

На правах рукописи



Клубничкин Владислав Евгеньевич

**МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ БЕСПИЛОТНЫХ КОЛЕСНЫХ И
ГУСЕНИЧНЫХ ТРЕЛЕВОЧНЫХ МАШИН**

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

Специальность 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре транспортно-технологических средств и оборудования лесного комплекса федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Официальные оппоненты:

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор.

ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса»

Галактионов Олег Николаевич

доктор технических наук, доцент.

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», заведующий кафедрой «Технологии лесного комплекса и ландшафтной архитектуры»

Молев Юрий Игоревич

доктор технических наук, доцент.

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Строительные и дорожные машины»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Защита состоится «19» декабря 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.331.10 при ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу: Российская Федерация, 141005, г. Мытищи, улица 1-я Институтская, 1, ауд. 1222.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 141005, г. Мытищи, улица 1-я Институтская, 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: www.mf.bmstu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.т.н., доцент



М.И. Голубев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Мировые объемы лесозаготовки стабильно растут, и к 2030 году ожидается увеличение до 4,5 млрд м³. В России, обладающей огромными возобновляемыми лесными ресурсами, стратегией развития лесного комплекса предусмотрено увеличение объемов заготовки древесины до 290 млн м³ в год, включая освоение новых лесных массивов на слабонесущих грунтах.

Утверждённая «Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» и приоритетные направления научно-технологического развития РФ, включая интеллектуальные транспортные системы и автономные транспортные средства, подчеркивают необходимость внедрения инновационных технологий для повышения производительности труда, экологической устойчивости и безопасности лесозаготовок. Традиционные методы лесозаготовки сопряжены с высоким риском травматизма, воздействием вредных факторов и неблагоприятных условий труда, что делает внедрение беспилотных технологий особенно актуальным.

В настоящее время научно обоснованные методы формирования технического облика беспилотных трелевочных машин (БПТМ) отсутствуют, что является ключевой научной проблемой. Для её решения требуется проведение исследований по выбору конструктивно-компоновочных решений, определению рациональных схем технологического оборудования и трансмиссий, прогнозированию подвижности и разработке законов управления движением БПТМ.

В то время как роботизированные системы активно применяются в сельском хозяйстве и горнодобывающей промышленности, в лесной отрасли они пока не получили широкого распространения. Данная работа направлена на устранение этого разрыва, предлагая научно обоснованные решения для интеграции беспилотных технологий в лесозаготовительные процессы, что способствует эффективному лесопользованию и переходу к интенсивным методам лесозаготовок.

При коллаборативной технологии заготовки древесины путем применения беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин практически исключаются простои, связанные с перерывами на физиологические потребности оператора трелевочной машины. Исключается необходимость оплаты труда оператора трелевочной машины, повышается скорость движения машины в порожнем состоянии. Повышается безопасность труда. В целом повышается коэффициент производительности труда и снижается себестоимость.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в области исследования и проектирования колесных и гусеничных лесозаготовительных машин (ЛМ), совершенствования процесса трелевки древесины, оптимизации технологических процессов лесосечных работ внесли разработки отечественных ученых: Александрова В.А., Андреева В.Н., Анисимова Г.М., Бартенева И.М., Бита Ю.А., Бурмистровой О.Н., Воскобойникова И.В., Виногорова Г.К., Галактионова О.Н., Гобермана Л.А., Григорьева И.В., Добрецова Р.Ю., Егорова Л.И., Ерхова А.В., Жукова А.В., Зайчика М.И., Иванова В.А.,

Капанова И.В., Карпачева С.П., Клубничкина Е.Е., Котикова В.М., Кочнева А.М., Куликова М.И., Макарова Ф.Н., Макуева В.А., Матвейко А.П., Махова Г.А., Мехренцева А.В., Муравьева А.В., Орлова С.Ф., Патякина В.И., Редькина А.К., Сюнева В.С., Хахиной А.М., Хитрова Е.Г., Цофина З.С., Шапиро В.Я., Шегельмана И.Р., Шелгунова Ю.В., Ширнина Ю.А., Шоля Н.Р., Эмайкина Л.М. и др.

Вопросами взаимодействия колесных и гусеничных машин с опорными поверхностями в сельском хозяйстве, транспортном комплексе, военном деле и дорожном строительстве занимались ученые: Агейкин Я.С., Антонов Д.А., Бабков В.Ф., Баженов Е.Е., Бекетов С.А., Барахтанов Л.В., Беляков В.В., Бируля А.К., Вахидов У.Ш., Водяник И.И., Вольская Н.С., Вольский С.Г., Горелов В.А., Гуськов В.В., Дьяков А.С., Евсеев К.Б., Забавников Н.А., Кацыгин В.В., Красненьков В.И., Косицын Б.Б., Котиев Г.О., Ксенович И.П., Ларин В.В., Летошнев М.Н., Ляско М.И., Макаров В.С., Молев Ю.И., Наказной О.А., Опейко Ф.А., Платонов В.Ф., Смирнов Г.А., Стадухин А.А., Фаробин Я.Е., Харитонов С.А., Чудаков Е.А., Шарипов В.М., Шуклин С.А., Шухман С.Б. и др. Также значительный вклад внесли зарубежные исследователи Адамс Д., Беккер М.Г., Ванцевич В., Вильям Л., Вонг Дж., Нордфьел Т., Риис А., Рингдал О., Санду К., Ханамото Б., Элс Ш., Янг Р.Н. и др.

Цель и задачи. Целью диссертационной работы является совершенствование технологии лесозаготовок, направленное на повышение энергоэффективности и безопасности работ путем применения беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин.

Для достижения цели исследования сформулированы и решены следующие научные задачи:

1. Разработана коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами.

2. Разработан комплекс математических моделей движения беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин при выполнении трелевочных операций.

3. Проведены экспериментальные исследования с целью оценки адекватности и точности математических моделей движения беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин с пачкой хлыстов в полупогруженном состоянии.

4. Разработаны законы управления движением беспилотными трелевочными колесными и гусеничными машинами по заданным траекториям.

5. Разработана виртуальная лесосека для моделирования трелевочных операций с параметризованными характеристиками дорожно-грунтовых условий.

6. Разработан метод определения рациональных технических характеристик трансмиссии и технологического оборудования БПТМ с использованием виртуальной лесосеки и моделирования трелевочных операций.

7. Проведено сравнительное технико-экономическое исследование коллаборативной технологии заготовки древесины с использованием имитационного математического моделирования рабочих процессов.

Научная новизна работы заключается в разработке коллаборативной технологии заготовки древесины, методов, позволяющих определить рациональные технические характеристики трансмиссий и технологического оборудования на этапе проектирования, включая комплекс математических моделей и законов управления движением беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин.

1. Коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами, отличающаяся применением робототехнических комплексов при трелевке и порожнем ходе в автономном режиме, при работе на лесосеке и верхнем складе в дистанционно управляемом режиме, позволяющих повысить безопасность труда и энергоэффективность при выполнении операций трелевки и экономическую эффективность лесозаготовок;

2. Новые математические модели движения трелевочных беспилотных колесных и гусеничных машин, отличающиеся возможностью моделирования перемещений трелеваемой пачки хлыстов в полупогруженном состоянии с учетом её колебаний;

3. Законы управления движением беспилотными трелевочными колесными и гусеничными машинами, позволяющие:

- учитывать влияние пачки хлыстов на динамику машин с учетом особенности трелевочного оборудования и конструктивного исполнения БПТМ;
- осуществлять энергоэффективное и безопасное беспилотное движение по волоку;

- повысить экологическую безопасность при выполнении маневров на лесосеке, путем предотвращения выезда за пределы трелевочного волока.

4. Разработана параметризованная математическая модель условий эксплуатации – «виртуальная» лесосека с характеристиками дорожно-грунтовых условий, отличающаяся использованием зависимости от числа проходов БПТМ.

5. Разработаны новые методы определения рациональных технических характеристик трансмиссий и технологического оборудования БПТМ, отличающиеся моделированием трелевки на виртуальной лесосеке и движения без нагрузки с целью повышения безопасности и энергоэффективности транспортных операций и расчета нагруженности агрегатов и узлов машин.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов базируются на сравнительной оценке данных теоретических и экспериментальных исследований динамики БПТМ, а также на использовании апробированных методов имитационного математического моделирования.

Предметом исследования являются конструктивно-компоновочные решения и законы управления колесных и гусеничных БПТМ, обеспечивающих безопасность и энергоэффективность заготовки древесины.

Объектами исследования являются беспилотные колесные и гусеничные трелевочные машины для хлыстовой технологии заготовки древесины.

Практическая значимость работы.

1. Разработаны программные реализации математических моделей движения колесных и гусеничных БПТМ при трелевке на виртуальной лесосеке

с целью прогнозирования энергоэффективности операций и нагруженности элементов лесозаготовительных машин на этапе проектирования.

2. Даны рекомендации к выбору технических характеристик колесных и гусеничных БПТМ с различным трелевочным оборудованием для хлыстовой заготовки древесины.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены в ПАО «КАМАЗ», АО «Курганмашзавод»-«Рубцовск», ООО Завод «Алтайлесмаш», ООО «ЛЕСТЕХ-ФИНАНС».

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся положения научной новизны, общие выводы по работе и результаты научных исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований заслушивались и обсуждались на: I-м Европейском лесопромышленном форуме молодежи. Воронеж, 2014; International seminar Soil trafficability- challenges for soils and vehicles. Tartu (Estonia), 2015; 48th International Symposium on Forestry Mechanization. Linz (Austria), 2015; 13th ISTVS European Conference. Rome (Italy), 2015; Международном молодежном симпозиуме «Современные проблемы математики. Методы, модели, приложения». Воронеж, 2015; 8th ISTVS Americas regional conference. Detroit (USA), 2016; 49th International Symposium on Forestry Mechanization: «From Theory to Practice: Challenges for Forest Engineering». Warsaw (Poland), 2016; XVI Международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки». Нижний Новгород, 2017; 19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS. Budapest (Hungary), 2017; Ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Мытищи, Московская обл. 2017-2025; 102-ой Международной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы помощи водителю: разработка, исследование, сертификация». Нижний Новгород, 2018; Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (ICMTMTE 2018-2020). Севастополь, 2018-2020; Научно-техническом семинаре «Подвижность транспортно-технологических машин». Нижний Новгород, 2018-2020; Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова «Повышение эффективности управления устойчивым развитием лесопромышленного комплекса». Воронеж 2020; Всероссийской научно-практической конференции «Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития». Воронеж, 2022; Всероссийской научно-практической конференции «Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития», Воронеж, 2023; XX и XXI Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса». Вологда, 2022, 2023; 114-я международная научно-техническая конференция «Перспективы развития наземных транспортных средств и технологий транспортной логистики». Нижний Новгород, 2023.

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертации опубликовано **95** научных работ общим объемом 18,9 п.л., из которых по перечню научных изданий, рекомендованных ВАК РФ – **42**, индексируемых в международной базе научных изданий SCOPUS – **18**, патент РФ на изобретение – **2**, патент РФ на полезную модель – **2**, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ – **1**, прочие издания – **30**.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов и заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения. Работа изложена на 326 листах машинописного текста, содержит 227 рисунков, 30 таблиц. Список литературы содержит 229 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приведено краткое содержание выполненных исследований, сформулирована цель работы, задачи исследования, положения научной новизны, практическая значимость, содержание исследований по главам, основные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 выполнен анализ условий эксплуатации лесных трелевочных машин, эксплуатационных показателей и сформированы основные значимые параметры трелевочных машин. Проведенный анализ базируется на работах в области исследования и проектирования колесных и гусеничных ЛМ, совершенствования процесса трелевки древесины, оптимизации технологических процессов лесосечных работ. Особо отмечены работы: Александрова В.А., Андреева В.Н., Анисимова Г.М., Бартенева И.М., Бита Ю.А., Бурмистровой О.Н., Воскобойникова И.В., Виногорова Г.К., Галактионова О.Н., Гобермана Л.А., Григорьева И.В., Добрецова Р.Ю., Егорова Л.И., Ерхова А.В., Жукова А.В., Зайчика М.И., Иванова В.А., Капранова И.В., Карпачева С.П., Клубничкина Е.Е., Котикова В.М., Кочнева А.М., Куликова М.И., Макарова, Ф.Н., Макуева В.А., Матвейко А.П., Махова Г.А., Мехренцева А.В., Муравьева А.В., Орлова С.Ф., Патякина В.И., Редькина А.К., Сюнева В.С., Хахиной А.М., Хитрова Е.Г., Цофина З.С., Шапиро В.Я., Шегельмана И.Р., Шелгунова Ю.В., Ширнина Ю.А., Шоля Н.Р., Эмайкина Л.М. и работы научных школ МГУЛ - МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, АГАТУ, ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, АО «ГНЦЛПК», ПетрГУ, САФУ им. М.В. Ломоносова, СПбГЛТУ.

