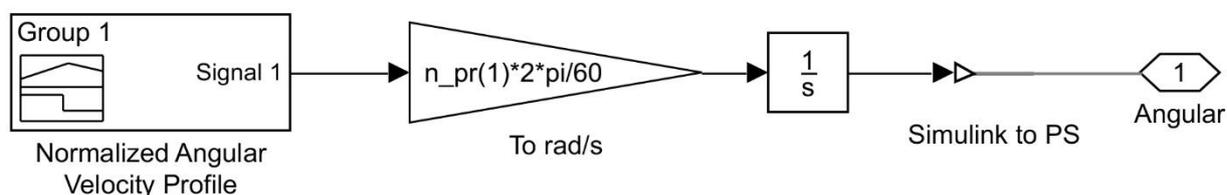


Рисунок 3.33 – Подсистема Angular, рассчитывающая входной сигнал привода (угол поворота)

Нормализованную угловую скорость разгона ротора без учета сил инерции задаем графиком на рисунке 3.34.

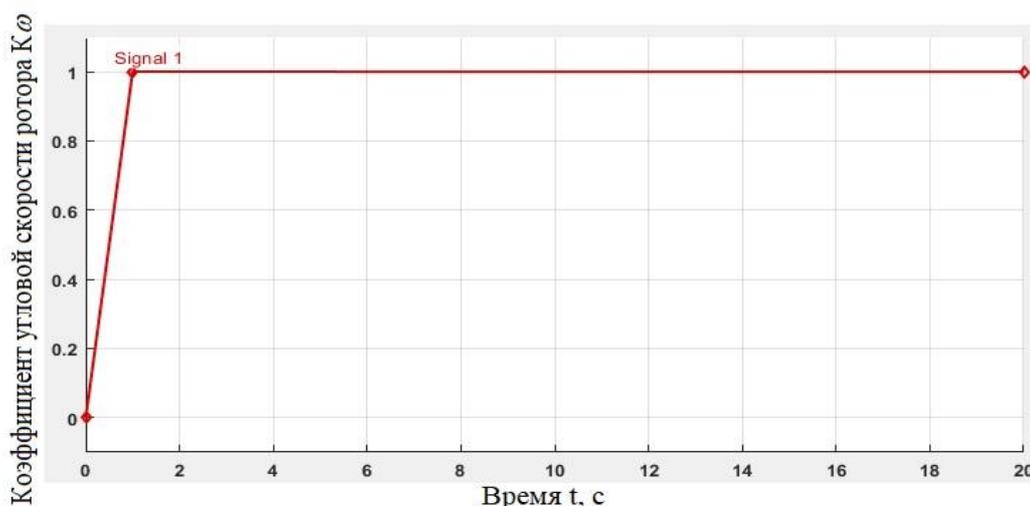


Рисунок 3.34 – Входной нормализованный профиль изменения угловой скорости ротора во времени

Усилим этот сигнал на постоянное значение угловой скорости, рассчитываемое по известной формуле $\omega = \frac{n \cdot 2\pi}{60}$, где n – число оборотов, переданное приводом на ротор, об/мин. Вычислим интеграл и получим значения угла, на который должен быть повернут ротор в исследуемый момент времени. Переведем полученный сигнал в физическую величину и используем его как входной параметр, определяющий поворот в кинематической паре, стойка-ротор. Число оборотов – входной параметр модели показан на рис 3.33, n_{pr} является вектором с постоянным значением, берем первое значение вектора.

Подсистема Torque Ang. Velocity позволяет получить зависимости угловой скорости и крутящего момента сил сопротивления на роторе от времени с учетом кинематики и динамики всей системы (рисунок 3.35). Полученные физические значения переводим в цифровые сигналы, которые можно увидеть во встроенных в MATLAB осциллографах (N*m, rad/s, W), а также передаем в рабочую среду (Torque_Rotor, Power_Rotor, V_Ang_Rotor) для экспорта в Excel.

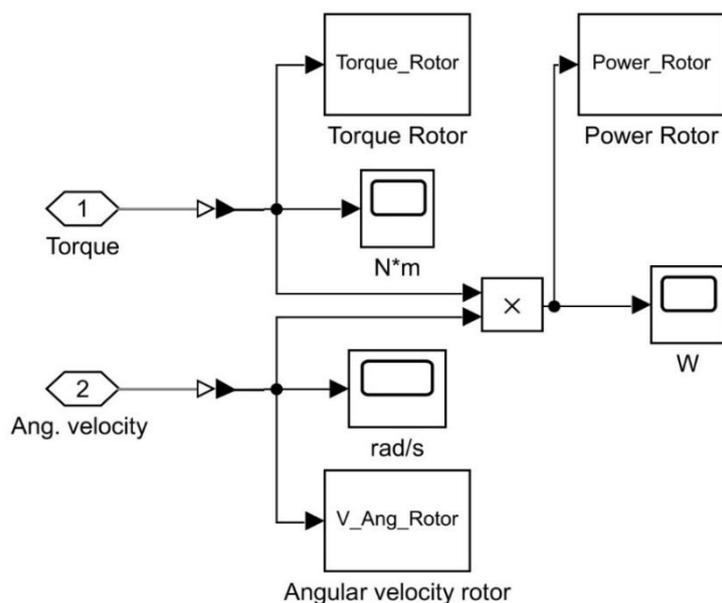


Рисунок 3.35 – Подсистема Torque Ang. Velocity, снимающая показания крутящего момента и угловой скорости с кинематической пары «привод-ротор»

Для соединения оси, ножей с втулками к ротору необходимо создать порты с локальными системами координат для каждого элемента, расположенные относительно локальной системы координат оси ротора. Порты F...F12 получены автоматически при импорте сборки ротора из Solidworks. Порты PrR1...PrR6 указываем в свойствах ротора, как показано на рисунке 3.36.

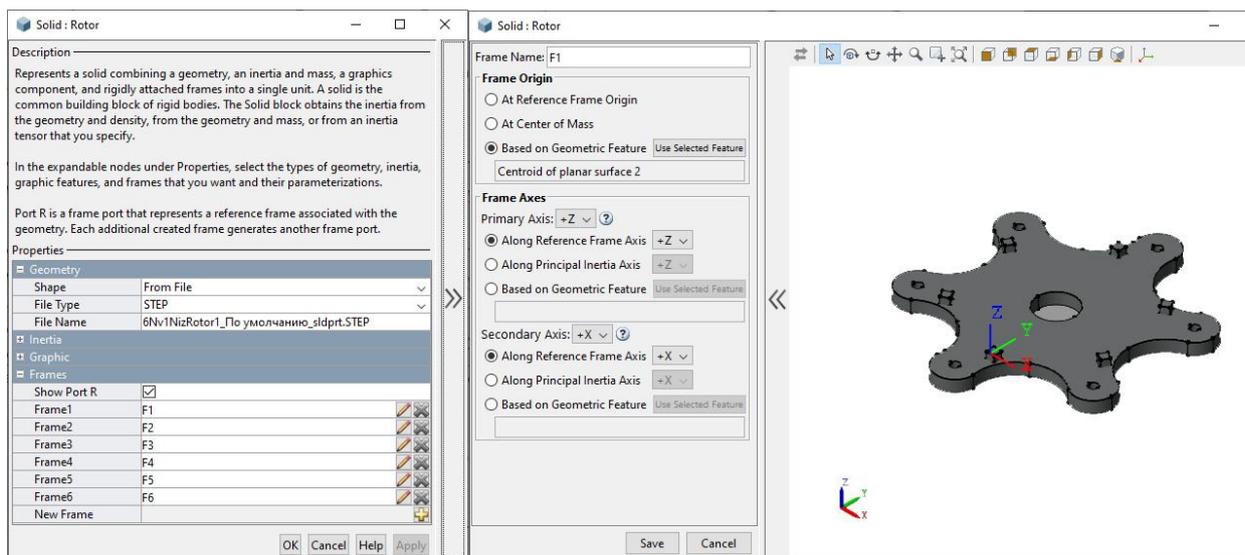


Рисунок 3.36 – Порты крепления пружины на роторе

Порты F,F1,F2,F3,F4,F5 соответствуют системам координат втулок ножей 1,2,3,4,5,6. Порты F7,F8,F9,F10,F11,F12 соответствуют системам координат ножей 1,2,3,4,5,6. Порты PrR1, PrR2, PrR3, PrR4, PrR5, PrR6 – бобышкам ротора, к которым присоединяем упруго-вязкие пружины (рисунок 3.37).

В подсистему Noz1 (см. рисунок 3.32) включим нож, втулку, вращательную кинематическую пару Revolute1, соединяющую ротор с втулкой, цилиндрическую кинематическую пару Cylindrical, обеспечивающую соосность осей вращения ножа и втулки, вращательную кинематическую пару Revolute2, соединяющую нож и ротор, твердые тела и кинематические пары импортированы из CAD с сохранением геометрических и массовых характеристик.

На ноже помимо автоматически созданного порта R для подключения к вращательной и цилиндрической кинематическим парам добавим порт F1 для соединения ножа с пружиной ротора, порт для воздействия силы резания на

нож F2 и порт для снятия скорости вращения ножа F3. Положение локальной системы координат подключения силы резания установим, как показано на рисунке 3.38.

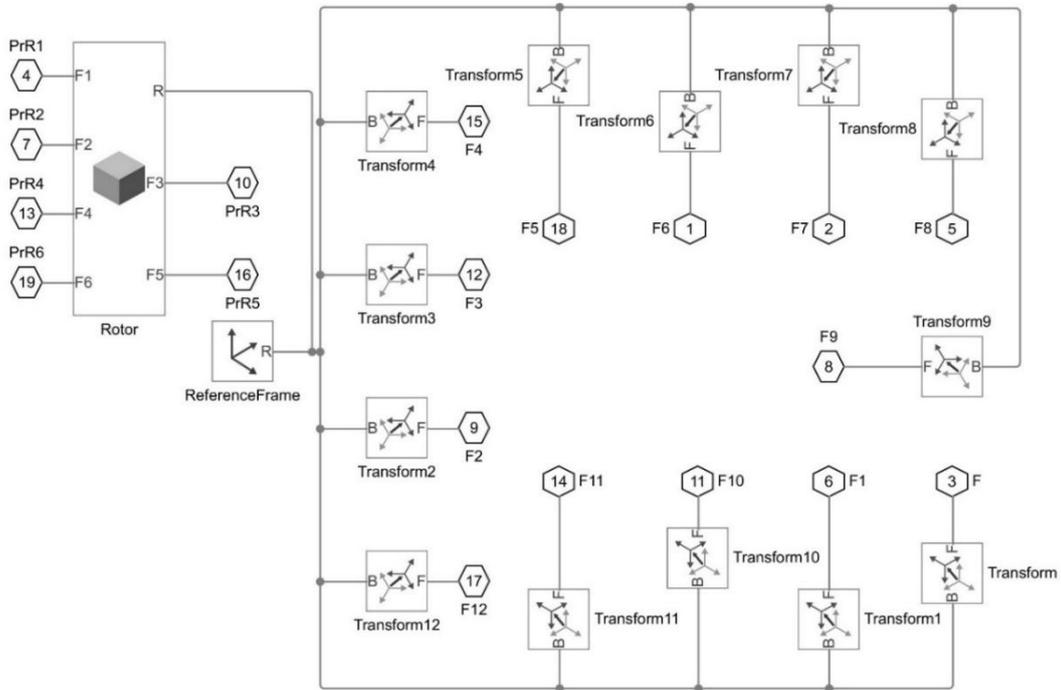


Рисунок 3.37 – Ротор с указанием портов для соединения с осью, ножами, втулками

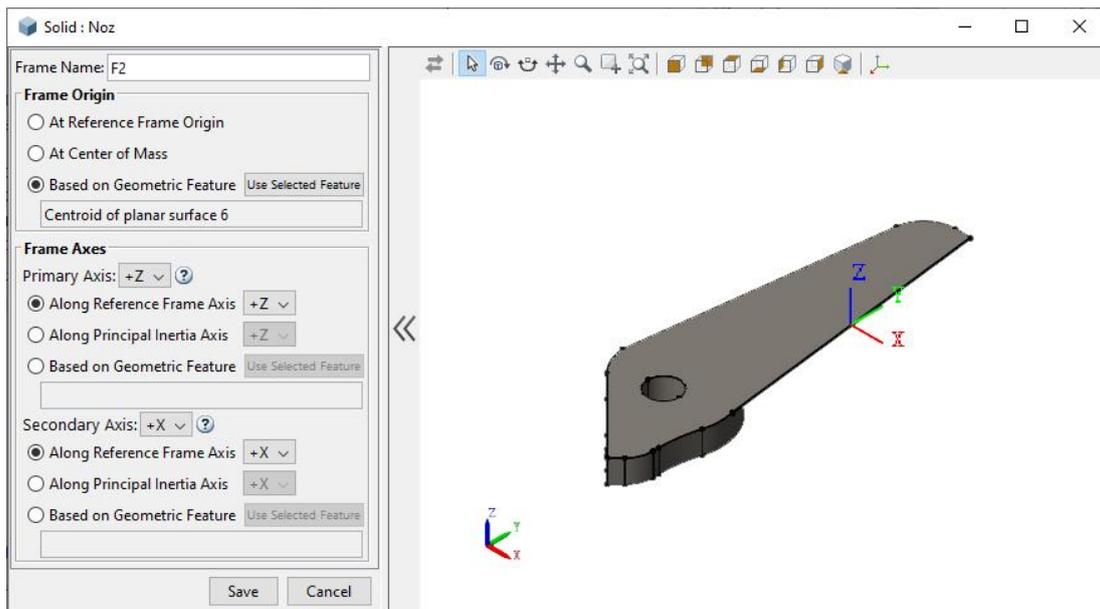


Рисунок 3.38 – Расположение на ноже системы координат от действия силы резания

Аналогично указываем координаты портов F1,F3.

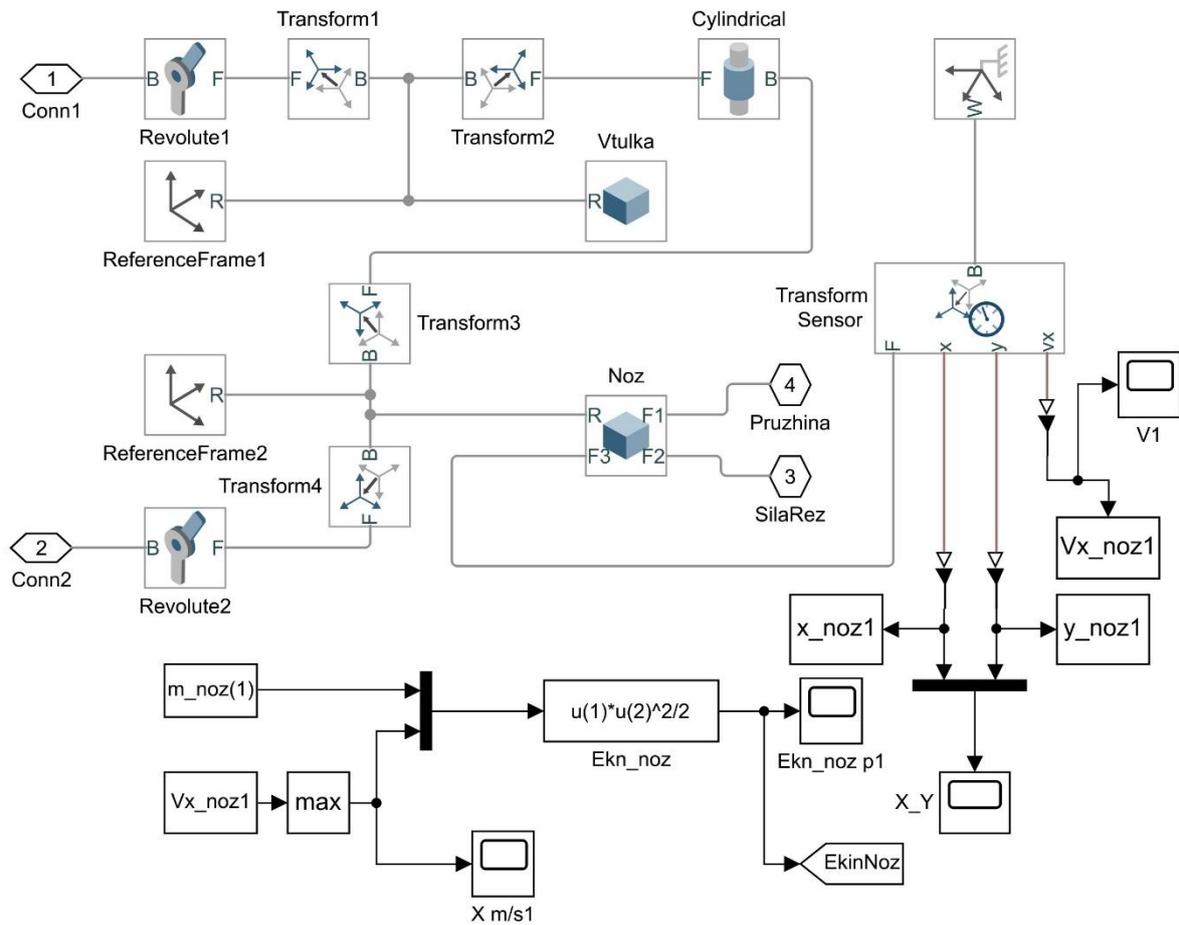


Рисунок 3.39 – Подсистема Noz1

С помощью блока Transform Sensor получим изменение координат ножа и его окружной скорости во времени в плоскости OX, сохраняем эти величины в рабочую область для последующего экспорта переменных x_noz1, y_noz1, Vx_noz1 в Excel (рисунок 3.39). Зная массу и окружную скорость ножа, рассчитаем кинетическую энергию ножа по формуле $E_{kn_noz} = \frac{m_{noz(1)} \cdot V_{x_noz1}^2}{2}$. Полученные значения контролируем с помощью встроенного осциллографа MATLAB – Ekn_nozp1 и передаем на верхний уровень иерархии модели с помощью блока EkinNoz. Аналогичные подсистемы создаем для ножей 2,3,4,5,6.

Для расчета реакции от силы резания, которая воздействует на нож, используем функцию MATLAB fcn, которая позволяет синхронно считывать

входящие значения (диаметр срезаемого ствола, кинетическую энергию на ноже, время моделирования, нормализованный сигнал силы резания), обрабатывать их по заданному алгоритму и получать на выходе сигнал, который преобразуем в физический с помощью блока Simulink to Ps1 и блоком External Force1 передаем как силу в плоскости OX в подсистему Noz1 [15]. Аналогично поступаем и для других ножей ротора. Фрагмент рисунка 3.32, на котором рассмотрен один нож, формируемая сила резания и вязко-упругая пружина, показан на рисунке 3.40.

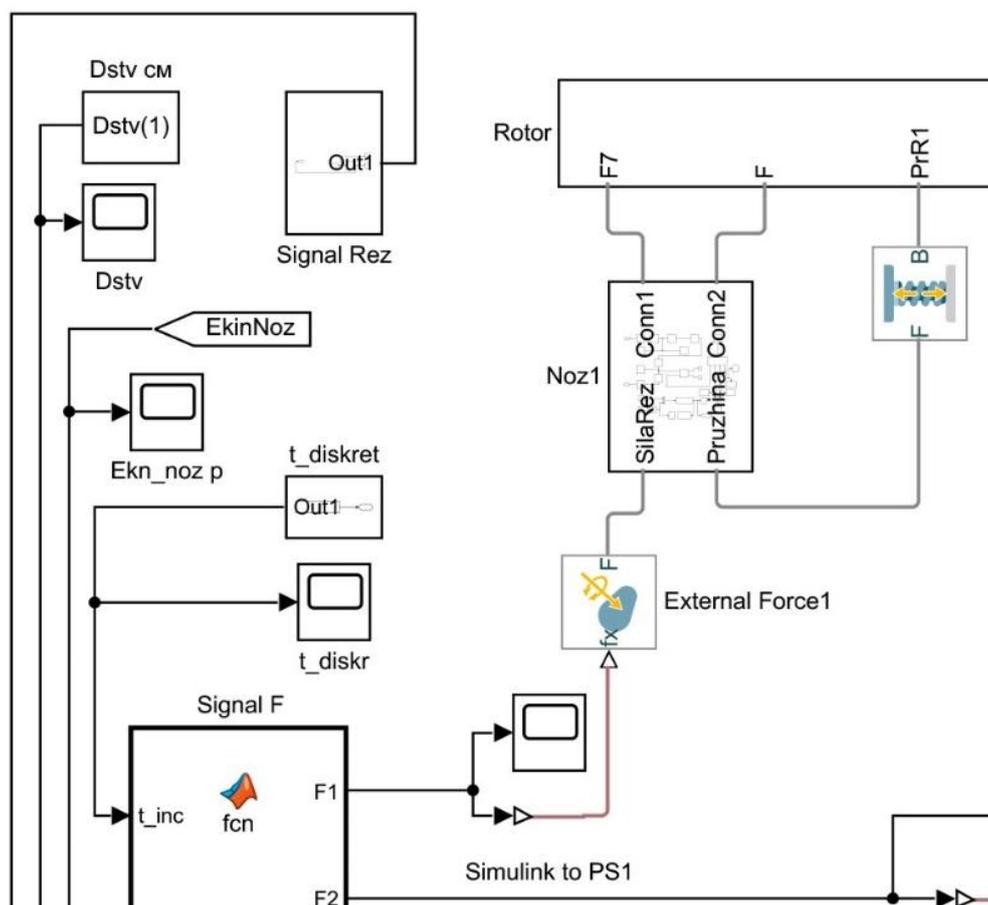


Рисунок 3.40 – Фрагмент имитационной модели, отвечающий за формирование силы резания на первом ноже

В подсистеме Signal Rez синхронизируются дискретное значение времени моделирования с временной шкалой осциллографов MATLAB (рисунок 3.41). Для этого количество записей в массив усилия на роторе используется как

входной параметр, а внутри функции считается количество входов в неё, после чего в пропорции от входной величины рассчитываются периоды времени для разгона ротора и между воздействиями силы резания.

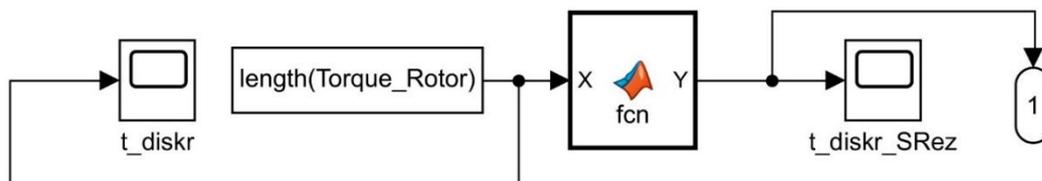


Рисунок 3.41 – Подсистема Signal Rez, формирующая нормализованный сигнал силы резания

Пример полученных значений показан на рисунке 3.42.