По вопросам взаимодействия колесных и гусеничных машин с опорными поверхностями в сельском хозяйстве, транспортном комплексе, военном деле и дорожном строительстве отмечены труды ученых: Агейкина Я.С., Антонова Д.А., Бабкова В.Ф., Баженова Е.Е., Бекетова С.А., Барахтанова Л.В., Белякова В.В., Бируля А.К., Вахидова У.Ш., Водяника И.И., Вольской Н.С., Вольского С.Г., Горелова В.А., Гуськова В.В., Дьякова А.С., Евсеева К.Б., Забавникова Н.А., Кацыгина В.В., Красненькова В.И., Косицына Б.Б., Котиева Г.О., Ксеновича И.П., Ларина В.В., Летошнев М.Н., Ляско М.И., Макарова В.С., Молева Ю.И., Наказного О.А., Опейко Ф.А., Платонова В.Ф., Смирнова Г.А., Стадухина А.А., Фаробина Я.Е., Харитонов С.А., Чудакова Е.А., Шарипова В.М., Шуклина С.А., Шухмана С.Б. и многих других ученых. Значительный вклад внесли зарубежные исследователи Адамс Д., Беккер М.Г., Ванцевич В., Вильям Л., Вонг Дж., Нордфел Т., Риис А., Рингдал О., Санду К.,

Ханамото Б., Элс Ш., Янг Р.Н. и другие ученые, а также научные школы: МГТУ им. Н.Э. Баумана, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, МАДИ, МАМИ, ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», НАТИ, Академии БТВ, 21 НИИИ МО РФ и других.

В результате анализа современного состояния проблемы определены основные измерители эксплуатационных свойств трелевочных машин, которые будут использоваться для сравнения вариантов колесных и гусеничных беспилотных трелевочных машин.

Проведен обзор и анализ технологий хлыстовой заготовки древесины, изучены системы распознавания условий движения и управления движением беспилотных машин. В результате обоснована возможность применения и определено место БПТМ в технологии лесозаготовок.

Разработана коллаборативная технология заготовки древесины беспилотными колесными и гусеничными машинами, позволяющая повысить безопасность и энергоэффективность при выполнении операций трелевки, экономическую эффективность лесозаготовок (Рис. 1). На участке лесосеки устанавливаются базовые станции для формирования «коридора» трелевочного волокна. Лесосека разделяется на две зоны ответственности управления БПТМ. Первая зона ответственности работы БПТМ находится вблизи верхнего склада. В данной зоне контроль работы БПТМ осуществляет оператор процессора или сортиментовоза/лесопогрузчика при наличии. Вторая зона ответственности работы БПТМ располагается непосредственно на лесозаготовке, контроль и дистанционное управление БПТМ осуществляет оператор валочно-пакетирующей машины (ВПМ). Между этими зонами по волокам БПТМ двигается автономно при трелевке и без груза на обратном ходе.

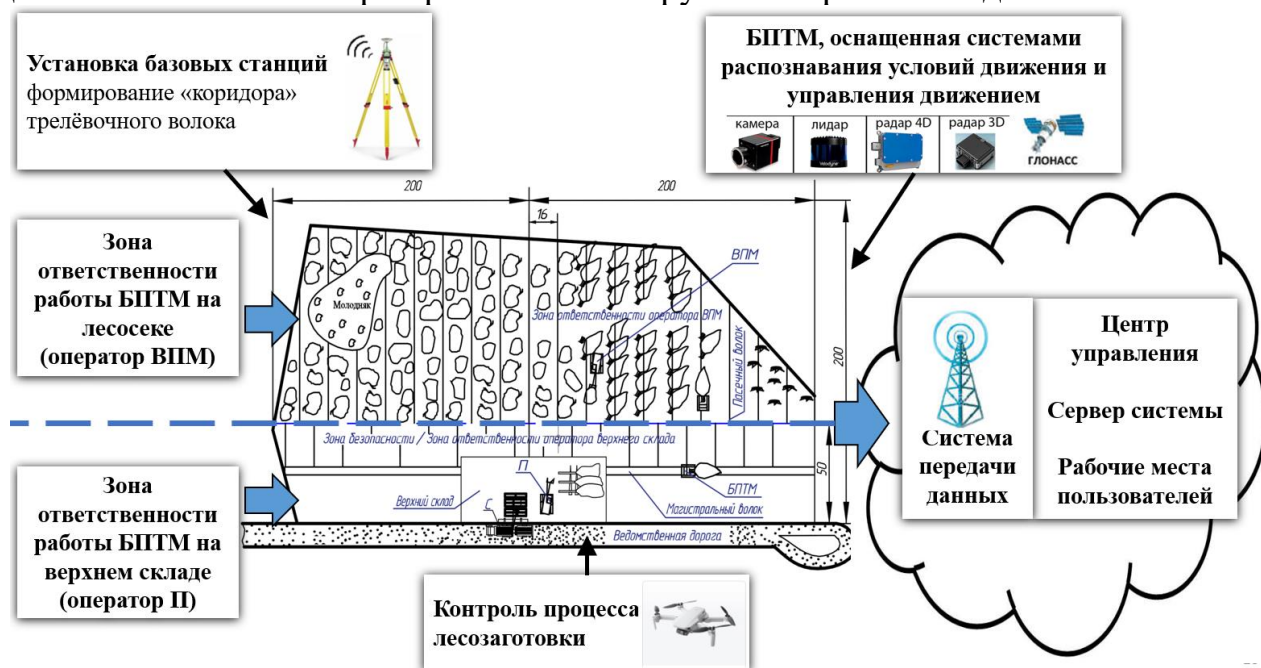


Рис.1. Коллаборативная технология заготовки древесины

БПТМ оснащается беспилотным летательным аппаратом (БЛА), совместно они используют системы распознавания условий движения и управления движением. БЛА с установленной камерой и лидаром осуществляет сбор данных

о предстоящих условиях движения трелевочной машины по волоку и нахождении пачки хлыстов (деревьев). БПТМ со спутниковой системой слежения траектории движения, видеокамерами и радаром на основе предварительно полученных данных с БЛА осуществляет беспилотное движение по волоку. Через систему передачи данных вся отправляемая и получаемая информация должна аккумулироваться на сервере системы, к которому может быть осуществлен удаленный доступ с рабочего места пользователя (оператора ЛМ). Периодически с БЛА осуществляется контроль процесса лесозаготовки.

В периоды трелевки деревьев (хлыстов) на верхний склад и возврата БПТМ в автономном режиме, на лесосеке продолжает работать оператор ВПМ формируя новые пачки деревьев. По возвращению БПТМ за пачкой и готовности к погрузке, оператор ВПМ дистанционно осуществляет погрузку с использованием технологического оборудования (пачкового захвата), установленного на БПТМ. После сбора пачки деревьев оператор ВПМ отправляет БПТМ в автономный режим трелевки до верхнего склада, там осуществляется ее дистанционная разгрузка оператором процессора, лесопогрузчика, сортиментовоза или удаленным оператором. Далее оператор с верхнего склада отправляет БПТМ в автономном режиме обратно.

Таким образом в главе сформирован полный цикл работы БПТМ при коллаборативной заготовке древесины для различных вариантов использования трелевочного оборудования и систем лесозаготовительных машин, даны предложения по техническому облику беспилотных трелевочных колесных и гусеничных машин.

На основе проведенных в первой главе исследований сформулированы задачи, которые решаются в последующих главах для достижения поставленной в диссертации цели.

В Главе 2 разработаны имитационные математические модели движения колесных и гусеничных БПТМ (КБПТМ и ГБПТМ) с различным технологическим оборудованием, отличающиеся возможностью моделирования перемещений трелеваемой пачки деревьев и хлыстов в полупогруженном состоянии.

Для выбора приоритетного технического решения БПТМ необходимо определение показателей подвижности, основанного на методах с использованием имитационного математического моделирования. Использование системы уравнений динамики твердых тел позволяет описать движение элементов гусеничного и колесного движителя БПТМ и пачки.

Подобные системы связанных уравнений могут быть реализованы в современных программных комплексах для моделирования динамики механических систем, таких как «Adams», «Универсальный механизм», «Эйлер», «ФРУНД» и других.

Метод построения уравнений движения твердых тел дает возможность автоматически формировать систему уравнений для любой конфигурации механической системы. Для этого достаточно задать параметры связей между телами, перемещающимися в пространстве под воздействием внешних сил.

Данный подход обеспечивает более глубокий анализ движения твердых тел, а также точное описание кинематических и силовых взаимодействий между ними.

При изучении динамики колесных и гусеничных трелевочных машин, помимо учета связей между твердыми телами, требуется также моделировать контакт движителя с опорной поверхностью (ОП). В случае моделирования колесных и гусеничных БПТМ рассматривается движение по малодеформируемому («плотному») грунту. Это позволяет определить максимальные средние скорости перемещения, оценить энергозатраты, а также проанализировать управляемость и вибрационные нагрузки, действующие на трелевочные машины.

Рассмотрим взаимодействие гусеничного движителя (ГД) с ОП. Будем считать, что пятно контакта представляет собой прямоугольник со сторонами L_k и B_k . Описание взаимодействия базируется на представлении об активных участках, расположенных под опорными катками (ОК) гусеничной машины.

При создании математической модели взаимодействия активного участка ГД с ОП типа плотный грунт принято допущение: сила взаимодействия в центре активного участка гусеницы, находящейся под опорным катком направлена против абсолютной скорости скольжения активного участка. Такой подход распространяется и на взаимодействие колесного движителя.

Взаимодействие активных участков движителя с опорным основанием описывается эллиптической зависимостью (Рис. 2 а). Расчетная схема взаимодействия с опорным основанием гусеницы представлена на Рис. 2 б.

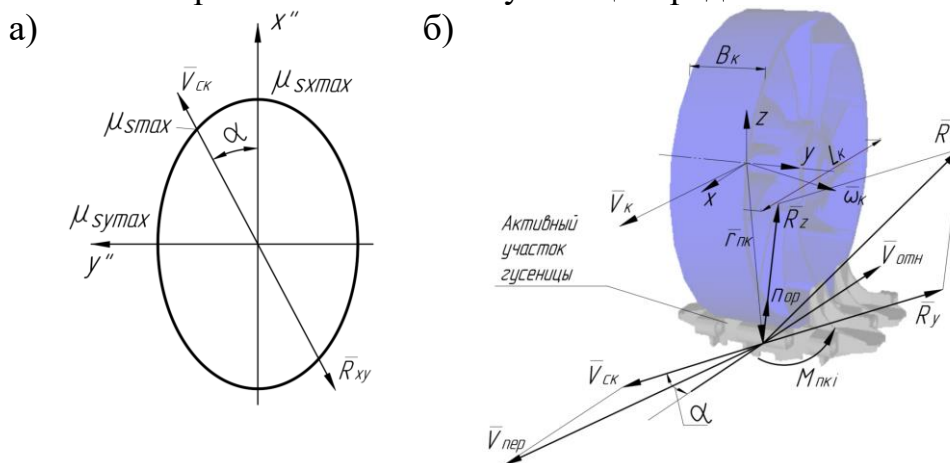


Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия с опорным основанием:

а) гусеницы; б) колеса

Величину суммарной реакции в пятне контакта R определяют по зависимости:

$$R = \mu_s R_z, \quad (1)$$

где μ_s – коэффициент взаимодействия гусеницы с опорным основанием; R_z – вертикальная реакция в активном участке гусеницы.

Для несвязных оснований характерна следующая зависимость коэффициента взаимодействия от коэффициента скольжения:

$$\mu_s = \mu_{s\max} \left(1 - e^{-\frac{S_k}{S_0}} \right), \quad (2)$$

где μ_{smax} – коэффициент взаимодействия при полном скольжении активного участка гусеницы для данного угла поворота скорости скольжения α относительно оси x'' ; S_k – коэффициент скольжения активного участка гусеницы в зоне контакта; S_0 – константа, определяющая форму кривой $\mu_s(S_k)$.

Коэффициент взаимодействия при полном скольжении определяется выражением:

$$\mu_{smax} = \frac{\mu_{sxmax}\mu_{symax}}{\sqrt{\mu_{sxmax}^2 \sin^2 \alpha + \mu_{symax}^2 \cos^2 \alpha}}, \quad (3)$$

где μ_{sxmax} , μ_{symax} – коэффициент сцепления в продольном и поперечном направлении (параметры эллипса трения Рис. 2 а), α – угол отклонения скорости скольжения от продольной оси трака.

Вращательное движение активного участка гусеницы, которое определяется вращением корпуса и поступательным движением, вызывает возникновение момента сопротивления повороту активного участка $M_{пк}$.

$$\begin{cases} M_{пki} = \frac{M_{пkmaxi}}{1 + 0,15 \frac{R_{пi}}{B_K}}; \\ M_{пkmaxi} = 0,375 \mu_{max} R_{zi} \sqrt{\frac{\pi L_K B_K}{4}}, \end{cases} \quad (4)$$

где $M_{пki}$ – момент сопротивления повороту i -ого активного участка гусеницы, движущегося по дуге радиусом $R_{пi}$; $M_{пkmaxi}$ – максимальный момент сопротивления повороту активного участка гусеницы при повороте на месте.

При движении по неровной поверхности и преодолении единичных препятствий контакт движителя гусеничной БПТМ с опорной поверхностью может осуществляться не только через активные участки, находящиеся под опорными катками, но и через другие элементы гусеничного обвода. Поэтому для оценки профильной проходимости гусеничной БПТМ в процессе моделирования учитываются следующие взаимодействия: траков между собой, траков с ведущим колесом, траков гусеницы с опорными катками, а также траков с опорным основанием.

В настоящее время большое распространение получили и специализированные лесные колесные тягачи с шарнирно-сочлененной рамой, состоящей из двух секций, соединенных шарниром, обеспечивающим взаимный поворот секций в плане и относительно продольной горизонтальной оси.

С учетом специфики программных комплексов, используемых для моделирования динамики твердых тел, при создании математических моделей динамики колесных и гусеничных БПТМ были введены следующие допущения: 1) масса и геометрические параметры тел остаются неизменными в ходе моделирования, все объекты считаются абсолютно твердыми (не подверженными деформации); 2) силы и моменты, воздействующие на тела, известны в любой момент времени (могут быть рассчитаны); 3) шарнирные соединения считаются идеальными, то есть не обладают податливостью и не

имеют потерь энергии; 4) начальные условия заданы и соответствуют кинематическим ограничениям, наложенным на элементы системы.

На Рис. 3 показаны геометрические схемы разработанных математических моделей КБПТМ (Рис. 3 а) и ГБПТМ (Рис. 3 б), оснащенных технологическим оборудованием типа «пачковый захват».

При построении математической модели трелемой пачки хлыстов были приняты следующие допущения: 1) в трелемой пачке содержится несколько хлыстов одинаковой формы и объема; 2) все хлысты приподнятой части пачки жестко крепятся к пачковому захвату технологического оборудования БПТМ; 3) плотность и модуль упругости древесины всех хлыстов являются постоянными величинами.

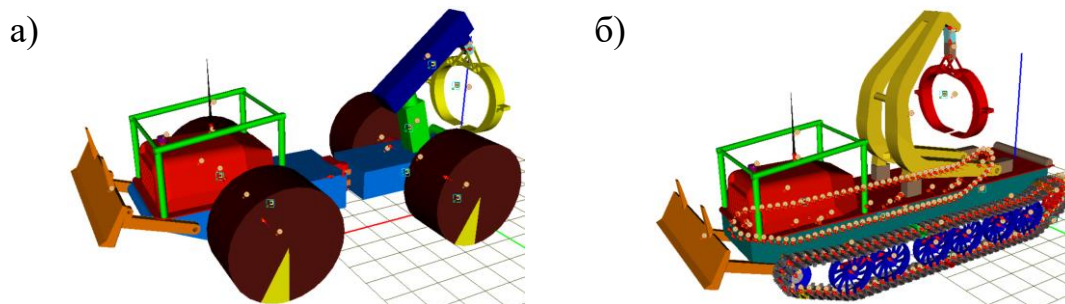


Рис. 3. Динамические модели БПТМ с пачковым захватом: а) колесная; б) гусеничная

При моделировании динамики движения БПТМ рассматривается контактное взаимодействие хлыстов с технологическим оборудованием (захватом) и опорным основанием трелевочного волока.

На конец пачки хлыстов, перемещающейся по опорному основанию, в плоскости опорной поверхности против скольжения действует сила сопротивления волочению P_B :

$$P_B = N_{\pi} \cdot f_c, \quad (5)$$

где N_{π} – нормальная реакция пути на волочащуюся часть пачки; f_c – коэффициент сопротивления волочению пачки.

Для хлыстов или деревьев трелемых БПТМ по волоку: зимой $f_c = 0,3 - 0,45$; летом $f_c = 0,4 - 0,8$.

Для формирования динамических моделей БПТМ и последующего моделирования динамики их движения в пакете программ Универсальный механизм, необходимо было выбрать эксплуатационные показатели деревьев в пачке, распространенных на участках рассматриваемой лесосеки, характеризующиеся высотой 25 м и средним объемом хлыста $0,96 \text{ м}^3$ (Таблица 1).

Таблица 1.

Числовые значения усредненных основных эксплуатационных показателей деревьев

Диаметр на высоте 1,3м [см]	Диаметр в месте спиливания [см]	Высота дерева [м]	Масса наземной части дерева [кг]	Средний объем хлыста [м ³]
32	38,4	25	900	0,96

Модель хлыста общей длиной 25 м представляет из себя последовательно шарнирно соединенные кусочно-линейные стержни длиной 5 м. Каждый из стержней имеет точки контакта с опорной поверхностью. На Рис. 4 представлена модель пачки хлыстов, с указанием шарниров, центров масс и номера участка (Таблица 2).

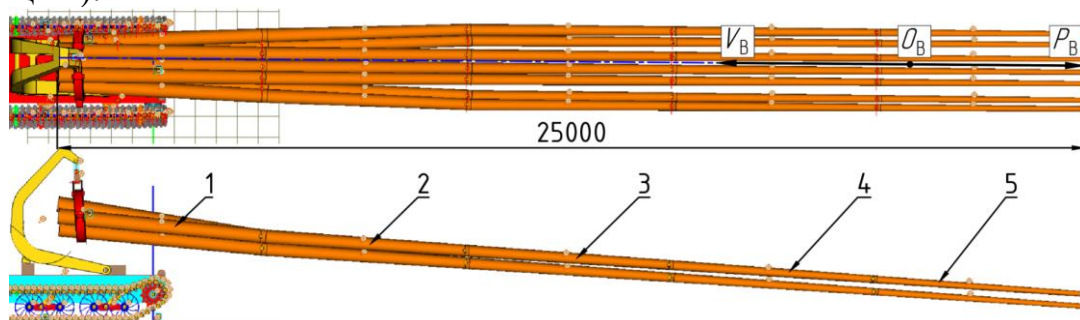


Рис. 4. Модель пачки хлыстов

На Рис. 5 представлено трелевочное оборудование БПТМ – пачковый захват. Захват имеет возможность поворота за счет трех шарниров (1, 2, 3).

Таблица 2.

Характеристика хлыста

№ участка	Длина, м	Масса, кг
1	5	285
2	5	235
3	5	180
4	5	130
5	5	70
1-5	25	900

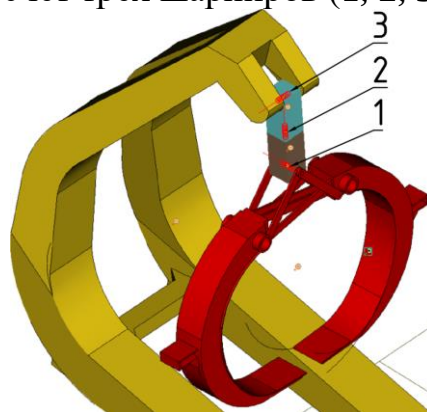


Рис. 5. Тела модели и шарниры пачкового захвата гусеничной БПТМ

На Рис. 6 представлены геометрические интерпретации разработанных математических моделей беспилотных трелевочных машины с пачкой хлыстов. КБПТМ с пачковым захватом (Рис. 6 а) и двух ГБПТМ с технологическим оборудованием типа пачковый захват (Рис. 6 б) и самозажимной коник (Рис. 6 в).

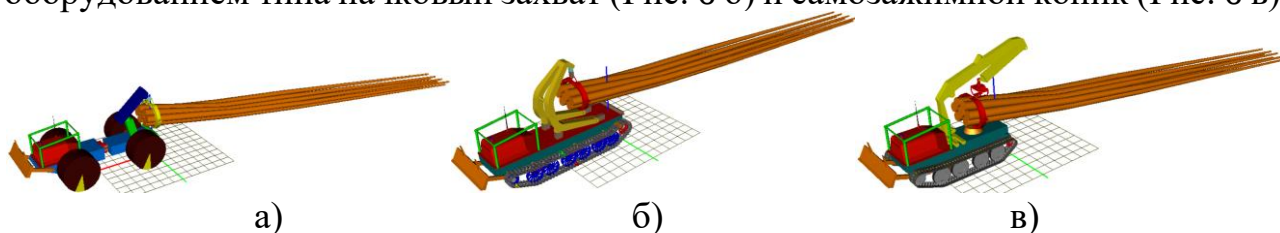


Рис. 6. Динамические модели БПТМ с пачкой хлыстов: а) КБПТМ с пачковым захватом; б) ГБПТМ с пачковым захватом; в) ГБПТМ с самозажимным коником

Созданные модели беспилотных трелевочных машин охватывают функциональные подсистемы и основные компоненты: корпус, технологическое оборудование, движитель, силовую установку, а также системы управления движением и контроля параметров.

В Главе 3 представлены экспериментальные исследования, направленные на оценку точности и адекватности математических моделей движения колесных и гусеничных БПТМ с полупогруженной пачкой.

Исследования проводились на дернистом грунте, где были получены зависимости коэффициента взаимодействия от коэффициента скольжения для колесного и гусеничного движителей, а также для хлыстов. В главе детально описаны методика проведения экспериментов, используемое оборудование и объекты исследования.

Сравнение экспериментальных данных с результатами математического моделирования подтвердило точность разработанной модели. Относительная погрешность по координатам точек корпуса машины и пачки, измеренным с помощью системы Racelogic Vbox и GPS-приемников, не превысила 16%.

Для верификации математической модели ГБПТМ использовался трелевочный трактор ТБ-1М с самозажимным коником и трелевочный трактор ЛТ-187 с пачковым захватом. Верификация математической модели КБПТМ осуществлялась на тракторе Вепрь 4х4 с тросочокерным оборудованием и скиддере JohnDeere 4х4 с пачковым захватом. Внешний вид объектов испытаний представлен на Рис. 7 (а, б, в, г).

а)



б)



в)



г)



Рис. 7. Внешний вид объектов испытаний:

а) Вепрь 4х4; б) ТБ-1М; в) скиддер JohnDeere 4х4; г) ЛТ-187

Для фиксации траекторий и скоростей движения машин и пачки применялась система точного позиционирования Racelogic Vbox. GPS-датчики устанавливались: на корпусе машины (в точке пересечения продольной оси с осью ведущих колес); на конце волочащейся части пачки (для максимального расхождения траекторий). На гусеничной машине дополнительно использовались индуктивные датчики для измерения частоты вращения ведущих колес обоих бортов. Полученные данные сравнивались с расчетными показателями модели.

Использовались типовые траектории: окружности радиусом 10 м и 30 м, а также криволинейный участок при переходе с пасечного на магистральный

волок. Для испытаний было размечено три участка пути: $R=10\text{м}$, $R=30\text{м}$ и криволинейная траектория.

Параметры криволинейного движения фиксировались с помощью двух программно-измерительных комплексов. В состав первого комплекса входит два комплекта «RaceLogic» - устройство измерения ускорения, скорости, пройденного пути и определения в пространстве на основе технологии GPS движущейся трелевочной машины и пачки. На Рис. 8 показаны места установки датчиков GPS на трелевочной машине и пачке деревьев.



Рис. 8. Программно-измерительный комплекс «RaceLogic»

В состав второго измерительного комплекса «ZetLab» входит комплект из индуктивных датчиков, размещенных на ведущих колесах и аналого-цифрового преобразователя, подключенного к компьютеру (Рис. 9).

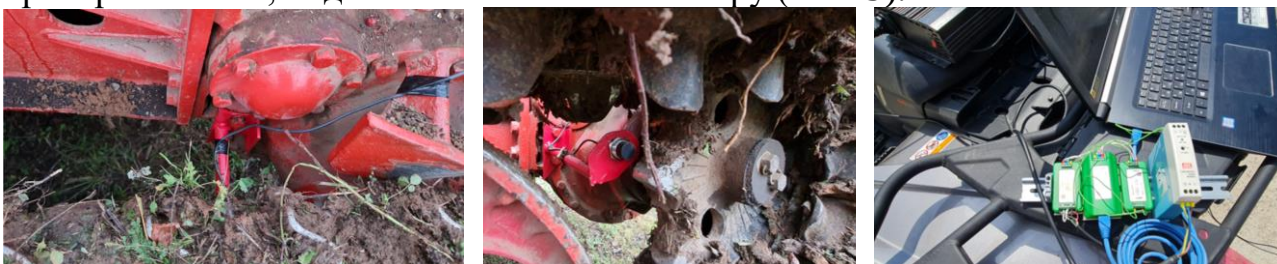


Рис. 9. Программно-измерительный комплекс определения угловой скорости вращения ведущих колес

На Рис. 10 представлено сравнение траекторий движения, полученных с помощью GPS-модуля программно-измерительных комплексов «RaceLogic», и траекторий, полученных по результатам имитационного математического моделирования ГБПТМ с пачковым захватом и пачкой деревьев разной длины (15м, 20м, 25м).

Из анализа результатов сравнения математического моделирования и экспериментальных данных следует, что максимальное расхождение по траектории движения машины и траектории пачки не превышает 16 % относительно средних значений в ходе проведения эксперимента.

Анализ показал, что погрешность моделирования не превышает 8% по угловой скорости ведущих колес. Разработанная модель пригодна для исследования динамики криволинейного движения БПТМ как с пачкой, так и без нее на опорном основании «дернистый грунт». Экспериментально подтверждена ее точность, что позволяет использовать ее для дальнейших расчетов.