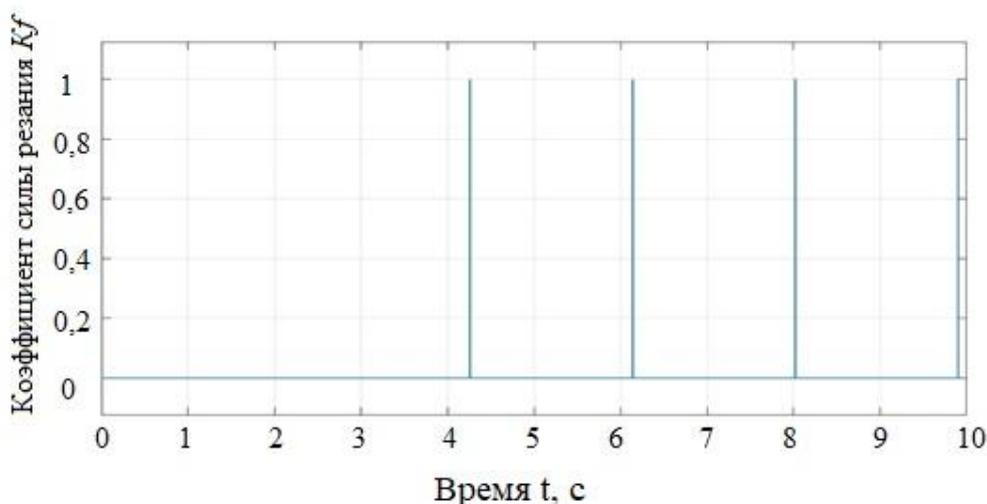


Рисунок 3.42 – Нормализованный сигнал с осциллографа t_diskr_SRez, являющийся множителем для силы резания

Как известно, работа силы, приложенной к телу, численно равна изменению кинетической энергии этого тела $A = \Delta E_k$. Таким образом, мы можем оперировать кинетической энергией, накапливаемой на ноже ротора, и работой, требуемой для среза ствола. Рассмотрим приведенный на рисунке 3.43 алгоритм.

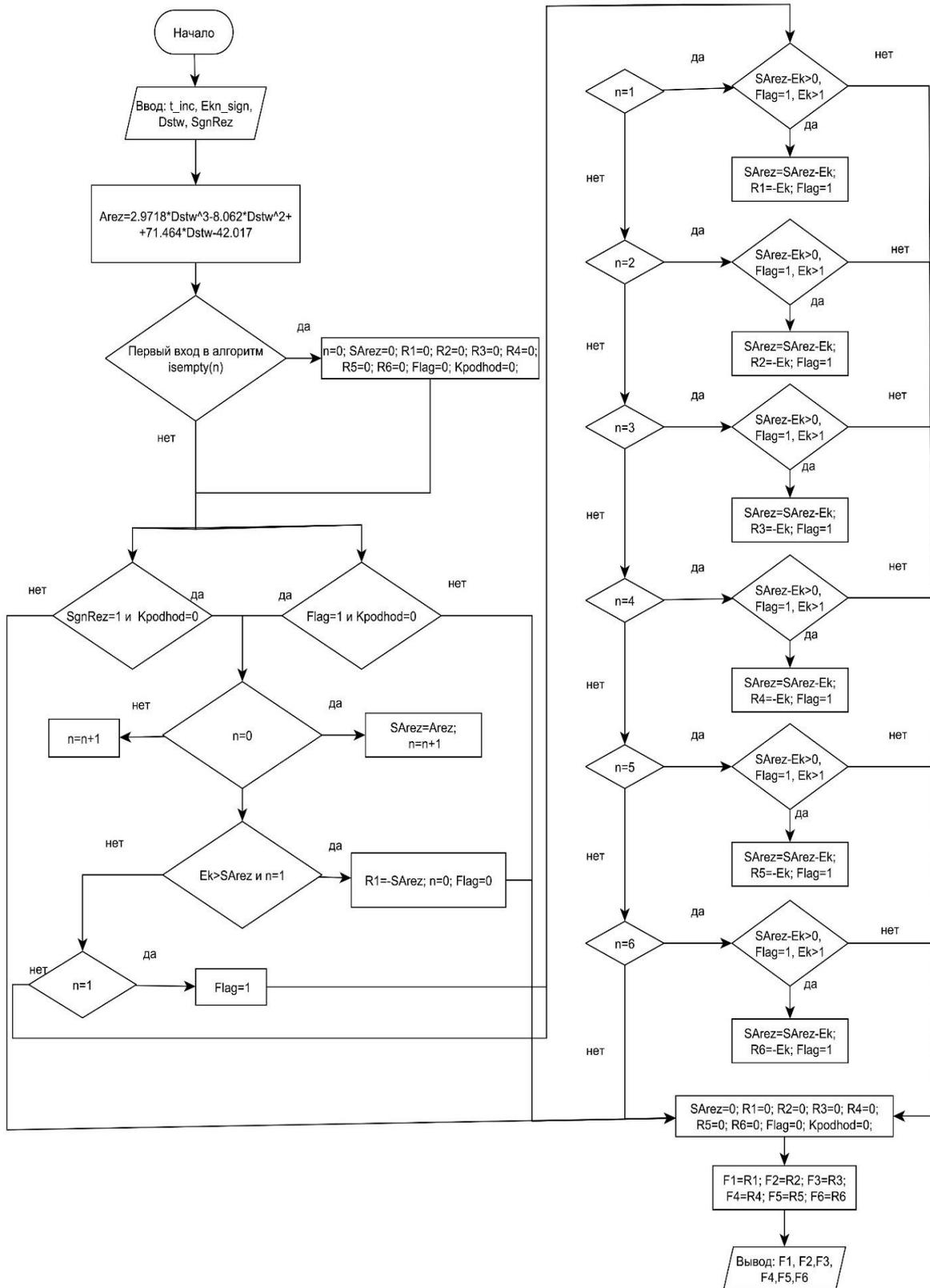


Рисунок 3.43 – Алгоритм расчета силы на ноже через функцию fcn (Signal F)

Входными величинами являются время, кинетическая энергия ножа, диаметр перерезаемого ствола, нормализованный сигнал резания. Сначала рассчитываем работу резания по экспериментально установленной формуле, учитывая диаметр ствола. Если вход в алгоритм первый, то обнуляем все используемые переменные, в последующие входы оставляем их текущие значения. Если ствол был срезан одним ножом, то заканчиваем алгоритм, обнуляем все переменные, кроме сил реакций, и на выходе присваиваем силам значения, рассчитанных реакций на ноже. То же самое делаем, если сигнал резания отсутствует и резание ранее не происходило. В других случаях переходим на этап формирования внутреннего счетчика модели n . При первом входе сохраняем значение работы резания и увеличиваем индекс счетчика, а при последующих оставляем текущее значение работы и увеличиваем индекс. На следующем этапе сравниваем накопленную кинетическую энергию на ноже с требуемой работой резания. Если кинетическая энергия больше требуемой работы резания, значит, можем срезать за один удар ножа, поэтому присваиваем реакции значение работы резания и выходим из алгоритма. Если за один подход одного ножа срезать не получается, то устанавливаем флаг процесса резания и переходим к расчету для каждого ножа. Уменьшаем текущее значение работы резания после воздействия каждого ножа на величину кинетической энергии этого ножа. Присваиваем значения реакций на ножах силам от действия сил резания и передаем их на выход из функции [15].

Величину силы резания находим как функцию от диаметра на основании литературных источников [8].

3.4 Вычислительный эксперимент на имитационной модели для получения выходных параметров работы ротора

Кинематика рамы с учетом её динамических свойств.

Разработанная нами в MATLAB Simulink имитационная модель позволяет получить траектории движения любых элементов звеньев и реакции в кинематических парах. В качестве примера были получены показания габаритных точек ножевого рабочего органа и четырех шарниров нижних тяг навески на трактор.

Для имитации движения кустореза установим постоянную скорость подачи в кинематической паре между почвой и плитой вдоль оси OY равной $0,1$ м/с. Для имитации движения по неровной поверхности зададим вращение в кинематической паре между почвой и плитой с угловой скоростью 2 рад/с. Умножим это значение на коэффициент поворота $K\varphi$, показанный на рисунке 3.44. После чего, проинтегрировав, получим значения углов поворота плиты вокруг её оси OX .

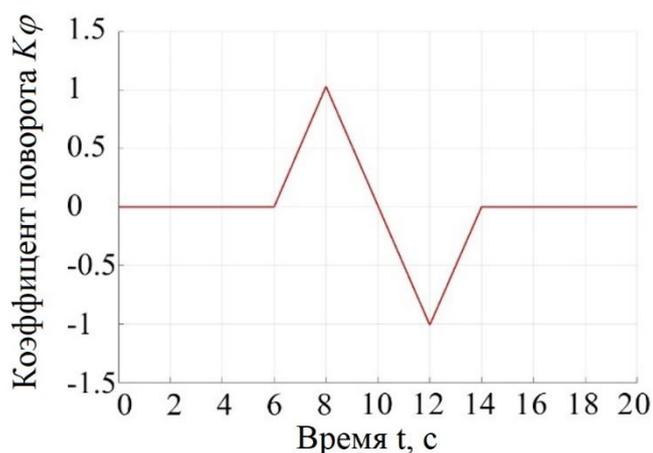


Рисунок 3.44 – Входной сигнал для расчета угла поворота плиты (PlitaMTZ82_1)

С каждой точки звеньев рабочего органа в результате проведения имитационного эксперимента мы можем получить координаты x , y , z (рисунок

3.44). В качестве примера на рисунке 3.45 показано изменение координат нижней тяги в шарнире F.

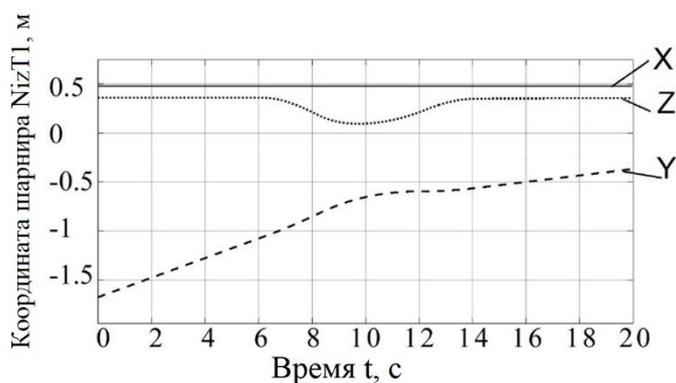


Рисунок 3.45 – Изменение координат X,Y,Z шарнира NizTiaga_1 в процессе вычислительного эксперимента

На рисунке видно, что тяга движется на постоянном расстоянии 0,5 м по оси OX, с 6 по 14 секунды тяга перемещается вниз и возвращается обратно в соответствии с поворотом плиты заданным сигналом (см. рисунок 3.44) и увеличивает перемещение по оси OY, т.к. трактор движется поступательно вперед.

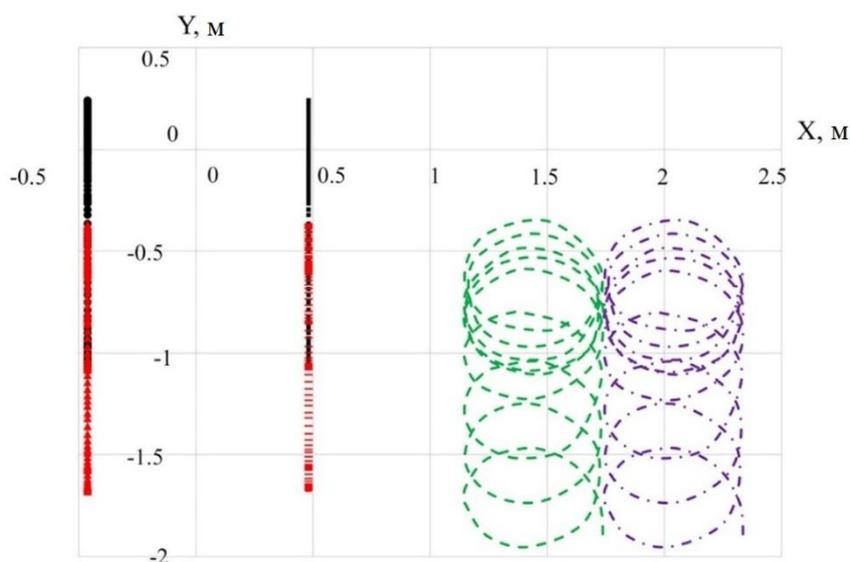


Рисунок 3.46 – Изменение координат X и Y шарниров F, F1, F2, F3 двух нижних тяг сцепного устройства и двух крайних точек лопастей рабочего органа.

Объединяя полученные данные по координатам шарниров тяги и крайних точек ножей рабочего органа, построим вид сверху (рисунок 3.46) и вид сзади (рисунок 3.47).

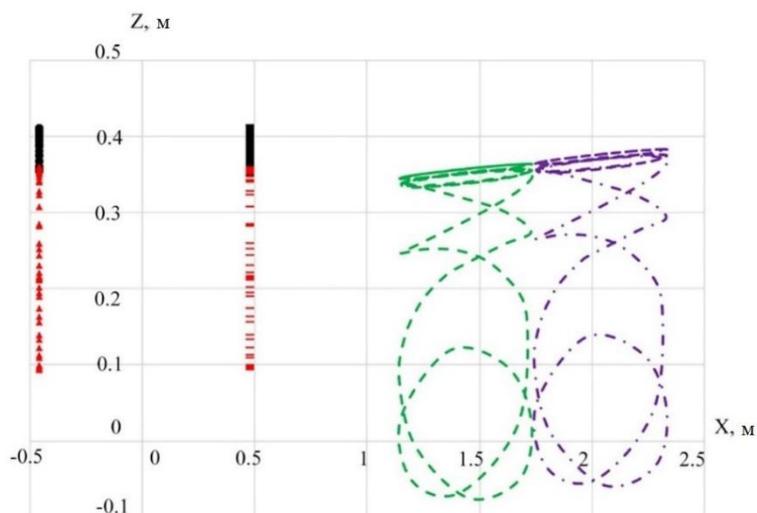


Рисунок 3.47 – Изменение координат X и Z шарниров F, F1, F2, F3 двух нижних тяг и двух крайних точек лопастей рабочего органа

Проведенный динамический анализ в Solidworks Motion подтверждает результаты, полученные с помощью MATLAB Simulink (рисунок 3.48).

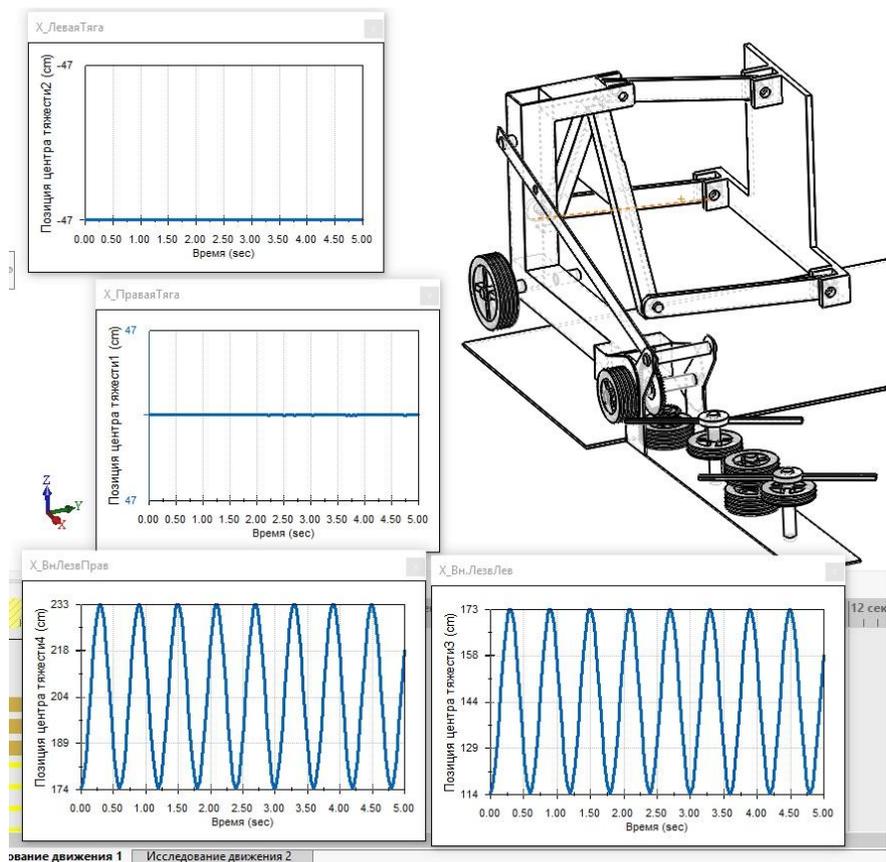


Рисунок 3.48 – Динамический анализ механизма в Solidworks Motion

Кинематика и динамика ротора с шарнирно-сочлененными лезвиями

При разработке имитационной модели на базе Solidworks Motion маховик был выполнен подвижным относительно оси, лезвия шарнирно соединены с помощью осей с маховиком [14]. Для предотвращения свободного поворота ножей на 360° в конструкцию была добавлена виртуальная пружина и демпфер, расположенные, как показано на рисунке 3.48

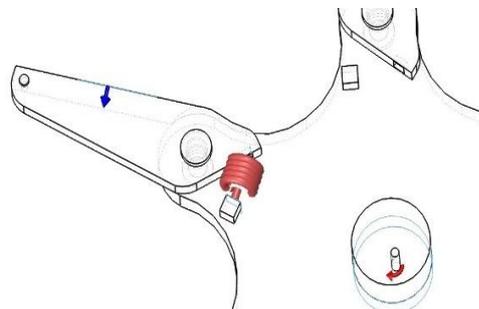


Рисунок 3.48 – Силовые воздействия на ротор

Нами было выполнено три компьютерных эксперимента. В первом и втором компьютерном экспериментах момент от действия силы резания у кинематической пары лезвие-ротор был задан зависимостью, приведенной на рисунке 3.49. При этом в первом случае присутствовала пружина, стабилизирующая вращение ножа, а во втором она отсутствовала.

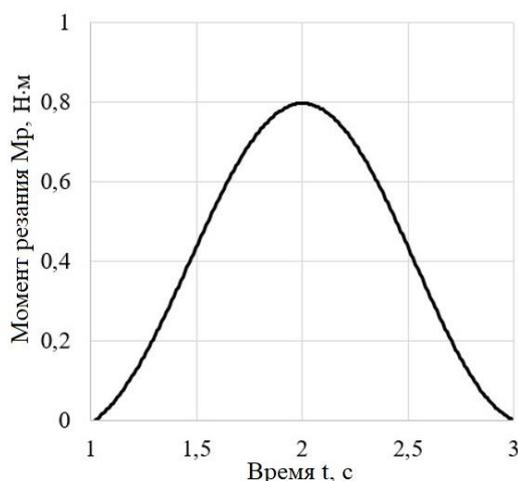


Рисунок 3.49 – Воздействие момента сил резания от ДКР на лезвие (первый и второй опыт)

При проведении третьего компьютерного эксперимента вращающий момент от сил резания был увеличен (рисунок 3.50), стабилизирующая пружина присутствует.

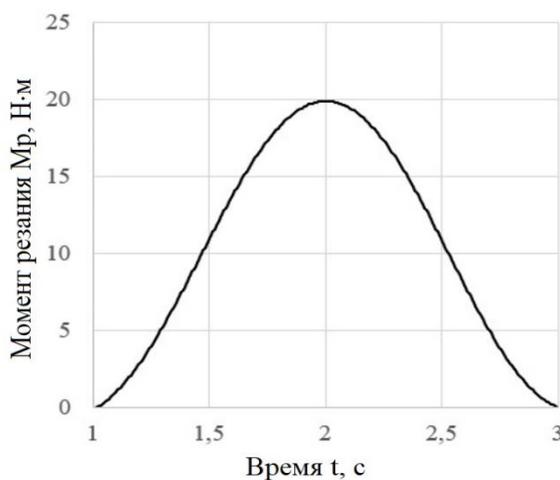


Рисунок 3.50 – Воздействие момента силы резания от ДКР на лезвие (третий опыт)

Обозначим характерные точки ротора: О – шарнир крепления маховика к оси, А – шарнир крепления лезвия к оси маховика, В – расположение виртуального датчика на конце лезвия, рисунок 3.51.

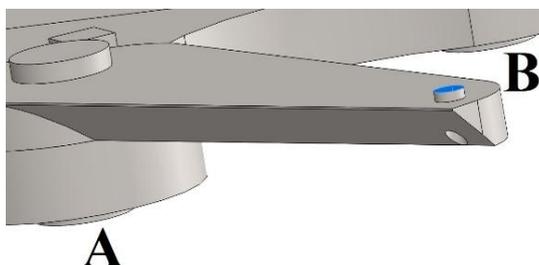


Рисунок 3.51 – Место расположения датчика движения шарнира А

Аналогично установим датчики, которые отслеживают потребляемую мощность и угол поворота ножа относительно его оси вращения.

Материал маховика и лезвий – сталь, рабочая зона 0,26 м. Основные геометрические и массовые характеристики спроектированных звеньев ротора приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Кинематические и динамические параметры ротора, полученные с помощью САПР

№	Параметр	Маховик	Нож
1	m, кг	0.72	0.045
2	L _{oa} , м	0.07	
3	L _{ав} , м		0.06
4	I _x	[1, 0, 0]	[0.97, -0.21, 0.003]
5	I _y	[0, 1, 0]	[0.21, 0.98, -0.03]
6	I _z	[0, 0, 1]	[0.002, 0.26, 0.99]

Показания виртуальных датчиков, характеризующих затрачиваемую двигателем мощность и угол поворота ножа относительно его оси вращения, для трех компьютерных экспериментов приведены на рисунках 3.52 - 3.57.

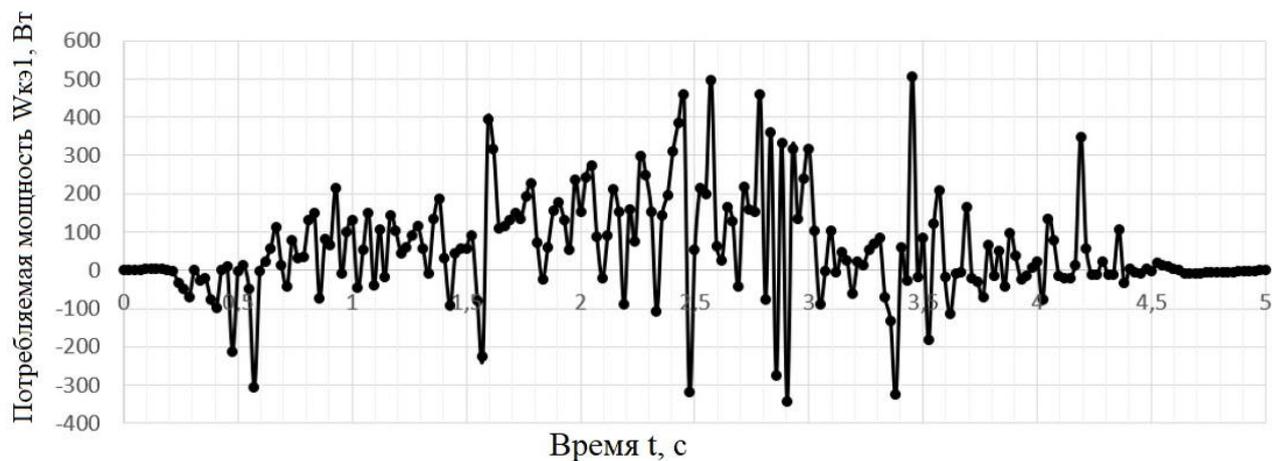


Рисунок 3.52 – Показания датчика мощности, потребляемой двигателем ротора, для первого компьютерного эксперимента

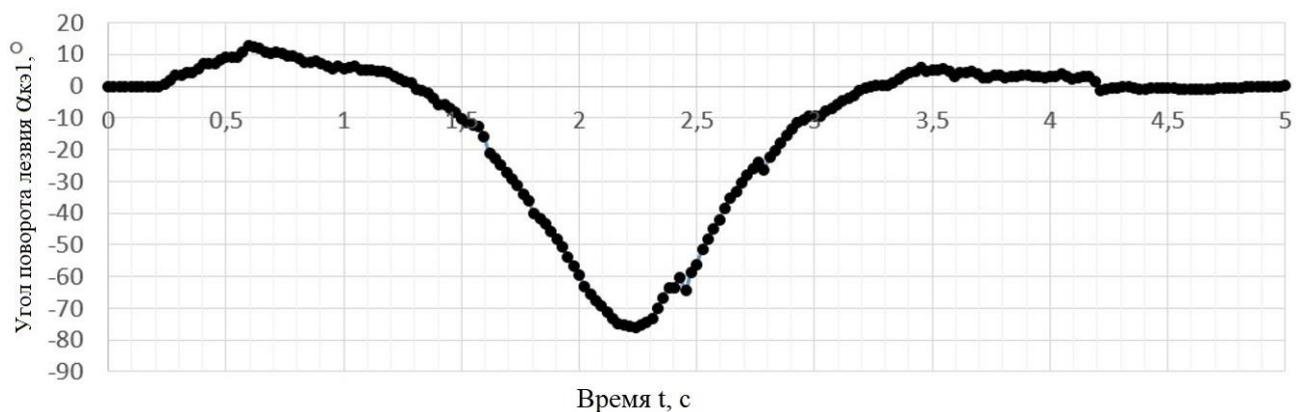


Рисунок 3.53 – Показания датчика угла поворота лезвия для второго компьютерного эксперимента

В результате проведения первого компьютерного эксперимента (рисунок 3.52-3.53) установлено, что затраты мощности на разгон и работу ротора находятся в промежутке 0-400 Вт, с отдельными кратковременными пиками, превышающими указанные значения. В момент начала вращения нож не успевает повернуть за движением ротора (за счет инерции) и поэтому отклоняется на

угол 10 градусов, далее при воздействии на нож силы резания и как следствие момента резания незначительной величины – 0,8 Н·м нож отклоняется на угол -70°.