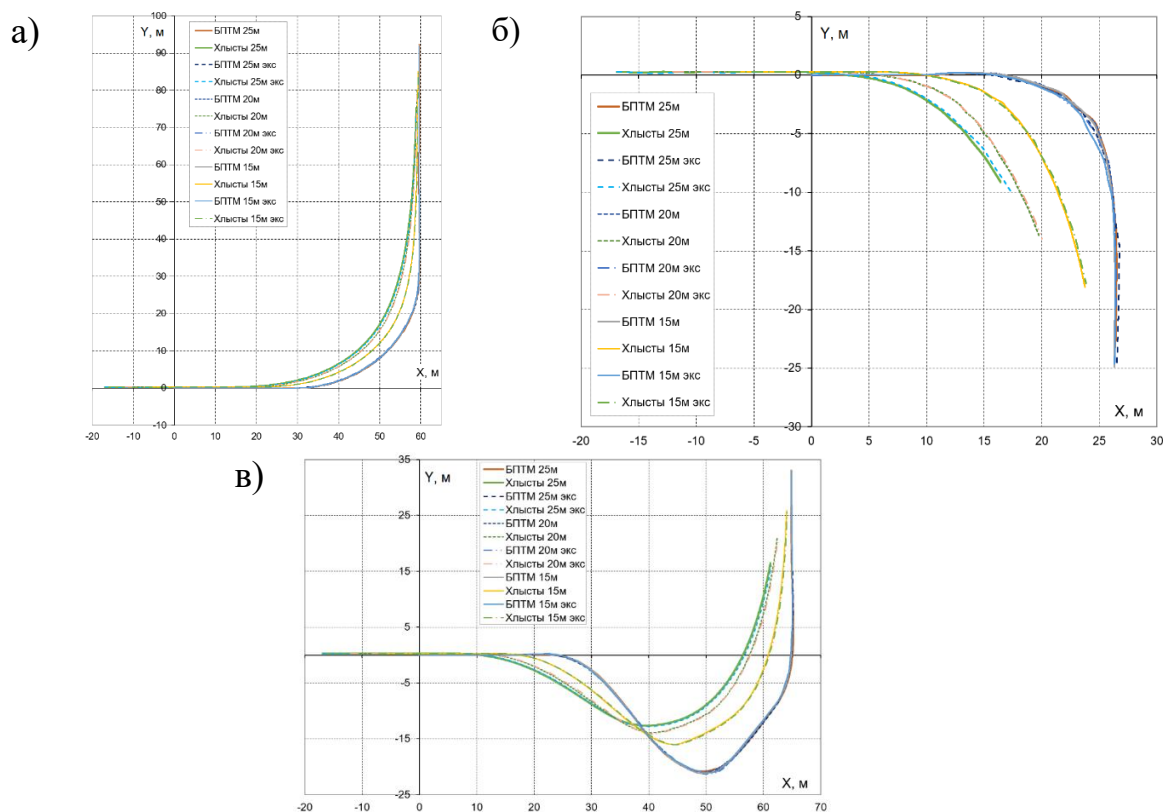


Рис. 10. Траектории движения гусеничной трелевочной машины и пачки разной длины (15м, 20м, 25м), полученные экспериментально и расчетным путем:
а) поворот на волоке $R=30$ м; б) поворот на волоке $R=10$ м; в) криволинейная траектория движения

В Главе 4 для определения основных значимых показателей колесных и гусеничных БПТМ сформирована программа испытаний на виртуальной лесосеке. Разработанная виртуальная лесосека для моделирования трелевочных операций с параметризованными характеристиками ДГУ представлена на Рис. 11.

Лесосека разработана в соответствии с лесоводственными требованиями к технологическим процессам лесосечных работ (Приказ №314 от 29.11.1993г.), правил по охране труда в лесозаготовительном, деревообрабатывающем производствах и при проведении лесохозяйственных работ (Приказ №644н от 23.09.2020г.), Приказа Минприроды России №23 от 17.01.2022г. и на основе цикла работы БПТМ включающего в себя: 1) Холостой ход – БПТМ в порожнем состоянии первый раз движется по волоку (траектории) до места сбора пачки (при этом определяется и фиксируется скоростной режим по пути с учетом ограничений по безопасности и кривизна пути); 2) Технологическая операция – сбор пачки; 3) Рабочий ход – БПТМ с пачкой движется по волоку обратно с места сбора до верхнего склада (учитывается длина пачки, БПТМ движется по траектории с минимальными отклонениями от нее и с высокой энергоэффективностью при этом определяется и фиксируется скоростной режим по пути с учетом ограничений по безопасности и кривизна пути); 4) Технологическая операция – разгрузка пачки деревьев на верхнем складе и окучивание их в штабель; 5) Холостой ход – повторение цикла работ (с

изменение характеристик участка пути, по которому движется БПТМ в связи с предыдущим проходом машины).

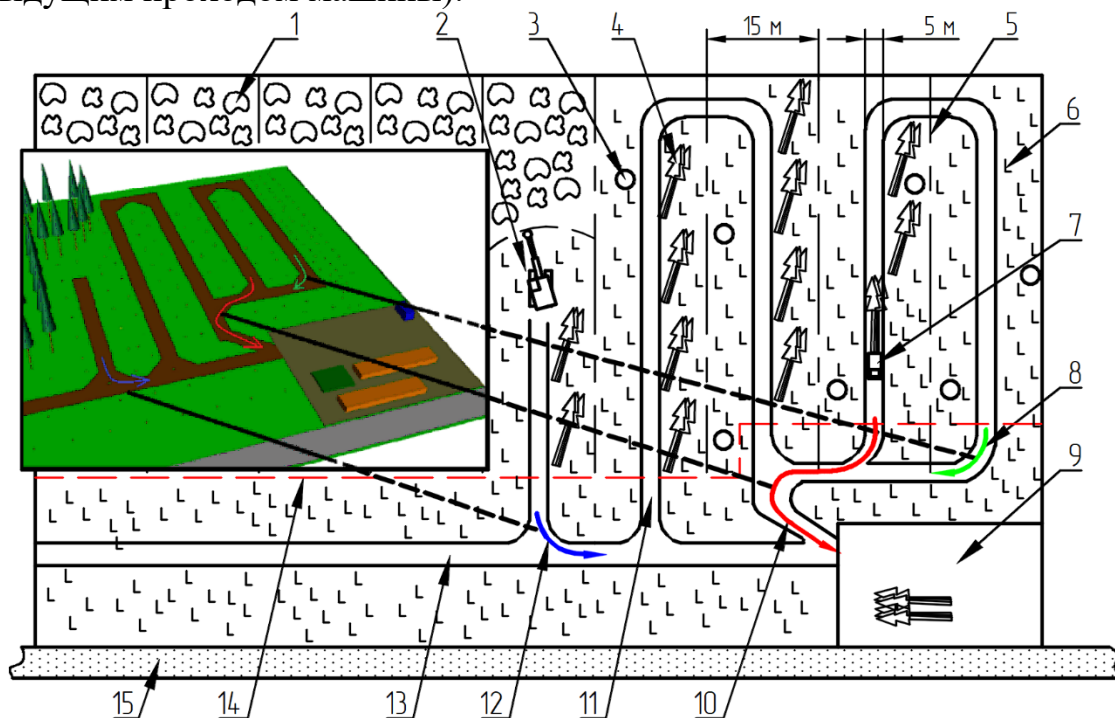


Рис. 11. Схема разработки виртуальной лесосеки ВПМ и БПТМ:

1 – сохраненный подрост; 2 – ВПМ; 3 – семенные деревья; 4 – пачки деревьев, пакетируемые; 5 – граница лент; 6 – спиленные деревья; 7 – БПТМ; 8 – поворот

БПТМ на пасечном волок ($R=10\text{м}$); 9 – лесопогрузочный пункт; 10 – криволинейная траектория выезда БПТМ с пасечного на магистральный волок; 11 – пасечный волок; 12 – поворот БПТМ на магистральном волок ($R=30\text{м}$); 13 – магистральный волок; 14 – зона безопасности; 15 – лесовозный ус

Разработанная модель виртуальной лесосеки включает участки для определения показателей БПТМ: профильной проходимости, маневренности, автономности, устойчивости, эффективности выполнения технологических операций.

На Рис. 12 представлены ДГУ виртуальной лесосеки: 1) Поворот на магистральном волок $R=30\text{ м}$; 2) Поворот на пасечном волок $R=10\text{ м}$; 3) Выезд с пасечного на магистральный волок по криволинейной траектории; 4) Прямолинейное движение; 5) Микропрофиль пути и единичные препятствия; 6) Углы подъема, спуска и крена.

В качестве параметризованных характеристик ДГУ были выбраны: геометрические и физико-механические характеристики. Геометрические характеристики включают микропрофиль (единичные препятствия), макропрофиль опорной поверхности (углы крена, подъема и спуска), кривизна и протяженность траектории движения по волоку.

Физико-механические характеристики включают коэффициент взаимодействия (эллипс трения движителя и пачки) и коэффициент сопротивления движению (разыгрываются при проходе машины по волоку).

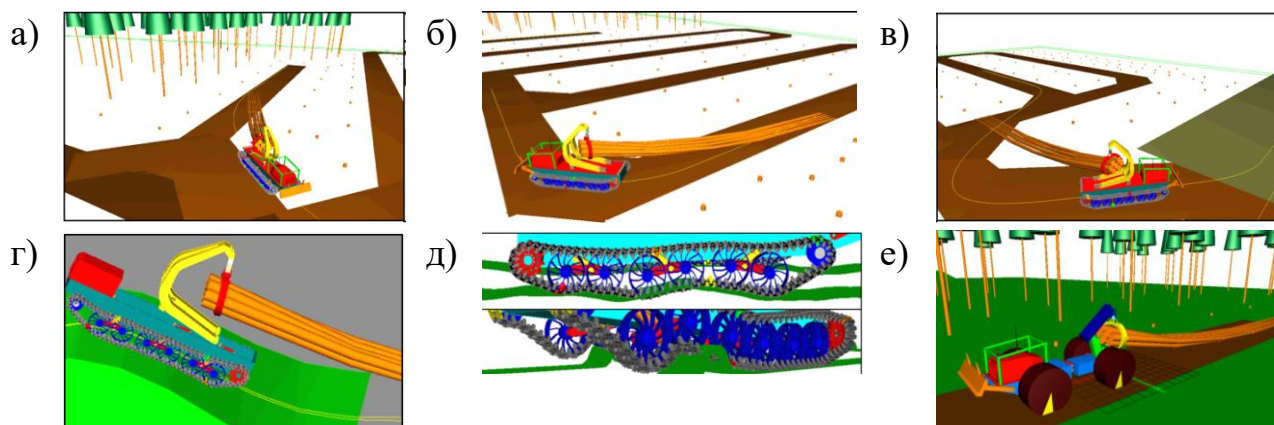


Рис. 12. Участки виртуальной лесосеки: а) поворот магистрального волока $R=30\text{м}$; б) поворот пасечного волока $R=10\text{м}$; в) криволинейная траектория движения; г) подъемы, спуски и крены; д) микропрофиль трелевочного волока, единичные неровности; е) прямолинейная траектория

В Главе 5 представлены разработанные законы управления движением беспилотных колесных и гусеничных трелевочных машин.

Эффективность предложенных законов подтверждена путем имитационного математического моделирования. В исследовании рассматривались шарнирно-сочлененная колесная машина 4×4 , а также гусеничные трелевочные машины с различными типами трелевочного оборудования. Результаты, демонстрирующие преимущества предложенных законов, приведены в заключительном разделе работы.

Один из способов сокращения затрат является программное управление движением трелевочной машины с учетом энергоэффективности и безопасности. Этот подход предполагает движение по маршруту «место лесозаготовки – верхний склад» с грузом (деревьями, хлыстами или сортиментами) и «верхний склад – место лесозаготовки» без груза по заранее заданной траектории и скорости. Для этого используются информационно-управляющие системы как на участке лесозаготовки, так и на борту машины, которая может управляться дистанционно оператором или функционировать в автономном режиме.

Таким образом, задача заключается в поиске оптимального процесса перемещения трелевочной машины из начальной точки маршрута в конечную с учетом ограничений на фазовые координаты и время движения.

Закон автоматизированного движения трелевочной машины по заданной траектории:

Данный закон представляет собой элемент системы управления поворотом БПТМ, обеспечивающий энергоэффективное и безопасное движение с пачкой деревьев в полупогруженном положении по заданному пути волока без участия оператора.

Траектория движения БПТМ задана точками T_i , расположенными по центру волока. Машина должна последовательно перемещаться из точки T_0 в T_1 , затем в T_2 , T_3 и так далее (Рис. 13). Считается, что этап завершен, когда центр масс БПТМ C достигает очередной целевой точки. После этого система управления переключает направление движения к следующей точке.

Координаты всех точек заданы в виде $(x_i; y_i)$, а расстояние между ними ΔS_i вычисляется по формуле:

$$\Delta S_i = \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (x_i - x_{i-1})^2}, \quad (6)$$

Рассматриваемое движение по центру волока характерно для движения порожней БПТМ или БПТМ с сортиментами в полностью груженом состоянии.

Однако при трелевке пачки деревьев по участку волока, характеризуемым определенным радиусом поворота, необходимо исключать движение пачки вне волока, для этого необходимо, чтобы БПТМ двигалась по внешнему радиусу (R_4^n) поворота волока без выезда за его приделы, таким образом для БПТМ с пачкой деревьев необходимо осуществлять последовательное перемещение из точки T_1 , в точку T_2^n , далее в T_3^n , T_4^n и т. д. (Рис. 13).

В этом случае расстояние между точками ΔS_i для II, III и IV участков волока может быть найдено выражениями представленными ниже.