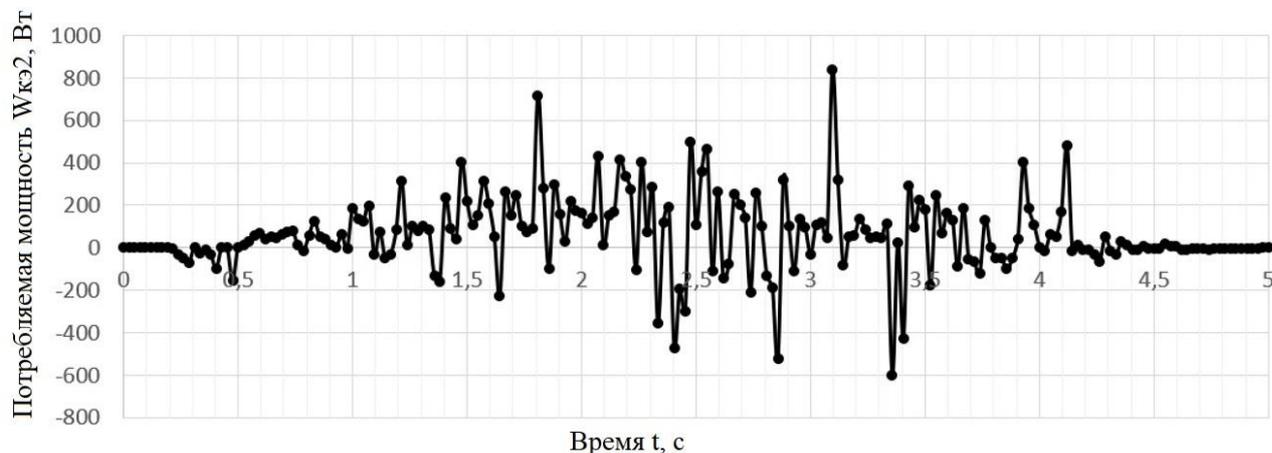


Рисунок 3.54 – Показания датчика мощности, потребляемой двигателем ротора, для второго компьютерного эксперимента

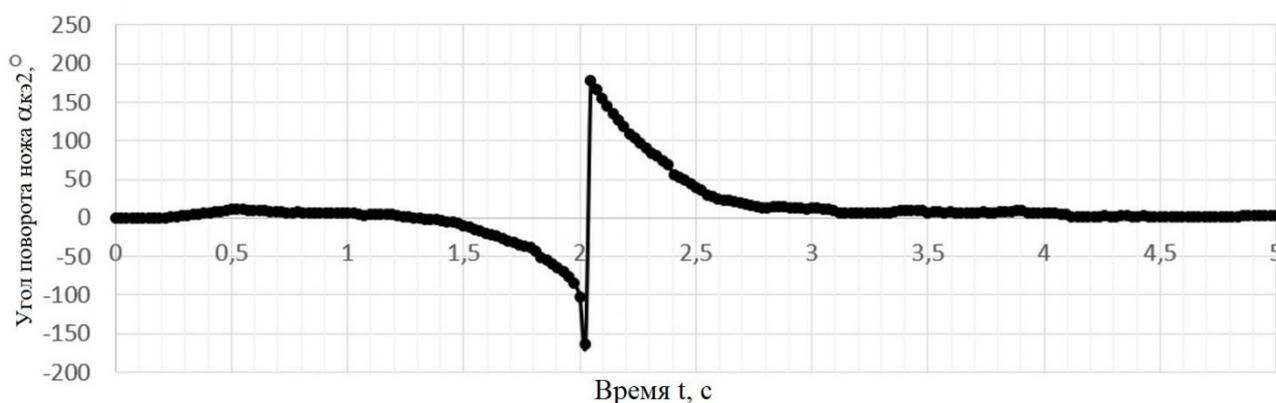


Рисунок 3.55 – Показания датчика угла поворота ножа для второго компьютерного эксперимента

В результате проведения второго компьютерного эксперимента (рисунок 3.54-3.55), в котором убрана пружина, препятствующая свободному вращению ножа, мы наблюдаем поворот ножа вокруг оси от +180 до -180 °. Мощность, затрачиваемая на работу ротора при этом, сохранилась в тех же пределах.

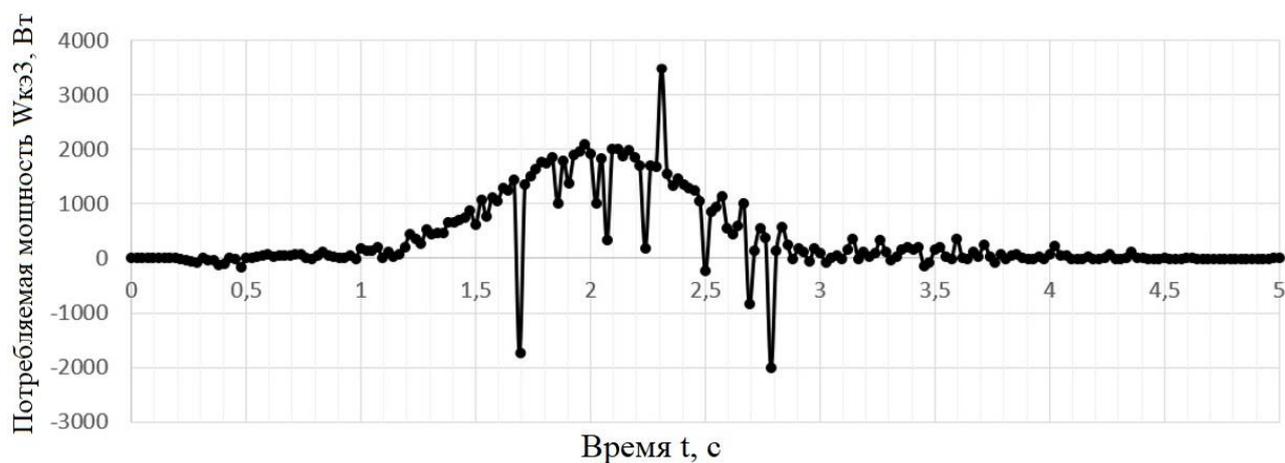


Рисунок 3.56 – Показания датчика мощности, потребляемой двигателем ротора, для третьего компьютерного эксперимента

В результате проведения третьего компьютерного эксперимента (рисунок 3.56 – 3.57), в котором значительно увеличена сила резания и, как следствие, момент резания – 20 Н·м, мы видим возросшие значения затрат мощности на вращения до величины 2000 Вт. В результате значительного удара на ноже в течение 2 с происходят его колебания в пределах 0...120° с отдельными пиковыми значениями, превышающими указанные.

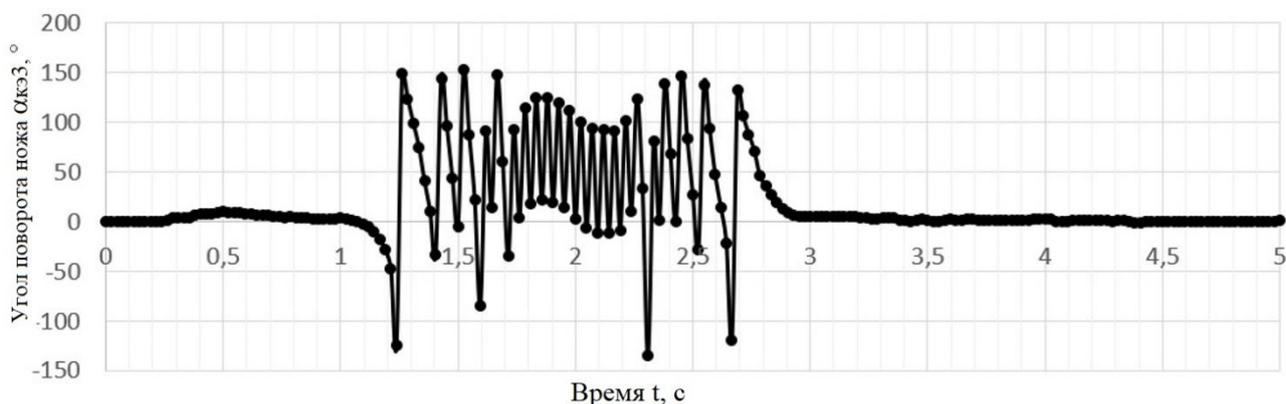


Рисунок 3.57 – Показания датчика угла поворота ножа относительно оси вращения для третьего компьютерного эксперимента

Траектория вращения ножа на холостом ходу, полученная с виртуальных датчиков, фиксирующих координаты по ОХ и ОУ, показана на рисунке 3.58.

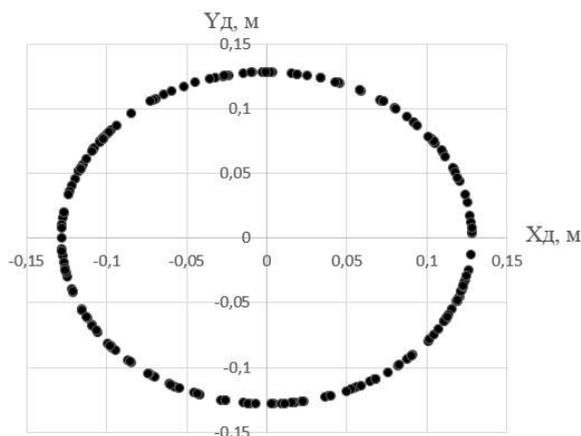


Рисунок 3.58 – Траектория точки В лезвия

Из рисунка 3.58 следует, что датчик, отслеживающий вращение (см. рис. 3.51) на холостом ходу, движется на постоянном радиусе и образует рабочую зону шириной 0,26 м [14]

На основании имитационной модели ротора, выполненной в MATLAB Simulink, мы получили изменения угловой скорости ротора и величины затрат мощности в Вт от сил сопротивления резания для заданного режима работы (рисунок 3.59-3.60).

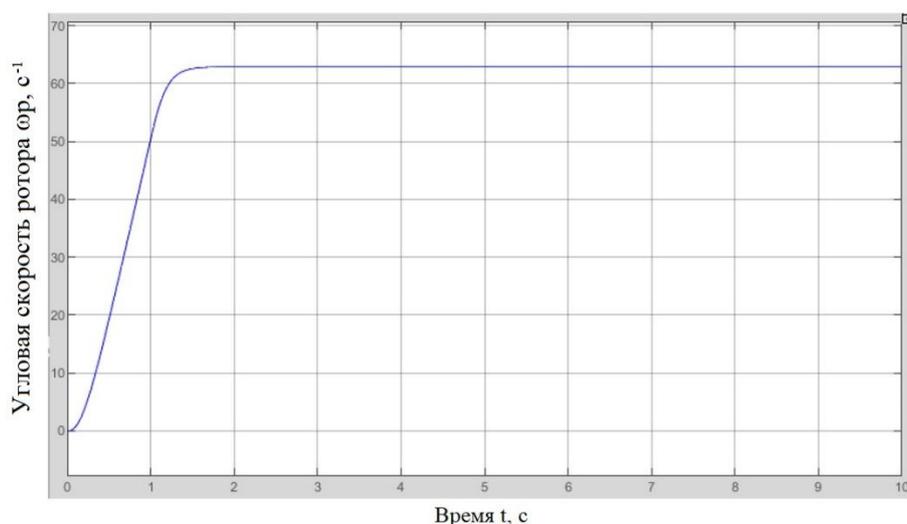


Рисунок 3.59 – Угловая скорость ротора, рассчитанная с помощью Simulink

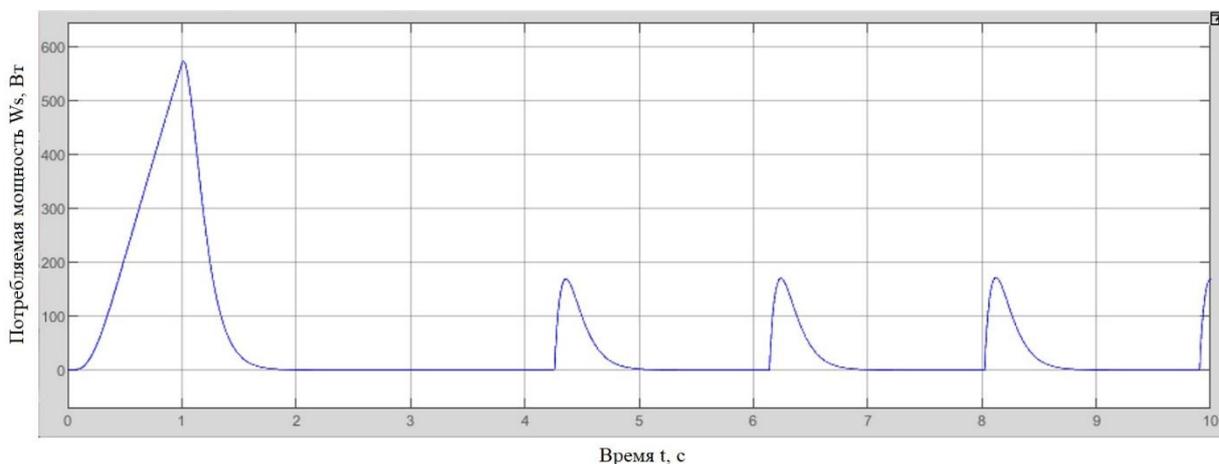


Рисунок 3.60 – Затраты мощности на роторе, рассчитанные в MATLAB для разработанной имитационной модели

В первую секунду мы видим колебания крутящего момента сил сопротивления, связанные с резким набором оборотов и возникающей силой инерции ротора и ножей. Спустя две секунды система приходит в равновесное состояние и момент сопротивления близок к нулю. Силы сопротивления воздуха и трения в шарнирах в модели приняты равными нулю, поэтому после разгона и до резания затрачиваемая мощность в отличие от экспериментальных исследований также равна нулю. Колебания на пятой секунде возникли из-за приложения к ножу сил сопротивления резанию.

3.5 Выводы по разделу

1. Проектирование в САПР цифровой трехмерной модели кустореза позволило описать используемые конструктивные решения в виде установленных кинематических связей деталей, обладающих геометрическими и массовыми параметрами.

2. С помощью приложений Motion Solidworks разработаны имитационные модели рамы и ротора кустореза, установлены кинематические и мощностные характеристики работы.

3. Проведенный компьютерный эксперимент позволил рассчитать траектории тяг навески и двух ножей на роторах кусторезов. Траектории наглядно демонстрируют ширину захвата рабочих органов, движение рамы навески и колебания этих звеньев под воздействием возмущающих нагрузок, имитирующих неровности почвы.

4. Разработанная в MATLAB имитационная модель физических процессов работы рамы и ротора кустореза позволила получить параметры функционирования машины. Определена рабочая зона резания – 0,26 м, и траектории движения ножа при воздействии на него сил резания в диапазоне от 0,8 до 20 Н·м. Рассмотрено и показано положительное влияние пружины и демпфера на снижение колебаний ножа и предотвращение его вращения вокруг своей оси на 360°.

5. Представленная хронология имитационного моделирования, показывающая этапы связи работы в программах по автоматизированному проектированию с математическими блоками MATLAB на примере кустореза, позволит использовать данный подход и при проектировании других машин.

4 Разработка лабораторного образца ротора кустореза

4.1 Программа лабораторных исследований ротора кустореза

Целью лабораторных исследований является определение энергетических характеристик ротора кустореза с шарнирно-сочлененными ножами. Рассмотрим два типа роторов: с одним ножом на валу (один шарнир на валу, здесь и далее ножевой) и с тремя лезвиями (с тремя шарнирами на роторе и одним на валу, здесь и далее шарнирно-сочлененный) [3, 14, 15, 16, 17, 46, 103, 12].

В соответствии с целью была разработана программа лабораторных исследований:

- провести оценку энергоёмкости процесса резания ветвей на различных режимах работы;
- определить вид получаемого среза для шарнирно-сочлененного и ножевого рабочего органа;
- провести анализ полученных данных.

Для определения энергетических характеристик ротора кустореза нами была проведена серия лабораторных экспериментов.

Эксперименты проводились на разработанном нами стенде. Стенд разработан с использованием средств автоматизированного проектирования Solidworks. Анализ полученных данных был выполнен с помощью ПО Microsoft Excel. При формировании методики были изучены литературные источники [1,4,5,8].

4.2 Оборудование, применяемое в лабораторных исследованиях

При определении таксационных параметров ветвей (диаметра и высоты) использовались стандартные измерительные средства: метр, штангенциркуль по ГОСТ 166-80, с погрешностью измерения не более 0,1 мм, рулетка измери-

тельная, металлическая ГОСТ 7502-98. При определении влажности использовался цифровой детектор влажности древесины RZ 01 Wood. Для измерения напряжения был использован мультиметр UNI-T 61E позволяющий записывать данные на компьютер.

Перед созданием лабораторного стенда была выполнена печать его макета с помощью 3D принтера, рисунок 4.1. Далее были скорректированы размеры и изготовлен лабораторный стенд.



Рисунок 4.1 – Макет стенда для испытания ротора кустореза напечатанный на 3D принтере

Лабораторный стенд (рисунок 4.2, 4.3) включает в себя раму, 1 внутри которой зажимаются с помощью клиньев ветви требуемого диаметра 2, срез которых происходит сменным рабочим органом 3 установленным на валу электродвигателя 4.

В качестве двигателя выступает дрель с мощностью 700 Вт и максимальной частотой вращения 3000 об/мин (Makita HP1630). Патрон дрели заменен и вместо него изготовлен фланец для крепления сменного рабочего органа. Характеристики линейного привода - максимальный ход 200 мм, создаваемое усилие 100 Н.

Электропитание подается через удлинитель 8 к которому подключен блок питания 9 выдающий постоянный ток 12В поступающий через ШИМ контроллер 10 на линейный привод 6, к ШИМ контроллеру подключены две кнопки 7 соответствующие движению вперед и назад штока линейного электропривода, а также имеется ручка регулировки скорости подачи.

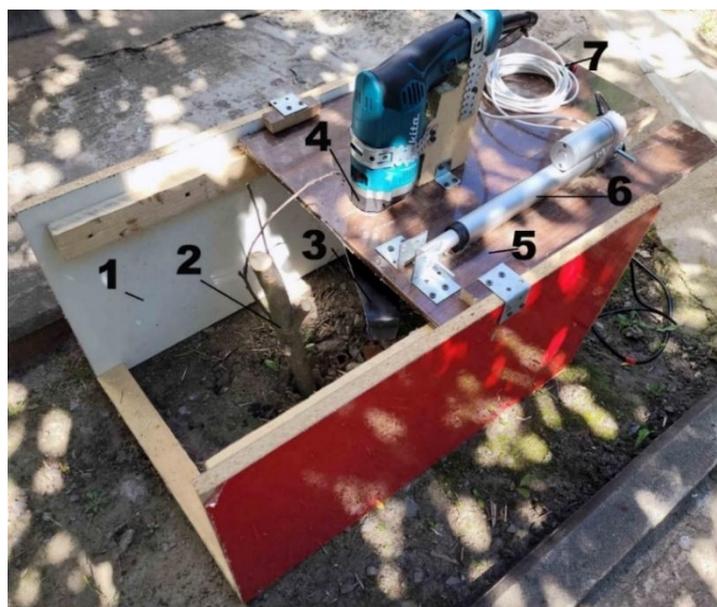


Рисунок 4.2 – Лабораторный стенд (вид спереди)

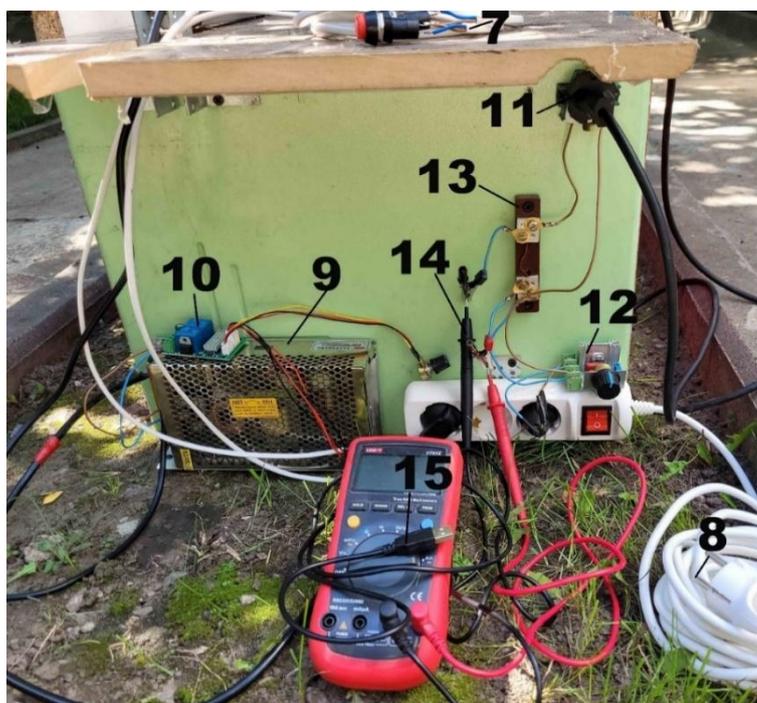


Рисунок 4.3 – Лабораторный стенд (вид сзади)

Электродвигатель 4 запитывается от розетки 11 которая через шунт 13 и регулятор напряжения 12 подсоединена к сети 220 В посредством удлинителя 8. На контакты шунта 13 подсоединены щупы мультиметра 14 измеряющие напряжение. Измеренное напряжение каждые 0,5 с записывается через USB порт 15 на компьютер для последующего анализа.

В качестве сменных рабочих органов использовали ножевой рабочий орган (на одном шарнире у вала), рисунок 4.4а и шарнирно-сочлененный рабочий орган (шарнир у вала и три шарнира на роторе), рисунок 4.4б.



а)



б)

а – ножевой; *б* – шарнирно-сочлененный

Рисунок 4.4 – Ротор с рабочим органом

Для определения длины рулетка измерительная, металлическая ГОСТ 7502-98, рисунок 4.5. Для определения влажности использовался цифровой детектор влажности древесины RZ 01 Wood, рисунок 4.6.

Для снятия мощностных показаний используем цифровой мультиметр UNI-T UT61E щупы которого подключим к токовому шунту 10А\75мВ, а для

связи с компьютером используем идущий в комплекте с мультиметром USB кабель и программное обеспечение.