С целью исключения выезда конца пачки деревьев за пределы волока при подъезде БПТМ к повороту необходимо обеспечить выравнивание пачки вдоль продольной оси машины. Для этого на участке II осуществляется перемещение БПТМ с пачкой из центра (T_1) волока к краю (T_2^n) на величину k_Π .

$$k_\Pi = \frac{b}{2} - \frac{B_{\text{БПТМ}}}{2}, \quad (7)$$

где b – ширина волока ($b = B_{\text{БПТМ}} + 1,5 \cdot 2$), минимальная ширина волока составляет 5 м;

$B_{\text{БПТМ}}$ – ширина БПТМ.

$$\Delta S_2^n = \sqrt{(y_i - (y_{i-1} - k_\Pi))^2 + (x_i - (x_i + k_\Pi \cdot 2))^2}, \quad (8)$$

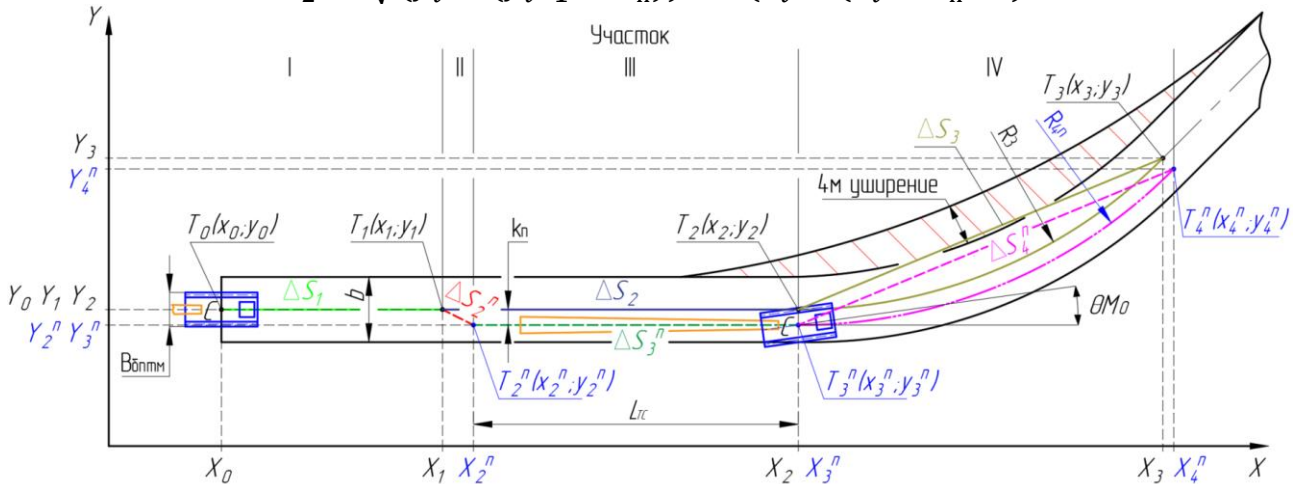


Рис. 13. Схема движения БПТМ с пачкой деревьев по заданной траектории

Участок III характеризуется прямолинейным движением БПТМ вдоль края волока от точки T_2^n к началу поворота (T_3^n). Длина данного участка ($L_{\text{ТС}}$) определяется общей длиной БПТМ ($L_{\text{БПТМ}}$) с пачкой деревьев (L_Π).

$$L_{\text{ТС}} = L_{\text{БПТМ}} + L_\Pi, \quad (9)$$

$$\Delta S_3^n = \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + L_{\text{ТС}}^2}, \quad (10)$$

На криволинейном участке (IV) волока точки координат $(x_i^n; y_i^n)$ и расстояние между ними ΔS_i^n может быть найдено:

$$\Delta S_i^n = \sqrt{[(y_i^n - k_n) - (y_{i-1}^n - k_n \cdot 0,7)]^2 + [x_i^n - (x_{i-1}^n + k_n \cdot 0,7)]^2}, \quad (11)$$

При перемещении между точками траектория центра масс БПТМ C должна представлять собой кривую радиусом R :

$$R_i \approx \frac{\Delta S_i}{\Delta \theta}, \quad (12)$$

где $\Delta \theta$ – угол между осью симметрии БПТМ и отрезком, соединяющим две соседние точки.

Данный угол вычисляется по формуле:

$$\Delta \theta = \arcsin\left(\frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta S_i}\right) - \theta_{m_0}, \quad (13)$$

где θ_{m_0} – текущий угол поворота корпуса БПТМ относительно оси X неподвижной системы координат.

Электронный блок управления БПТМ непрерывно рассчитывает траекторию на основе приведенных уравнений при переходе от одной точки к следующей.

Координаты пути движения БПТМ можно фиксировать с помощью ГЛОНАСС/GPS-оборудования, записывая их в выбранной системе координат. Эта траектория будет использоваться в качестве эталонной при повторных проходах машины по трелевочному волоку. Движение по траектории должно осуществляться с минимальными отклонениями от нее и с высокой энергоэффективностью при этом определяется и фиксируется скоростной режим по пути с учетом ограничений по безопасности и кривизна пути.

На основе информации, получаемой от систем распознавания условий движения, в траекторию маршрута вносятся корректировки с целью повышения экологической безопасности при выполнении маневров на лесосеке, направленные на предотвращение выезда БПТМ за пределы волока.

Закон управления движением сочлененной колесной трелевочной машины по заданной траектории:

Наиболее часто применяемым методом управления является программный, при котором управляющие сигналы заранее вычисляются и подаются на вход системы в зависимости от времени или иного параметра.

Однако при управлении беспилотной трелевочной машиной (БПТМ) возникает дополнительное внешнее воздействие – помеха. Под помехой понимается совокупное влияние внешних факторов на контролируемые параметры БПТМ, такие как положение машины, расположение трелевочного оборудования с пачкой и т.д.

Например, при движении БПТМ по склону или при значительном сопротивлении волочения пачки может возникать пробуксовка колес, что приводит к изменению траектории. Это воздействие имеет кумулятивный эффект, поскольку в каждый последующий момент времени машина оказывается в новых начальных условиях, а система управления продолжает выдавать команды без учета накапливающихся отклонений.

Одним из методов борьбы с помехами является управление по отклонению, при котором текущее значение параметра (например, координаты машины) сравнивается с заданным (расчетной траекторией). Разница между ними – ошибка регулирования – поступает в систему управления (СУ) и далее в гидравлическое рулевое управление (ГРУ).

Такой подход позволяет компенсировать помехи, но при этом система становится подверженной запаздыванию, перерегулированию и колебаниям. Согласно теории автоматического управления, уменьшить эти эффекты можно за счет применения различных законов регулирования, например, пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД). Однако главный недостаток этого метода заключается в том, что управляющий сигнал формируется только после возникновения ошибки.

Система управления по возмущению лишена этого недостатка, поскольку управляющее воздействие генерируется одновременно с появлением помехи, что значительно сокращает задержку реакции.

Тем не менее, такие системы не получили широкого распространения по двум причинам: сложность разработки датчиков помех и то, что компенсируется только основное возмущение, в то время как остальные продолжают влиять на систему.

Для БПТМ основной помехой является сила сопротивления при волочении пачки, вызывающая отклонение от заданной траектории. Комбинированное управление объединяет преимущества двух подходов: главная помеха компенсируется по принципу управления по возмущению, а остальные – по отклонению.

В случае колесной сочлененной БПТМ (СБПТМ) для повышения эффективности системы управления предлагается использовать комбинированный метод, сочетающий управление по отклонению и программное управление. При этом программный принцип можно рассматривать как частный случай управления по возмущению (Рис. 14).

Для реализации программного управления требуется преобразовать заданную траекторию движения в функцию угла складывания полурам. Эта задача решается на основе кинематической модели (Рис. 15).

Бортовая информационно-управляющая система (БИУС) определяет необходимый угол складывания полурам, анализируя траекторию и положение исполнительных механизмов рулевого управления колесной СБПТМ, чтобы обеспечить требуемую кривизну движения.

Для разработки закона управления выполняется обратное преобразование на основе полученной математической модели кинематики поворота.

При проведении теоретических исследований колесной СБПТМ по выполнению маневров для каждой скорости уточнялись максимальные углы складывания полурам, момент времени, соответствующий началу управляющего воздействия, а также время задержки сигнала управляющего воздействия, обусловленное характеристикой системы управления колесной СБПТМ.

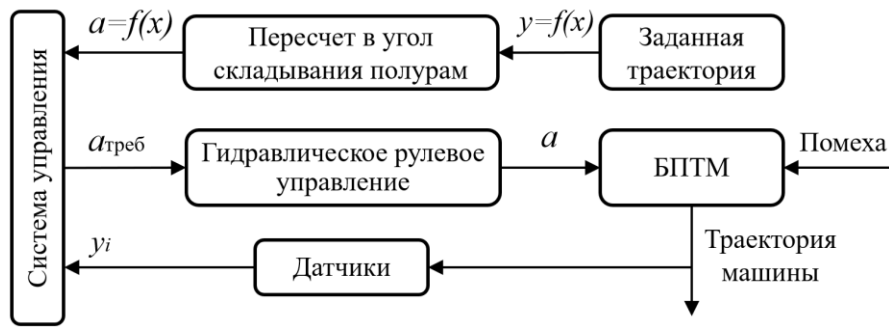


Рис. 14. Структурная схема системы управления движением колесной СБПТМ

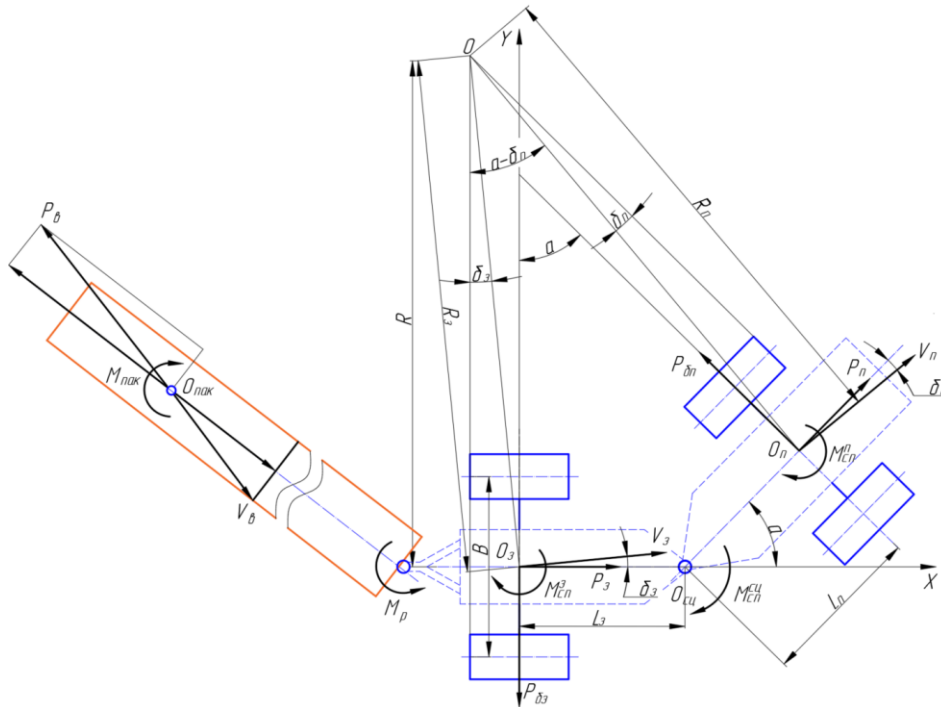


Рис. 15. Расчетная схема поворота колесной СБПТМ с пачкой

Закон управления складывания секций СБПТМ $\Theta(t)$ представлен на Рис. 16.

Оценочным параметром для данного маневра колесной СБПТМ с пачкой деревьев является предельно возможная скорость выполнения при заданной величине задержки управляющего воздействия.

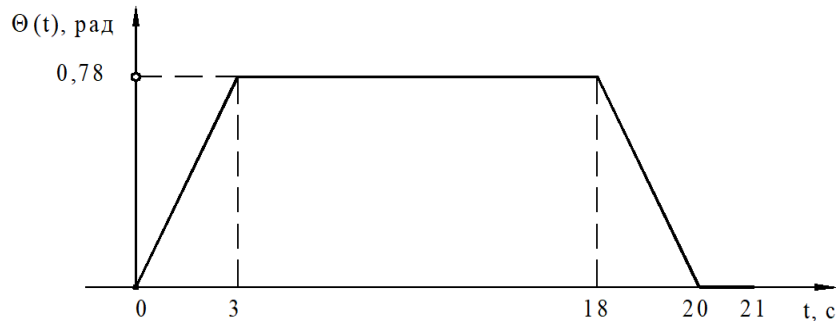


Рис. 16. Закон управления поворотом СБПТМ

Для формирования закона управления поворотом СБПТМ рассмотрим схему, изображенную на Рис. 17.

Угол поворота ψ определяется как угол складывания между передним и задним модулем СБПТМ. Направление движения γ определяется как направление

движения переднего модуля СБПТМ. Ориентация α определяется как направление, в котором двигалась бы СБПТМ, если бы угол поворота был равен нулю и сохранялась исходная линия, как показана машина пунктирным отображением (Рис. 17). Значение α вычисляется как направление движения СБПТМ за вычетом половины угла поворота, т.е.

$$\alpha = \gamma - \frac{\psi}{2}, \quad (14)$$

Оба параметра, α и γ , задаются в глобальной системе координат.

При дистанционном движении по траектории ориентация и угол поворота фиксируются в каждой точке маршрута. Эти данные (α' и ψ') используются в методе «Следование по записи», который включает три независимых режима:

ψ_1 : Коррекция курса в соответствии с записанной ориентацией α' .

ψ_2 : Воспроизведение записанного угла поворота ψ' .

ψ_3 : Движение в направлении траектории.

Каждый режим зависит от текущих параметров: ориентации, угла поворота и расстояния до траектории. ψ_3 использует ближайшую точку маршрута (x', y') и текущие координаты СБПТМ (x, y); ψ_1 учитывает разницу между записанной ориентацией α' и текущей α ; ψ_2 применяет сохраненный угол поворота ψ' .

Эти три режима объединяются в итоговый управляющий сигнал ψ_t (Рис. 18).