Рисунок 4.5 – Рулетка измерительная, металлическая ГОСТ 7502-98



Рисунок 4.6 – Цифровой детектор влажности древесины RZ 01 Wood



Рисунок 4.7 – Цифровой мультиметр UNI-T UT61E подключенный к компьютеру

Процесс записи показаний представлен на рисунке 4.7.

4.3 Методика проведения лабораторных исследований

1. На валу двигателя с помощью фланца устанавливается рабочий орган, направление вращения вала двигателя устанавливается в сторону закручивания резьбы на гайке фланца, осуществляется затяг гайки.

2. Подается питание 220 В на удлинитель. Без включения двигателя с помощью управляющих кнопок 7 (см. рисунок 4.3) производится перемещение стола соответствующего минимальному вылету штока линейного электропривода. Выключается питание сети 220 В.

3. В жестко установленные металлические круглые трубы вставляется ветвь исследуемого диаметра, с помощью клиньев происходит её фиксация.

4. С помощью регулятора напряжения выбирается режим работы двигателя. На двигателе нажимается пусковая кнопка и блокируется тумблером для постоянной работы.

5. Проверяется соединение мультиметра через USB шнур с компьютером и запускается программное обеспечение, считывающее и записывающее показания напряжения на шунте.

6. Отойдя на безопасное расстояние ограниченное длиной проводов на концах которых расположены кнопки 7 подается питание на удлинитель, в результате чего начинает работать двигатель с ротором.

7. С помощью кнопок 7 рабочий стол с установленным двигателем перемещается вперед и происходит процесс резания. По окончании процесса резания рабочий стол перемещается обратно на минимальный вылет штока. По окончании перемещения стола питание сети 220 В выключается.

8. Полученные данные по напряжению сохраняются для дальнейшего анализа, в названии файла указывается при каком режиме работы двигателя они были получены, какой диаметр и влажность ветви.

9. Остатки ветви демонтируются из трубы.

4.4 Результаты лабораторных исследований ротора кустореза и их анализ

Для определения мощности на основании измерения напряжения на шунте 75ШИП1-5-0.5, (5А 75мВ) используем закон Ома

$$P = U \cdot I = U_c \cdot \frac{U_m \cdot I_{ш}}{U_{ш}} = 110В \cdot \frac{14,17мВ \cdot 5А}{75мВ} = 103,913 Вт \quad (4.1)$$

Известно, что работа численно равна площади от мощности. Рассчитаем площадь под экспериментальными кривыми на основании формулы трапеции

$$A = \frac{1}{2} \cdot h \cdot (a + b) \quad (4.2)$$

Пример расчета для зависимости, соответствующей ножу рисунок 4.4 а, выполненный с помощью Excel показан на рисунке 4.8

B	C	D	E	F	G	H
t	t uni-t, ч.м.с	Pнорм, Вт	P, Вт	Uunit-t, мВ	Uсети, В	Анорм, Дж
0	10:48:11	0,413	103,913	14,17	110	2*(B7-B6)
0,5	10:48:12	0,120	103,620	14,13	110	0,372
1	10:48:12	1,367	104,867	14,3	110	1,802
1,5	10:48:13	5,840	109,340	14,91	110	3,268
2	10:48:13	7,233	110,733	15,1	110	3,800
2,5	10:48:14	7,967	111,467	15,2	110	3,910
3	10:48:14	7,673	111,173	15,16	110	3,543
3,5	10:48:15	6,500	110,000	15	110	2,957
4	10:48:15	5,327	108,827	14,84	110	2,498
4,5	10:48:16	4,667	108,167	14,75	110	2,095
5	10:48:16	3,713	107,213	14,62	110	1,710
5,5	10:48:17	3,127	106,627	14,54	110	1,270
6	10:48:17	1,953	105,453	14,38	110	0,830
6,5	10:48:18	1,367	104,867	14,3	110	0,683
7	10:48:18	1,367	104,867	14,3	110	0,720
7,5	10:48:19	1,513	105,013	14,32	110	0,757
8	10:48:19	1,513	105,013	14,32	110	
					Сумма	30,348

Рисунок 4.8 – Расчет работы резания дня ножа при $U_c=110 В$, $d_{в}=1 см$, $W_B=11 \%$

На рисунке 4.8 указаны напряжение снятое мультиметром Unit с шунта, напряжение сети $U_{\text{сети}}$ с помощью которого регулировались обороты, время съёмки с осциллограммы для сопоставления с фрагментом видео фиксации. Запись данных производилась 1 раз в 0,5 с. Показана как рассчитывается формула работы и её суммарное значение. Для более наглядное представления мощности все значения были нормализованы к значениям на холостом ходу. Суммарное значение будет складываться из мощности на холостом ходу P_x , и нормализованной мощности резания $P_{\text{норм}}$. Для последующих графиков расчет работы проводился аналогично.

На рисунке 4.9 приведен фрагмент осциллограммы мощности для двух типов рабочих органов при резании ими на минимальных оборотах ($U_c=110$ В) тонкой древесины $d=1$ см, влажностью $W=11$ %.

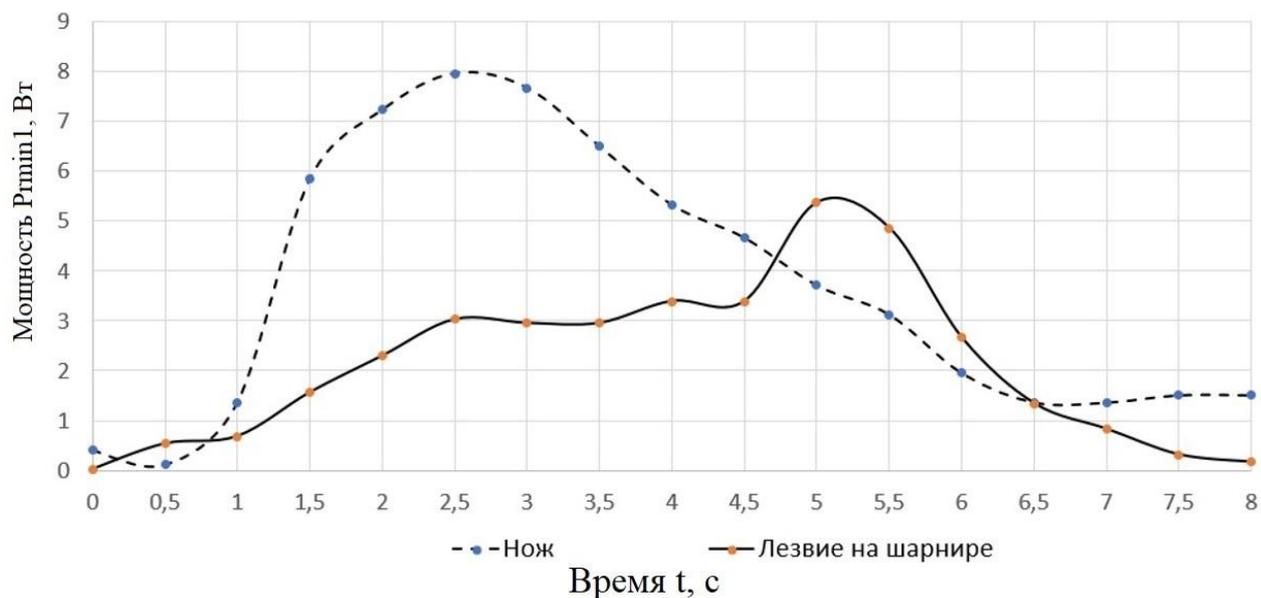


Рисунок 4.9 – Мощность для режима $U_c=110$ В, $d_b=1$ см, $W_b=11$ %

Работа резания для ножа составила $A_{\text{нормНож1}}=30,348$ Дж, для шарнирно-сочлененного лезвия $A_{\text{нормЛезв1}}=18,12$ Дж. В процессе резания нож расколол ветвь $d_b=1$ см, а лезвие постепенно внедрялось и срез без раскола.

На рисунке 4.10 показаны фрагменты осциллограммы процесса резания, соответствующие режиму работы на максимальных оборотах ($U_c=220$ В) тонкой древесины $d_B=1$ см, влажностью $W=11\%$.

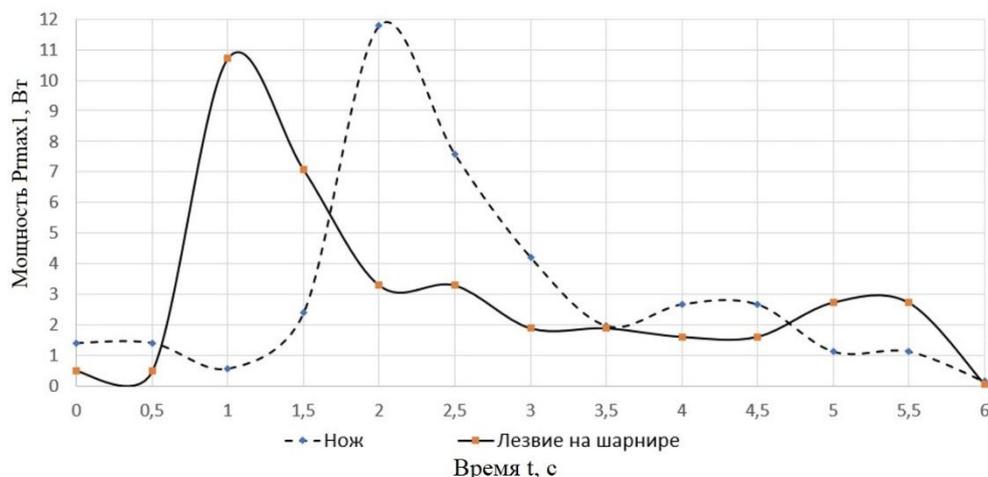


Рисунок 4.10 – Мощность для режима $U_c=220$ В, $d_B=1$ см, $W_B=10$ %

Работа резания для ножа составила $A_{\text{нормНож2}}=19,195$ Дж, для шарнирно-сочлененного лезвия $A_{\text{нормЛезв2}}=18,861$ Дж. В процессе резания нож расколол ветвь $d_B=1$ см, а лезвие срезало без раскола.

На рисунке 4.11 показаны фрагменты осциллограммы процесса резания, соответствующие режиму работы на минимальных оборотах ($U_c=110$ В) ветвь $d_B=1,5$ см, влажностью $W=92$ %.

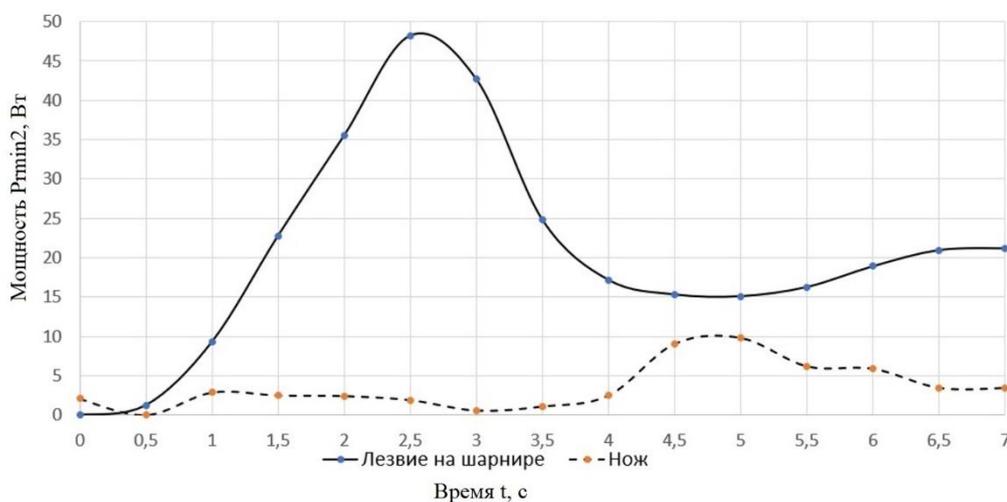


Рисунок 4.11 – Мощность для режима $U_c=110$ В, $d_B=1,5$ см, $W_B=92$ %

Работа резания для ножа составила $A_{\text{нормНож3}}=25,47$ Дж, для шарнирно-сочлененного лезвия $A_{\text{нормЛезв3}}=149,5$ Дж. В процессе резания нож расколол ветвь $d_B=1$ см, а лезвие срезало без раскола.

На рисунке 4.12 показаны фрагменты осциллограммы процесса резания, соответствующие режиму работы на минимальных оборотах ($U_c=110$ В) ветвь $d_B=3$ см, влажностью $W=92$ %.

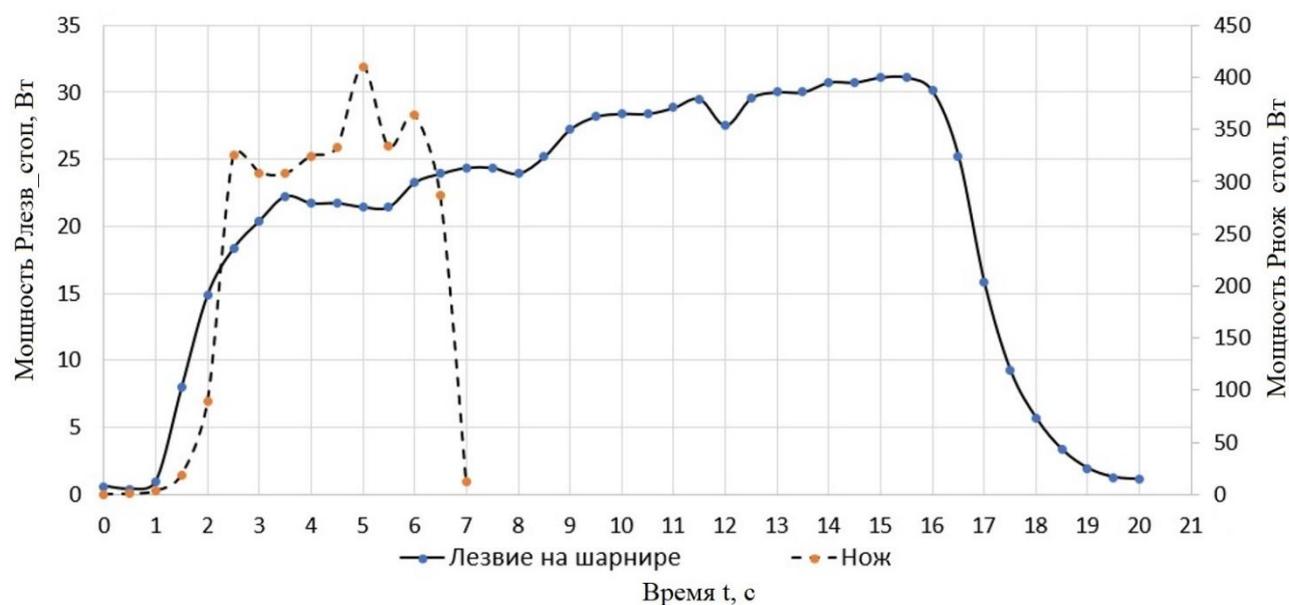


Рисунок 4.12 – Мощность для режима $U_c=110$ В, $d_B=3$ см, $W_B=92$ %.

Работа резания для ножа составила $A_{\text{нормНож6}}=1555,95$ Дж, для шарнирно-сочлененного лезвия $A_{\text{нормЛезв6}}=410,8$ Дж. Слева шкала соответствует лезвию, справа ножу. В процессе нож и лезвие не смогли срезать ствол поэтому расход энергии был максимальным на данном режиме, но не приводил к срезанию. Т.к. время работы ротора с ножом в данном режиме 7 с, а лезвия 20 с, то для того, чтобы сопоставить работу используем коэффициент равный 2,857. После пересчета получим $A_{\text{нормНож6}}=1555,95$ Дж, для шарнирно-сочлененного лезвия $A_{\text{нормЛезв6}}=143,7981$ Дж.

На рисунке 4.13 показана мощность, затрачиваемая на разгон роторов с ножевым и шарнирно-сочленённым лезвием для на минимальных оборотах при напряжении $U_c=110$ В, и максимальных оборотов при напряжении $U_c=210$ В.

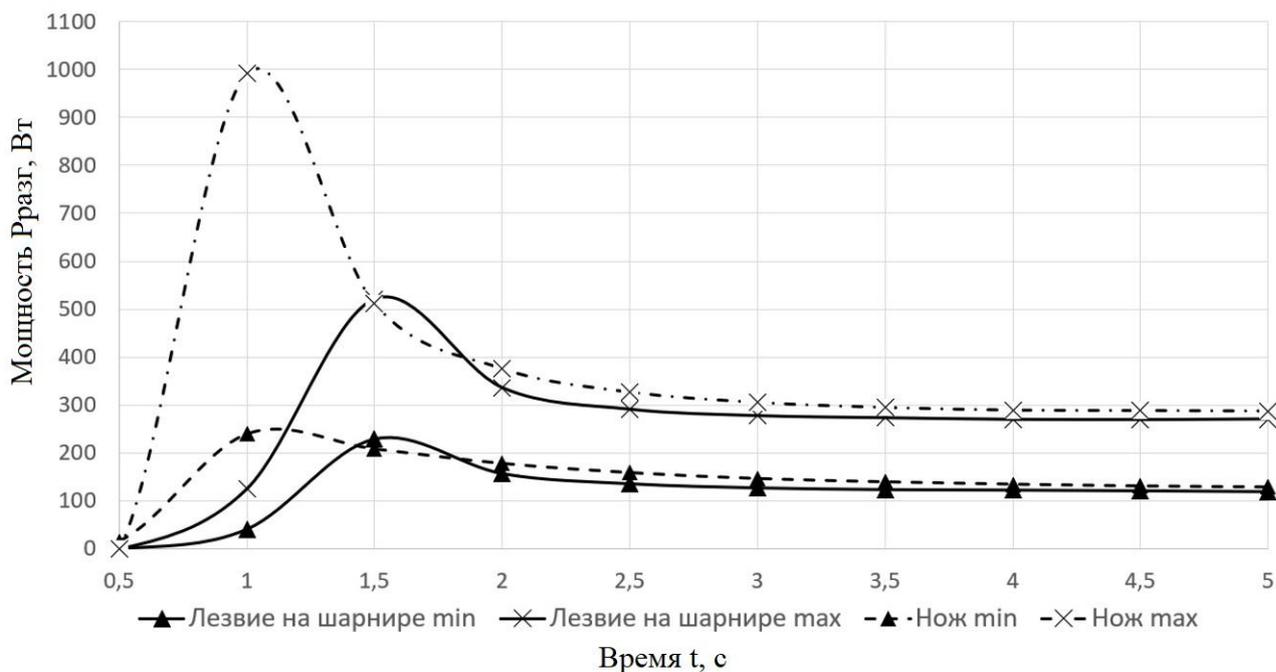


Рисунок 4.13 – Мощность при разгоне $U_{c_min}=110$ В, $U_{c_max}=210$ В
ножевого и шарнирно-сочлененного рабочих органов

Работа при разгоне в течении 5 с для ножа составила $A_{разг_нож_min}=709,313$ Дж, $A_{разг_нож_max}=1763,48$ Дж. Для шарнирно-сочлененного лезвия $A_{разг_лезв_min}=558,267$ Дж, $A_{разг_лезв_max}=1114,5$ Дж. Таким образом при разгоне на минимальных оборотах шарнирно-сочлененный рабочий орган затрачивает на 27% меньше работы чем ножевой, а на максимальных оборотах на 58% меньше чем ножевой. На основании рисунка 4.13 мы установили, что на холостом режиме работы уровень мощности составляет $P_{x_нож_min}=129$ Вт, $P_{x_лезв_min}=118$ Вт $P_{x_нож_max}=287$ Вт, $P_{x_лезв_max}=269$ Вт. Для получение результирующей работы с учетом данных мощностей и продолжительности времени для каждого графика перемножим попарно время и мощность и получим площадь определяющую работу резания. Сведем расчет в таблицу

Для каждого режима резания было проведено 9 опытов и рассчитаны работы резания, представленные в приложении А. Пример получаемых осциллограмм приведен в приложении Б. Проведем статистическую обработку с помощью Excel, результаты сведем в таблицу 4.1

Таблица 4.1 – Описательные статистики для работы резания
ротора кустореза

№	Шифр режима резания	Средняя работа резания, Дж	Стандартная ошибка	Медиана	Стандартное отклонение	Дисперсия выборки	Уровень надежности(95,0%)
1	Нож_min_d1	32,03	1,51	31,89	4,53	20,51	4,00
2	Лезв_min_d1	17,94	1,48	18,12	4,45	19,81	3,42
3	Нож_max_d1	18,21	1,82	19,15	5,45	29,66	4,19
4	Лезв_max_d1	19,21	1,07	20,56	3,20	10,24	2,46
5	Нож_min_d1,5	26,57	0,96	27,18	2,87	8,22	2,20
6	Лезв_min_d1,5	148,97	0,61	149,24	1,81	3,31	1,39
11	Нож_min_d3_c	1543,11	10,49	1543,80	31,46	989,61	24,18
12	Лезв_min_d3_c	144,32	0,75	143,99	2,26	5,09	1,73

Таблица 4.2 – Результаты расчета работы резания ветвей ротором
с ножевым и шарнирно-сочлененным рабочим органом

№ п.п.	Шифр режима	$A_{рез}$, Дж	P_x , Вт	t , с	A_x , Дж	$A_{рез}+A_x$, Дж	Разница в %
1	Нож_min_d1	32,03	129	8	1032	1064,03	9,6
2	Лезв_min_d1	17,94	118	8	944	961,94	
3	Нож_max_d1	18,21	287	6	1722	1740,21	6,14
4	Лезв_max_d1	19,21	269	6	1614	1633,21	
5	Нож_min_d1,5	26,57	129	7	903	929,57	4,8
6	Лезв_min_d1,5	148,97	118	7	826	974,97	
11	Нож_min_d3_c	1543,11	287	7	2009	3552,11	42,9
12	Лезв_min_d3_c	144,32	269	7	1883	2027,32	

На основании расчет установлено, что при срезании отдельных ветвей у шарнирно-сочлененного и ножевого рабочих органов затраты работы отличаются на величину 5-10 %, это связано с тем что из накопленной силы инерции расходуется малая часть и ротор быстро его восполняет. В случае постоянного расхода, когда режущий элемент ударяет о ветвь, не может её срезать и снова ударят разница между ножевым и шарнирно-сочлененным рабочим органом достигает 43%.

Таблица 4.3 – Результаты расчета работы ротора при разгоне с ножевым и шарнирно-сочлененным рабочим органом

№п.п	Шифр режима	$P_{\text{пик}}$, Вт	P_x , Вт	$A_{\text{рез}}$, Дж	t, с	Разница в %
1	Нож_min	239	129	710	5	27
2	Лезв_min	208	118	559	5	
3	Нож_max	991	287	1763	5	54
4	Лезв_max	511	269	1145	5	

На основании расчета установлено, что при разгоне на минимальных оборотах для напряжения сети $U_c=110$ В рабочий орган с ножом расходует на 27 % больше энергии, а при максимальных оборотах для $U_c=210$ В нож расходует на 54 % больше работы [13].

Вид среза ветвей ножевым и шарнирно-сочлененным рабочими органами показано на рисунках 4.14-4.17.



Рисунок 4.14 – Вид среза тонкой древесины диаметром 1 см.



Рисунок 4.15 – Вид среза ветви 1,5 см



Рисунок 4.16 – Вид среза ветви диаметром 2 см



Рисунок 4.17 – Вид среза ветви диаметром 2,5 см

4.5 Оптимизация скорости подачи ротора с шарнирно-сочлененными ножами

Согласно действующему нормативному документу [11] на мелиорируемых землях существует следующая классификация древесно-кустарниковой растительности:

- редкая (до 10000 шт. на 1 га);
- средняя (10000-16000 шт. на 1 га);
- плотная (более 16000 шт. на 1 га).

Проведем расчет для полосы шириной 1м для густоты, соответствующей максимальной плотно заросшей кустарником $D=1,5$ см составляющей 30 шт. на 1м^2 . Для математического описания используем функцию случайного распределения по оси абсцисс и ординат, получим модель участка рисунок 4.18

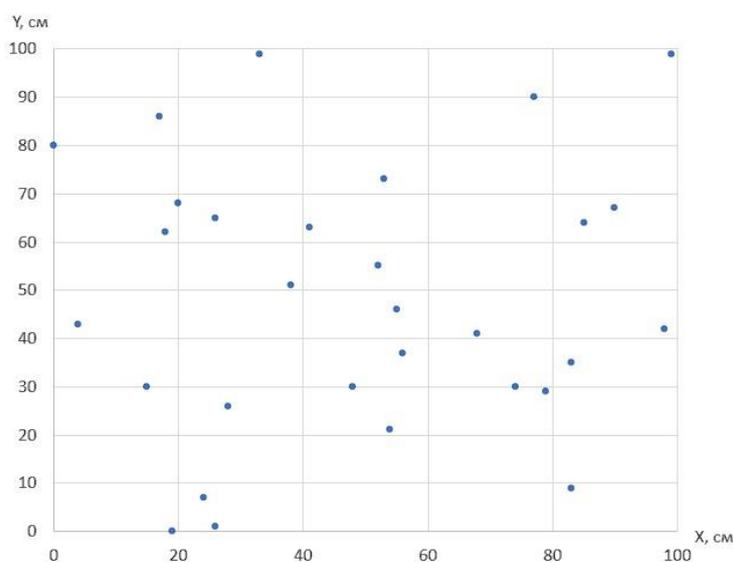


Рисунок 4.18 – Модель участка лесосеки

Проведем экстраполяцию на четвертый год и округлим полученные значения, получим диаметры ветвей 1, 1,5, 2, 2,5 см для первого, второго, третьего и четвертого года вырубki.

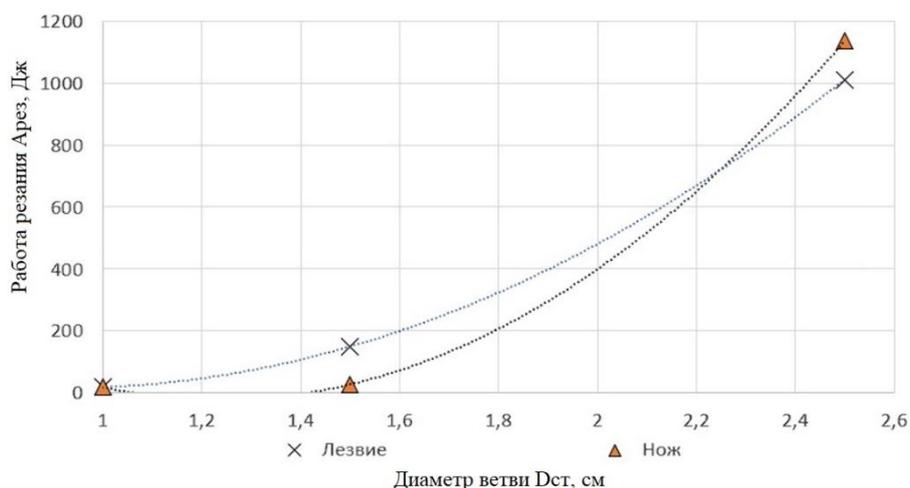


Рисунок 4.19 – Экспериментальные зависимости работы резания от диаметра ветви для ножевого и шарнирно-сочлененного (лезвие) рабочих органов

На основании полученных нами работ резания получим экспериментальную зависимость средних значений работы резания, рисунок 4.19

Для резания будем использовать роторы диаметром 22, 30, 38 см. Напишем скрипт MATLAB показанный на рисунке 4.20 и разобьем модельный участок на полосы.

```
clear all
clc
Xctv1=[83 20 26 0 15 68 24 52 17 33 98 18 85 26 41 83 56 99 79 4 55 77 54 53 90 48 28 74
38 19];
Yctv1=[35 68 65 80 30 41 7 55 86 99 42 62 64 1 63 9 37 99 29 43 46 90 21 73 67 30 26 30
51 0]; D=38; PolosaXctv1=zeros(0); PolosaYctv1=zeros(0); n=1;
for k = 1:30
    if Yctv1(k)<=D
        PolosaYctv1(n)=Yctv1(k); PolosaXctv1(n)=Xctv1(k); n=n+1;    end
    if Yctv1(k)>D && Yctv1(k)<=2*D
        PolosaYctv1(n)=Yctv1(k)-D; PolosaXctv1(n)=Xctv1(k)+100; n=n+1;    end
    if Yctv1(k)>2*D && Yctv1(k)<=3*D
        PolosaYctv1(n)=Yctv1(k)-2*D; PolosaXctv1(n)=Xctv1(k)+200; n=n+1;    end
    if Yctv1(k)>3*D && Yctv1(k)<=4*D
        PolosaYctv1(n)=Yctv1(k)-3*D; PolosaXctv1(n)=Xctv1(k)+300; n=n+1;    end
    if Yctv1(k)>4*D && Yctv1(k)<=5*D
        PolosaYctv1(n)=Yctv1(k)-4*D; PolosaXctv1(n)=Xctv1(k)+400; n=n+1;    end
end
plot(PolosaXctv1,PolosaYctv1,'o');    hold on
```

Рисунок 4.20 – Скрипт MATLAB для нарезания полосы шириной 38 см

Полученные полосы модельного участка представлены на рисунках 4.21-4.23

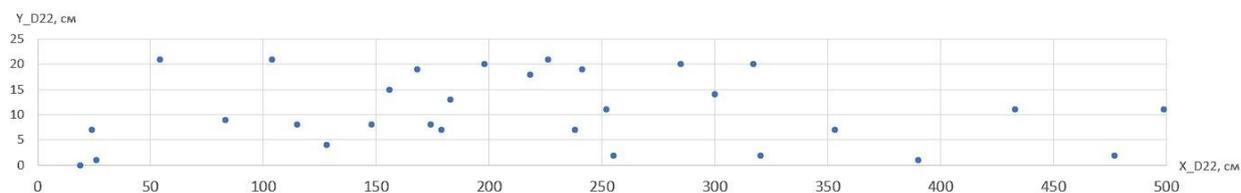


Рисунок 4.21 – Полоса модельного участка для ротора D=22 см

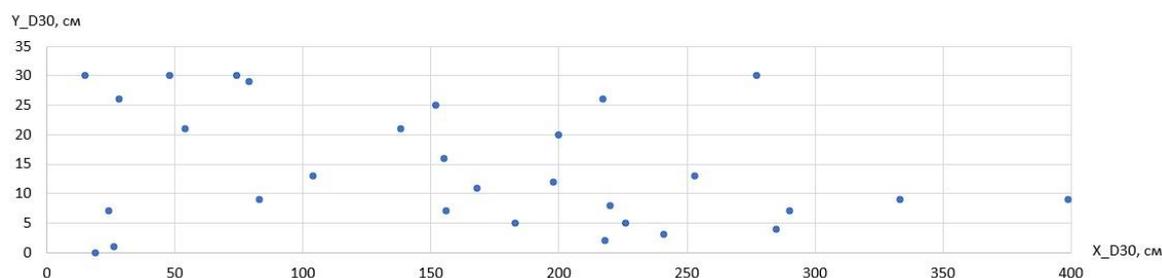


Рисунок 4.22 – Полоса модельного участка для ротора D=30 см

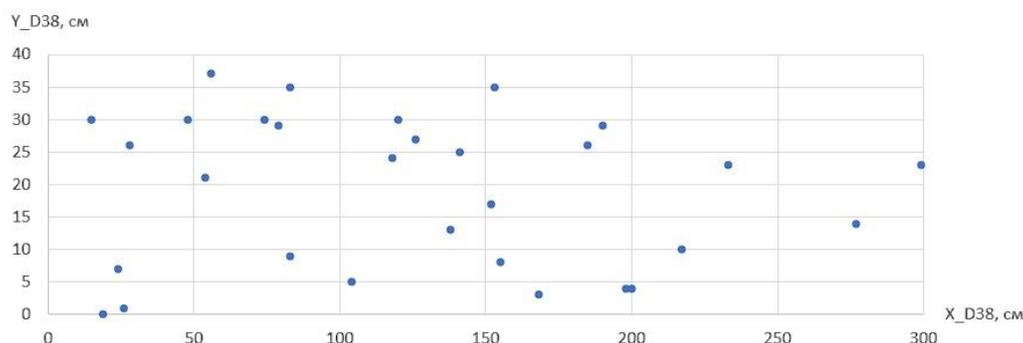


Рисунок 4.23 – Полоса модельного участка для ротора D=38 см

Целевую функцию процесса резания запишем в виде:

$$V_{\Pi}(m_p, R_p, N_{ст}, t_p, t_{\Pi}, A_{рез}) \rightarrow \max \quad (4.3)$$

Рассмотрим процесс резания шарнирно-сочлененным рабочим органом на полосе шириной 1м. Из рассмотренной классификации примем плотный тип зарастания и число ветвей константой $N_{ст}=30$ шт. На основании рисунков 4.21-4.23 видим, что чем меньше рабочая зона ротора, тем больше их нужно на раме кустореза чтобы охватить ширину срезаемой полосы. Для полосы шириной 1м количество требуемых роторов определим по формуле:

$$K_{\text{рот}} = \frac{1}{2 \cdot R_p}, \quad (4.4)$$

Полученные значения числа роторов $K_{\text{рот}}$ округляем до целых в большую сторону (учитываем перекрытие рабочей зоны).

Время разгона электродвигателя ротора t_p определим по известной формуле [35]:

$$t_p = \frac{J \cdot \omega}{\alpha \cdot M_{\text{дв}} - M_c}, \quad (4.5)$$

где J – момент инерции $J = J_{\text{дв}} + J_{\text{рот}}$, кг·м²;

$J_{\text{дв}}$ – момент инерции электродвигателя (находим из паспорта) кг·м²;

$J_{\text{рот}}$ – момент инерции рабочего органа, кг·м² (находим на основании 3D модели спроектированной нами в Solidworks);

ω – угловая скорость ротора, $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$, с⁻¹;

n – обороты электродвигателя ротора, об/мин;

α – коэффициент, учитывающий кратность среднего пускового момента по отношению к номинальному моменту электродвигателя $M_{\text{дв}}$, (находим из паспорта двигателя);

$M_{\text{дв}}$ – номинальный крутящий момент на валу двигателя (находим из паспорта двигателя), Н·м;

M_c – момент от действия сил сопротивления разгону рассчитываем по формуле, Н·м:

$$M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.6)$$

Проведем расчет для шарнирно-сочленённых рабочих органов диаметрами 22, 25, 30, 35, 38 см и соответствующей массой m_p определенной в Solidworks. Результаты расчета времени разгона представлены на рисунке 4.24.

Полученная зависимость для рассматриваемых шарнирно-сочлененных рабочих органов была аппроксимирована полиномом второй степени:

$$t_p = 2,2146 \cdot m_p^2 - 2,911 \cdot m_p + 1,5572 \quad (4.7)$$

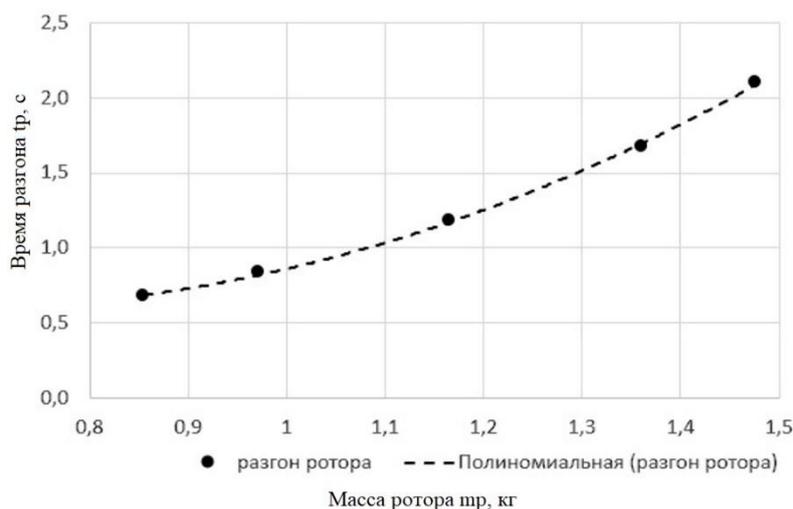


Рисунок 4.24 – Характеристики разгона рассматриваемого ротора

Целью оптимизации является установление максимальной скорости подачи кустореза с шарнирно сочлененными рабочими органами при которой развиваемой мощности этими рабочими органами будет достаточно для среза ветвей установленного диаметра.

Следует учесть, что чем больше масса рабочего органа, тем больше время разгона и в тоже время больше накопленной кинетической энергии для резания. Чем больше скорость подачи, тем большее количество стволов необходимо срезать, а значит время, отводимое на разгон, сокращается.

Запишем в виде формул постановку задачи оптимизации. Режущие возможности ротора представим в виде формулы:

$$\frac{E_k \cdot K_{\text{рот}}}{N_{\text{ст}} \cdot S} > A_{\text{рез}} \quad (4.8)$$

где E_k – кинетическая энергия накапливаемая ротором, Дж;

$N_{\text{ст}}$ – число ветвей на 1 м^2 , шт;

S – перемещение ротора по полосе шириной 1 м, (чем больше перемещение тем больше ветвей необходимо срезать) м;

$A_{\text{рез}}$ – необходимая работа резания одного ствола на основании экспериментальных исследований, Дж.

Для того чтобы рабочий орган мог срезать ветви накапливаемая им энергии в расчете на одну ветвь должна быть больше, чем требуемая поэтому второе условие примет вид:

$$\frac{A_{рез} \cdot N_{ст} \cdot t_p}{E_k \cdot K_{рот}} < 1, \quad (4.9)$$

Раскроем формулы 4.8,4.9 и получим постановку задачи оптимизации в виде системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{m_p \cdot \left(R_p \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}\right)^2 \cdot \frac{1}{2 \cdot R}}{N_{ст} \cdot V_{п} \cdot t_{п}} > A_{рез}; \\ \frac{A_{рез} \cdot N_{ст} \cdot t_p}{m_p \cdot \left(R_p \cdot \frac{\pi \cdot n}{30}\right)^2 \cdot K_{рот}} < 1; \\ 0,85 < m_p < 1,5; \\ 0,11 < R_p < 0,19; \\ 0,5 < V_{п} < 1,5; \\ N_{ст} = 30; \\ n = 2600; \\ t_{п} = 1. \end{array} \right. \quad (4.10)$$

$$V_{п}(m_p, R_p, N_{ст}, t_p, t_{п}, A_{рез}) \rightarrow \max$$

Проведем оптимизацию методом сканирования, которые реализуем в виде скрипта MATLAB, приведен на рисунке 4.25

```
clear all
clc
m=0.85:0.1:1.5;
Vpod=0.5:0.1:1.5;
Rpl=[0.11 0.125 0.15 0.175 0.19];
n=2600; Nst=30; tpod=1; Arez=250;
in=0; Save=zeros(1000,6);
for i=1:1:7
    for k=i:1:11
        for z=i:1:5
            trazg=2.1456*m(i)^2-2.911*m(i)+1.5572;
            if (m(i)*(Rpl(z)*3.14*n/30)^2*ceil(1/(2*Rpl(z))))/(Nst*Vpod(k)*tpod)> Arez &&
```

```

Arez*Nst*trazg/(m(i)*(Rpl(z)*3.14*n/30)^2*ceil(1/(2*Rpl(z))))<1
    in=in+1; Save(in,1)=m(i); Save(in,2)=Rpl(z);
Save(in,3)=ceil(1/(2*Rpl(z)));Save(in,4)=Vpod(k); Save(in,5)=trazg;
Save(in,6)=(Rpl(z)*3.14*n/30)^2;
    end
end
end
end
end

```

Рисунок 4.25 – Оптимизация скорости подачи ротора с шарнирно-сочлененными рабочими органами

В результате получим набор данных, которые экспортируем в Excel, построим по возрастанию скорости подачи и определим оптимальные значения рабочего органа. Для рассмотренного случая оптимальной является скорость подачи $V_n=1,25$ м/с которая достигается при радиусе ротора $R_p=0,19$ м, массе $m_p=1,25$ кг и количестве роторов на раме $K_{рот}=3$. Результаты расчета представлены в Приложении В.

4.6 Выводы

1. При срезании отдельных ветвей у шарнирно-сочлененного и ножевого рабочих органов затраты работы отличаются на величину 5-10 %. Работа резания отдельно стоящих ветвей на минимальных оборотах находится в пределах 960-1062 Дж, на максимальных оборотах в пределах 1600-2500 Дж.

2. При постоянной нагрузке на минимальных оборотах работа резания для ножа составляет 3552,11 Дж, для шарнирно-сочлененного рабочего органа 2027,32 Дж т.е. отличается на 42,9 %.

3. При разгоне пиковые значения мощности резания составляют $R_{пик_{Нож_min}}=239$ Вт, $R_{пик_{Лезв_min}}=208$ Вт, $R_{пик_{Нож_max}}=991$ Вт, $R_{пик_{Лезв_max}}=511$ Вт, а разница в работе резания для минимальных оборотах ($U_c=110$ В) составляет 27 % а для максимальных оборотов ($U_c=210$ В) 58 %.

4. При резании ротором с ножевым рабочим органом, как правило, происходит раскол места среза что связано с изогнутой формой на конце лезвия. При резании шарнирно-сочлененным рабочим органом срез гладкий, но при диаметрах ветвей 2-3 см происходит зажим лезвия и повышенные затраты энергии.

5. Для рассмотренного кустореза оптимальным режимом является скорость подачи $V_{п}=1,25$ м/с, частота вращения роторов 2600 об/мин, при радиусе ротора $R_{р}=0,19$ м, массе $m_{р}=1,25$ кг и количестве роторов на раме $K_{рот}=3$ шт.

5 Техничко- экономическое обоснование нового кустореза

5.1 Функциональное моделирование технологической схемы работы базовой модели кустореза

При анализе технологических схем (с последовательным выполнением основных технологических операций) работы базовой модели кустореза и проектируемой модели кустореза будет использована методология функционального моделирования, рекомендованная российским национальным стандартом Р 50.1.028-2001.

Функциональное моделирование технологических схем (с последовательным выполнением основных технологических операций) работы базовой модели кустореза и проектируемой модели кустореза, будет визуализировано посредством графической нотации IDEF0 в программном продукте Business Studio 4.0.

Графическая нотация IDEF0 позволяет формализовать и описать структуру и функции системы, а также потоки информации и материальных объектов, преобразуемые этими функциями.

С учетом ряда особенностей нами рассмотрены и проанализированы технологические схемы (с последовательным выполнением основных технологических операций) работы базовой модели кустореза и проектируемой модели кустореза. Построение функциональной модели основных технологических операций срезания в междурядьях надземной части нежелательной древесной и кустарниковой растительности базовой моделью кустореза представлены на рисунке 5.1.

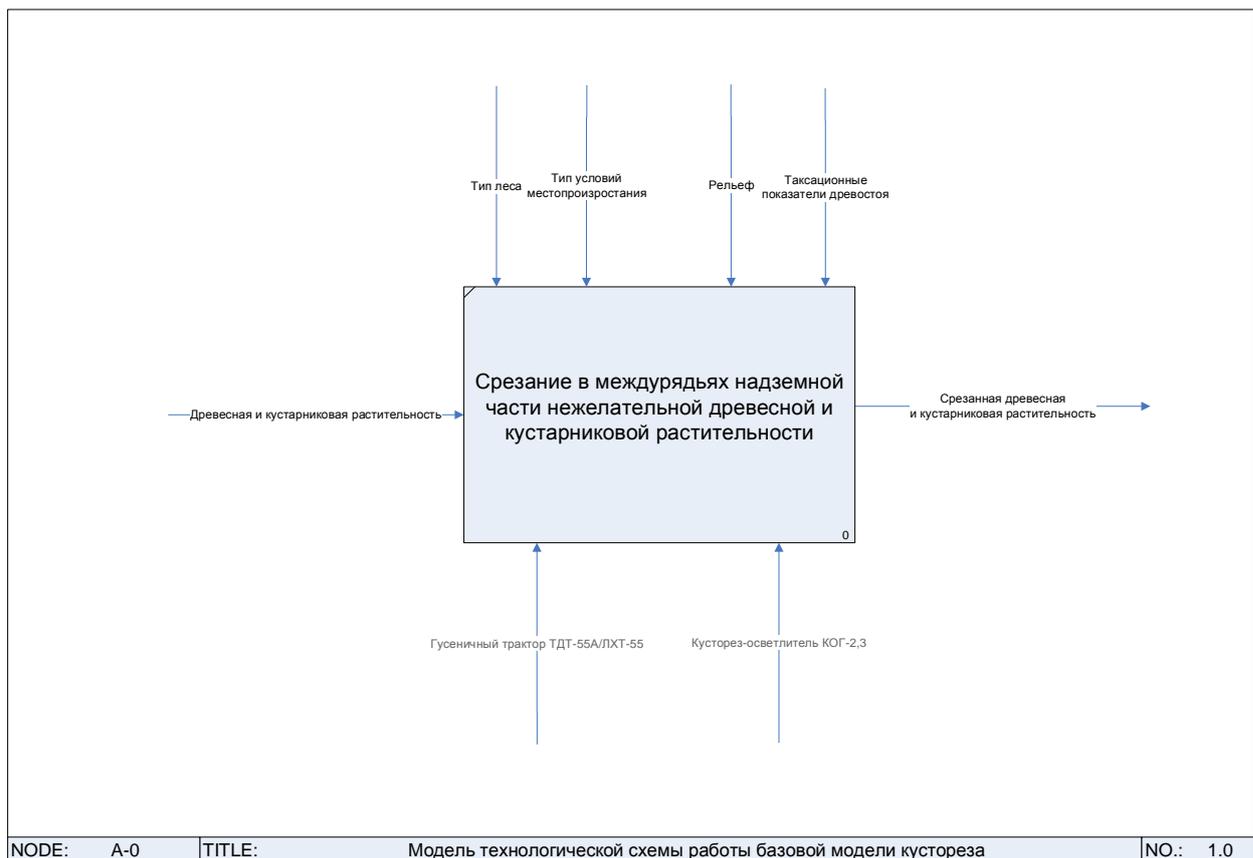


Рисунок 5.1 – Модель технологической схемы работы базовой модели кустореза

Данная диаграмма является самой верхней в иерархии процессов, на которой объект моделирования - технологическая схема работы базовой модели кустореза, представлен единственным блоком (А-0) с граничными стрелками. Граничные стрелки на диаграмме показывают:

- данные или материальные объекты, преобразующиеся или расходуемые в процессе формирования результата (входы процесса);
- данные или материальные объекты, произведенные в ходе процесса и в которые преобразуются входы (выходы процесса);
- условия, необходимые для протекания процесса, чтобы сформировать результат (управление процессом);
- средства, поддерживающие ход выполнения процесса (механизм процесса).

В организационной модели «А-0 Технологическая схема работы базовой модели кустореза» условием, необходимым для протекания процесса, чтобы

сформировать результат являются: тип леса, тип условий местопроизрастания, рельеф, таксационные показатели древостоя (структура древостоя, возраст древостоя, густота древостоя, наличие подроста и подлеска).

В представленной модели параметрами входа является нежелательная древесная и кустарниковая растительность на вырубках. Стрелка входа на диаграмме представлена как входящая в левую грань процесса.

Результатом окончания технологическая схема работы базовой модели кустореза (выход процесса) является срезанная древесная и кустарниковая растительность. Стрелка выхода на диаграмме представлена как выходящая из правой грани процесса.