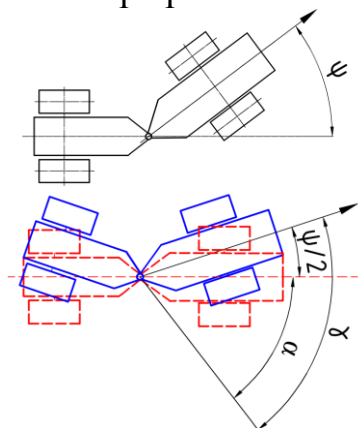


Рис.17. Схема определения угла поворота ψ , направления γ и ориентации α СБПТМ

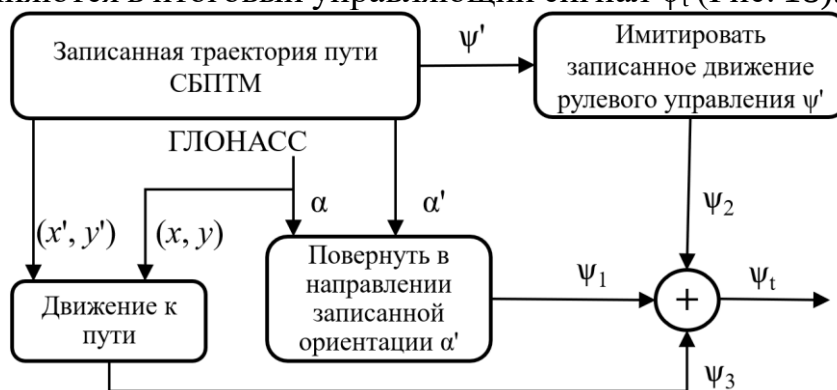


Рис. 18. Отслеживание траектории с активным управлением углом поворота ψ_t

ψ_1 : Коррекция курса по записанной ориентации. Управляющий сигнал вычисляется как разность между α' (ориентация в ближайшей точке траектории) и текущей α :

$$\psi_1 = \alpha' - \alpha, \quad (15)$$

ψ_2 : Воспроизведение записанного угла поворота. Позволяет точно повторять изгибы траектории:

$$\psi_2 = \psi', \quad (16)$$

ψ_3 : Возврат на траекторию. Необходим при отклонениях из-за помех или объезда препятствий. Реализуется двумя способами:

Способ 1: Самым простым способом является вычисление значения, которое прямо пропорционально расстоянию между СБПТМ и точкой пути. Делается это путем умножения расстояния d на постоянную величину k :

$$\psi_3 = k \cdot d, \quad (17)$$

где d – обозначенное знаками расстояние между СБПТМ и точкой траектории.

Расстояние d может быть отрицательным или положительным, в зависимости от стороны траектории движения СБПТМ. Типичное значение $k=0,07$. Чтобы избежать чрезмерных углов, ψ_3 ограничивается диапазоном $\pm 90^\circ$.

Способ 2: При использовании способа 1 расчет управляющего угла ψ_3 является линейным. Это может привести к колебаниям траектории движения, когда СБПТМ находится близко к ней. Уменьшение значения параметра k приводит к замедлению реакции даже при большом значении параметра d , а это означает, что СБПТМ требуется больше времени, чтобы добраться до маршрута. Способ 2 позволяет устранить эту проблему, используя прогнозируемую точку и вычисляя угол между СБПТМ и прогнозируемой точкой (Рис. 19).

Алгоритм вычисления ψ_3 с помощью способа 2 следующий:

1. Найти ближайшую точку траектории.
2. Определить прогнозируемую точку на расстоянии l в направлении $\beta = \alpha' + \psi'$.
3. Вычислить угол ξ между текущим положением СБПТМ и прогнозируемой точкой.
4. Вычислить ψ_3 как разницу между ξ и углом β , т.е. $\psi_3 = \xi - \beta$.

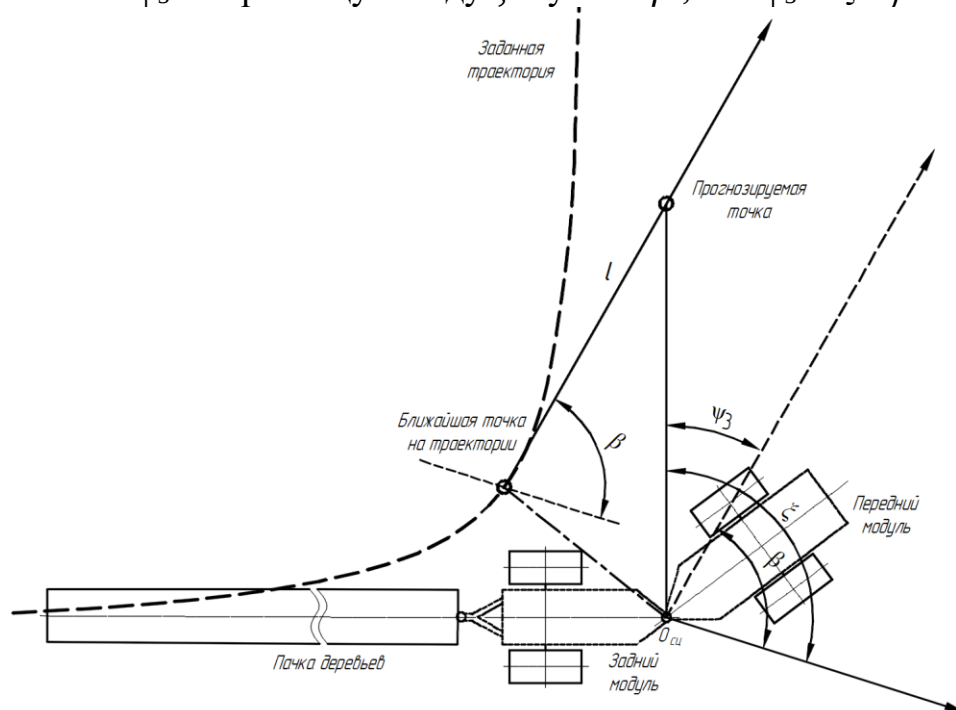


Рис. 19. Схема движения и поворота колесной СБПТМ с пачкой
Формирование итогового управляющего сигнала.

Результирующий угол ψ_t – сумма трех составляющих (Рис. 18):

$$\psi_t = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3, \quad (18)$$

Для способа 1 это выражение имеет вид:

$$\psi_t = \alpha' - \alpha + \psi' + k \cdot d, \quad (19)$$

Для способа 2 выражение для объединенного ψ_t имеет вид:

$$\psi_t = \xi - \beta + \psi_1 + \psi_2 = \xi - (\alpha' + \psi') + (\alpha' - \alpha) + \psi' = \xi - \alpha, \quad (20)$$

Закон управления движением гусеничной трелевочной машины по заданной траектории:

При выполнении поворота БПТМ с пачкой деревьев возникают реакции связей, вызванные воздействием пачки. Характер поворота зависит от соотношения между радиусом поворота R и приведенной длиной пачки L_{π} , которая определяется как расстояние между центрами давления пачки на трелевочное оборудование (O_c) и на ОП (O_6). В зависимости от этих параметров возможны два режима поворота.

Как показано на Рис. 20, если $R \geq L_{\pi}$, поворот осуществляется в первой фазе с радиусом:

$$R_1 = \frac{L_{\pi} \cos \gamma}{\sin(\psi - \gamma)}, \quad (21)$$

где γ - угол между продольной осью машины и направлением линейной скорости точки сцепки O_c ; ψ - угол между продольной осью БПТМ и пачкой деревьев.

Анализ формулы (21) показывает, что радиус поворота уменьшается при сокращении L_{π} и увеличении ψ . Если угол ψ достигает 90° , минимальный радиус R_1 становится равным L_{π} .

В некоторых конструкциях трелевочного оборудования угол ψ ограничен значением ψ_{np} , при котором происходит зажим деревьев в погрузочном устройстве. В этом случае (вторая фаза поворота) вектор скорости точки O_6 направлен под углом δ к оси пачки, а мгновенный центр вращения O_a смещен относительно O_6 на величину m , учитывающую также небольшой поперечный изгиб пачки. Радиус поворота во второй фазе определяется выражением:

$$R_2 = L_{\pi} \cdot \frac{\cos \delta \cdot \cos \gamma}{\sin(\psi + \delta - \gamma)}, \quad (22)$$

а теоретический радиус вычисляется по формуле:

$$R_t = \frac{B \cdot L_{\pi} \cos \delta \cdot \cos \gamma}{\sin(\psi + \delta - \gamma)} \cdot \frac{1}{B + d_2 - d_1} + \frac{B(d_2 + d_1)}{2(B + d_2 - d_1)}, \quad (23)$$

где B – ширина колеи машины; d_1 и d_2 – поперечные смещения мгновенных центров вращения гусениц (отстающей и забегающей).

Для управления движением гусеничной БПТМ по заданной траектории разработан закон. Система анализирует отклонения от траектории по расстоянию e_r и углу e_{θ} , а управляющее воздействие направлено на их минимизацию. Расчетная схема для определения отклонений представлена на Рис. 20.

В алгоритме управления используется точка O_c , по которой определяются e_r и e_{θ} . Точка T_1 - пересечение заданной траектории с перпендикуляром к оси БПТМ, проведенным из O_c . Точка T_2 находится на касательной к траектории в T_1 и служит для уточнения отклонения. Точка O_c расположена на оси поворота захвата трелевочного оборудования.

Для коррекции траектории движения гусеничной БПТМ сначала компенсируется линейное отклонение, затем угловое. Алгоритм включает

комбинированный регулятор, состоящий из: ПИД-регулятора (PID_r), устраняющего линейное отклонение; регулятора углового отклонения (PID_θ), воздействие которого уменьшается (путем умножения на коэффициент < 1) при активной работе PID_r . После суммирования управляющих сигналов выполняется их нормирование.

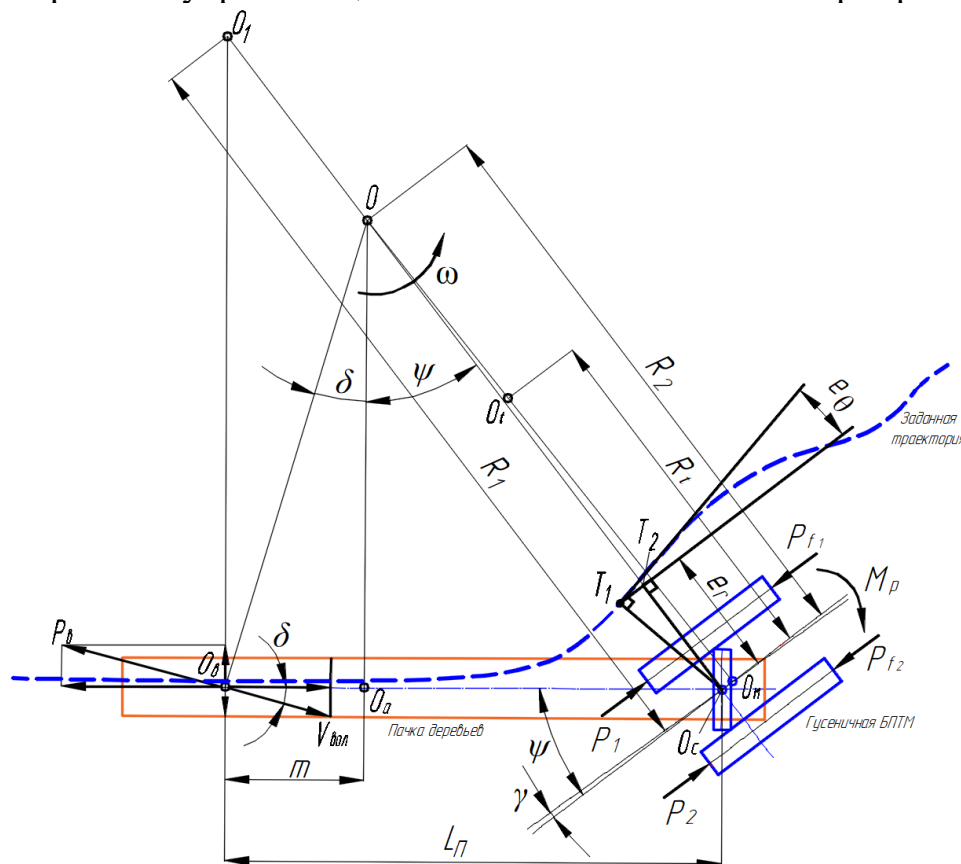


Рис. 20. Расчетная схема движения и поворота гусеничной БПТМ с пачкой

Данный регулятор позволяет обеспечить движение БПТМ с пачкой по заданной траектории в соответствии с разработанным законом управления. Структурная схема системы управления представлена на Рис. 21.

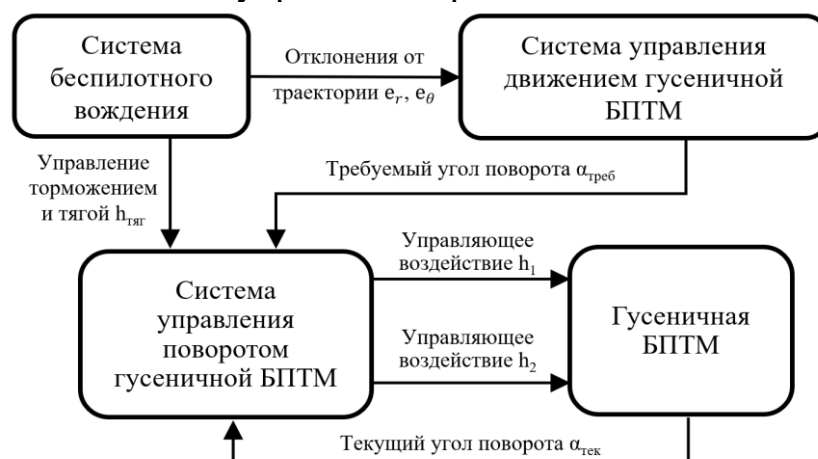


Рис. 21. Структурная схема системы управления движением гусеничной БПТМ

Применение разработанных законов позволяет: автоматизировать движение машины без участия оператора; повысить точность следования по траектории при трелевке; улучшить маневренность, предотвращая съезд с

волока; увеличить безопасность и энергоэффективность операций. Это упрощает дистанционное управление и снижает нагрузку на оператора.