Моделирование технологической схемы работы базовой модели кустореза осуществлено нами в соответствии с принципом функциональной декомпозиции, согласно которой сложный процесс представлен в виде совокупности составляющих его более простых подпроцессов, которые так же в свою очередь подвергнуты декомпозиции.

Таким образом, технологическая схема работы базовой модели кустореза включает четыре технологических операций, которые представлены на диаграмме в виде функциональных блоков (рисунок 5.2):

- А1. Проход древесной и кустарниковой растительности;
- А2. Слом, срезание древесной и кустарниковой растительности;
- А3. Предотвращение падения срезанной древесной и кустарниковой растительности;
- А4. Наклон срезанной древесной и кустарниковой растительности.

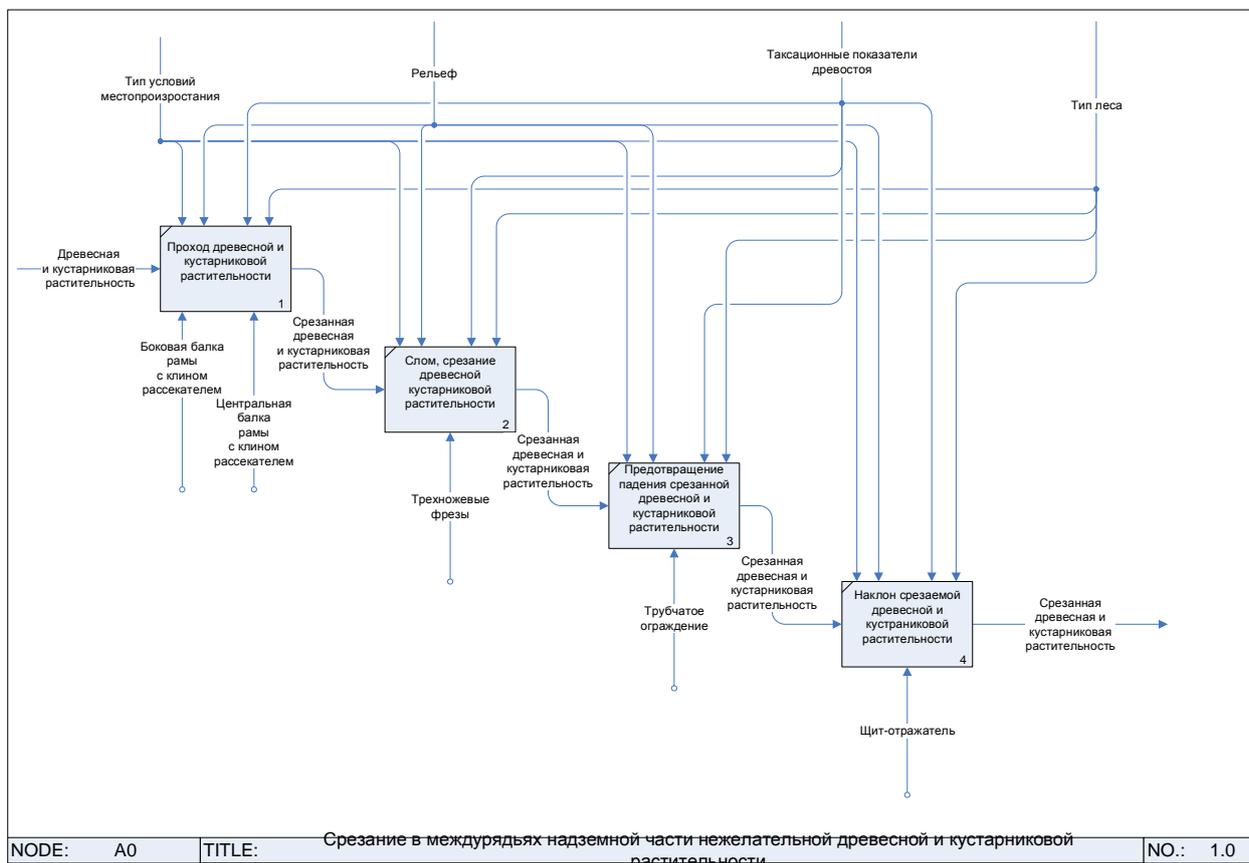


Рисунок 5.2 – Декомпозиция контекстной диаграммы на последовательность процессов «А0 Модель технологической схемы работы базовой модели кустореза»

На диаграмме декомпозиции контекстной диаграммы А0 «Модель технологической схемы работы базовой модели кустореза» функциональные блоки отображают функции системы, которые должны быть реализованы в рамках основной функции.

Блоки модели А-0 «Модель технологической схемы работы базовой модели кустореза» на диаграмме располагаются по диагонали - от левого верхнего угла диаграммы до правого нижнего в порядке присвоенных номеров. Блоки на диаграмме, расположенные вверху слева, являются «доминирующими» над блоками, расположенными внизу справа, т.е. оказывающие влияние, на другие блоки диаграммы.

5.2 Функциональное моделирование технологической схемы работы проектируемой модели кустореза

Самой верхней в иерархии процессов технологической схемы работы проектируемой модели кустореза так же является операция – Срезание в междурядьях надземной части нежелательной древесной и кустарниковой растительности. Данная диаграмма на рисунке 5.3 представлена единственным блоком (А-0) с граничными стрелками.

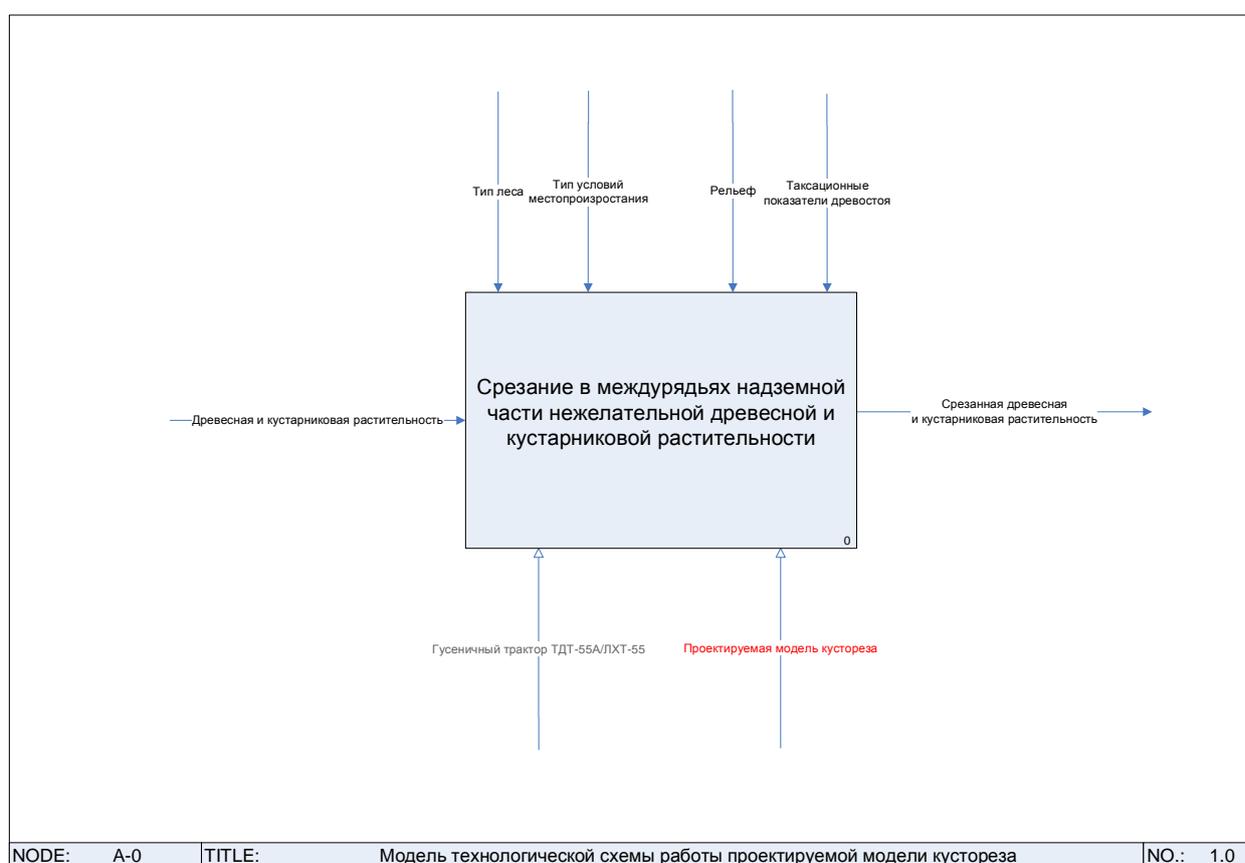


Рисунок 5.3 – Модель технологической схемы работы проектируемой модели кустореза

Технологическая схема работы проектируемой модели кустореза состоит из таких же технологических операций, выполняющихся при работе базовой модели (рисунок 5.4):

- А1. Проход древесной и кустарниковой растительности;
- А2. Слом, срезание древесной и кустарниковой растительности;

- А3. Предотвращение падения срезанной древесной и кустарниковой растительности;
- А4. Наклон срезанной древесной и кустарниковой растительности.

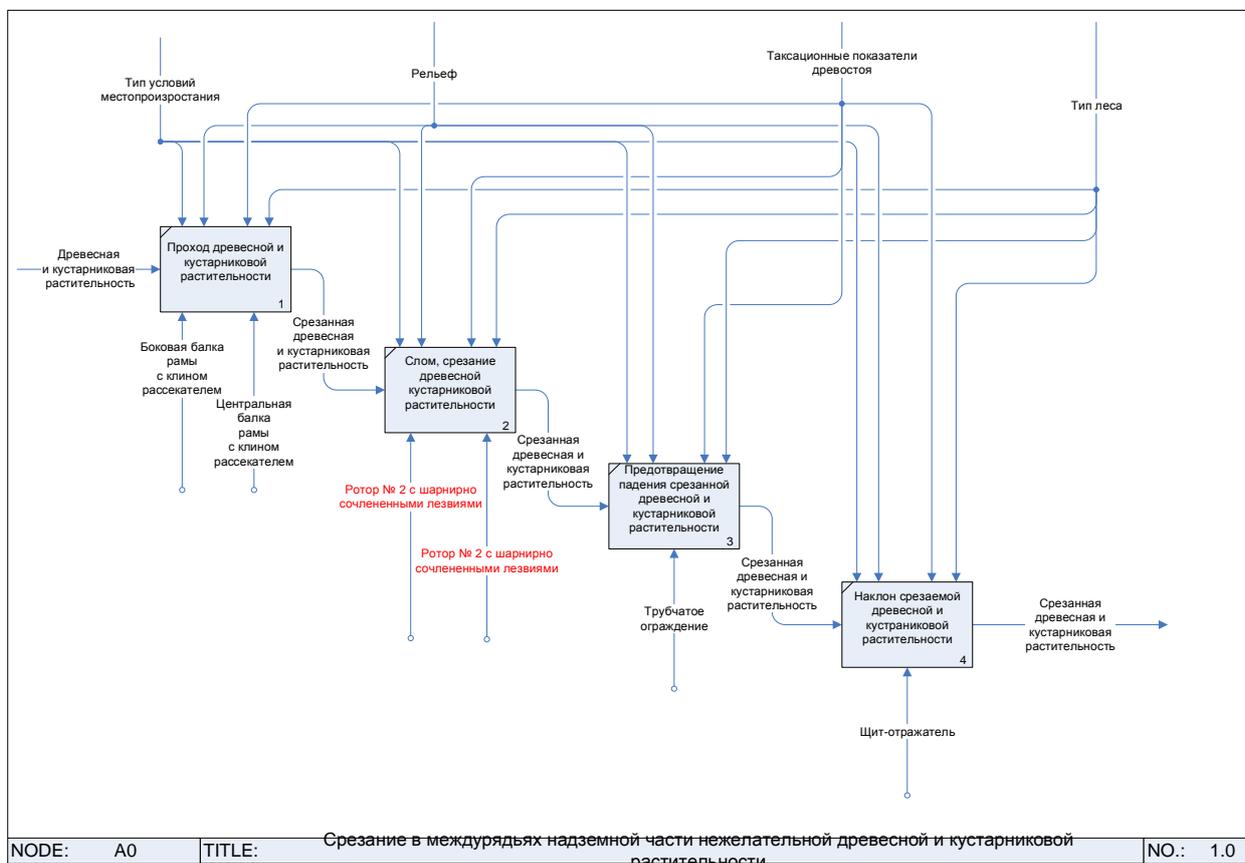


Рисунок 5.4 – Декомпозиция контекстной диаграммы на последовательность процессов «А0 Модель технологической схемы работы проектируемой модели кустореза»

Принципиальное отличие технологической схемы работы проектируемой модели кустореза заключается в том, что выполнение операции «А2. Слом, срезание древесной и кустарниковой растительности» осуществляется посредством двух роторов с шарнирно сочлененными лезвиями.

Особенностью технологической схемы работы проектируемой модели кустореза является то, что при внесении изменений в конструкцию базовой модели кустореза общий принцип действия работы не меняется, т.е. набор техно-

логических операций и их последовательность выполнения остается прежней, что и в базовой модели кустореза.

5.3 Расчет экономической эффективности применения нового кустореза

Расчет экономической эффективности от применения кустореза производился в соответствии с «Отраслевыми методическими указаниями по определению экономической эффективности использования в лесном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений», учитывая действующее законодательство. За аналог, с которым производилось сравнение экономических показателей, был принят фрезерный кусторез КОГ–2,3.

Кусторез КОГ–2,3 предназначен для осветления рядовых лесных культур на вырубках путем срезания в междурядьях нежелательной древесной и кустарниковой растительности диаметром до 5 см. Годовую загрузку проектируемого кустореза принимаем равной 70 рабочих дней в году, учитывая то, что трактора часть времени работают на посадке лесных культур, а осветление производят только в конце весны – начале лета. Экономический эффект внедрения достигается за счёт повышения эффективности процесса осветления лесных культур, путём усовершенствования конструкции кустореза.

Как показывает экономический расчет, применение нового кустореза с шарнирно-сочленённым рабочим органом для осветления лесных культур позволяет повысить производительность орудия: часовая – на 0,16 пог. км; сменная – на 1,23 пог. км; годовая – на 86,1 пог. км. Экономический эффект от применения нового кустореза составил 234964,8 рублей при сроке окупаемости 0,08 года.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Проведенный анализ конструкций указывает на предпочтение использования шарнирно-сочлененной рамы и шарнирно-сочленённого рабочего органа при проектировании кустореза, т.к. такая конструкция рамы расширяет область применения (работа на склонах), а ножи ротора обладают возможностью отклонения от непреодолимых препятствий.

2. Обзор теоретических исследований показал значительную проработку отдельных вопросов теории касаво сил резания кинематики и динамики, но исследования не сведены в единой математической среде, и потому их применение вызывает значительные сложности у инженеров. Повышение эффективности работы кустореза возможно, при применении нового шарнирно-сочленённого рабочего органа (патент №212494).

3. Предлагаемые этапы постановки задачи имитационного моделирования с использованием САПР Solidworks и ПО MATLAB Simulink позволят инженерам, не изучая большой перечень программ и языков программирования, решить задачу по проектированию и обоснованию параметров разрабатываемых конструкций машин.

4. Проведенный компьютерный эксперимент позволил рассчитать траектории тяг навески и двух ножей на роторах кусторезов. Траектории наглядно демонстрируют ширину захвата рабочих органов, движение рамы навески и колебания этих звеньев под воздействием возмущающих нагрузок, имитирующих неровности почвы. Разработанная в MATLAB имитационная модель физических процессов работы рамы и ротора кустореза позволила получить параметры функционирования машины. Определена рабочая зона резания – 0,26 м, и траектории движения ножа при воздействии на него сил резания в диапазоне от 0,8 до 20 Н·м. Рассмотрено и показано положительное влияние пружины и демпфера на снижение колебаний ножа и предотвращение его вращения вокруг своей оси на 360° .

5. При срезании отдельных порослевин у шарнирно-сочлененного рабочего органа затраты работы меньше на величину 5-10 % чем у ножевого. Работа резания отдельно стоящих порослевин на минимальных оборотах у обоих рабочих органов находится в пределах 960- 1062 Дж , на максимальных оборотах в пределах 1600-2500 Дж. При постоянной нагрузке на минимальных оборотах работа резания для ножа составляет 3552,11 Дж, а для шарнирно-сочлененного рабочего органа меньше на 42,9 % и составляет 2027,32 Дж. При разгоне пиковые значения мощности резания составляют $R_{\text{пик}_{\text{Нож}_{\text{min}}}}=239$ Вт, $R_{\text{пик}_{\text{Лезв}_{\text{min}}}}=208$ Вт, $R_{\text{пик}_{\text{Нож}_{\text{max}}}}=991$ Вт, $R_{\text{пик}_{\text{Лезв}_{\text{max}}}}= 511$ Вт, при этом работа на разгон шарнирно-сочленённого рабочего органа в сравнении с ножевым до минимальных оборотов меньше на 27 %, а до максимальных оборотов меньше на 58 %.

6. При резании ротором с ножевым рабочим органом как правило происходит раскол места среза что связано с изогнутой формой на конце лезвия. При резании шарнирно-сочлененным рабочим органом срез гладки, но при диаметрах порослевин 2-3 см происходит зажим лезвия и повышенные затраты энергии. Для предлагаемого кустореза оптимальным является скорость подачи $V_{\text{п}}=1,25$ м/с, частота вращения роторов 2600 об/мин при радиусе ротора $R_{\text{р}}=0,19$ м, массе $m_{\text{р}}=1,25$ кг и количестве роторов на раме $K_{\text{рот}}=3$ шт.

7. При анализе технологических схем (с последовательным выполнением основных технологических операций) работы базовой модели кустореза и проектируемой модели кустореза использована методология функционального моделирования, рекомендованная российским национальным стандартом Р 50.1.028-2001. Применение нового кустореза с шарнирно-сочленённым рабочим органом для осветления лесных культур позволяет повысить производительность орудия: часовая – на 0,16 пог. км; сменная – на 1,23 пог. км; годовая – на 86,1 пог. км. Экономический эффект от применения нового кустореза составил 234964,8 рублей при сроке окупаемости 0,08 года.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Азаренок, В. А. Исследование режима бесстружечного резания древесины [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук / В. А. Азаренок. – Свердловск, 1973. – 34 с.
2. Александров, В. А. Моделирование технологических процессов лесных машин [Текст]: Учебник / В.А. Александров, А.В. Александров. - СПб.: Лань, 2016. - 368 с.
3. Бартенев, И.М. Имитационная модель обрезчика ветвей в САПР / И. М. Бартенев, Л. Д. Бухтояров, В. П. Попиков, А. В. Придворова // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10. – № 1(37). – С. 153-160. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/20.
4. Бершадский, А. Л. Расчет режимов резания древесины [Текст] / А. Л. Бершадский. - Москва: Лесная промышленность, 1967. - 174 с.
5. Бершадский, А. Л. Резание древесины [Текст] / А. Л. Бершадский, Н. И. Цветкова. – Минск: Высшая школа, 1975. – 302 с
6. Борисов, И.И., Колюбин С.А. Имитационное моделирование мехатронных систем [Текст]: Учебно-методическое пособие. - Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2020. - 103 с. - экз.
7. Бурьков, Д.В. Применение IT-технологий в электроэнергетике: Matchad, MATLAB (Simulink), NI Multisim [Текст]: учебное пособие / Д.В. Бурьков, Н.К. Полуянович; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. -126 с.
8. Бухтояров, Л. Д. Разработка конструкции и обоснование параметров инерционно-рубящего рабочего органа кустореза для удаления лесной поросли : специальность 05.21.01 "Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бухтояров Леонид Дмитриевич. – Воронеж, 2004. – 197 с.
9. Вальщиков, Н. М. Рубительные машины [Текст] / Н.М. Вальщиков. – Л.: Машиностроение, 1970. – 328 с.

10. Воскресенский, С. А. Резание древесины [Текст] / С.А. Воскресенский. – М. ; Л. : Гослесбумиздат, 1955. – 199

11. ВСН 33-2.3.01-83. Нормы и правила производства культуртехнических работ / ВГПТИ "Союзоргтехводстрой" 105318, Москва, ул. Ибрагимова, 12 ЛитНИИГиМ 01.05.1984. Статус: действующий. Дата актуализации текста: 17.06.2011. – 17

12. Драпалюк, М. В. 3D модель стенда для изучения процесса резания ветвей и цифровые средства для снятия показаний / М. В. Драпалюк, Л. Д. Бухтояров, А. В. Прокудина // Цифровые технологии в лесной отрасли : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 19–20 мая 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2022. – С. 115-118. – DOI 10.34220/DTFI2022_115-118.

13. Драпалюк, М.В. Изучение мощностных показателей и качества среза шарнирно-сочлененным и ножевым рабочими органами роторного кустореза / М. В. Драпалюк, Л. Д. Бухтояров, О. А. Куницкая, А.В. Прокудина, О.И. Григорьева, Д.В. Отмахов // Системы. Методы. Технологии. – 2023. – № 2(58). – С. 7-13. – DOI 10.18324/2077-5415-2023-2-7-13

14. Драпалюк, М. В. Имитационная модель ротора кустореза с шестью лезвиями / М. В. Драпалюк, Л. Д. Бухтояров, А. В. Придворова // Лесотехнический журнал. – 2021. – Т. 11. – № 3(43). – С. 121-129. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2021.3/10.

15. Драпалюк, М. В. Методика формирования входных воздействий и алгоритм расчета силы, необходимой для резания на роторе кустореза / М. В. Драпалюк, Л. Д. Бухтояров, А. В. Придворова // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : Материалы международной научно-практической конференции, Воронеж, 08–09 июня 2021 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. – С. 345-349.

16. Драпалюк, М. В. О методике моделирования динамических систем лесных машин с помощью программного комплекса Simulink MATLAB / М. В.

Драпалюк, Л. Д. Бухтояров, А. В. Придворова // Повышение эффективности лесного комплекса : Материалы Седьмой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием, Петрозаводск, 25 мая 2021 года. – Петрозаводск: Петрозаводский государственный университет, 2021. – С. 53-54.

17. Драпалюк, М. В. Результаты исследований процесса резания ветвей ротором с шарнирно-сочлененными и жестко установленными лезвиями / М. В. Драпалюк, Л. Д. Бухтояров, А. В. Прокудина // Лесотехнический журнал. – 2022. – Т. 12. – № 2(46). – С. 80-88. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2022.2/7.

18. Захаренков, Ф. Е. Исследования процесса обрезки сучьев методом силового резания [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ф. Е. Захаренков. – Л., 1965. – 19 с.

19. Захаров, В. В. Импульсное резание древесины [Текст] / В. В. Захаров. – М. : Лесная промышленность, 1983. – 160 с.

20. Ивановский, Е. Г. Резание древесины [Текст] / Е. Г. Ивановский. – М. : Лесная промышленность, 1975. – 200 с.

21. Ивашнев, М. В. Математический анализ колебательного процесса шарнирно-закрепленного ножа роторного кустореза [Текст] / М. В. Ивашнев // Вузовская наука – региону : Материалы четвертой всерос. науч.-техн. конф. – Вологда : ВоГТУ, 2006. – Т. 1. – С. 41-43.

22. Ивашнев, М. Р. Научные основы совершенствования машин для удаления древесно-кустарниковой растительности при непрерывном движении базового трактора [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук 05.21.01 / М. Р. Ивашнев. – Петрозаводск., 2019. – 36 с.

23. Кириллов, Е. В. Исследование некоторых параметров инструментов для перерезания сучьев и древесины без образования стружки при углах встречи меньше 90° [Текст] / Е. В. Кириллов // Труды ЦНИИМЭ : сборник науч. трудов. – М., 1965. – Вып. 69. – С. 137-155.