В Главе 6 для комплексного определения рациональных конструктивных параметров была разработана база данных типовых условий эксплуатации лесозаготовительных машин. Эта база включает параметризованные характеристики дорожно-грунтовых условий (ДГУ) и представлена в формате виртуальной лесосеки (Глава 4).

Методом компьютерного моделирования, основанного на законах управления, были построены траектории движения колесных и гусеничных БПТМ по трелевочному волоку (Рис. 23). В ходе моделирования движения гусеничной БПТМ получены данные о частотах вращения и моментах на ведущих колесах обоих бортов. На основе известных зависимостей между моментами, передаваемыми на ведущие колеса, и их частотами вращения определены требуемые механические характеристики для различных вариантов механизмов передачи и поворота (МПП). Наибольшая эффективность управления поворотом достигнута при применении двухпоточного дифференциального механизма поворота с гидрообъемной передачей (ГОП) в параллельном потоке мощности.

Исследования показали, что для гусеничных БПТМ, работающих на лесосеке, повышение управляемости может быть обеспечено заменой традиционных механизмов поворота типа «бортовой фрикцион» на планетарные механизмы с тормозами, управляемыми гидроприводом.

Кроме того, установлено, что для перспективных гусеничных лесозаготовительных машин наиболее рациональной схемой привода ведущих колес, обеспечивающей максимальную маневренность, является гибридный МПП, в котором параллельный поток мощности реализуется через электродвигатель. Индивидуальный привод ведущих колес рационально применять в случае гусеничной БПТМ с малым $L/B = [1...1,2]$.

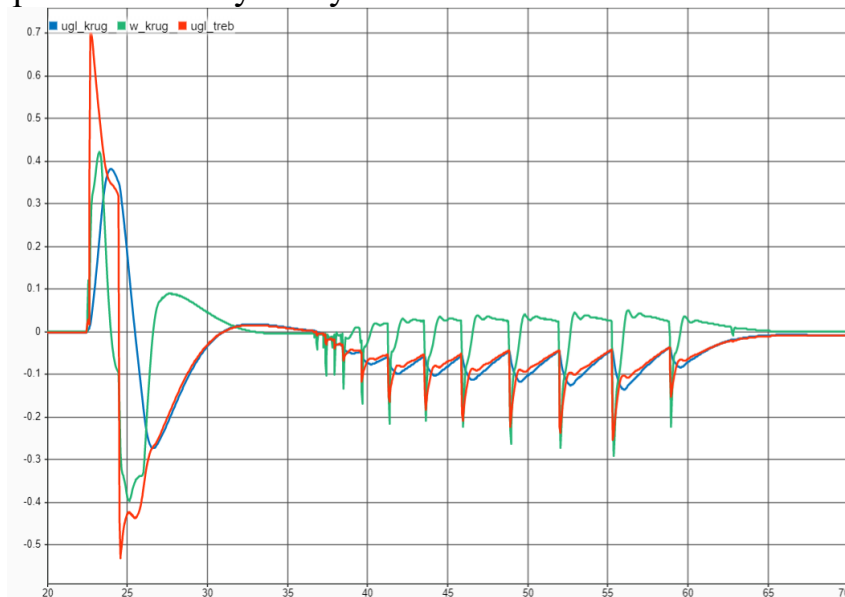


Рис. 22. Закон управления колесной СБПТМ при движении по волоку со скоростью 7 км/ч

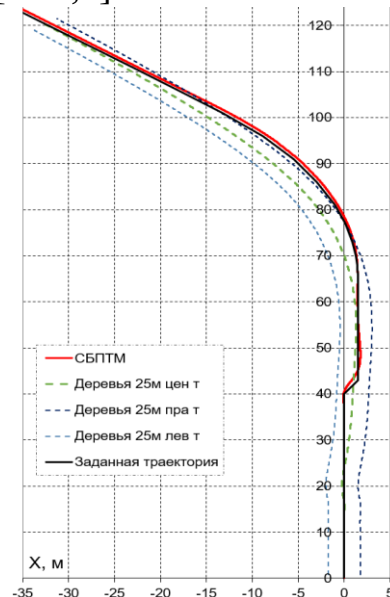


Рис. 23. Траектория движения СБПТМ

В результате проведенных теоретических исследований колесной СБПТМ в процессе моделирования было установлено, что траектория движения колесной СБПТМ с пачкой 25 м (Рис. 23) при заданном управляющем воздействии (Рис. 22) и заданной скорости укладывается в заданный «коридор волока» (Рис. 13).

Значения угловых скоростей секций и момента в узле сочленения в установившемся режиме составляют $\omega = 0,397$ 1/с и $M_{yc} = 2200$ Нм.

В Главе 7 проведено сравнительное технико-экономическое исследование коллаборативной технологии заготовки древесины.

В современных условиях лесозаготовительная отрасль активно развивается за счет внедрения энергосберегающих и роботизированных технологий, направленных на повышение производительности, безопасности и экологичности производства. Проведенные исследования сравнивают традиционные и коллаборативные (беспилотные) технологии заготовки древесины, оценивая их технико-экономическую эффективность. Методология исследования включала анализ производительности лесосечных машин на основе хронометражных данных, технических характеристик и организационных условий, использование аналитических функционалов, учитывающих эксплуатационные, экономические и технологические показатели, а также метод сплошного перебора для оптимизации состава парка машин. Особое внимание уделено расчету экономического эффекта от внедрения беспилотных технологий, включая снижение затрат на ГСМ, зарплату операторов и энергопотребление.

Ключевые результаты исследования демонстрируют ряд значительных преимуществ БПТМ. Так, порожняя БПТМ в 2 раза может быстрее двигаться по сравнению с традиционными машинами, что сокращает время цикла трелевки и позволяет повысить производительность в среднем на 20%.

Экономический эффект (Рис. 25) проявляется в исключении затрат на зарплату оператора (до 3,1 млн руб. в год), снижении энергопотребления климатических систем на 72 кВт·ч/сутки (экономия до 1080 руб./день), оптимизации расхода топлива (экономия 15750 л/год или 945 тыс. руб./год) и уменьшении металлоемкости (экономия 3600 л дизеля/год или 216 тыс. руб./год). Однако внедрение БПТМ требует значительных первоначальных вложений: к примеру, стоимость оборудования для беспилотного управления скиддером составляет порядка 105 тыс. долл. (Рис. 24), но при этом снижаются затраты за счет уменьшения металлоемкости и необходимости изготовления кабины оператора. Так за три года экономия от внедрения одной БПТМ при рабочей смене 12 часов будет составлять чуть больше 10,5 млн. рублей (Рис. 25).

За год энергоэффективность БПТМ составляет более 86 тыс. кВт*ч, что позволяет снизить выбросы CO₂ до 57 тонн в год (Рис. 26, 27).

Для крупных лесозаготовительных предприятий внедрение БПТМ экономически оправдано благодаря снижению эксплуатационных затрат и значительному росту производительности, в то время как для малых предприятий традиционные технологии могут оставаться более выгодными из-за высоких первоначальных затрат. Перспективы развития коллаборативных

технологий в лесозаготовке связаны с дальнейшим совершенствованием технических решений и снижением стоимости оборудования внешней и внутренней сенсорной сети машины, что сделает их более доступными для широкого круга предприятий.

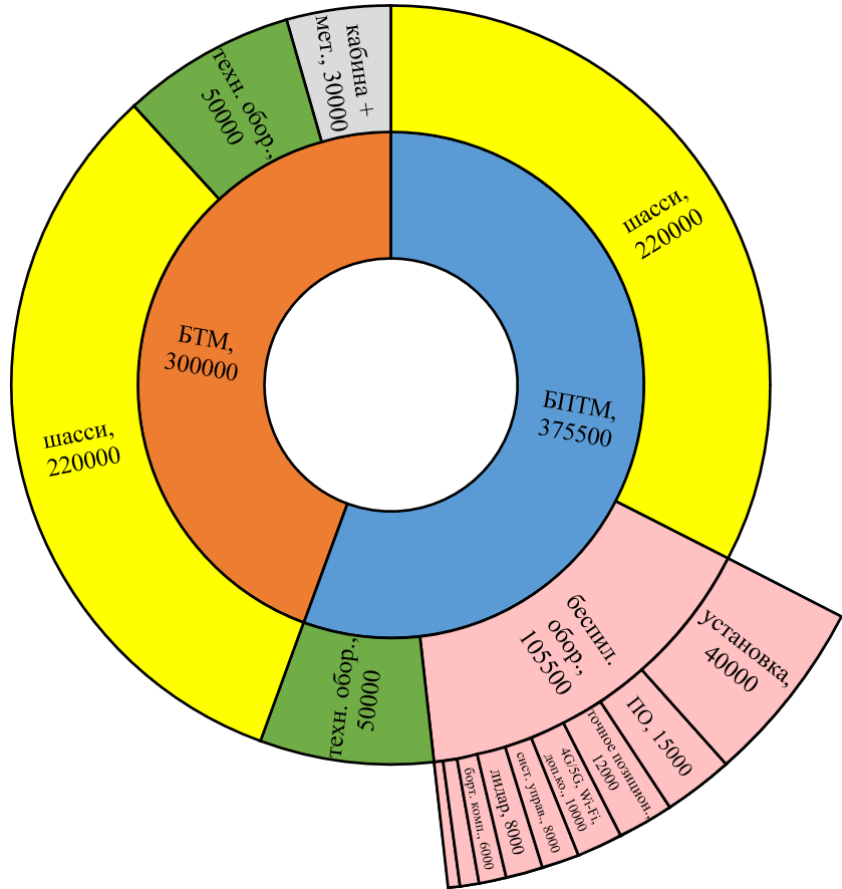


Рис. 24. Сравнение стоимости бесчokerной трелевочной машины (скиддера) с БПТМ (долл.)

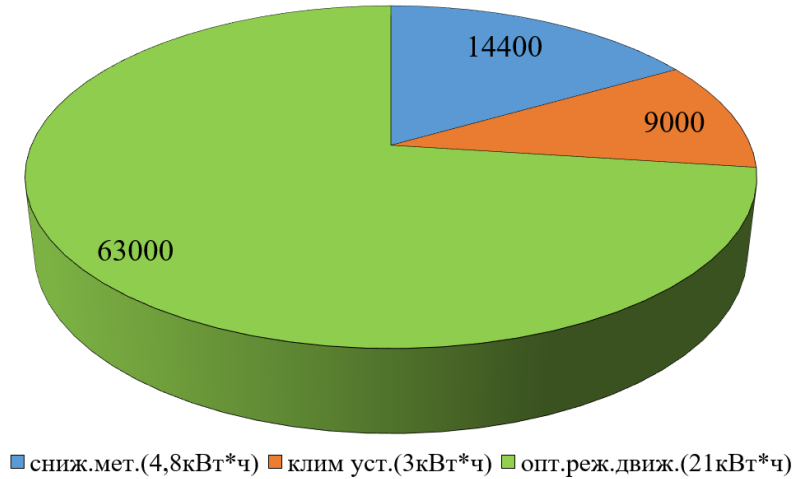


Рис. 26. Энергоэффективность за 1 год (кВт*ч)

Экономический эффект от внедрения коллаборативной технологии достигается за счет: уменьшения затрат связанных с заработной платой оператора трелевочной машины; увеличении скорости движения БПТМ в порожнем состоянии и исключения простоев связанных с перерывами на

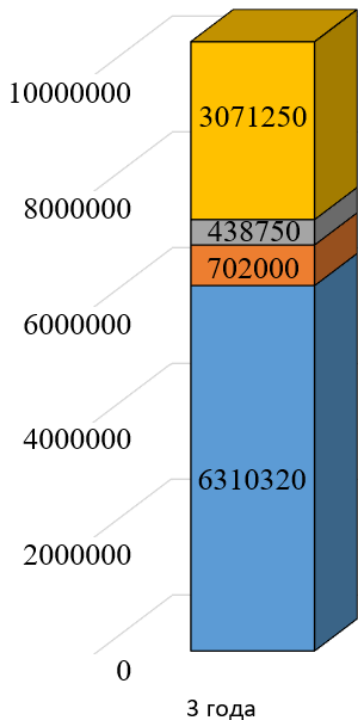


Рис. 25. Экономия внедрения БПТМ (руб.)

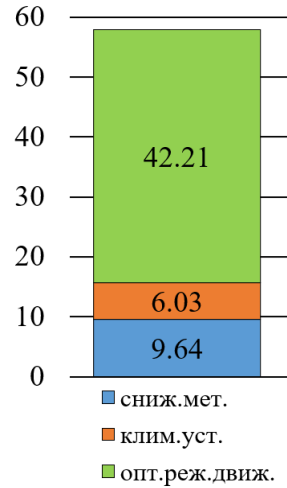


Рис. 27. Снижение выбросов CO₂ (тонн г.)

физиологические потребности человека, что приводит к увеличению производительности машины в смену; повышения энергоэффективности БПТМ за счет того, что рационально расходуется энергия при движении в порожнем и груженном состоянии по маршруту волока, а также снижении энергопотребления климатических систем и уменьшения металлоёмкости, что приводит к уменьшению на 18% затрат связанных с ГСМ.

На начальном этапе внедрения коллаборативной технологии заготовки древесины необходимо будет своевременно повышать квалификацию операторов и обслуживающего персонала БПТМ в эксплуатации и обслуживании систем распознавания условий движения и управления движением, которые устанавливаются на машины. В динамично развивающемся рынке электроники в области беспилотных систем необходимо определиться с качественным и приемлемым по стоимости оборудованием, а также его надежными поставщиками. Все это на начальном этапе потребует определенных дополнительных экономических вливаний, которые в последующем окупятся.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1) Разработана коллаборативная технология заготовки деревьев и сортиментов беспилотными колесными и гусеничными машинами, отличающаяся применением робототехнических комплексов, при трелевке и порожнем ходе в автономном режиме, при работе на лесосеке и верхнем складе в дистанционно управляемом режиме, позволяющая повысить безопасность труда и энергоэффективность при выполнении операций трелевки и экономическую эффективность лесозаготовок;

2) Созданы имитационные математические модели для анализа движения колесных и гусеничных БПТМ с двумя типами технологического оборудования: с пачковым захватом и самозажимным коником. Разработанные модели применяются для оценки подвижности машин на этапе проектирования. Уравнения динамики формируются с помощью программных комплексов, автоматизированного моделирования систем твердых тел, что позволяет учитывать кинематику и динамику колесного и гусеничного движителей.

3) Верифицированные модели динамики колесной и гусеничной БПТМ с учетом экспериментально определенных параметров дорожно-грунтовых условий и данных, полученных в результате работы контрольно-измерительного оборудования, пригодны для исследования динамики криволинейного движения машин с полупогруженной пачкой деревьев по плотному грунту. Сравнение натурных испытаний и имитационного моделирования показало, что отклонение от расчетной траекторий не превышает 16%, что соответствует допустимой погрешности.

4) Разработаны законы управления движением гусеничных и колесных БПТМ, направленные на повышение безопасности, энергоэффективности и экономической эффективности лесозаготовок. Управление может осуществляться как оператором дистанционно, так и автоматической беспилотной системой.

5) Предложен метод определения оптимальных параметров трансмиссии и технологического оборудования БПТМ с использованием имитационного моделирования на виртуальной лесосеке с заданными дорожно-грунтовыми условиями. Метод включает комплекс вычислительных мероприятий для оценки проходимости машины по микропрофилям пасечных и магистральных волоков на этапе проектирования, что позволяет определить требуемые конструктивные параметры трансмиссии и ходовой системы БПТМ для движения по волоку с максимальной энергоэффективностью. Разработана методика виртуальных испытаний, учитывающая различные режимы движения, скорость и траекторию БПТМ с пачкой деревьев и в порожнем состоянии в соответствии с лесоводственными требованиями к технологическим процессам лесосечных работ.

6) Разработан метод математического моделирования движения колесных БПТМ по опорным основаниям трелевочного волока, позволяющий оценивать безопасность и энергоэффективность движения при трелевке деревьев в полупогруженном состоянии и сортиментов на этапе проектирования. Особенность метода заключается в возможности исследования БПТМ с различными конструктивными особенностями трелевочного оборудования. Математическая модель позволяет имитировать поведение БПТМ в реальных условиях эксплуатации, сокращая сроки проектирования, доводочных испытаний и повысить безопасность и энергоэффективность движения по трелевочному волоку. Сравнение результатов имитационного моделирования с натурными экспериментами подтвердило адекватность разработанной математической модели: погрешность по энергетическим и кинематическим показателям криволинейного движения при выполнении маневров «Поворот на пасечном ($R=10\text{м}$) и магистральном ($R=30\text{м}$) волоке» не превышает 11%, при выполнении маневра «Криволинейная траектория» - 13%.

7) Установлено, что применение разработанных законов для обеспечения движения по заданной траектории волока, повышает безопасность и энергоэффективность трелевки. Особенностью разработанных законов управления является автономное движение БПТМ (как порожней, так и с грузом) без участия оператора. Отклонение от заданной траектории для машины с полупогруженной пачкой деревьев не превышает 12%, а для порожней БПТМ или при транспортировке сортиментов - 10%.

8) Определены рациональные схемы механизмов передачи-поворота для гусеничных БПТМ. Наилучшие показатели управляемости достигнуты при использовании двухпоточного дифференциального механизма с гидрообъемной передачей (ГОП) в параллельном потоке мощности. Для машин, работающих на лесосеке, рекомендуется замена традиционных бортовых фрикционов на бортовые планетарные механизмы с гидроприводом. Для перспективных гусеничных лесозаготовительных машин рациональной схемой привода ведущих колес для обеспечения максимум возможностей по управлению движением является гибридный МП, в котором в параллельном потоке мощности установлен электродвигатель. Индивидуальный привод ведущих колес рационально применять в случае гусеничной БПТМ с малым $L/B = [1...1,2]$.

9) Установлено, что разработанные законы управления движением беспилотными трелевочными колесными и гусеничными машинами, позволяют повысить экологическую безопасность при выполнении маневров на лесосеке, путем предотвращения выезда за пределы трелевочного волока.

10) Установлено, что коллаборативная технология заготовки древесины с применением БПТМ обеспечивает значительное повышение технико-экономической и экологической эффективности лесозаготовительных работ. Данная технология отличается применением автономных и дистанционно управляемых робототехнических комплексов, что позволяет увеличить производительность на 20% за счёт сокращения времени цикла трелёвки и исключения простоев, связанных с человеческим фактором. Экономический эффект достигается за счёт снижения затрат на заработную плату оператора (до 3,1 млн руб. в год), оптимизации расхода топлива (экономия 15750 л/год), уменьшения энергопотребления (86 тыс. кВт·ч/год) и металлоёмкости конструкции. Дополнительным преимуществом является снижение выбросов CO₂ на 57 тонн в год, что повышает экологическую безопасность производства.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ: В НАУЧНЫХ ИЗДАНИЯХ ИЗ ПЕРЧНЯ ВАК РФ:

1. Клубничкин В.Е. Исследование факторов, определяющих выбор типа и грузоподъемности лесозаготовительных погрузочно-транспортных машин / В.Е. Клубничкин, В.Е. Клубничкин, В.Н. Наумов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 1. С. 87-103. (1,1 п.л./0,5 п.л.).

2. Клубничкин В.Е., Клубничкин В.Е. Выбор критерия оценки влияния типажа и грузоподъемности погрузочно-транспортных машин на эффективность трелевочного процесса // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2024. №3 (146). С. 82-97. (1 п.л./0,5 п.л.).

3. Рогачев Д.И., Клубничкин В.Е. Реализация сегментации деревьев для системы поддержки принятия решений оператора лесозаготовительной машины // Системы. Методы. Технологии. 2023. №4(60). С. 169-175. (0,5 п.л./0,25 п.л.).

4. Клубничкин В.Е., Рогачев Д.И., Козлов И.В. Фильтрация шумов сканируемого участка леса на основе цветовой модели // Лесотехнический журнал. 2023. Т. 13. № 4 (52). С. 141-158. (1,125 п.л./0,5 п.л.).

5. Исследование тормозных свойств колесного форвардера 8×8 / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. 2021. Т.11. №4 (44). С. 124-138. (0,93 п.л./0,4 п.л.).

6. Клубничкин В.Е., Клубничкин В.Е., Рогачев Д.И. Автоматизация технологических процессов лесозаготовительной машины // Научно-технический вестник Поволжья. 2021. №12. С. 114-117. (0,3 п.л./0,1 п.л.).

7. Расчет устойчивости колесной валочно-сучкорезно-раскряжевой машины на опрокидывание / В.Е. Клубничкин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2021. №3 (134). С. 99-106. (0,5 п.л./0,2 п.л.).

8. Разработка узла сочленения лесной погрузочно-транспортной машины / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. 2020. Т.10. №4 (40). С. 217-226. (0,63 п.л./0,3 п.л.).

9. Математическое описание взаимодействия элементов почвогрунта с рабочими поверхностями лесопожарного грунтомета-полосопрокладывателя / В.Е. Клубничкин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. №2 (129). С. 117-125. (0,56 п.л./0,16 п.л.).
10. Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Карташов А.Б. Краткий анализ тенденций развития лесозаготовительных машин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2020. №3 (130). С. 93-102. (0,62 п.л./0,22 п.л.).
11. Влияние угла трения трака о почву на коэффициент сцепления трака / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2019. Т. 23. №6. С. 75-80. (0,37 п.л./0,15 п.л.).
12. Влияние шага грунтозацепов на тяговые свойства гусеничного движителя / В.Е. Клубничкин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева 2019. №1 (124). С. 151–158. (0,5 п.л./0,2 п.л.).
13. Программа и методика проведения экспериментальных исследований погрузочно-транспортной машины в прикладном пакете программ / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. 2017. Т.7. №4. С. 175-182. (0,5 п.л./0,2 п.л.).
14. Определение динамических нагрузок в трансмиссии гусеничной лесозаготовительной машины при преодолении препятствий / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. 2017. Т.7. №1 (25). С. 185-196. (0,75 п.л./0,3 п.л.);
15. К определению буксования гусеничной лесозаготовительной машины / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. 2016. Т.6. №4 (24). С. 201-207. (0,44 п.л./0,12 п.л.).
16. Влияние распределения нормальных давлений движителей гусеничных лесозаготовительных машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5 на колееобразование / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. 2016. Т.6. №3 (23). С. 167-176. (0,63 п.л./0,18 п.л.).
17. Оценочный показатель проходимости лесозаготовительных машин / В.Е. Клубничкин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. №4. С. 176-183. (0,5 п.л./0,18 п.л.).
18. О проходимости лесозаготовительных машин на гусеничном ходу и агрегатных машин на их базе / В.Е. Клубничкин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. №4. С. 169-175. (0,44 п.л./0,12 п.л.).
19. Критерии оценки качества транспортно-технологических машин / В.Е. Клубничкин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. №4. С. 128-168. (2,5 п.л./0,32 п.л.).
20. Моделирование движения гусеничных машин по лесным дорогам / В.Е. Клубничкин [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2016. №1. С. 171-176. (0,38 п.л./0,12 п.л.).
21. Модель нагруженности элементов трансмиссии при управляемом криволинейном движении гусеничной лесозаготовительной машины / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. 2015. Т.5. №2 (18). С. 166-176. (0,68 п.л./0,2 п.л.).
22. К вопросу оценки устойчивости шарнирно-сочлененного колесного шасси лесозаготовительной машины / В.Е. Клубничкин [и др.] // Вестник

Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2015. Т. 19. №1. С. 111-115. (0,31 п.л./0,15 п.л.).

23. Модель взаимодействия элементов опорной поверхности гусениц лесозаготовительной машины с грунтом / В.Е. Клубничкин [и др.] // Лесотехнический журнал. 2014. Т.4. №4 (16). С. 191-200. (0,65 п.л./0,2 п.л.).

24. Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Бухтояров Л.Д. Исследование кинематики и динамики движителя гусеничной лесозаготовительной машины // Лесотехнический журнал. 2014. Т.4. №4 (16). С. 179-190. (0,68 п.л./0,3 п.л.).

25. Наноматериалы и их использование в двигателях внутреннего сгорания / В.Е. Клубничкин [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2014. Т.18. №4. С.150-153. (0,25 п.л./0,1 п.л.).

26. Клубничкин Е.Е., Макуев В.А., Клубничкин В.Е. Определение нагруженности ходовой системы многооперационной лесосечной машины // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2013. №3 (95). С.175-177. (0,2 п.л./0,1 п.л.).

В ИЗДАНИЯХ, ИНДЕКСИРУЕМЫХ В МЕЖДУНАРОДНОЙ БАЗЕ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ SCOPUS:

1. Klubnichkin V.E., Kotiev G.O., Makarov V.S. Assessing load on support rollers of the tracked load-transport timber harvesting vehicle through simulated mathematical modeling // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1086. 012008. doi:10.1088/1757-899X/1086/1/012008. (0,4 п.л./0,25 п.л.).

2. Effect of structural parameters on roll motions of the wheeled timber harvesting vehicle / V.E. Klubnichkin [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971(5). 052093. doi:10.1088/1757-899X/971/5/052093. (0,4 п.л./0,18 п.л.).

3. Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Kotiev G.O. Developing a method of theoretical evaluation of the tracked timber harvesting machine undercarriage element loading // Proceedings of the ISTVS 19th International and 14th European-African Regional Conference. Budapest, Hungary. 2017. p. 134-156. (1,38 п.л./0,5 п.л.).

ПРОЧИЕ ИЗДАНИЯ:

1. Клубничкин В.Е., Лазарев Д.М. Разработка динамической модели гусеничной беспилотной погрузочно-транспортной машины // В сборнике: Современный лесной комплекс страны: актуальные векторы развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор А.А. Платонов. Воронеж, 2023. С. 94-100. (0,44 п.л./ 0,3 п.л.).

2. Клубничкин В.Е. Формирование облика гусеничных беспилотных трелевочных машин // Материалы XX Международной научно-технической конференции. «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» Вологда: ВГУ, 2022. С. 287-291. EDN: CNYUER (0,34 п.л.).

3. Клубничкин В.Е. Коллаборативная технология трелевки древесины // В сборнике: Современный лесной комплекс страны: проблемы и тренды развития. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Отв. редактор А.А. Платонов. Воронеж, 2022. С. 26-31. (0,4 п.л.).