24. Кочегаров, В. Г. Технология и машины лесосечных работ [Текст] : учебник для вузов / В. Г. Кочегаров, Ю. А. Бит, В. Н. Меньшиков. – М. : Лесная промышленность, 1990 – 392 с.

25. Крыльцов, В. Д. Аналитическое определение энергосиловых параметров ножевого бесстружечного резания древесины [Текст] / В. Д. Крыльцов. // Труды ЦНИИМЭ : сб. научн. трудов. – М., 1971. – № 120. – С. 167-183.

26. Курапцев, Н. Ф. Теоретические и экспериментальные исследования работы режущих органов бесстружечного резания древесины [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. Ф. Курапцев. – Йошкар-Ола, 1972. – 158 с.

27. Леонов, Б. А. Исследование процесса ножевой раскряжевки круглых лесоматериалов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Б. А. Леонов. – М., 1971. – 22 с.

28. Мазуркин, П. М. Обоснование параметров модульных рабочих органов лесозаготовительных машин на начальных стадиях проектирования [Текст]: дис. ... д-ра тех. наук. / П. М. Мазуркин. – Йошкар-Ола, 1995. – 403

29. Мазуркин, П.М. Основы научных исследований : учебное пособие / П. М. Мазуркин ; Федеральное агентство по образованию, Марийский гос. ун-т. - Йошкар-Ола : МарГУ, 2006. - 410 с.

30. Малюков, С. В. Обоснование рабочего процесса и параметров комбинированного рабочего органа кустореза-осветлителя лесных культур : специальность 05.21.01 "Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Малюков Сергей Владимирович. – Воронеж, 2012. – 190 с.

31. Меньшиков, В. Н. Исследование параметров рабочих органов машин для комплексной механизации рубок ухода [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Н. Меньшиков. – Л., 1970. – С. 21.

32. Некрасов, Р. М. Исследования процесса срезания сучьев при переменной скорости подачи стволов [Текст] / Р. М. Некрасов, Ю. В. Плотников // Труды ЦНИИМЭ : сборник науч. трудов. – М., 1967. – № 79. – С. 78-90.

33. Овчинников, В. В. Оборудование бесстружечной разделки лесоматериалов [Текст] / В. В. Овчинников. – М. : Лесная промышленность, 1990. – 224 с

34. Отраслевые методические указания по определению экономической эффективности использования в лесном хозяйстве новой техники, изобретений рационализаторских предложений. М.: ЦБНТИлесхоз, 1978. - 182 с.

35. Павлович, С.Н. Автоматизированный электропривод: курс лекций для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» / С. Н. Павлович. – Минск: БНТУ, 2016. - 128 с.

36. Патент № 184 195 Российская Федерация, МПК А01G23/00. Кусторез : № 2018117588 : заявл. 11.05.2018 ; опубл. 18.10.2018 / С. В. Малюков, А. А. Аксенов, В. Н. Рубанов ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО "ВГЛТУ"

37. Патент № 5,775,075 US, МПК А01D34/00. Articulated boom assembly : № 719,400 : заявл. 24.09.1996 ; опубл. 07.07.1998 / Gary D. Dannar; заявитель и патентообладатель Gary D. Dannar.

38. Патент №01997017831 WO, МПК А01D34/73. Hinged security blade for reapers: №PCT/FR96/01810: заявл. 15.11.1995 ; опубл. 15.11.1996 / Alain Forgeau; заявитель и патентообладатель Alain Forgeau

39. Патент №0337909B1 EP, МПК А01D34/66. Direktangetriebene Mähmaschine: заявл. 14.03.1989 ; опубл. 27.11.1991 / Horst M. Neuerburg; заявитель и патентообладатель Kuhn SAS

40. Патент №20180192571 US, МПК А01B39/18. Agricultural device with chain segments and related methods: № 15/403,617 : заявл. 11.06.2017 ; опубл. 12.07.2018 / James C. Paul; заявитель и патентообладатель Gulfcoast Nurseries LLC

41. Патент №2751737 US, МПК А01D34/00. Disc type mowing apparatus having pivoted blades: заявл. 25.09.1953 ; опубл. 26.07.1956 / Henderson B Herod; заявитель и патентообладатель Henderson B Herod

42. Патент №4054992 US, МПК B26B27/00. Rotary cutting assembly: № 641,969 : заявл. 18.12.1975 ; опубл. 14.10.1977 / George C. BallasThomas N. Geist; заявитель и патентообладатель White Consolidated Industries Inc WEED EATER Inc

43. Патент №419212375 US, МПК A01D55/26. Agricultural mower: № 863,641 : заявл. 23.12.1977 ; опубл. 11.03.1980 / Robert Allely; заявитель и патентообладатель Massey Ferguson Services NV

44. Патент №4403743 US, МПК B02C213/26. Articulated knife rotor assembly in a machine for reducing materials: №270,124: заявл. 03.07.1981 ; опубл. 13.09.1983 / Joseph C. V. Ducasse; заявитель и патентообладатель Fabcon Inc

45. Патент №6321518 US, МПК A01D34/00. Land clearing machine attachment: №09/473,744: заявл. 28.12.1999 ; опубл. 27.11.2001 / John P. O'Hagan; заявитель и патентообладатель John P. O'Hagan

46. Патент на полезную модель № 212494 U1 Российская Федерация, МПК A01G 23/06, A01D 34/412. Ротор кустореза : № 2022108223 : заявл. 29.03.2022 : опубл. 26.07.2022 / Л. Д. Бухтояров, М. В. Драпалюк, А. В. Прокудина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова". – EDN GMNSZT.

47. Петрова, К. А. Анализ посевной площади Северо-Западного федерального округа России [Текст] / К. А. Петрова // Наука, образование, общество : тенденции и перспективы развития : Мат. IX междунар. науч.-практ. конф. – Чебоксары : ЦНС «Интерактив плюс», 2018. – С. 138–139

48. Пижурин, А.А. Основы моделирования и оптимизации процессов деревообработки [Текст]: учебник для вузов / А.А. Пижурин, М.С. Розенблит. - М.: Лесн. пром-сть, 1988. – 296 с.

49. Побединский, В.В. Имитационное моделирование работы АЗС в среде ANYLOGIC [Текст]. Учебно-методическое пособие / В.В. Побединский, Н.С. Кузьминов, М.А. Черницын . — Екатеринбург : УГЛТУ, 2018. – 33с.

50. Поршнеv, С. В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB [Текст]: учебное пособие / С. В. Поршнеv. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург : Лань, 2011. — 736

51. Пошарников, Ф. В. Технология и машины лесовосстановительных работ [Текст]: учеб. пособие / Ф. В. Пошарников, Фед. агентство по образованию; ВГЛТА. – Воронеж, 2006. – 523 с. – ISBN 5-7994-0176-X

52. Пошарников, Ф.В. Технология и техника в лесной промышленности [Текст]: учеб. пособие. / Ф.В. Пошарников; ВГЛТА. – Воронеж, 1998. – 180 с.

53. Преловский, Б. А. Экспериментальное исследование процесса силового резания сучьев [Текст] / Б. А. Преловский // Труды ЦНИИМЭ : сборник науч. трудов. – М., 1974. – № 140. – С. 54-61.

54. Придворова, А. В. Обзор и анализ литературы и учебных пособий, положивших начало дереворезанию и удалению древесно-кустарниковой растительности / А. В. Придворова // Всероссийский форум молодых исследователей : Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции, Петрозаводск, 25 марта 2021 года. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская Ирина Игоревна), 2021. – С. 214-218.

55. Прокопьев, М. Н. Лесные культуры на концентрированных вырубках [Текст] : учеб. / М. Н. Прокопьев. – М.: Лесная промышленность, 1964. – 144 с.

56. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ [Текст] : учеб. / под ред. Е.Ю. Малиновского. – М.: Машиностроение, 1980. – 216 с.

57. Редько, Г.И. Лесные культуры [Текст] : учеб. / Г.И. Редько, А.Р. Родин, И.В. Трещевский. – М.: Агропромиздат, 1985. – 400 с.

58. Редько, Г.И. Рукотворные леса [Текст] : учеб. / Г.И. Редько, И.В. Трещевский. – М.: Агропромиздат, 1986. – 240 с.

59. Резник, Н.Е: Теория резания лезвием и основы расчёта режущих аппаратов. Монография. - М: Машиностроение, 1975. -311 с.

60. Рубцов, В. И. Биологическая продуктивность сосны в лесостепной зоне [Текст] : учеб. / В. И. Рубцов [и др.]. – М.: Наука, 1976. – 224 с.
61. Рубцов, В. И. Культуры сосны в лесостепи [Текст] : учеб. / В. И. Рубцов; изд. 2-е. – М.: Лесная промышленность, 1969. – 288 с.
62. Рубцов, В. И. Культуры сосны в лесостепи центрально-черноземных областей [Текст] : учеб. / В. И. Рубцов. – М.: Лесная промышленность, 1964. – 316 с.
63. Руководство по лесовосстановлению и лесоразведению в лесостепной, степной, сухостепной и полупустынной зонах европейской части Российской Федерации [Текст] : учеб. / – М.: Всероссийский научно-исследовательский информационный центр по лесным ресурсам. 1994. – 152 с.
64. Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента [Текст]: справочное руководство / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
65. Рушнов, Н. П. Рубительные машины [Текст] / Н. П. Рушнов, Э. П. Лицман, Е. А. Пряхин. – М.: Лесная промышленность, 1985. – 208 с.
66. Самарский, А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры [Текст] /А.А. Самарский, А.П. Михайлов 2-е.изд., испр. – М.:Физматлит, 2001. -320 с.
67. Самарцев, А. Я. Комплексная механизация в защитном лесоразведении [Текст] : учеб. / А. Я. Самарцев. – Саратов, Приволж. кн. изд., 1973. – 160 с.
68. Самарцев, А. Я. Комплексная механизация рубок ухода в защитных лесонасаждениях [Текст] / А. Я. Самарцев // «Лесное хозяйство». – 1993. – №5. – С. 49–50.
69. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614081 Р.Ф. Имитационная модель кустореза с улавливателями ветвей [Текст] / С.В.Малюков, И.М. Бартенев, В. В. Посметьев. – № 2011612237 ; заявл. 01.04.2011 ; опубл. 25.05.2011.
70. Силаев, Г.В. Технологический комплекс машин для создания лесных культур на вырубках [Текст] : учеб.пособ. / Г.В. Силаев; лабораторный практикум. Для студентов специальности 31.12. – М.: МГУЛ, 1988. – 43 с.

71. Синеоков, Г. Н. Теория и расчет почвообрабатывающих машин [Текст] : учеб. / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М.: Машиностроение, 1977. – 328 с.

72. Система машин для комплексной механизации сельскохозяйственного производства на 1986–1995 годы [Текст] : учеб. / Часть IV. Лесное хозяйство и защитное лесоразведение. Государственный агропромышленный комитет СССР. – М.: Машиностроение, 1988. – 208 с.

73. Сляднев, А. П. Комплексный способ выращивания сосновых насаждений [Текст] : учеб. / А. П. Сляднев. – М.: Лесная промышленность, 1971. – 104 с.

74. Смирнов, Н. А. Создание культур сосны саженцами [Текст] / Н. А. Смирнов, Н. С. Прошин // Физиолого-лесоводственное обоснование технологии создания культур хвойных пород на вырубках: Сб. науч. трудов. – М.:ВНИИЛМ, 1977. – С.98–105.

75. Советов, Б. Я. Моделирование систем [Текст] : учеб. пособие / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 1998. – 319 с.

76. Солдатов, А. Г. Выращивание высокопродуктивных дубрав [Текст] : учеб. / А. Г. Солдатов. – М.: Сельхозиздат, 1961. – 175 с.

77. Справочник лесохозяйственных машин, оборудования и приборов, разработанных ВНИИЛМ, ЦОКБлесхозмаш, С.– П.НИИЛХ, Вырицким ОМЗ, ВНИИПОМлесхоз и рекомендованных в производство [Текст] : учеб./ Под ред. В.И. Казакова. – М.: Пушкино, 2001. – 134 с.

78. Суворов, В.И. Особенности морфологии, физиологии и роста ели и сосны в культурах на вырубках с суглинистыми почвами в зависимости от условий почвенного и светового питания [Текст] / В.И. Суворов // Физиолого-лесоводственное обоснование технологии создания культур хвойных пород на вырубках: Сб. науч. трудов. – М.:ВНИИЛМ, 1977. – С. 3–49.

79. Сумецкий, И. Ш. Классификация машин для сводки древесно-кустарниковой растительности [Текст] / И. Ш. Сумецкий // Строительные и дорожные машины. –1988. – №4. – С. 14–16.

80. Тарасик, В.П. Математическое моделирование технических систем [Электронный ресурс]: доп. УМО вузов РФ по образованию в области транс-

портных и транспортно-технологических машин в качестве учебника для студентов / В.П. Тарасик. — Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2017. — 592 с. - ЭБС "Знаниум".

81. Технологии и машины удаления поросли, порубочных остатков и пней на вырубках / Бартенев И.М., Малюков С.В.; ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2010. – 82с. – Библиогр.: 130 назв. Рус. Деп. в ВИНТИ.

82. Тимохин, А.Н. Моделирование систем управления с применением Matlab: [Текст] учеб. пособие / А.Н. Тимохин, Ю.Д. Румянцев; под. ред. А.Н. Тимохина. – М.: ИНФРА-М, 2019. – 256 с.

83. Типовые нормы выработки на лесокультурные работы, выполняемые в равнинных условиях [Текст]. – М.: Лесная пром-сть, 1989. – 95 с.

84. Ткаченко, М. Е. Общее лесоводство [Текст] : учеб. / М. Е. Ткаченко. – М. – Л.: Гослесбумиздат, 1952. – 600 с.

85. Тришин, В. С. Техническое нормирование труда в лесном хозяйстве [Текст] / В. С. Тришин, М. М. Бороздин. – М.: Лесная пром-сть, 1965. – 231 с.

86. Трус, М. В. Влияние рубок ухода на состав и показатели фитомассы в молодняках дуба [Текст] / М. В. Трус; Сб. науч. работ / Саратов. госуд. с.-х. академия. – Саратов, 1994. – С. 29–32.

87. Федоров, В.В. Теория оптимального эксперимента [Текст] : учеб. / В.В. Федоров. – М.: ГРФМЛ изд-ва Наука, 1971. – 312 с.

88. Финни, Д. Введение в теорию планирования экспериментов [Текст] : учеб. / Д. Финни. – М.: ГРФМЛ изд-ва Наука, 1970. – 287 с.

89. Ханбеков, И. И. Технология и техника рубок ухода за лесом в горных лесах [Текст] / И. И. Ханбеков, Г. Н. Гигаури; В кн.: Проблемы рубок ухода: Сборник Материалов конференции Международного союза лесных исследовательских организаций (ИЮФРО). – М.: Лесная промышленность, 1987. – С. 184–192.

90. Ханбеков, И.И. Лесовосстановление и рубки в горных лесах [Текст] : учеб. / И.И. Ханбеков; 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1987. – 159 с.

91. Цыплаков, В. В. О доступности вырубок степной и лесостепной зон Поволжья для лесокультурной техники [Текст] / В. В. Цыплаков // Лесное хозяйство, лесомелиорация и охрана природы: Сб. науч. работ / Сарат. СХИ. – Саратов, 1993. – С. 103–109.
92. Цыплаков, В. В. О реконструкции осинников [Текст] / В. В. Цыплаков, М. Ю. Корниенко; Сб. науч. работ/Сарат. госуд. с.–х. академия им. Н. И. Вавилова. – Саратов, 1994. – С. 47–53.
93. Четыркин, Е. Н. Статистические методы прогнозирования [Текст] : учеб./ Е. Н. Четыркин. – М.: Статистика, 1975. – 200 с.
94. Чикуров, Н.Г. Моделирование систем и процессов [Текст]: учеб. пособие / Н.Г. Чикуров. – М.:РИОР: ИНФРА-М, 2019. – 398 с.
95. Шапкин, О.М. Интенсификация искусственного лесовосстановления [Текст] : учеб. / О.М. Шапкин. – М.: Лесная промышленность, 1983. – 152 с.
96. Шегельман, И. Р. Повышение эффективности удаления древесно-кустарниковой растительности при непрерывном движении лесной машины / И. Р. Шегельман, М. В. Ивашнев, П. В. Будник // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 3(30). – С. 79.
97. Шелгунов, Ю.В. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства [Текст] : учеб. / Ю.В. Шелгунов, Г.М. Кутуков, Г.П. Ильин. – М.: Лесная промышленность, 1982. – 453 с.
98. Шипилин, Н. А. Исследование процесса резания сучьев на ели клиновидным резцом при прямолинейном движении [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н. А. Шипилин . – М., 1969. – 19 с.
99. Шутов, И. В. Арборициды при реконструкции малоценных молодняков [Текст] / И. В. Шутов // «Лесное хозяйство». – 1965. – №4. – С. 18 – 19.
100. Юнаш, Г. Г. Опыт восстановления дуба в малоценных лиственных молодняках [Текст] / Г. Г. Юнаш // «Лесное хоз-тво». – 1952. – № 1. – С. 42–46.
101. Яковлев, А. С. Рубки ухода в культурах дуба черешчатого [Текст] / А. С. Яковлев // «Лесное хозяйство». – 1990. – №1. – С. 27–28.

102. Bukhtoyarov L D, Maksimenkov A I, Lysych M N and Abramov V V 2020 Movement simulation of flexible working body links in the Unity cross-platform development environment. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. **595** 012014 DOI: 10.1088/1755-1315/595/1/012014.

103. Bukhtoyarov, L. D. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package / L. D. Bukhtoyarov, M. V. Drapalyuk, A. V. Pridvorova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 09–10 сентября 2021 года. – Voronezh, 2021. – P. 12004. – DOI 10.1088/1755-1315/875/1/012004. – EDN BTJUB

104. Chen Y, Huang M F, Shi B, Xiao M M, Hu R K & Tang J S 2012 Kinematic Analysis and Simulation of an A/C Axes Bi-Rotary Milling Head with Zero Transmission. *Advanced Materials Research*, **625** 146 doi:10.4028/www.scientific.net/amr.625.146.

105. Debroussallage et abattage des petits bois // Forests de France. – 1975. – №190. – p. 24–25.

106. Effects of orchard mulching with reflective mulch on apple tree canopy irradiation and fruit quality Augustyn Mika, Waldemar Treder, Zbigniew Buler, Krzysztof Rutkowski and Barbara Michalska // *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*. – 2007. – Vol. 15. – С. 41–53.

107. Gennine clearing saws come from Husqvarna – the clearing saw professionals. Проспект фирмы Husqvarna (Швеция).

108. Kadvi.ru Публичное Акционерное Общество "Калужский двигатель" - URL:<http://kadvi.ru/product/kosilka-k-ugre/> (дата обращения: 18.08.2021).

109. Lichao Xu, Yong Che, Rong Zhu, Jing Zhu and Rui Zhang 2021 Design and Simulation of Chopping Device of Straw Returning Machine IOP Publishing Ltd Phys.: Conf. Ser. 1748 062066 DOI:10.1088/1742-6596/1748/6/062066.

110. Lin Y., Xue Q. Effects of mulching models and wheat roots on distribution of soil antagonistic actinomycetes // Chinese Journal of Applied and Environmental Biology. – 2009. – Т. 15. – № 1. – С. 35–38.

111. Malyukov, S. V The wood shoots removing mechanisms applied in the forests [Текст] / S. V. Malyukov, N. I. Bazarskaya // Актуальные проблемы лесного комплекса»: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. проф. Л. Т. Свиридова. – Воронеж, 2010. – Вып. 1. – Т. 2. – С. 168–171. Figures 3. References bibliography: 4 art.

112. Planting time and mulching effect on onion development and seed production M. Anisuzzaman, M. Ashrafuzzaman, Mohd. Razi Ismail, M. K. Uddin and M. A. Rahim // African Journal of Biotechnology. – 2009. – Vol. 8 (3). – С. 412–416.

113. Robinson T.L. Effect of tree density and tree shape on light interception, tree growth, yield and economic performance of apples // 8-th International Symposium On Integrating Canopy. Rootstock and environmental physiology in orchard systems. 13–18 June 2004, Budapest-Hungary, p. 79.

114. Vangdal E., Hjeltnes S.H., Meland M. Reflective mulch (extenday) in fruit orchards; preliminary results // 8-th International Symposium on Integrating Canopy. Rootstock and environmental physiology in orchard systems. 13–18 June 2004, Budapest-Hungary, p. 159.

Таблица А1 – Статистические данные резания ветвей диаметром 1,5...3 см ножевым и шарнирно-сочлененным рабочими органами

№	А рез Нож_min_d1, Дж	А рез Лезв_min_d1, Дж	А рез Нож_max_d1, Дж	А рез Лезв_max_d1, Дж	А рез Нож_min_d1,5, Дж	А рез Лезв_min_d1,5, Дж	А рез Нож_min_d3_с, Дж	А рез Лезв_min_d3_с, Дж
1	38,56	17,29	12,34	20,83	20,52	149,20	1558,08	145,22
2	29,83	21,46	16,64	12,20	27,18	149,24	1482,49	143,62
3	30,67	16,84	19,74	19,19	25,47	144,98	1509,08	148,35
4	22,99	13,69	18,86	20,56	27,84	149,50	1564,65	139,94
5	30,34	19,58	19,15	17,40	24,50	148,54	1543,80	144,00
6	36,74	25,12	8,39	20,84	27,54	151,72	1542,28	143,86
7	31,89	19,70	20,47	21,07	29,40	150,08	1541,38	146,14
9	35,02	9,64	20,68	23,24	30,14	148,03	1590,31	143,99

Осциллограммы лабораторных исследований процесса резания

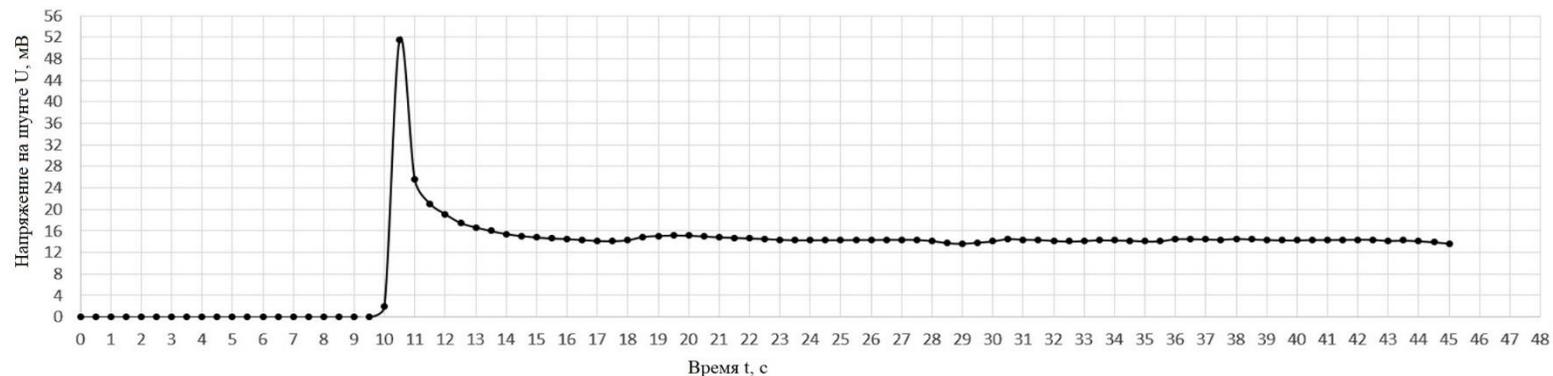


Рисунок Б1 – Осциллограмма, снятая мультиметром $U_c=110$ В, $d_B=1$ см, $W_B=11$ % ножевой рабочий орган

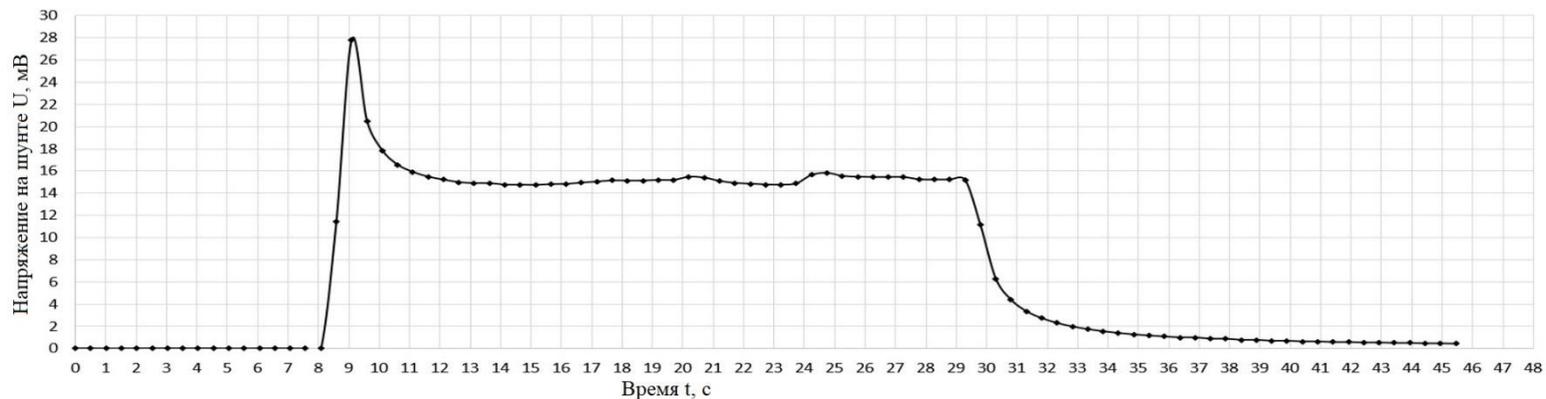


Рисунок Б2 – Осциллограмма, снятая мультиметром $U_c=110$ В, $d_B=1$ см, $W_B=11$ % шарнирно-сочлененный рабочий орган

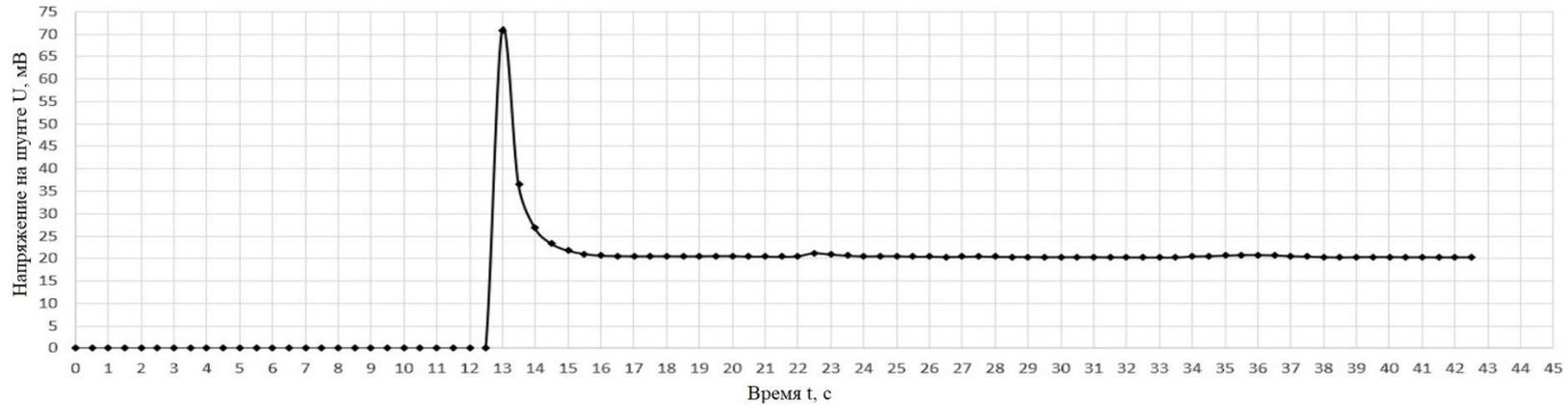


Рисунок Б3 – Осциллограмма, снятая мультиметром $U_c=220$ В, $d_b=1$ см, $W_b=10$ % ножевой рабочий орган

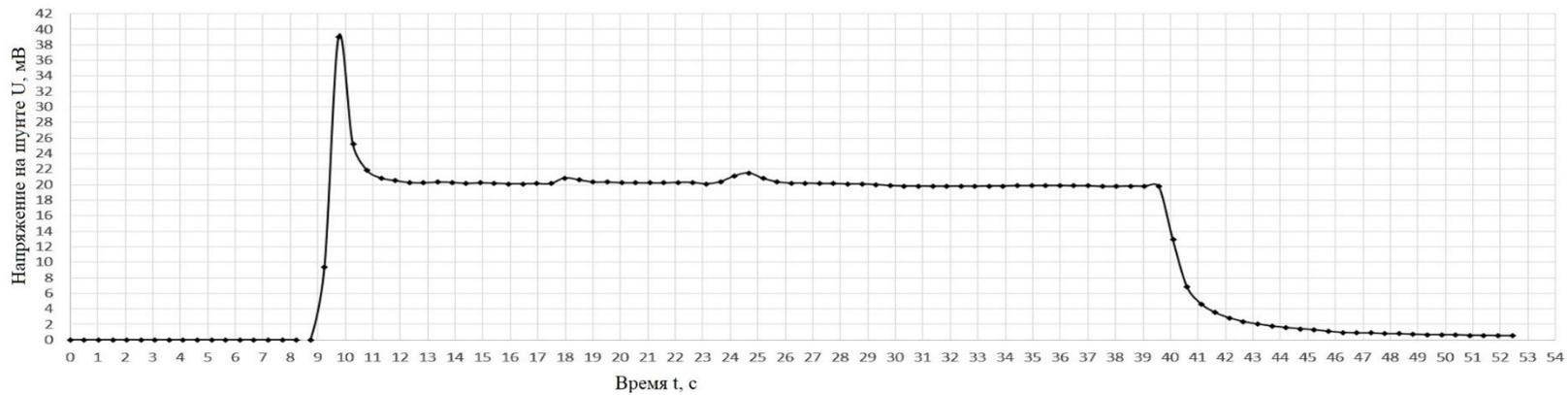


Рисунок Б4 – Осциллограмма, снятая мультиметром $U_c=220$ В, $d_b=1$ см, $W_b=10$ % шарнирно-сочлененный рабочий орган

продолжение приложения Б

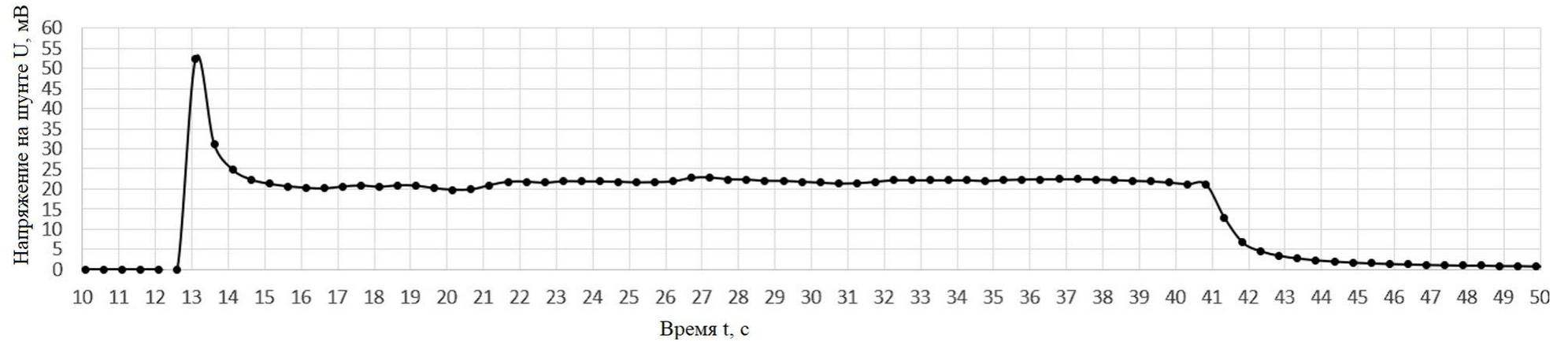


Рисунок Б5 – Осциллограмма, снятая мультиметром $U_c=110$ В, $d_b=1,5$ см, $W_b=92\%$ ножевой рабочий орган

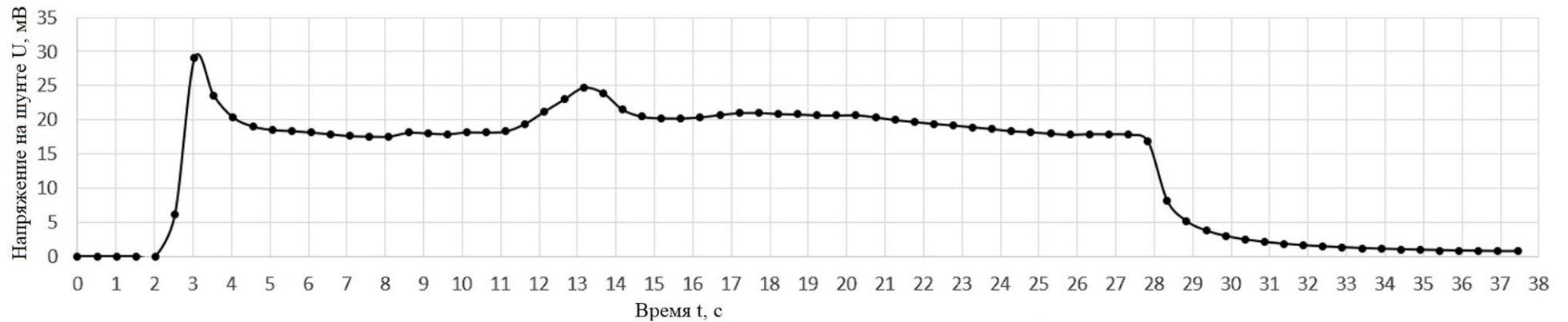


Рисунок Б6 – Осциллограмма, снятая мультиметром $U_c=110$ В, $d_b=1,5$ см, $W_b=92\%$ шарнирно-сочлененный рабочий орган

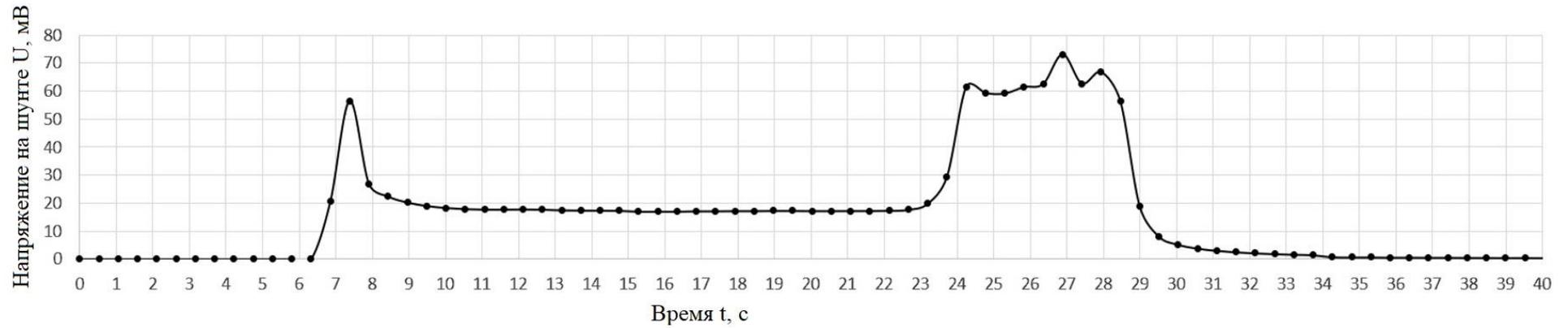


Рисунок Б7 – Осциллограмма, снятая мультиметром $U_c=110$ В, $d_B=3$ см, $W_B=92$ %. ножевой рабочий орган

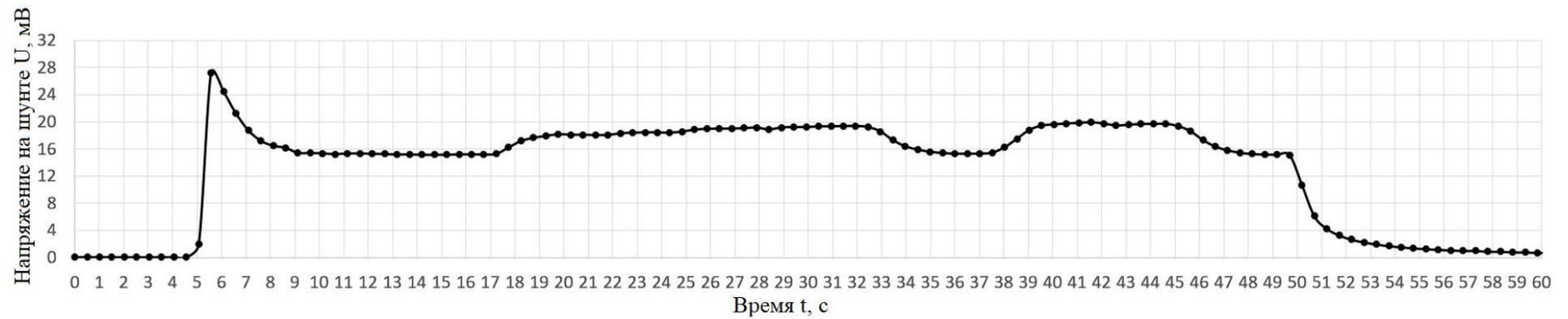


Рисунок Б8 – Осциллограмма, снятая мультиметром $U_c=110$ В, $d_B=3$ см, $W_B=92$ %. шарнирно-сочлененный рабочий орган

Таблица В1 – Результаты расчета максимальной скорости подачи
методом сканирования для $A_{рез}=250$ Дж

№	Vп, м/с	m, кг	R, м	n, шт		№	Vп, м/с	m, кг	R, м	n, шт
1	0,5	0,85	0,15	4		23	0,7	1,05	0,15	4
2	0,5	0,85	0,175	3		24	0,7	1,05	0,175	3
3	0,5	0,85	0,19	3		25	0,7	1,05	0,19	3
4	0,6	0,85	0,15	4		26	0,8	1,05	0,15	4
5	0,6	0,85	0,175	3		27	0,8	1,05	0,175	3
6	0,6	0,85	0,19	3		28	0,8	1,05	0,19	3
7	0,7	0,85	0,15	4		29	0,9	1,05	0,15	4
8	0,7	0,85	0,175	3		30	0,9	1,05	0,175	3
9	0,7	0,85	0,19	3		31	0,9	1,05	0,19	3
10	0,8	0,85	0,19	3		32	1	1,05	0,19	3
11	0,9	0,85	0,19	3		33	1,1	1,05	0,19	3
12	0,6	0,95	0,15	4		34	0,8	1,15	0,19	3
13	0,6	0,95	0,175	3		35	0,9	1,15	0,19	3
14	0,6	0,95	0,19	3		36	1	1,15	0,19	3
15	0,7	0,95	0,15	4		37	1,1	1,15	0,19	3
16	0,7	0,95	0,175	3		38	1,2	1,15	0,19	3
17	0,7	0,95	0,19	3		39	0,9	1,25	0,19	3
18	0,8	0,95	0,15	4		40	1	1,25	0,19	3
19	0,8	0,95	0,175	3		41	1,1	1,25	0,19	3
20	0,8	0,95	0,19	3		42	1,2	1,25	0,19	3
21	0,9	0,95	0,19	3		43	1,3	1,25	0,19	3
22	1	0,95	0,19	3						

Расчет экономической эффективности от применения кустореза производился в соответствии с типовой методикой [34]

Исходные данные для экономических расчетов приведены в таблице Г1.

Таблица Г1 – Исходные данные для расчёта основных показателей экономической эффективности при модернизации кустореза

Наименование показателя	Единицы измерения	Базовая модель	Проект. модель
Цена орудия	руб.	300000	318000
Часовая производительность орудия	пог. км/час	1,53	1,69
Время смены	час	8	8
Число смен		1	1
Годовая загрузка орудия	дни	70	70
Цена трактора	руб.	3750000	3750000
Годовая занятость трактора на всех видах работ	час	1000	1000
Количество обслуживающего персонала/разряд	Чел/разряд	1/v	1/v
Часовая тарифная ставка 1 разряда	руб.	20,6	20,6
Коэффициент, учитывающий надбавки и доплаты		2	2
Дополнительная зарплата	%	10	10
Страховые взносы	%	30	30
Отчисления по травматизму	%	0,9	0,9
Отчисления на амортизацию:	%		
– по орудию		14,3	14,3
– по трактору		25	25
Отчисления на ТО и ремонт:	%		
– по орудию		23	23
– по трактору		39	39
Комплексная цена нефтепродуктов	руб.	48,6	48,6
Расход горючего на единицу выработки	кг	2,04	2,1
Нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений		0,15	0,15

Таблица Г2 – Показатели экономической эффективности внедрения проектируемого варианта

Показатели	Единицы измерения	Варианты	
		Базовый	проектируемый
Производительность орудия:	пог. км		
– часовая		1,53	1,69
– сменная		12,27	13,5
– годовая		858,9	945
Текущие затраты, приходящиеся на единицу выработки	руб.	2193,91	2013,03
Удельные капитальные вложения	руб.	5186,9	4735,2
Годовой экономический эффект	руб.	–	234964,8
Коэффициент экономической эффективности		–	11,87
Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений	лет	–	0,08

Как показывает экономический расчет, применение нового кустореза с шарнирно-сочленённым рабочим органом для осветления лесных культур позволяет повысить производительность орудия: часовая – на 0,16 пог. км; сменная – на 1,23 пог. км; годовая – на 86,1 пог. км. Экономический эффект от применения нового кустореза составил 234964,8 рублей при сроке окупаемости 0,08 года.

РЕКОМЕДОВАНО:
 Учебно-методической комиссией
 Протокол № 3 от 10.11.2022.
 Председатель УМК по направлению
 «Технологические машины и
 оборудование»
 к.т.н. доц. Четверикова И.В.



АКТ

О внедрении в учебный процесс на кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин разработок по разделу «Повышение эффективности рабочих процессов и обоснование параметров конструкции машин и оборудования для лесовосстановления, ухода за насаждениями и придорожными территориями, транспортировки, переработки древесины с совершенствованием привода исполнительных механизмов», предусмотренной госбюджетной тематикой кафедры «Разработка технологий и техники для лесовосстановления и защиты лесов от пожаров с обоснованием типа и параметров рабочих органов проектируемых машин на основе цифровых методов моделирования» и согласно развернутому плану кандидатской диссертации аспиранта Прокудиной А.В. на тему «Обоснование параметров и режимов работы ротора кустореза с установленными на нем неподвижными и шарнирно-сочленёнными ножами»

1. Научный руководитель – д.т.н. проф. Драпалюк М.В.
2. Ответственный исполнитель – аспирант Прокудина А.В.
3. Наименование разделов темы, выполненной аспирантом:

- а) теоретические исследования рабочего процесса и параметров ротора кустореза с неподвижными и шарнирно-сочленёнными ножами;
- б) экспериментальные исследования.

4. Краткое описание результатов внедрения, конечный результат.

Разработана имитационная модель и новая конструкция ротора кустореза, позволяющая повысить эффективность процесса резания тонкомерной древесно-кустарниковой растительности.

Внедрение по дисциплинам: «Теория и конструкция технологических машин и оборудования лесного комплекса».

5. Влияние на качество подготовки бакалавров и магистров: результаты исследований повышают уровень учебного процесса и качество подготовки бакалавров.

6. Эффект от внедрения: использование указанных результатов позволяет повысить качество и эффективность проектирования машин с активными рабочими органами роторного типа для проведения осветлений лесных культур..

Зав. кафедрой МЛХ и ПМ, к.т.н., доцент

 Дружинин Д.Ю.

Научный руководитель, д.т.н., профессор

 Драпалюк М.В.

Ответственный исполнитель, аспирант

 Прокудина А.В.

«Утверждаю»

Руководитель СГБУ ВО

«Воронежский лесопожарный центр»

Пахомов Ю.Н.

2023 г.

АКТ

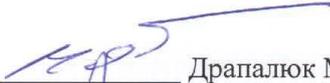
О внедрении законченной научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представители *Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г. Ф. Морозова* в лице *руководителя научно-исследовательской работы, доктора технических наук, профессора Драпалюка М.В.*, ответственного исполнителя в лице аспиранта *кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ Прокудиной А.В.* и представитель Специализированного государственного бюджетного учреждения Воронежской области «Воронежский лесопожарный центр» в лице руководителя Пахомова Ю.Н., составили акт о том, что результаты научно-исследовательской работы на тему «*Обоснование параметров ротора кустореза с шарнирно-сочлененными ножами для осветления лесных культур на вырубках*», выполненной кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова, использованы при выполнении работ по осветлению лесных культур и совершенствованию технических средств для ухода за создаваемыми лесонасаждениями.

Внедрение результатов исследования даст возможность предприятиям (организации) получить следующий технико-экономический эффект: повысить качество выполнения агролесоводственных уходов за лесными культурами за счет эффективного удаления нежелательной древесно-кустарниковой растительности кусторезом с ножевыми рабочими органами.

Замечания и предложения о дальнейшей работе по внедрению:
продолжить исследования в области совершенствования технологического
процесса и разработки конструкций кусторезов и работы по их внедрению в
серийное производство.

Ректор ФГБОУ ВО
«ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова»
д.т.н., проф.



(подпись) Драпалюк М.В.

Ответственный исполнитель
аспирант



(подпись) Прокудина А.В.

«Утверждаю»
 Главный инженер
 Инжинирингового центра
 ВГЛТУ, к.т.н.
 Лысыч М.Н.
 « 19 » августа 2022г.



Акт

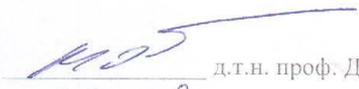
О внедрении научно-исследовательской работы

Мы, нижеподписавшиеся, представитель Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова в лице руководителя научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы, доктора технических наук Драпалюка М.В., ответственного исполнителя в лице аспиранта кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Прокудиной А.В. и представитель инжинирингового центра ВГЛТУ в лице главного инженера, кандидата технических наук Лысыча М.Н., составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской работы на тему «Обоснование параметров и режимов работы ротора кустореза с установленными на нем неподвижными и шарпирно-сочленёнными ножами», выполненной на кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова в 2022 г., использованы при проектировании экспериментального образца чеканчика, путем использования имитационной модели рабочего процесса.

Внедрение результатов исследования дало возможность инжиниринговому центру получить следующий технико-экономический эффект: за счет использования имитационной модели рабочего процесса ротора кустореза удалось сократить сроки проектирования чеканчика.

Замечания и предложения по дальнейшей работе по внедрению: продолжить работу по совершенствованию роторов кустореза, предназначенных для срезания тонкомерной древесно-кустарниковой растительности.

Научный руководитель


 д.т.н. проф. Драпалюк М.В.
 (подпись)

Исполнитель/аспирант


 Прокудина А.В.
 (подпись)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 212494

Ротор кустореза

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова" (RU)*

Авторы: *Бухтояров Леонид Дмитриевич (RU), Драпалюк Михаил Валентинович (RU), Прокудина Анастасия Викторовна (RU)*

Заявка № 2022108223

Приоритет полезной модели **29 марта 2022 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **26 июля 2022 г.**

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **29 марта 2032 г.**



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b60077614c43013294e0bd24145d5c7
Владимир **Зубов** Юлий Сергеевич
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов