Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

На правах рукописи

Aug

Агапов Максим Евгеньевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ РАБОЧЕГО ОРГАНА ЦЕПНОГО ТРАНШЕЙНОГО ЭКСКАВАТОРА

Специальность 05.05.04 - «Дорожные, строительные и подъемнотранспортные машины»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

кандидат технических наук, доцент С.Д. Игнатов

Омск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4				
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА 10				
1.1 Цепной траншейный экскаватор. Конструкция и классификация 10				
1.2 Траншеи и предъявляемые к ним требования 19				
1.3 Анализ существующих систем управления землеройными машинами				
1.4 Анализ процесса взаимодействия движителя с опорной поверхностью 22				
1.4.1. Анализ стохастических математических моделей микрорельефа грунта 23				
1.4.2 Описание процесса взаимодействия ходового оборудования с неровностями микрорельефа				
1.5 Выбор и обоснование критерия эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора				
1.6 Цели и задачи исследования				
Выводы по главе				
2 МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ 38				
2.1 Методы научных исследований				
2.2 Методы экспериментальных исследований 39				
2.3 Структура работы				
Выводы по главе				
3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЦЕПНОГО ТРАНШЕЙНОГО ЭКСКАВАТОРА				
3.1 Рабочий процесс цепного траншейного экскаватора с устройством управления положением рабочего органа в поперечной плоскости				
3.2 Математическая модель опорной поверхности				
3.3 Математическая модель взаимодействия ходового оборудования с микрорельефом				
3.4 Уравнения геометрических связей звеньев цепного траншейного экскаватора				
3.5 Математическая модель взаимодействия рабочего органа цепного траншейного экскаватора с разрабатываемым грунтом в поперечной плоскости. 62				
3.6 Математичсекая модель изменения угла наклона рабочего органа от перемещения штока гидроцилиндра				

3.7 Математическая модель гидропривода устройства управления положение	M
раоочего органа и скоростью движения цепного траншеиного экскаватора 6	18
3.8 Математическая модель управляющего устройства	1
Выводы по главе	5
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ 8	6
4.1 Обоснование параметров, исследуемых в работе	6
4.2 Экспериментальные исследования	57
4.3 Теоретические исследования	13
4.3.1 Условия проведения теоретических исследований	13
4.3.2 Исследование гидропривода наклона рабочего органа цепного траншейног экскаватора в поперечной плоскости	ro 95
4.3.3 Исследование имитационной модели взаимодействия рабочего орган цепного траншейного экскаватора с грунтом в поперечной плоскости	1a 96
4.3.4 Исследование имитационной модели рабочего процесса цепног траншейного экскаватора	ro 97
4.4. Аппроксимация зависимостей 10)1
4.5 Решение задачи оптимизации 10	19
4.6 Инженерная методика оптимизации параметров устройства управлени положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечно плоскости	ия рй 6
4.7 Расчет экономического эффекта11	7
Выводы по главе12	.3
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	.4
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ12	.6
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	27
	2

Актуальность темы исследования. В настоящее время высокими темпами идет строительство трубопроводов, что невозможно без использования землеройных машин (3М). Большое распространение получили траншейные экскаваторы непрерывного действия, такие как цепные траншейные экскаваторы (ЦТЭ).

Во время работы ЦТЭ может перемещаться по наклонной грунтовой поверхности, что в совокупности с возмущающими воздействиями со стороны рельефа приводит к ошибке позиционирования рабочего органа (РО) в поперечной плоскости и, как следствие, к производству траншеи неправильной формы.

Нарушение вертикальности стенок траншеи приводит к ее обрушению и ошибкам в укладке трубопровода, что недопустимо. В связи с этим актуальной задачей является обеспечение проектной формы траншеи, производимой ЦТЭ, без использования дополнительных работ по зачистке дна и выравниванию стенок, учитывая при этом требования СНиП.

Ручное управление положением РО в поперечной плоскости не может обеспечить требуемую геометрическую точность, а оператор, управляющий машиной, не способен использовать весь технологический потенциал ЦТЭ.

Для повышения эффективности рабочего процесса (РП) ЦТЭ и точности разработки траншеи необходимо создать устройство управления (УУ), которое позволит обеспечить проектную форму траншеи путем регулирования положения РО в поперечной плоскости.

Степень разработанности темы исследования.

Вопросами изучения, разработки и модернизации землеройных машин занимались различные коллективы научно-исследовательских институтов (СибНИИстроймаш, г. Красноярск, ВНИИЗеммаш, г. Санкт-Петербург), ВУЗов (ВНИИГиМ, НИ ИрГТУ, МАДИ, МГСУ, СПбГАСУ, НИ ТГАСУ, СибАДИ), конструкторских бюро (СКБ ЗАО «Сгазстроймашина», г. Москва), заводов-

изготовителей (ФГУП «Дмитровский экскаваторный завод», г. Дмитров, ОАО «Ирмаш», г. Брянск, ООО «Михневский ремонтно-механический завод», г. Санкт-Петербург) и др. Вопросами изучения, разработки и модернизации землеройных и землеройно-транспортных машин занимались такие ученые как: В.А. Алексеев, К.А. Артемьев, **Β**.Φ. Амельченко, A.M. Васьковский, В.С. Дегтярев, Ю.М. Княжев, Б.Д. Кононыхин, Е.Ю. Малиновский, А.М. Холодов, И.А. Недорезов, А.А. Скловский и др. В частности экскаваторами непрерывного действия, занимались: В.С. Щербаков, В.Г. Зедгенизов, И.А. Недорезов, А.Н. Стрельников, Э.Н. Кузин, Р.Ю. Сухарев, М. В. Суковин, С.Д. Игнатов, В.Г., З.Е. Гарбузов, В.М. Донской и др. В своих работах Э. Н. Кузин и Р. Ю. Сухарев занимались вопросами автоматизации землеройных машин, рассматривали причины возникновения ошибки позиционирования РО и вопросы повышения точности позиционирования РО ЦТЭ. В работах М.В. Суковина, С.Д. Игнатова, В.Г. Зедгенизова, А.Н. Стрельникова рассмотрены процессы распределения энергии, а также вопросы повышения эффективности и производительности ЦТЭ. Работа В.С. Щербакова посвящена исследованию структуры ЗТМ, представлены геометрических связей основных уравнения элементов машин И ИХ математическое описание. З.Е. Гарбузов, В.М. Донской подробно описали действия, конструкции экскаваторов непрерывного также рассматривали многоковшовые и скребковые рабочие органы ЦТЭ. А. К. Данилов изучал вопросы совершенствование конструкций режущих элементов и систем приводов рабочих органов ЦТЭ.

Объектом исследования является рабочий процесс цепного траншейного экскаватора.

Предметом исследования являются закономерности, устанавливающие связь между технологическими параметрами рабочего процесса, параметрами устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости и критерием эффективности.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора за счет обеспечения

5

проектной формы траншеи путем стабилизации положения рабочего органа в поперечной плоскости.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) выбрать и обосновать критерий эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора;

2) разработать математическую модель рабочего процесса цепного траншейного экскаватора с усовершенствованным устройством управления положением рабочего органа в поперечной плоскости;

3) выявить функциональные зависимости, связывающие технологические параметры рабочего процесса цепного траншейного экскаватора и основные параметры устройства управления положением рабочего органа в поперечной плоскости с критерием эффективности;

4) разработать инженерную методику оптимизации параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости.

Научная новизна диссертационной работы:

1) функциональные зависимости, связывающие технологические параметры рабочего процесса цепного траншейного экскаватора, основные параметры устройства управления положением рабочего органа в поперечной плоскости с критерием эффективности;

2) аппроксимированные зависимости критерия эффективности от исследуемых параметров цепного траншейного экскаватора и его рабочего процесса;

3) математическая модель рабочего процесса цепного траншейного экскаватора с усовершенствованным устройством управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы.

Разработана математическая модель рабочего процесса цепного траншейного экскаватора, которая отличается от существующих тем, что имеет в составе модель устройства двухконтурного управления положением РО в поперечной плоскости. Применение полученных результатов позволит увеличить технологические

возможности цепного траншейного экскаватора за счет компенсации неуправляемых перемещений рабочего органа в поперечной плоскости, сократить время на проектирование машины. Результаты проведенных научных исследований внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «СибАДИ». Разработанная инженерная методика оптимизации параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости внедрена на АО «Омсктрансмаш» (г. Омск).

Диссертационная работа соответствует пунктам 2 (методы расчета технологических параметров машин, исходя из условий их применения) и 4 (методы управления машинами) паспорта научной специальности 05.05.04 Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины.

Методология и методы исследований. Работа базируется на методологии системного анализа. Использован комплексный метод исследований, включающий проведение теоретических и экспериментальных исследований. Используются математическая модель РП ЦТЭ и регрессионный анализ, а также методы теории алгоритмов.

Положения, выносимые на защиту:

1) критерий эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора, обоснованный в работе;

2) математическая модель рабочего процесса цепного траншейного экскаватора с усовершенствованным устройством управления положением рабочего органа в поперечной плоскости;

 функциональные зависимости, связывающие технологические параметры рабочего процесса цепного траншейного экскаватора, параметры устройства управления положением рабочего органа в поперечной плоскости с критерием эффективности;

4) аппроксимированные зависимости критерия эффективности от исследуемых параметров цепного траншейного экскаватора и его рабочего процесса;

5) алгоритм работы устройства управления положением рабочего органа в поперечной плоскости и скоростью движения цепного траншейного экскаватора;

 6) инженерная методика оптимизации параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости.

Степень достоверности научных положений обеспечивается подтверждением адекватности математической модели, принятием корректных допущений, корректным использованием методов математического моделирования и экспериментальными исследованиями.

Апробация результатов работы. Юбилейный международный конгресс производственной «Креативные В образовательной, научной подходы И деятельности», посвященный 80-летию академии, Омск, 17-18 ноября 2010г.; Региональная научно-техническая конференция молодых ученых, студентов, аспирантов, (с международным участием) «Новые технологии на транспорте в энергетике и строительстве» (к 90-летию Омского командного речного училища), Омск, 2-3 декабря 2010г.; VI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Развитие дорожно-транспортного комплекса И строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования», 18-20 мая 2011г.; Всероссийская 65-я научно-практическая конференция ФГБОУ ВПО «СибАДИ» «Ориентированные фундаментальные и прикладные исследования – основа модернизации и инновационного развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплексов России», Омск, 28-30 ноября 2011г.; VII Всероссийская научно-практическая конференция ФГБОУ ВПО «СибАДИ» (с международным участием) «Развитие дорожно-транспортного комплекса И строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования», Омск, 26-27 апреля 2012г.; Международный конгресс «Архитектура, Строительство, Транспорт», 1-3 октября 2013г.; Международная конференция «Современные научно-практическая научные исследования: актуальные проблемы и тенденции», Омск, 23 декабря 2014г.; Международная научно-практическая конференция «Развитие дорожно-транспортного И строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклады науки», Омск, 2014г.; Международная научно-практическая конференция «Архитектура, строительство транспорт» (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»), г. Омск, 2-3 декабря 2015г.; 76-я Студенческая научно-техническая конференция и I тур конкурса на лучший научный доклад студентов, Омск, 19-21 апреля 2016г.; Международная научно-практическая конференция «Вопросы современных научных исследований», Омск, 11 июня 2019г; XIII Международная IEEE научно-техническая конференция "Динамика систем, механизмов и машин", Омск, Россия, 05-07 ноября 2019 г.

Публикации по работе. Материалы выполненной работы опубликованы в 13 печатных работах, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК и 1 статья в рецензируемом журнале. Получено свидетельство о регистрации электронного ресурса.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, общих выводов по работе, списка использованных в работе сокращений, списка литературы, состоящего из 134 наименований, и приложений на 3 страницах. Общий объем работы состоит из 146 страниц основного текста, 7 таблиц и 77 рисунков.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА.

1.1 Цепной траншейный экскаватор. Конструкция и классификация.

Экскаватор – это основной тип землеройных машин. Они делятся по принципу работы на две крупные категории: многоковшовые (экскавторы непрерывного действия) и одноковшовые (экскаваторы цикличного действия). Из названия понятно, что рабочее оборудование экскаватора непрерывного действия включает несколько ковшей, которые непрерывно перемещаются по замкнутой траектории [1, 30, 55, 111,123].

Экскаваторы бывают различных видов [111, 123]:

- экскаватор с механической лопатой;

- экскаватор – драглайн;

- экскаватор – струг;

экскаваторы – планировщики;

- мини – экскаваторы;

- траншейные экскаваторы.

В данной работе рассматривается ЦТЭ, поэтому детально остановимся на этом виде экскаваторов непрерывного действия.

Траншейные экскаваторы предназначены для разработки траншей под различные коммуникации, включая магистральные трубопроводы. Также они могут использоваться для рекультивации земель, при строительстве и ремонте дорог, при проведении мелиоративных работ, при присыпке дна траншей и засыпке их разрыхленным грунтом. Наиболее эффективно примененять траншейные экскаваторы для прокладки коммуникаций вдоль дорог и в сельской местности, в местах, где необходимо выкапывать длинные траншеи за короткие сроки, и где нет опасности повреждения существующих коммуникаций. В городских условиях применяют и траншейные технологии с применением одноковшовых экскаваторов, и технологии с использованием установок направленного горизонтального бурения (бестраншейные) [1, 111, 112, 123]. Экскаваторами непрерывного действия называют ЗМ, которые разрабатывают и транспортируют грунт непрерывно. Обе эти операции (копание и транспортирование грунта) выполняются одновременно. Совмещение и непрерывность рабочих процессов выгодно отличает такие экскаваторы от ЗМ циклического действия, у которых копание и транспортирование грунта производится периодически и последовательно, например, одноковшовые экскаваторы и скреперы, [1, 15, 111, 112, 123].

Достоинства таких специальных машин становятся более наглядными, если сравнивать с другими методами строительства траншеи. Одноковшовые экскаваторы, в свою очередь, не дают четкой, ровной траншеи одной глубины, а использовать для обратной засыпки комья извлеченного грунта зачастую невозможно. Производительность одноковшовых экскаваторов намного ниже изза того, что рабочий процесс дискретный (заполнение ковша грунтом, выемка грунта из траншеи, освобождение ковша, возврат ковша в траншею, перестановка экскаватора). ЦТЭ выполняет работу непрерывно и передвигается самостоятельно с определенной скоростью, которая связана со скоростью вращения цепи РО [15, 111, 112, 123].

Непрерывная разработка грунта в течение рабочего времени и совмещение рабочих процессов обеспечивают высокую производительность не только траншейных экскаваторов непрерывного действия, но и производительность труда в целом. При этом на таких машинах существенно облегчается труд машинистов, так как им отведена роль набюдателя за протеканием процессов, при этом они могут при необходимости изменять режим работы механизмов [26, 72, 106].

По результатам сравнения одноковшовых и многоковшовых экскаваторов отметим преимущества вторых [22, 106]:

1) многоковшовый экскаватор выполняет непрерывную работу по разработке и экскавации породы, а у одноковшового экскаватора время экскавации составляет лишь 15-30% от времени работы (цикла);

11

2) многоковшовые экскаваторы имеют меньшую металлоемкость, чем одноковшовые, при условии производительности свыше 100-150 м³/ч;

3) у многоковшовых экскаваторов удельный расход энергии на 1 м³ выемки ниже, чем у одноковшовых такой же производительности;

 при работе в карьерах, многоковшовые цепные экскаваторы позволяют выполнять разработку прослоек полезных ископаемых отдельно от пустой породы;

5) ЦТЭ способны разрабатывать грунт на большую глубину с практически окончательной отделкой и получением точного профиля поперечного сечения выемки, когда одноковшовые разрабатывают глубокие выемки, имеющие ряд уступов, в каждом из которых остается большой недобор;

6) экскаваторы непрерывного действия специального исполнения без рыхления могут разрабатывать грунты с большой силой удельного сопротивления копанию, которая может достигать 60 кH/м², а одноковшовые – только с 5-8 кH/м².

Одноковшовый экскаватор имеет преимущества перед многоковшовым в следующем [14, 22, 69, 106]:

1) одноковшовые экскаваторы разрабатывают грунты всех категорий, даже скальных пород, при предварительном их дроблении, а многоковшовый экскаватор способен работать с грунтами I-IV категорий, которые не имеют крупных каменистых включений, также в тяжелых грунтах однородной массы;

2) для разработки твердых и мерзлых пород требуется использование специальных конструкций РО многоковшовых экскаваторов.

При работе с грунтами I-IV категорий у многоковшового экскаватора стоимость и эксплуатационные расходы на 1 м³ извлеченного грунта значительно меньше, за исключением особо неблагоприятных условий [1, 13, 106].

Многоковшовые экскаваторы имеют ограниченное применение в тяжелых климатических условиях и при разработке пород высокой плотности, а также грунтов, которые имеют крупные твердые включения. [26, 123].

В результате совершенствования конструкции многоковшовых экскаваторов значительно изменилось соотношение технико-экономических показателей ОДНОКОВШОВЫХ И многоковшовых экскаваторов. Ha сегодняшний день экскаваторы непрерывного действия успешно разрабатывают породы (особенно это касается очень плотных грунтов), которые не могут разрабатываться одноковшовыми экскаваторами без рыхления [1, 22, 106].

При многочисленных достоинствах, к экскаваторам непрерывного действия предъявляют высокие требования по уходу за узлами и поддержанию их в рабочем состоянии. Особое внимание уделяется равномерности загрузки машины, из-за высокой стоимости простоя каждого часа [26, 123].

Учитывая рассмотренные выше преимуществами, 3M непрерывного действия обладают одним существенным недостатком – это специфичность применения. Такая машина предназначена для выполнения конкретных операций И на других работах ее невозможно использовать, по сравнению С одноковшовыми экскаваторами. В результате, при работе землеройных машин непрерывного действия используют комплект машин, включающий машины для других видов работ [26].

Чтобы обеспечить постоянную загрузку экскаватора непрерывного действия, необходимо заранее подготовить график работ на объекте, чтобы исключить простой техники и обеспечить порядок выполнения рабочих операций. Оператор экскаватора непрерывного действия обязан строго соблюдать график выполнения работ и не должен допускать отклонения от него по организационным или другим причинам. Персонал, обслуживающий машины, должен обладать исчерпывающими знаниями о техническом устройстве, порядке регулировки и эксплуатации. А чтобы обеспечить работоспособность машин, еще и знать технологический процесс выполнения ими работ. Экскаваторы непрерывного действия оборудованы энергетической установкой, механическими передачами, гидравлическими приводами с бесступенчатым регулированием скоростей, электрическими приводами и системами автоматизированного управления. РП экскаватора непрерывного действия имеет ряд особенностей, если не знать

13

которые, не получится обеспечить необходимую загрузку и максимально возможную производительность машины. Поэтому к квалификации персонала предъявляются высокие требования в части технических знаний. [26, 123].

Экскаватор непрерывного действия имеет РО для непрерывного копания, например, многоковшовый цепной или роторный, у которого ковши последовательно копают грунт и транспортируют его на поверхность. Чтобы обеспечить непрерывный РП, РО постоянно перемещается в пространстве. Такой РО является существенным признаком отличия, по которому определяют экскаваторы непрерывного действия, такие как экскваторы продольного и поперечного копания, цепные и роторные [26].

Экскаваторы продольного копания обладают РО, который перемещается в плоскости движения ковшей или скребков (роторный, цепной или двухроторный РО) и имеет основное исполнение траншейное или модернизированное, необходимое для прокладки кюветов, каналов и для укладки дренажных труб; экскаваторы поперечного копания – РО перемещается перпендикулярно плоскости движения ковшей или скребков (цепной РО); экскаваторы веерного копания – ковши перемещаются в вертикальной плоскости, при этом РО движется веерно, поворачиваясь вокруг вертикальной оси (роторный РО) [24, 51].

Цепные и роторные экскаваторы поперечного копания имеют мелиоративное и карьерное основные исполнения. А роторные экскаваторы веерного копания, используются для карьерных работ и работ, связанных сдобычей ископаемых. ЦТЭ – это специализированная ЗМ непрерывного действия, она обладает активным цепным РО. Благодаря дополнительному оборудованию, ЦТЭ можно использовать в различных целях [24, 79, 123]:

чтобы прокладывать газо- и нефтепровод, водопровод;

чтобы прокладывать кабеля;

чтобы рыть каналы и дренажные системы;

чтобы рыть траншеи под ленточные фундаменты зданий и промышленных сооружений;

для нарезания щелей в мерзлом грунте, чтобы в последующем его разработать;

- чтобы раскапывать трубопровод при его ремонте.

Характер и виды выполняемых работ в большей степени определяют конструкцию и тип ЦТЭ. [24].

Несмотря на то, что в мире все большие обороты набирает технология бестраншейного бурения, для прокладки коммуникаций она далеко не всегда может заменить стандартные методы [132].

ЦТЭ изготавливают как для малых объемов работ, например, прокладка коммуникаций на малой глубине, так и для крупных – прокладка трубопроводов большого диаметра на большой глубине. Специализированные траншейные экскаваторы обладают преимуществом, которое заключается в быстрой работе, чистой и стабильной прокладке траншеи высокого качества, а также в снижении трудовых затрат, в возможности повторного использования изъятого грунта для засыпки траншеи [55, 77, 123].

Для выполнения работ различного объема для грунтов разных типов используются PO четырех типов: плужные, цепные, дисковые и роторные [22, 24].

ЦТЭ может работать без привлечения дополнительных машин со всеми видами грунтов, такими как мерзлый грунт, ракушечник, известняк, глина, ил, бетон, асфальтобетон и большинство скальных пород, а также в других тяжелых условиях [41, 42, 51, 123].

В ЦТЭ используется гидромеханический привод. Подъем и опускание РО осуществляется гидроцилиндром. Гидравлическая система работает за счет жидкости, которая подается насосом из гидравлического бака [24, 41, 42].

ЦТЭ широко применяются во всем мире, выполняя работы по рытью траншей под газо- и нефтепроводы, водопроводные и канализационные трубы, рытью и очистке оросительных каналов, а также, чтобы производить дренажные работы в мелиаративном и дорожном строительстве [24, 123].

Работа РО ЦТЭ ничем принципиально не отличается от работы многоковшовых карьерных экскаваторов. Грунт срезается и поднимается

ковшами, которые закреплены на подвижной цепи. Грунт срезается в направлении корпуса машины. Срезанный грунт поднимается на поверхность [24, 123].



Рисунок 1.1 – Рабочий орган цепного траншейного экскаватора

В отличие от карьерных экскаваторов, в ЦТЭ применяют свободно провисающую цепь (рис. 1.1).

Основные части ЦТЭ (рис. 1.2) [123]:

1. Опорная рама 1, на которой расположена кабина 10;

2. Ходовое оборудование 3 с гусеницами 12 на остове 11;

3. Рабочий орган 2 со свободнопровисающей цепью 7;

4. Подъемный гидроцилиндр 5 для обеспечения различной глубины копания;

5. Дополнительная рама рабочего оборудования 6;

6. Сменный зачистной башмак 8 для зачистки и сглаживания траншеи;

7. Стабилизаторы 9;

8. Транспортер 4, отводящий вырытый грунт на одну или по обе стороны от траншеи.

ЦТЭ изготовляются во множестве стран (России, США, Англии, и других). Такими экскаваторами разрабатывают траншеи различной ширины (от 0,05 до 3,6 *м*) и глубины (до 10,7 *м*). В последние годы широкое распространение получили модели ЦТЭ малых размеров, которые копают траншею, глубиной до 0,5 м [106, 123, 134].

В России для ЦТЭ используют индексацию, состоящую из цифр и букв. В обозначении индекса ЦТЭ используют цифры, обозначающие глубину копания (первые две цифры), *м*; порядковый номер модели (третья). Для экскаваторов поперечного и радиального копания обозначение индекса означает вместимость ковша (первые две цифры), *л*; порядковый номер модели (третья). В случаях модернизации к индексу добавляют буквы русского алфавита [26, 123].

Траншейные экскаваторы можно классифицировать по основным признакам [56]:

1. по рабочему оборудованию:

-цепные (ЦТЭ) и роторные (РТЭ);

2. по типу ходового устройства:

- пневмоколесные и гусеничные;

3. по виду соединения базовой машины и рабочего оборудования:

- навесное и полуприцепное оборудование;

4. по типу привода:

- механический, электрический, гидравлический и комбинированный [26, 123].



1.2 Траншеи и предъявляемые к ним требования

Траншея – открытая выемка в грунте, которая обычно обладает значительной протяженностью для прокладывания трубопровода и других подземных коммуникаций. Траншея, как временное земляное сооружение, разрабатывается в определенных параметрах в зависимости от диаметра строящегося трубопровода и может устраиваться с откосами или с вертикальными стенками [3, 96, 99].

К траншеям, в зависимости от назначения, предъявляют определенные требования. В частности, они касаются формы, прямолинейности и уклона траншеи и выражаются в предельных отклонениях различных параметров траншеи от проектной документации. Для обеспечения требований, предъявляемых к траншеям при их возведении под различные коммуникации, предусмотрены строительные нормы и правила (СНиП) и свод правил (СП) [3, 92, 95, 96, 99].

По виду коммуникаций, траншеи можно разделить на [93, 96]:

- траншеи для магистральных трубопроводов;

- траншеи под канализации и наружные сети;

- траншеи для водоснабжения;

- траншеи под основания и фундаменты.

При возведении траншеи по требованиям СНиП и СП предусмотрены устройства для удерживания стенок траншеи от обрушения, а также наличие откосов. Обычно это необходимо в при работе в грунтах, подверженных осыпанию (супесь) и когда необходимо выполнять работы непосредственно в траншее. Но существуют траншеи и условия, когда допускается строительство без удерживающих устройств и откосов. Допускается строительство траншей с вертикальными стенками без креплений на глубину до трех метров роторными и другими траншейными экскаваторами в связных грунтах (суглинках, глинах) [3, 95].

При разработке выемок и устройстве естественных оснований под фундаменты и водоснабжение, траншеи должны соответствовать требованиям

проекта. Но в таком случае эти требования касаются не траншеи, а уложенной коммуникации, и выражаются в следующем [3, 99]:

- отклонения дна выемок от проектных значений при черновой разработке траншейными экскаваторами допускается ±10 см;

- отклонение отметок дна траншеи от проектных значений в местах устройства фундаментов и укладки конструкции при окончательной разработке или после доработки недоборов и выполнения переборов ±5 см;

- максимальные отклонения от проектного положения осей напорных трубопроводов не должны превышать ± 100 мм в плане;

- отклонения отметок лотков безнапорных трубопроводов ± 5 мм;

- отклонения отметок верха напорных трубопроводов ± 30 мм.







Рисунок 1.5 – Отклонение оси уложенной коммуникации от проектного значения



Рисунок 1.4 – Трубопровод, уложенный в траншею с нарушенной формой в результате отклонения рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости

Траншеи, выполненные траншейным экскаватором, должны удовлетворять всем предъявляемым требованиям. Технические характеристики экскаватора должны обеспечивать достижение нужного результата. Учитывая вышеизложенные требования к траншеям и выемкам, производимым ЦТЭ, необходимо обеспечить правильную форму траншеи с вертикальными стенками и ровным дном без использования дополнительных работ по зачистке дна траншеи и выравниванию стенок.

1.3 Анализ существующих систем управления землеройными машинами

Для РО ЦТЭ характерно два движения: основное рабочее движение (например, поступательно-вращательное движение для цепного РО) и вспомогательного за счет ходового оборудования в виде поступательного движения. Самая большая часть мощности от энергетической установки экскаватора поглощается приводом РО, но производительность машины и степень загрузки двигателя определяются, прежде всего, поступательным движением экскаватора [58]. Качество работ для ЦТЭ определяется постояным значением вертикальной координаты дна траншеи и углом отклонения РО в поперечной плоскости [24, 26, 37 123].

Исходя из этого, можно выявить направление автоматизации ЦТЭ [25, 41]:

– автоматическое управление положением РО ЦТЭ с целью обеспечения правильной геометрической формы траншеи в соответсвие с требованиями СНиП.

Автоматизация в этом направлении заключается в обеспечении требуемой точности выполнения работ, за которыми человек-оператор не имет возможности производить контроль из-за отсутствия приборов, способных измерить контролируемые величины [23, 34, 39, 70, 71].

Большое распространение в мире получили системы стабилизации высотного и углового положений РО экскаватора, к которым можно отнести системы «Профиль», RAHCO (Германия), LASERPLANE (США), СМІ (США) и другие [21, 44].

Анализ СУ ЦТЭ позволил убедиться в том, что они отвечают необходимым требованиям точности и успешно применяются при строительстве траншей различного назначения. Такие СУ могут применяться на новых видах ЦТЭ с различными РО [46, 123].

СУ положением РО оснащаются экскаваторы, которые используются при работах, требующих высокую точность исполнения (дренажные системы, канализация свободного стока). При этом большей частью известных СУ

являются копирные системы [85]. Но использование копирных систем в городских условиях затруднительно из-за нехватки места для выполнения работ. В свою очередь, существуют и автономные системы, и, хотя их использование позволит расширить возможности землеройной техники, они применяются не так часто. Автономные СУ являются перспективным направлением в модернизации землеройной техники [46, 117, 123, 129].

1.4 Анализ процесса взаимодействия движителя с опорной поверхностью

Опорной поверхностью в работе является грунт, по которому перемещается ЦТЭ [102]. Неровности поверхности грунта можно разделить на макрорельеф, микрорельеф и шероховатость. Макрорельеф определяется неровностями длинной более 100 m и большими вертикальными координатами, которые дают медленное изменения вертикальной координаты узлов ЗМ. Шероховатость в свою очередь имеет неровности малой протяженностью (не более 0,5 m) и вызывает незначительные изменения вертикальных координат, так как шероховатость компенсируется сглаживающей способностью элементов XO [23, 47].

В работе определена проблема, для решения которой особый интерес неровности представляет взаимодействие микрорельефа с XO. Именно микрорельефа являются причиной, которая вызывает неуправляемые случайные изменения вертикальной координаты остова экскаватора, а, следовательно, и РО в пространстве. Математическая модель процесса взаимодействия элементов ходового оборудования с неровностями микрорельефа описывается математической моделью, которая является важной частью математической модели РП ЦТЭ, формируемого траншею с требуемыми геометрическими параметрами [23, 47, 120].

В связи с этим необходимо провести анализ существующих математических моделей рельефа и процесса взаимодействия ХО с неровностями рельефа.

Обычно поверхность грунта представляют в виде детерминированных или стохастических функций [55, 123].

22

При повышении точности разработки грунта используют математическое описание опорной поверхности детерминированными функциями вертикальной координаты поверхности грунта $Y_n(t)$ от времени, а также при определении граничных значений параметров [55, 123].

Для решения задачи описания взаимодействия XO с рельефом опорной поверхности, учитывая реальный рельеф местности, можно применять стохастические модели рельефа [13, 106].

1.4.1. Анализ стохастических математических моделей микрорельефа грунта

Математическому описанию микрорельефа, влияющего на положение PO, посвящено большое количество работ, освещающих анализ стохастических зависимостей различных грунтовых поверхностей [13, 106].

В работе [13] рассматривается случайная функция двух переменных, описывающая поверхность грунта как стационарную и эргодическую [47]:

$$y = y(x, z), \tag{1.1}$$

где *х, z* – продольная и поперечная координаты средней плоскости, относительно которой изменяются вертикальные координаты неровностей.

Соответственно, необходимыми характеристиками статистического микрорельефа грунта будут служить его корреляционная функция R(l) или нормированная корреляционная функция r(l) и спектральная плотность $S(\omega)$ [13, 35, 47, 111].

Об изменении микрорельефа по длине участка l дает представление корреляционная функция R(l), о частоте повторения длин неровностей дает представление спектральная плотность $S(\omega)$. При этом путевая частота будет являться аргументом спектральной плотности [13, 47, 123]:

$$\omega = \frac{\pi \cdot V}{L_{y}},\tag{1.2}$$

где V – скорость движения базовой машины, M/c; L_v – длина неровности, M.

Уравнением 1.3 описывается двумерная корреляционная функция микрорельефа [13, 123]:

$$R(l_1, l_2) = \lim_{\substack{x \to \infty \\ y \to \infty}} \frac{1}{4xz} \int_{-x-z}^{x} \int_{-x-z}^{z} y(x, z) \cdot y(x+l_1, z+l_2) dx dz .$$
(1.3)

Так как вычислить двумерную корреляционную функцию $R(l_1, l_2)$ затруднительно, то ее возможно заменить на две некоррелированные функции: функцию угла наклона поперечного сечения $\gamma_n(l)$ поверхности и функцию среднего сечения продольного профиля y(l) [13, 47, 103, 105, 123]:

$$y(l) = 0, 5 \cdot (y_n(l) + y_n(l)); \qquad (1.4)$$

$$\gamma_{n}(l) = \frac{(y_{n}(l) - y_{n}(l))}{L_{\kappa}}, \qquad (1.5)$$

где $y_n(l)$ и $y_n(l)$ – функции сечений грунтовой поверхности соответственно по левой и правой колеям микрорельефа; L_{κ} – ширина колеи, *м*.

При описании микрорельефа необходимо учесть его статистические характеристики, которые представляют в виде двух корреляционных функций [13, 17, 47, 123]:

$$R_{y}(l) = \lim_{x \to \infty} \frac{1}{2 \cdot x} \int_{-x}^{x} y(x) \cdot y(x+l) dx; \qquad (1.6)$$

$$R_{\gamma}(l) = \lim_{x \to \infty} \frac{1}{2 \cdot x} \int_{-x}^{x} \gamma(x) \cdot \gamma(x+l) dx. \qquad (1.7)$$

При этом нормированная корреляционная функция имеет вид [13, 47, 123]:

$$r(l) = R(l)/R(0);$$
 (1.8)

$$R(0) = D = \sigma^2, \tag{1.9}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение; D – дисперсия.

Спектральный состав случайной функции характеризуется спектральной плотностью $S(\omega)$, которую можно определить через корреляционную функцию, используя преобразование Фурье [13, 47, 123]:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(l) \cdot e^{-j\omega l} dl. \qquad (1.10)$$

Существующие модели микрорельефа в общем случае записываются в виде [13, 47, 123]:

$$r(l) = \sum_{i=1}^{n} A_i e^{-\alpha_i |l|} \cdot \cos \beta_i l, \qquad (1.11)$$

где $\sum_{i=1}^{n} A_i = l; \alpha_i$ – параметры, которые характеризуют затухание корреляции;

 β_i – параметры, которые характеризуют периодичность корреляции.

Также для математического описания неровностей микрорельефа в некоторых случаях используют уравнения вида [13, 123]:

$$r(l) = A_0 e^{-\alpha_0 |l|} \cdot (1 + \alpha_0 |l|) + \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i |l|} \cdot (\cos \beta_i l + \frac{\alpha_i}{\beta_i} \sin \beta_i l).$$
(1.12)

В работах [12, 123] микрорельеф целины описан уравнением:

$$R_{y}(l) = \sigma^{2} \cdot \left(A_{1} e^{-\alpha_{1}|l|} + A_{2} e^{-\alpha_{2}|l|} \sin \frac{\pi l}{\beta} \right), \qquad (1.13)$$

где $\sigma = 0,19 \, \text{м}; A_1 = 0,28; A_2 = 0,72; \alpha_1 = 3,5 \, c^{-1}; \alpha_2 = 0,67 \, c^{-1}; \beta = 3,05 \, c^{-1}.$

Микрорельеф сельскохозяйственного поля описывается уравнением [13, 123]:

$$R_{y}(l) = \sigma^{2} \cdot e^{-\alpha_{1}|l|} \cos \beta l , \qquad (1.14)$$

В работах [22, 123] неровности грунтового аэродрома описаны формулой:

$$R_{y}(l) = e^{-\alpha_{1}|l|} \cdot (\cos\beta_{1}l + \alpha_{2}\sin\beta_{2}l), \qquad (1.15)$$

где $\alpha_1 = 0,53 c^{-1}; \alpha_2 = 0,138 c^{-1}; \beta_1 = 0,79 c^{-1}; \beta_2 = 3,7 c^{-1}.$

В таблице 1.1 приведены параметры коэффициентов и рекуррентные уравнения часто встречающихся корреляционных функций, описывающих случайные процессы [13, 123].

Уравнения для описания микрорельефа представляются как функции пути y(X). Поэтому, при решении задачи динамики для функции микрорельефа, его статистические характеристики правильно записывать как функцию от времени

$$y(t) = y(X/V).$$
 (1.16)

Корреляционная функция	Рекуррентное уравнение	Параметры рекуррентного		
		уравнения		
$R(\tau) = \sigma^2 \cdot e^{-\alpha \tau }$	$y(n) = a_0 x(n) + b_1 y(n-1)$	$a_0 = \sigma \sqrt{1 - \rho^2}; b_1 = \rho; \rho = e^-$		
		$^{\gamma}$; $\gamma = \alpha h$.		
$R(\tau) = \sigma^2 \cdot e^{\alpha \tau } \cdot co$ $s(\beta \tau)$		$a_0 = \sigma C; a_1 = (\sigma C_0)/C; b_1 =$		
		$2\rho \cdot \cos \gamma_0$; $b_2 = -\rho^2$;		
		$C_0 = \rho(\rho^2 - 1) \cdot \cos \gamma_0; C_1 = 1 - \rho^4; \rho$		
	$y(n) = a_0 x(n) + a_1 x(n-1) + b_1 y(n-1) + b_2 y(n-2)$	$=e^{-\gamma}; \gamma=\alpha h;$		
		$C = \frac{\sqrt{\left(C_1 \pm \sqrt{C_1^2 - 4C_0^2}\right)}}{2}; \ \gamma_0 =$		
		βh.		
$R(\tau) = \sigma^2 \cdot e^{\alpha \tau } \cdot \sin(\beta \tau)$		$a_0 = \sigma C; a_1 = (\sigma C_0)/C; b_1 =$		
		$2\rho \cdot \cos \gamma_0$; $b_2 = -\rho^2$;		
		$C_0 = \rho(1+\rho^2) \cdot \sin \gamma_0; C_1 = -$		
	$y(n) = a_0x(n) + a_1x(n-1) +$	$4\rho^2 \cdot \sin \gamma_0 \cdot \cos \gamma_0;$		
	$b_1y(n-1) + b_2y(n-2)$	$C = \frac{\sqrt{\left(C_1 \pm \sqrt{C_1^2 - 4C_0^2}\right)}}{2};$		
		$\rho = e^{-\gamma}; \gamma = \alpha h; \gamma_0 = \beta h.$		
$R(\tau) = R^{l}(\tau) +$	$\begin{aligned} f(\tau) &= R^{I}(\tau) + \\ R^{II}(\tau) \end{aligned} \qquad $	Параметры рекуррентных		
$R^{II}(\tau)$		уравнений		
Примечание. m _x = 0, x(n) – реализация нормально распределенных чисел с параметрами:				
математическое ожидание, h – шаг дискретности времени τ ; среднеквадратическое отклонение σ				
= 1.				
	Корреляционная функция $R(\tau) = \sigma^{2} \cdot e^{-\alpha \tau }$ $R(\tau) = \sigma^{2} \cdot e^{\alpha \tau } \cdot co$ $s(\beta \tau)$ $R(\tau) = R^{1}(\tau)$ $R(\tau) = R^{1}(\tau) + R^{11}(\tau)$ ечание. m _x = 0, x(n) атическое ожидание,	Корреляционная функцияРекуррентное уравнение $R(\tau) = \sigma^2 \cdot e^{-\alpha \tau }$ $y(n) = a_0 x(n) + b_1 y(n-1)$ $R(\tau) = \sigma^2 \cdot e^{\alpha \tau } \cdot co$ $s(\beta \tau)$ $y(n) = a_0 x(n) + a_1 x(n-1) + b_1 y(n-1) + b_2 y(n-2)$ $R(\tau)$ $y(n) = a_0 x(n) + a_1 x(n-1) + b_1 y(n-1) + b_2 y(n-2)$ $R(\tau)$ $y(n) = a_0 x(n) + a_1 x(n-1) + b_1 y(n-1) + b_2 y(n-2)$ $R(\tau) = R^1(\tau) + R^{II}(\tau)$ $y(n) = y^1(n) + y^{II}(n)$ $R(\tau) = R^1(\tau) + R^{II}(\tau)$ $y(n) = y^1(n) + y^{II}(n)$ $R(\tau) = 0, x(n) - реализация нормально расаатическое ожидание, h – шаг дискретности времени т$		

Таблица 1.1 - Рекуррентные уравнения случайных процессов и их параметры [13, 36, 65, 123]

$$t = l/V; \tag{1.17}$$

$$\alpha_i' = \alpha_i \cdot (V/V_0); \tag{1.18}$$

$$\boldsymbol{\beta}_i' = \boldsymbol{\beta}_i \cdot (V/V_0), \tag{1.19}$$

где V – скорость машины, m/c; $V_0 = 1 m/c$ – единичная скорость.

При принятии допущения, что в рассматриваемом процессе скорость машины не меняется, то и параметры функций микрорельефа будут неизменными. При выполнении равенства $V=V_0=1$ м/с численные значения параметров функций времени и пути будут совпадать [22, 123].

Для реализации на ПЭВМ случайного микрорельефа в основном используется алгоритм, который преобразует стационарную последовательность x_i независимых нормально распределенных случайных чисел, которую называют дискретным белым шумом, в последовательность y_n , для этого используется рекуррентное уравнение вида [25, 36, 120]:

$$y_{i} = a_{0}x_{i} + a_{1}x_{i-1} + \dots + a_{l}x_{i-l} -$$

$$\int -b_{1}y_{i-1} - b_{2}y_{i-2} - \dots - b_{m}y_{i-m} =$$

$$= \sum_{\kappa=0}^{l} a_{\kappa} \cdot x_{i-\kappa} - \sum_{\kappa=1}^{m} b_{\kappa} \cdot y_{i-\kappa}.$$
(1.20)

где x_i – значения независимых нормально распределенных чисел с параметрами: $m_x = 0 \ u \ \sigma_x = 1.$

Отсюда вид рекуррентного уравнения корреспондируется с видом корреляционной функции [13, 36, 123].

Уравнение (1.20) описывает действие дискретного фильтра, который может преобразовать белый дискретный шум, подаваемый на его вход, в случайный процесс с заданной корреляционной характеристикой. Фильтр представлен передаточной функцией, которая имеет вид [13, 36, 123]:

$$y(z) = \frac{a_0 + a_1 z + \dots + a_l z^l}{1 + b_1 z + \dots + b_m z^m} = \frac{\sum_{k=0}^l a_k z^k}{1 + \sum_{k=1}^m b_k z^k}.$$
(1.21)

Опираясь на вид передаточной функции (1.21), изобразим структурную схему дискретного фильтра (рис. 1.6), который описывается зависимостью (1.20) [13, 36, 123].



Рисунок 1.6 – Структурная схема дискретного фильтра

1.4.2 Описание процесса взаимодействия ходового оборудования с неровностями микрорельефа

Базовая машина передвигается по неровностям опорной поверхности, которые взаимодействуют с XO, являющимся промежуточным звеном между остом и неровностями, что вызывает вертикальные перемещения остова, а также его колебания в пространстве, которые в результате передаются на PO [36].

Рассмотрим два вида ХО: колесное и гусеничное. На сегодняшний день колесное ХО имеет в достаточной степени разработанный и подтвержденный множеством экспериментов математический аппарат [36, 88, 120]. Например, в работе [68] описывается переход от модели гусеничного ХО к некоторому подобию колесного ХО. Для этого предлагается принять допущение, что грунт недеформируем и обладает высокой несущей способностью.

При этом математическое описание гусеничного ХО, по сравнению с колесным, сопряжено с некоторыми трудностями, которые выражаются в наличии

гусеничной ленты, которая располагается на опорных катках и взаимодействует с неровностями рельефа [36, 64].

Во время движения машины гусеничное ХО деформирует под собой микрорельеф поверхности грунта, а также передает возмущающие воздействия деформированного микрорельефа на остов машины, что вызывает его вертикальные и угловые перемещения. С учетом сказанного, рассмотрим расчетную схему ХО при движении по деформируемому грунту (рис. 1.7) [36, 64].

При этом РО заменяется телом со следующими параметрами: массой базовой машины и РО, сосредоточенной в центре тяжести (точка О), и моментом инерции относительно поперечной оси, проходящей через центр тяжести [36, 64].



микропрофиль после прохода ЗМ

микропрофиль до прохода ЗМ

Рисунок 1.7 – Расчетная схема ходового оборудования при движении по деформируемому грунту: c₁, ..., c_n; c[`]₁, ..., c[`]_n и c_r – соответственно коэффициенты жесткости подвесок гусеничных тележек и грунта; k₁, ..., k_n; k[`]₁, ..., k[`]_n и k_r – соответственно коэффициенты вязкости подвесок гусеничных тележек и грунта; m₁, ..., m_n – массы соответствующих тележек подвески; у и φ – перемещения остова.

Для упрощения математического описания процесса взаимодействия XO с неровностями микрорельефа, принимаются следующие допущения [36, 64]:

- грунт недеформируем;

- не учитывается влияние масс тележек, вследствие их малости.

Учитывая принятые допущения, расчетная схема приводится к виду (рис. 1.8) [36, 64].



Рисунок 1.8 – Расчетная схема ходового оборудования при движении по недеформируемому грунту

В случае жесткого XO пренебрегают колебаниями остова, вследствие их малости, и не учитывают упруго-вязкие свойства подвески гусеничных тележек, учитывая лишь перемещения остова в пространстве (линейные и угловые) [36, 64].

В связи с тем, что гусеничный движитель обладает сглаживающей способностью, на остов ЗМ действует уже сглаженный микрорельеф. Для его определения применяют уравнение вида [25, 36, 120]:

$$Y(l) = \frac{1}{L_r} \int_{l-l_0}^{l+l_0} y(l) dl, \qquad (1.22)$$

где *y*(*l*) – вертикальная координата микрорельефа; *Y*(*l*) – результирующая вертикальная координата микрорельефа после сглаживающего воздействия гусеницы.

Для реализации на ЭВМ уравнение (1.22) задается в дискретном виде выражением [25, 36, 120]:

$$y(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=n-k}^{n+k} y(m),$$
 (1.23)

где k = 0,5 (M_c -1); M – интервал усреднения; y(m) – ординаты несглаженного микрорельефа.

Таким образом, анализ работ, посвященных процессу взаимодействия движителя с поверхностью грунта, показал, что статистические свойства микрорельефа грунта достаточно хорошо изучены. Существующий математический аппарат позволяет моделировать движение базовой машины по опорной поверхности с учетом реального рельефа местности и может быть использован в данной работе [36].

1.5 Выбор и обоснование критерия эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора

Эффективностью РП любой ЗМ является результат работы по отношению к затратам ресурсов за единицу продукции [3, 66, 120, 123].

Показатель эффективности должен отражать все факторы, влияющие на РП и на эффективность машины, и представлен в виде какого-то критерия (численного значения или функции). Критерий эффективности требует выбора И обоснования рациональных технических параметров ЦТЭ и УУ, которые определят техникоэкономическую эффективность машины [3].

Учитывая цель диссертационной работы, для решения задач оптимизации необходимо выбрать и обосновать критерий эффективности РП ЦТЭ.

Использование приведенных удельных затрат в качестве критерия для определения эффективности использования УУ положением РО является затруднительным в силу большого числа показателей [103, 105, 120, 123].

Учитывая требования, предъявляемые к траншеям [95, 96, 99] и эффективности ЦТЭ, как к инструменту производства работ, рациональным будет использовать в качестве критерия эффективности такие параметры РП, как среднее квадратическое значение угла отклонения РО ЦТЭ от гравитационной вертикали (γ_{cp} , *град*) и производительность ЦТЭ (Π , $m^3/4$) [109, 110].

Частными целевыми функциями критерия эффективности РП ЦТЭ будут служить [3]:

$$\begin{cases} \gamma_{cp} \to 0; \\ \Pi \to \max. \end{cases}$$
(1.24)

Переменными предложенных целевых функций являются скорость изменения угла наклона РО в поперечной плоскости (V_{yzna} , zpad/c) и линейная скорость движения ЦТЭ (V, m/c). Выбранные переменные существенно влияют на РП ЦТЭ.

В частности Π , которая определяет объем извлеченного грунта за единицу времени, напрямую зависит от заданной V, а величина γ_{cp} напрямую зависит от $V_{y_{2,na}}$. То есть, чем больше V, тем больше Π , и чем больше $V_{y_{2,na}}$, тем меньше γ_{cp} . Оптимальные значения этих параметров позволят обеспечить повышение эффективности РП ЦТЭ.

Однако одновременно достичь наилучших значений всех показателей критерия эффективности невозможно, поэтому для получения наибольшего эффекта необходимо определить рациональное соотношение между ними. [3].

Предложена целевая функция комплексного критерия эффективности, в которой рассматривается сумма соотношений между целевыми функциями γ_{cp} и Π и наилучших значений этих функций [3]:

$$\frac{\Pi(V_{yzna}, V)}{\Pi'(V_{yzna}, V)} + \frac{\gamma_{cp}'(V_{yzna}, V)}{\gamma_{cp}(V_{yzna}, V)} \to \max, \qquad (1.25)$$

где $\Pi(V_{y_{2,n,a}}, V)$ – целевая функция производительности в зависимости от скорости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости и

линейной скорости экскаватора; П'(V_{угла}, V) – наилучшее значение производительности в зависимости от скорости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости и линейной скорости экскаватора; $\gamma_{cp}(V_{y_{2,na}}, V)$ – целевая функция среднего квадратического значения угла отклонения РО от гравитационной вертикали в зависимости от скорости изменения угла наклона РО поперечной плоскости и линейной скорости экскаватора; $\gamma_{cp}'(V_{y_{2,na}}, V)$ – наилучшее значение PO среднего квадратического значения угла отклонения ОТ гравитационной вертикали в зависимости от скорости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости и линейной скорости ЦТЭ.

Значения переменных целевой функции (1.25) определяются возможностью технической реализации. Граничные значения переменных целевой функции представлены в виде неравенств [3]:

$$\begin{cases} V_{yzna.min} < V_{yzna} \le V_{yzna.max}; \\ V_{min} < V \le V_{max}. \end{cases}$$
(1.26)

1.6 Цели и задачи исследования

Вопросами изучения, разработки и модернизации землеройных и землеройно-транспортных машин занимались такие ученые, как: В.А. Алексеев [11], К.А. Артемьев [21], В.Ф. Амельченко [15], А.М. Васьковский [27], В.С. Дегтярев [39], Ю.М. Княжев [58], Б.Д. Кононыхин [61], Е.Ю. Малиновский [68], А.М. Холодов [113], И.А. Недорезов [76], А.А. Скловский [93], В.Г. Зедгенизов [50], В.С. Щербаков [120, 121] и др. В частности экскаваторами непрерывного действия, занимались: В.С. Щербаков, В.Г. Зедгенизов, И.А. Недорезов, А.Н. Стрельников [101], Э.Н. Кузин [64], Р.Ю. Сухарев [106], М. В. Суковин [103], С.Д. Игнатов [55], З.Е. Гарбузов и В.М. Донской [33] и др.

Работы приведенных выше авторов можно условно разделить на 2 группы [103, 106, 123]:

1) работы, направленные на повышение качества выполняемых работ;

2) работы, направленные на повышение производительности ЗМ.

К первой группе будут относиться работы таких исследователей, как В.А. Алексеева, К.А. Артемьева, Э.Н. Кузина, В.С. Щербакова. В этих работах представлены исследования, посвященные проектированию и совершенствованию СУ таких машин, как роторный траншейный экскаватор (Э.Н. Кузин), автогрейдер (Б.Д. Кононыхин, В.С. Щербаков), бульдозерный агрегат (В.А. Алексеев), ЦТЭ (Р.Ю. Сухарев). Все эти работы направлены на повышение точности позиционирования РО [36, 103, 106, 123].

Ко второй группе можно отнести работу В.Г. Зедгенизова, которая посвящена проблеме распределения мощности силовой установки между движителем машины и приводом РО [106]. А также работу М.В. Суковина, который для повышения производительности ЦТЭ предлагает реализовать СУ гидрообъемной трансмиссией, помогая адаптироваться экскаватору к изменяющимся грунтовым условиям [50, 103].

Все рассмотренные работы дают возможность проследить тенденцию проводимых исследований, направленных либо на повышение качества РП, либо

на повышение производительности ЦТЭ. Но взаимосвязь между рассмотренными в данной работе параметрами РП освещена не в полной мере [59, 60].

Труды Э.Н. Кузина [64] связаны с машинами для прокладки подземных коммуникаций и, в том числе, посвящены траншейным экскаваторам. Автором рассмотрены и описаны основные причины, из-за которых возникают изменения положения РО в пространстве.

В работах В.С. Щербакова [120, 121] сформулированы понятия о структуре землеройно-транспортных машин (3TM), представлены уравнения геометрических связей основных элементов и их математические описания.

В работе В.Г. Зедгенизова [50] исследована проблема распределения мощности силовой установки между движителем машины и приводом РО, определен коэффициент распределения мощности, изучен рабочий процесс траншейных экскаваторов различных марок и предложены рациональные параметры этих РП [106]. Исследование имеет экспериментальный характер и представляет ценные знания об основных процессах в динамической системе ЦТЭ, в том числе, о взаимодействии с грунтом скребкового РО ЦТЭ.

А.Н. Стрельников в своей работе [101] рассматривал процессы распределения энергии, а также вопросы повышения эффективности и производительности ЦТЭ.

В работе [33] З.Е. Гарбузов и Донской В.М. подробно описали конструкции экскаваторов непрерывного действия, также исследовали многоковшовые и скребковые рабочие органы ЦТЭ.

В работе М.В. Суковина [103] рассмотрен вопрос повышения производительности ЦТЭ за счет реализации системы управления (СУ) гидрообъемной трансмиссией для повышения адаптивности экскаватора к изменяющимся грунтовым условиям.

Данилов А.К. в своей работе [38] рассматривал тему повышения уровня надёжности элементов и системы привода РО ЦТЭ за счёт совершенствования конструкций режущих элементов и систем приводов РО и методов их проектирования.

В своих исследованиях Игнатов С.Д. [55] занимался проблемой автоматизации проектирования геометрических параметров траков гусеничной

ленты ЦТЭ с целью повышения эффективности ЦТЭ при разработке траншеи, в частности, при поперечном крене [55].

Наиболее близкой по тематике данной работы являются исследования Р.Ю. Сухарева, в которых он занимался повышением точности разработки траншей при помощи ЦТЭ. В своей работе он обосновал критерий эффективности процесса управления положением РО ЦТЭ, выявил закономерности, которые устанавливают связь между параметрами СУ и критерием эффективности процесса управления положением РО [106, 123].

Учитывая вышесказанное, несмотря на количество предшествующих исследований, для достижения поставленной цели диссертационной работы необходимо провести дополнительные исследования, направленные на усовершенствование УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости для повышения эффективности РП и качества выполнения работ [109, 110].

Целью диссертационной работы является повышение эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора за счет обеспечения проектной формы траншеи путем стабилизации положения рабочего органа в поперечной плоскости.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) выбрать и обосновать критерий эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора;

2) разработать математическую модель рабочего процесса цепного траншейного экскаватора с усовершенствованным устройством управления положением рабочего органа в поперечной плоскости;

3) выявить функциональные зависимости, связывающие технологические параметры рабочего процесса цепного траншейного экскаватора и основные параметры устройства управления положением рабочего органа в поперечной плоскости с критерием эффективности;

4) разработать инженерную методику оптимизации параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости.
Выводы по главе

1. Анализ конструкций, области применения и классификации траншейных экскаваторов позволил заключить, что выбранное направление исследования является актуальным.

2. Анализ требований, предъявляемых к цепным траншейным экскаваторам и производимым траншеям, позволил определить направление дальнейших исследований.

3. Анализ существующих систем управления землеройными машинами показал возможные способы повышения качества выполнения работ и увеличения технологических возможностей цепного траншейного экскаватора.

4. Анализ рабочего процесса, с учетом цели диссертационной работы, позволил выбрать и обосновать комплексный критерий эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора.

5. Анализ предыдущих исследований рабочего процесса цепного траншейного экскаватора позволил сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

2 МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Методы научных исследований

Научное исследование подразумевает конкретную логическую структуру, которая включает субъект, объект, предмет, формы, методы и результат исследования [78, 94].

Получение новых знаний осуществляется при использовании общенаучных методов проведения теоретических и экспериментальных исследований [57, 82, 94].

Метод определяет необходимость и место применения анализа и синтеза, индукции и дедукции, сравнения теоретических и экспериментальных исследований [78, 82, 94].

Общенаучными методами являются анализ и синтез, аналогия и моделирование [78, 82, 94].

Под синтезом понимается метод исследования, позволяющий соединять элементы (части) объекта, рассмотренные в процессе анализа, устанавливать связи между ними и определять объект исследования как единое целое [82].

Анализ также является методом исследования, который мысленно или практически расчленяет предмет изучения на составные элементы (части) объекта, при этом каждая из частей исследуется отдельно [82].

Эти методы позволяют систематизировать предметы и знания о них. Такой системный подход дает возможность синтезировать знания о предмете исследования [82].

Моделирование – это метод научного познания, заключающийся в замене изучаемого объекта его специально созданным аналогом или моделью. При этом модель должна содержать все существенные черты реального объекта [82].

В данной работе использовано математическое моделирование отдельных подсистем и их связей, которые в совокупности дают сложную математическую модель РП ЦТЭ. Этого возможно добиться в результате применения системного

анализа, который предусматривает комплексный подход в достижении поставленной цели, поэтому важными этапами работы являлись не только разработка математической модели РП ЦТЭ и ее теоретические исследования, но и проведение экспериментальных исследований. Цель экспериментальных исследований заключается в получении необходимых данных для подтверждения адекватности математической модели РП ЦТЭ и правомерности полученных теоретических выводов [82].

2.2 Методы экспериментальных исследований

В научном изыскании, наряду с теоретическими исследованиями, очень важную роль играют экспериментальные методы исследования [100].

Эксперимент необходим для получения достоверной информации об объекте исследования путем целенаправленного воздействия на него [89, 90].

В данной работе, с учетом классификации экспериментов, рассматриваются натуральные и машинные эксперименты. Натуральным эксперимент называют, экспериментального исследования взаимодействуют когда средства непосредственно с объектом исследования, a машинным когда соответствующие характеристики изучаемого объекта вычисляются с помощью алгоритма на ЭВМ [89, 90].

При проведении натурального эксперимента на вход объекта исследования подаются возмущающие воздействия, в результате чего определяются необходимые статистические и динамические характеристики ЦТЭ. Это свидетельствует об активном проведении эксперимента, который позволяет оперативно устанавливать закономерности и находить оптимальные режимы функционирования ЦТЭ [89, 90, 114].

Машинный эксперимент в работе проводился на ЭВМ с помощью программного комплекса МАТLAB. Натуральный эксперимент – на полигоне при помощи ЦТЭ с механизмом изменения положения РО в поперечной плоскости ИшМЗ ТРС 950 БСЛ.

Для подтверждения адекватности математических моделей, описывающих различные процессы, чтобы повысить эффективность экспериментальных исследований (повышения достоверности результатов исследования и сокращения времени и средств на проведение эксперимента) используют планирование эксперимента [89, 90, 94].

Планы эксперимента могут быть классические и факторные. Классический план заключается в изменении одного фактора во всем интервале значений при постоянстве других независимых факторов. Полный факторный эксперимент заключается в том, что в нем реализуются все возможные сочетания уровней факторов. В данной работе целесообразно использовать классические планы эксперимента, причем интервал варьируемых значений определяется свойствами объекта, к которому относится варьируемый параметр [36, 47].

В общем виде объект исследования можно представить структурной схемой, приведенной на рис. 2.1. Состояние объекта исследования можно представить зависимостью [89, 90, 94]:

$$Y = f(X; U; Z), \tag{2.1}$$

где $X = (x_1, x_2, ..., x_k)$ – независимые управляющие (входные) переменные, которые в процессе эксперимента можно целенаправленно изменять (питающее п.); $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ – напряжение, технологические режимы И Т. контролируемые возмущающие воздействия. которые не допускают целенаправленного изменения в ходе исследования (температура окружающей среды, освещение и т.п.); $Z = (z_1, z_2, ..., z_h)$ – неконтролируемые и неуправляемые возмущения, неизвестные исследователю, медленно изменяющиеся во времени случайным образом; $Y = (y_1, y_2, ..., y_n)$ – контролируемые или вычисляемые параметры, характеризующие состояние объекта.



Рисунок 2.1 - Структурная схема объекта исследования

Суждение о функционировании объекта создается только на основании внешних воздействий и соответствующих им реакций. Следовательно, одной из основных задач эксперимента является выявление взаимосвязей между входными и выходными параметрами объекта и представление их в количественной форме в модели. Такая виле математической модель является математическим отображением наиболее существенных взаимосвязей между параметрами объекта. Она представляет собой совокупность уравнений, условий и алгоритмических правил и позволяет получить информацию о процессах, протекающих в объекте, которая может быть использована для управления моделируемым объектом с целью поиска оптимальных условий [49, 89, 90].

В качестве оценки достоверности экспериментальных данных использовалась доверительная вероятность – P_x . В данной работе достаточной считалась доверительная вероятность $P_x = 0.95$ [119, 123].

Исключение грубых ошибок измерений проводилось в соответствии с ГОСТ 11.002-73. Для этого по данным упорядоченной выборки $x_1 \le x_2 \le ... \le x_n$ вычислялось среднее арифметическое выборки [89, 90, 119, 123]:

$$m_{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_{i}, \qquad (2.2)$$

Также вычислялась дисперсия [119]:

$$D_{x} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_{i} - m_{x})^{2}, \qquad (2.3)$$

где *x*_{*i*} – значение *i*-го наблюдения; *n* – число наблюдений.

Грубой считается ошибка, при которой выполняется неравенство(2.4) [67, 119, 123]:

$$\frac{x_i - m_x}{\sigma_x} \ge t_{k,\alpha},\tag{2.4}$$

где $t_{k,\alpha}$ – табличное значение параметра распределения Стьюдента при степени свободы k=n-1 и доверительной вероятности $p_{\partial}=1-\alpha_y$; где α_y – уровень значимости ($\alpha_y=1-p_{\partial}$).

С учетом принятого в работе допущения о нормальном законе распределения результатов наблюдений, истинное значение математического ожидания с вероятностью *p*_d лежит в пределах [89, 90, 119, 123]:

$$m_{x} - \frac{t_{\beta}\sigma_{x}}{\sqrt{n}} \le m_{x} \le m_{x} + \frac{t_{\beta}\sigma_{x}}{\sqrt{n}}, \qquad (2.5)$$

где t_{β} – величина, характеризующая для нормального закона распределения число среднеквадратических отклонений, откладываемых от центра рассеивания в обе стороны для того, чтобы вероятность попадания в полученный участок была равна p_{∂} .

Для среднеквадратического отклонения можно записать [89, 90, 119, 123]:

$$\sigma_x - \frac{t_\beta \sigma_x}{\sqrt{2n}} \le \sigma_x \le \sigma_x + \frac{t_\beta \sigma_x}{\sqrt{2n}}.$$
(2.6)

Количество необходимых измерений определяется исходя из заданной относительной погрешности измерений математического ожидания и среднеквадратического отклонения по формулам [89, 90, 103, 105, 119, 123]:

$$n_m = \frac{t_\beta^2 \psi_\delta^2}{\delta_m^2}; \tag{2.7}$$

$$n_{\sigma} = \frac{t_{\beta}^2}{2\delta_{-}^2},\tag{2.8}$$

где δ_m и δ_{σ} – относительные погрешности для математического ожидания и среднеквадратического отклонения соответственно; ψ_{δ} – коэффициент вариации измеряемой величины.

2.3 Структура работы

Принимая во внимание цель и задачи диссертационной работы, с учетом знаний, полученных предшествующими исследователями, работа будет обладать следующей структурой:

1. Обоснование критерия эффективности РП ЦТЭ.

1.1 Анализ ЦТЭ (РП, конструкция, геометрические связи между элементами).

1.2 Анализ возмущающих воздействий (изменение положения РО в результате взаимодействия ХО с микрорельефом).

1.3 Анализ существующих способов регулирования отклонения РО ЦТЭ в поперечной плоскости.

1.4 Составление блок-схемы динамической системы РП ЦТЭ с УУ положением РО в поперечной плоскости

1.5 Анализ и обоснование критериев эффективности.

2. Разработка математической модели динамической системы процесса управления РО ЦТЭ в поперечной плоскости.

2.1 Анализ существующих математических моделей подсистем РП ЦТЭ с УУ положением РО в поперечной плоскости.

2.2. Составление общей математической модели РП ЦТЭ с усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости.

3. Выявление основных закономерностей, связывающих параметры УУ положением РО с критерием эффективности.

3.1 Разработка алгоритма работы УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости.

3.2 Проведение теоретических исследований РП ЦТЭ.

3.3 Проведение экспериментальных исследований на траншеекопателе ТРС 950 БСЛ «Диминик».

3.4. Подтверждение адекватности математической модели РП ЦТЭ с УУ положением РО в поперечной плоскости.

4. Разработка инженерной методики и алгоритма выбора параметров УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости.

4.1 Разработка методики теоретических исследований РП ЦТЭ с УУ положением РО в поперечной плоскости.

4.2 Выявление зависимостей, связывающих параметры РП ЦТЭ с УУ положением РО в поперечной плоскости с критерием эффективности.

4.3 Разработка инженерной методики оптимизации параметров УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости.

Выводы по главе

1. При проведении теоретических исследований необходимо использовать методику системного анализа.

2. Проведение натурного экспериментального исследования необходимо осуществлять в соответствие с теорией планирования эксперимента.

3. Учитывая цель и задачи диссертационной работы, определена структура работы.

3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЦЕПНОГО ТРАНШЕЙНОГО ЭКСКАВАТОРА.

Для проектирования ЦТЭ необходимо провести исследование статических и динамических характеристик моделей компонентов и составных частей. Это возможно осуществить с помощью адекватной математической модели [36, 55, 65, 103, 119, 120, 123, 125].

При составлении математической модели РП ЦТЭ были приняты следующие допущения:

• конструктивные элементы экскаватора абсолютно жесткие;

• люфты в шарнирных сочленениях отсутствуют;

• РО зафиксирован гидроцилиндром и перемещается вместе с остовом;

• влияние массы элементов подвески на перемещения остова не учитывается;

• катки имеют постоянный контакт с гусеницей;

• гусеницы от опорной поверхности не отрываются, грунт недеформируем;

• рассматривается изменение только поперечной координаты положения PO, который постоянно заглублен в грунт;

• сила противодействия движению РО в поперечной плоскости со стороны грунта распределена равномерно по всей длине части РО, погруженной в грунт;

- объемный модуль упругости рабочей жидкости постоянен;
- инерционные свойства потока рабочей жидкости не учитываются;
- волновые процессы в элементах гидросистемы не учитываются;
- подача гидронасоса постоянна;
- неравномерность расхода гидромотора не учитывается;

• сжимаемость, утечки жидкости и силы сухого трения в ГЦ в связи с их малостью не учитываются;

• сжимаемость жидкости в рабочих полостях гидронасоса и гидромотора не учитывается;

• вязкость рабочей жидкости не учитывается;

• температура рабочей жидкости, а так же количество нерастворенного воздуха не изменяются;

• коэффициент расхода управляемых дросселей является постоянной величиной;

• силы сухого трения в гидроэлементах не учитываются.

3.1 Рабочий процесс цепного траншейного экскаватора с устройством управления положением рабочего органа в поперечной плоскости

Учитывая предыдущие исследования и опыт использования ЦТЭ в различных условиях, РП ЦТЭ рассматривается как динамическая система (рис. 3.1), состоящая из взаимодействующих между собой подсистем: «Базовая машина», «Управление», «Траншея» и «Поверхность» [74, 93, 97, 120, 122].

«Базовая машина» представлена подсистемами «Остов», «Ходовое оборудование» и «Рабочий орган». «Управление» представлено подсистемами «Оператор» и «Блок управления». «Траншея» представлена подсистемой «Грунт». «Опорная поверхность» – подсистемой «Рельеф».

Принцип РП ЦТЭ заключается в следующем.

«Оператор» воспринимает информацию о состоянии базовой машины (A16, A4), на основании которой формирует управляющие воздействия на подсистему «Блок управления» (A1), задавая начальные параметры РП (глубина копания), и запускает УУ. Также «Оператор» может напрямую воздействовать на гидропривод и управлять процессом в «ручном» режиме (A15). При движении ЦТЭ «Ходовое оборудование» взаимодействует с поверхностью грунта (подсистема «Рельеф»). Неровности рельефа состоят из двух составляющих – макрорельеф и микрорельеф, которые являются причиной неуправляемого изменения вертикальной координаты элементов ходового оборудования (A7). В результате этого наблюдается изменение угла наклона остова ЦТЭ в поперечной

плоскости (А8) и, в конечном счете, РО (А10). «Ходовое оборудование» при перемещении ЦТЭ сглаживает неровности микрорельефа (А6).



Рисунок 3.1 – Блок-схема динамической системы рабочего процесса цепного траншейного экскаватора

«Рабочий орган», в процессе формирования траншеи необходимой глубины и формы, воздействует на «Грунт» (A11). В результате возникает сила, препятствующая перемещению РО в поперечной плоскости (A12), которая передается на «Остов» (A13).

Информация о текущем состоянии РП поступает с датчиков на «Блок управления» (A2, A17), который, в соответствии с заданным алгоритмом, производит расчеты и формирует сигналы A3 и A5 о корректировке положения PO и регулировании скоростью движения ЦТЭ.

Во время работы элементов гидропривода возникает обратное силовое воздействие (A14).

3.2 Математическая модель опорной поверхности

Работа УУ ЦТЭ основана на компенсации неуправляемых отклонений РО в поперечной плоскости. Эти отклонения вызваны изменением вертикальных координат поверхности грунта под каждой из гусениц вследствие движения ЦТЭ по неровностям грунта, представленного подсистемой «Рельеф» в блок-схеме РП ЦТЭ (рис. 3.1). Для оценки степени влияния этого воздействия на РП составлена математическая модель рельефа. Эта модель реализована на ЭВМ и состоит из двух составляющих – макрорельеф и микрорельеф. Макрорельеф вызывает значительные угловые перемещения ЦТЭ в поперечной плоскости (тренд), микрорельеф вызывает малые угловые перемещения (флуктуации). В работе макрорельеф задается фиксированным углом наклона поверхности грунта в поперечной плоскости.

Для исследований колебаний, которые вызывают неровности микрорельефа, на сегодняшний день используются развитые методы статической динамики вместе со стохастическими моделями. [55, 65, 119, 123].

На сегодняшний день характеристики микрорельефа достаточно хорошо изучены. Микрорельеф привычно рассматривать в виде случайной функции, которая удовлетворяет необходимым условиям (функция является стационарной; ординаты микрорельефа распределены по нормальному закону распределения; длины волны неровностей ограничены по верхнему и нижнему пределам; микрорельеф изменяется случайным образом только в вертикальной продольной плоскости) [7, 65, 96, 104, 106, 111, 123].

Достаточными статистическими характеристиками микрорельефа грунта являются его спектральная плотность $S(\omega)$ и корреляционная функция R(l) [4, 104, 106, 111].

Корреляционная функция R(l) дает представление об изменении микрорельефа по длине участка l, спектральная плотность $S(\omega)$ показывает частоту повторения длин неровностей. Соответственно аргумент спектральной плотности можно определить [4, 7, 104, 106, 111]:

$$\omega = 2 \cdot \frac{\pi}{l}.\tag{3.2.1}$$

Поверхность грунта описывается функцией [4, 7, 104, 106, 111]:

$$y = y(x, z),$$
 (3.2.2)

где *у* – вертикальная координата точки поверхности; *х*,*z* – продольная и поперечная координаты точки поверхности.

Двумерная корреляционная функция такой поверхности представляется в виде [4, 7, 104, 106, 111]:

$$R(\Delta x, \Delta z) = \lim_{\substack{x \to \infty \\ z \to \infty}} \cdot \frac{1}{4 \cdot x \cdot y} \int_{-x-z}^{x} \int_{-x-z}^{z} y(x,z) \cdot y(x + \Delta x, z + \Delta z) \cdot dx \cdot dz$$
(3.2.3)

Для упрощения вычислений микрорельеф в данной работе описан двумя корреляционными функциями микрорельефа по левой и правой колее. В результате уклон в поперечном сечении определяется по вертикальным координатам левой и правой колеи [104, 128].

Спектральную плотность дисперсии можно определить через корреляционную функцию, используя преобразование Фурье [4, 7, 106, 111]:

$$R(l) = \sigma \cdot e^{-\alpha |l|} \cdot \cos(\beta) \cdot l, \qquad (3.2.4)$$

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} R(l) \cdot \cos(\omega \cdot l) \cdot dl, \quad \sigma = 0.5, \alpha = 0.1, \beta = 0.15.$$
(3.2.5)

Для моделирования на ЭВМ стохастического процесса использованы рекуррентные уравнения:

$$y(i) = d_0 \cdot x(i) + d_1 \cdot x(i-1) - b_1 \cdot y(i-1) - b_2 \cdot y(i-2); \qquad (3.2.6)$$

$$d_{0} = \sigma \cdot p = \sigma \cdot \sqrt{p_{1} \pm \frac{\sqrt{p_{1}^{2} - 4p_{0}^{2}}}{2}}; \qquad (3.2.7)$$

$$d_1 = \frac{\sigma \cdot p_0}{p}; \qquad (3.2.8)$$

$$b_1 = 2 \cdot \rho_2 \cdot \cos(\lambda_0); \qquad (3.2.9)$$

$$b_2 = -\rho_1; (3.2.10)$$

$$p_0 = \rho(\rho^2 - 1) \cdot \cos(\lambda_0);$$
 (3.2.11)

$$p_1 = 1 - \rho^4 ; \qquad (3.2.12)$$

$$\rho = e^{-\lambda}; \qquad (3.2.13)$$

$$\lambda = \alpha \cdot n_t; \tag{3.2.14}$$

$$\lambda_0 = \beta \cdot n_t, \tag{3.2.15}$$

где σ – среднеквадратическое отклонение исходного микрорельефа; *a*, β – коэффициенты затухания и периодичности корреляционной функции; n_t – шаг дискретного времени t_i .

Переход от текущего времени t_i к координате пути x_i : $x_i = V \cdot t_i$.

Так как гусеничное XO при перемещении сглаживает микрорельеф, то при составлении математической модели на ЭВМ микрорельеф был сглажен по площади контакта с гусеницей [25, 55, 62, 64, 65, 120]:

$$y(m) = \frac{1}{x_0} \cdot \sum_{m=i-k}^{i+k} y(i) , \qquad (3.2.16)$$

где y(m) – ординаты сглаженного микрорельефа; $k = 0,5(x_0 - 1); x_0$ – интервал усреднения; y(i) – ординаты несглаженного микрорельефа.

На рис. 3.2 и 3.3 приведена реализация несглаженного микрорельефа по левой и правой колеям.

Для дальнейших расчетов и составления схемы в Simulink, микрорельеф описан массивом чисел, полученным по рекуррентным уравнениям.



Рисунок 3.2 – Реализация несглаженного микрорельефа по левой колее



Рисунок 3.3 – Реализация несглаженного микрорельефа по правой колее

3.3 Математическая модель взаимодействия ходового оборудования с микрорельефом

Ходовое оборудование (ХО) является промежуточным динамическим звеном между остовом и неровностями рельефа, при этом ХО взаимодействует с рельефом, вызывая перемещения остова ЦТЭ и его колебания в пространстве, которые, в свою очередь, передаются на РО за счет жесткой их связи [36, 55, 65].

В процессе движения ЦТЭ ХО деформирует (сглаживает) микрорельеф опорной поверхности, по которой перемещается машина, и передает возмущающие воздействия деформированного микрорельефа на остов, вызывая его линейные и угловые перемещения [36, 55, 65].

При составлении модели взаимодействия XO с рельефом были приняты допущения [5, 10, 36, 55, 65]:

1) влияния массы элементов подвески на перемещения остова не учитываются;

2) катки имеют постоянный контакт с гусеницей;

3) остов трактора и РО являются абсолютно жесткими.

Математическое описание гусеничного XO, по сравнению с колесным, связано с определенными сложностями, которые заключаются в наличии гусеничной ленты, расположенной между опорными катками и опорной поверхностью, также совершенно иной динамикой перемещения опорных катков, в отличие от колес, что позволяет рассматривать катковую тележку в качестве абсолютно жесткой балки ПЗ (рис. 3.4), имеющей следующие координаты: Y_{Π} – вертикальная координата переднего опорного катка, m, Y_3 – вертикальная координата заднего опорного катка, m, L_{μ} – расстояние от переднего опорного катка до центра тяжести тележки, m, L_P – расстояние от переднего до заднего опорного катка – длина катковой тележки, m, μ – центр гусеницы (точка опрокидывания) [36, 55, 65].

Рассмотрим изменение положения опорных катков под воздействием микрорельефа в виде динамического звена, входом которого является профиль поверхности, представленный функцией Y(t), а выходами – изменение координаты переднего опорного катка $Y_{II}(t)$, координаты заднего опорного катка $Y_{3}(t)$ и координаты середины гусеницы $Y_{II}(t)$ [55, 65].



Рисунок 3.4 – Перемещение катковой тележки при наезде на ступенчатую неровность

Анализируя перемещение XO при положительном изменении Y(t) под опорными катками, примем $Y(t)=\Delta H$ в виде ступенчатой функции и рассмотрим зависимости $Y_{\Pi}(t)$ и $Y_{3}(t)$ от Y(t) при преодолении тележкой такого препятствия (рис. 3.4) [55, 65].

Составим систему уравнений, описывающую положение балки $\Pi 3$ при ступенчатой неровности $Y(t)=\Delta H$ в зависимости от координаты $X_{I\Pi}$ [55, 65]:

$$Y_{3} = \begin{cases} 0, & \text{при } X_{1\Pi} \leq L_{\mathcal{U}}; \\ \Delta H, & \text{при } X_{1\Pi} > L_{\mathcal{U}}. \end{cases}$$
(3.3.1)

$$Y_{II} = \begin{cases} 0, & \Pi \text{ри } X_{\Pi} < 0; \\ \Delta H, & \Pi \text{ри } X_{\Pi} = 0; \end{cases}$$

$$Y_{II} = \begin{cases} \Delta H + \frac{V}{L_p - X_{\Pi}} \cdot \int_{0}^{t} \Delta H dt, & \Pi \text{ри } 0 < X_{\Pi} < L_{\mu}; \end{cases}$$

$$\Delta H + \Delta H \cdot \frac{X_{\Pi}}{L_p - X_{\Pi}}, & \Pi \text{ри } X_{\Pi} = L_{\mu}; \end{cases}$$

$$\Delta H, & \Pi \text{ри } X_{\Pi} > L_{\mu}. \end{cases}$$

$$(3.3.2)$$

При подстановке в уравнения (3.3.1) и (3.3.2) выражения $Y_{I3}=L_{II}$, значения переменных Y_{II} и Y_3 определяются при $Y(t)=\Delta H$ в виде следующих функциональных зависимостей [55, 65]:

$$Y_{\Pi}(t) = \left[1 + \frac{k_1}{p} \left(1 - e^{-\tau_{\kappa} \cdot p}\right) - k_2 \cdot e^{-\tau_{\kappa} \cdot p}\right] \cdot Y(t); \qquad (3.3.3)$$

$$Y_{3}(t) = Y(t) \cdot e^{-\tau_{\kappa} \cdot p}, \qquad (3.3.4)$$

где $k_1 = \frac{V}{L_p - L_{II}}$ – коэффициент передачи, учитывающий нарастание X_{II} при заезде на ступеньку; $k_2 = \frac{L_{II}}{L_p - L_{II}}$ – коэффициент передачи, обуславливающий положение Y_{II} в точке опрокидывания; $\tau_K = L_{II}/V$ – время транспортного запаздывания с момента воздействия на передний каток до точки опрокидывания, *c*.

Учитывая уравнения геометрических связей ЦТЭ, полученных ранее, можно записать [55, 65]

$$Y_{\mu \pi} = \frac{Y_{\pi \pi} + Y_{3\pi}}{2}; \qquad Y_{\mu \pi} = \frac{Y_{\pi \pi} + Y_{3\pi}}{2}, \qquad (3.3.5)$$

где $Y_{U\Pi}$ – вертикальная координата центра правой гусеницы, *м*; $Y_{U\Pi}$ – вертикальная координата центра левой гусеницы, *м*; $Y_{\Pi\Pi}$, $Y_{3\Pi}$ – вертикальные координаты соответственно переднего и заднего катков правой гусеницы, *м*; $Y_{\Pi\Pi}$, $Y_{3\Pi}$ – вертикальные координаты соответственно переднего и заднего катков левой гусеницы, *м*.

ſ

На основании функций (3.3.3), (3.3.4) и (3.3.5) составлена структурная схема имитационной модели перемещения катковой тележки при наезде на неровность в обозначениях MATLAB Simulink для $Y(t)=\Delta H$ (рис. 3.5) [65].



Рисунок 3.5 – Структурная схема имитационной модели перемещения катковой тележки при наезде на неровность в обозначениях MATLAB Simulink при $Y(t)=\Delta H$

После расчета имитационной модели получен график, представляющий изменение вертикальной координаты центра гусеницы при наезде на неровность высотой $\Delta H=0,2 \ m$ со скоростью перемещения ЦТЭ $V=0,03 \ m/c$ (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – График изменения вертикальной координаты центра гусеницы при наезде на неровность

Рассмотрим перемещение ходового оборудования при $Y(t)=-\Delta H$ и зависимости $Y_{\Pi}(t)$ и $\alpha_{K}(t)$ от Y(t) (рис. 3.7) [65].



Рисунок 3.7 – Перемещение катковой тележки при съезде со ступенчатой неровности

$$Y_{\Pi} = \begin{cases} 0, & \text{при } X_{\Pi} < L_{\mathcal{U}}; \\ -\Delta H, & \text{при } X_{\Pi} \ge L_{\mathcal{U}}. \end{cases}$$
(3.3.6)

$$Y_{3} = \begin{cases} 0, \text{ при } 0 < X_{1\Pi} < L_{\mathcal{U}}; \\ -\Delta H \cdot \left(-\frac{L_{p} - X_{1\Pi}}{X_{1\Pi}} \right), \text{ при } X_{1\Pi} = L_{\mathcal{U}}; \\ -\Delta H \cdot \left(-\frac{L_{p} - X_{1\Pi}}{X_{1\Pi}} \right) - \frac{V}{X_{1\Pi}} \cdot \int_{0}^{t} \Delta H dt, \text{ при } L_{\mathcal{U}} < X_{1\Pi} < L_{p}; \\ 0, \text{ при } X_{1\Pi} = L_{p}; \\ -\Delta H, \text{ при } X_{1\Pi} > L_{p}. \end{cases}$$
(3.3.7)

При подстановке в уравнение (3.3.6) и (3.3.7) выражения $X_{I\Pi} = L_{II}$ значения переменных Y_{II} и Y_3 определяются при $Y(t)=-\Delta H$ в виде следующих функциональных зависимостей [55, 64, 65]:

$$Y_{\Pi}(t) = Y(t) \cdot e^{-\tau_{\kappa} \cdot p},$$
 (3.3.8)

$$Y_{3}(t) = \left[k_{3} \cdot e^{-\tau_{K} \cdot p} + \frac{k_{4}}{p} \left(e^{-\tau_{K} \cdot p} - e^{-\tau_{L} \cdot p}\right) + e^{-\tau_{L} \cdot p}\right] \cdot Y(t); \qquad (3.3.9)$$

где $k_3 = -\frac{L_p - L_{II}}{L_{II}}$ – коэффициент передачи, обуславливающий положение X₃ в

точке опрокидывания; $k_4 = \frac{V}{L_{II}}$ – коэффициент передачи, учитывающий уменьшение Y_3 при съезде со ступеньки; $\tau_L = L_P /V$ – время транспортного запаздывания с момента воздействия на передний каток до заднего катка, *c*.

На основании функций (3.3.8), (3.3.9) и (3.3.5) можно составить структурную схему имитационной модели перемещения катковой тележки при съезде с неровности в обозначениях MATLAB Simulink для $Y(t)=-\Delta H$ (рис. 3.8) [65].



Рисунок 3.8 – Структурная схема имитационной модели перемещения катковой тележки при съезде с неровности в обозначениях MATLAB Simulink при *Y*(*t*)=- ΔH

После расчета имитационной модели получен график, представляющий изменение вертикальной координаты центра гусеницы при съезде с неровности высотой $\Delta H=0,2 \ m$ со скоростью перемещения ЦТЭ $V=0,03 \ m/c$ (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – График изменения вертикальной координаты центра гусеницы при съезде с неровности

Полученные уравнения перемещения опорных катков (3.3.3) и (3.3.4), (3.3.8) и (3.3.9) применимы для частных случаев изменения профиля поверхности $Y(t)=\Delta H$ и $Y(t)=-\Delta H$, по которому движется ходовое оборудование, так как они различны по структуре [65].

Для создания обобщенной расчетной схемы перемещения катковой тележки предлагается ввести систему с переменной структурой, которая будет работать и при положительном и при отрицательном изменении вертикальной координаты опорной поверхности под катками. Для изменения структуры необходимо ввести ключевой элемент, который будет переключать выходные сигналы между различными схемами [55, 65].

В результате получена структурная схема перемещения ходового оборудования под воздействием микрорельефа в обозначениях MATLAB Simulink (рис. 3.10) [128].



Рисунок 3.10 – Структурная схема имитационной модели взаимодействия ходового оборудования с микрорельефом в обозначениях MATLAB Simulink

В результате составлена имитационная модель (рис. 3.11), которая состоит блоков генерации микрорельефа и блоков, реализующих взаимодействие ходового оборудования с поверхностью грунта.



Рисунок 3.11 – Структурная схема имитационной модели генерации микрорельефа и блоков, реализующих взаимодействие ходового оборудования с поверхностью грунта, в обозначениях MATLAB Simulink

В результате моделирования получены временные зависимости изменения вертикальных координат центров левой и правой гусениц (рис. 3.12, 3.13).



Рисунок 3.12 – Временная зависимость изменения вертикальной координаты центра левой гусеницы





58

3.4 Уравнения геометрических связей звеньев цепного траншейного экскаватора

Для определения положения РО в пространстве вследствие воздействия неровностей микрорельефа на ХО необходимо составить уравнения геометрических связей элементов ЦТЭ. Для этого разработана расчетная схема (рис. 3.14), которая показывает взаимосвязь рассматриваемых элементов и конструктивные особенности остова ЦТЭ, позволяющие оценить перемещения РО в поперечной плоскости.

Для составления структурной схемы ЦТЭ были приняты следующие допущения [55, 81, 103, 118, 120, 121, 124]:

1) рассматриваются изменения больших значений обобщенных координат звеньев расчетной схемы;

2) машина представлена упрощенно в виде многозвенника, отражающего раму машины с двигателем, трансмиссией, левую и правую гусеницы с ведущими звездочками, PO;

3) РО зафиксирован гидроцилиндром и перемещается вместе с остовом;

4) звенья многозвенника абсолютно жесткие;

5) гусеницы от опорной поверхности не отрываются.

Базовый трактор массой m_1 , включающий в себя массы остова, двигателя, РО с редуктором привода и с механизмом подъема, ходоуменьшителя, установки гидросистемы, гусеничной тележки, задается системой координат $O_1X_1Z_1Y_1$. Центр масс базового трактора находится в точке O_1 .

Для выполнения расчетов в инерциальной системе координат $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ задается плоскость отсчета, проходящая через оси $O_0 X_0$ и $O_0 Y_0$ [54].

Расстояния до ХО и РО от этой плоскости обозначены [54]:

*Y*_{ПП} – вертикальная координата переднего катка правой гусеницы, *м*;

 $Y_{\Pi\Pi}$ – вертикальная координата переднего катка левой гусеницы, *м*;

 $Y_{3\Pi}$ – вертикальная координата заднего катка правой гусеницы, *м*;

*Y*_{3Л} – вертикальная координата заднего катка левой гусеницы, *м*;

Y_{PO} – изменение вертикальной координаты РО в инерциальной системе координат в результате воздействия неровностей микрорельефа на ХО, *м* [102].

На рис. 3.14 даны следующие обозначения [102, 130]:

L – длина базы ЦТЭ, *м*;

L_M – расстояние от оси ведущих звездочек до режущей кромки РО, формирующей дно траншеи, *м*;

L_{PO} – расстоянии от оси ведомых звездочек до режущей кромки PO, формирующей дно траншеи, *м*;

 L_b – ширина базы машины, *м*;

*Y*_{ЦЛ} – вертикальная координата центра левой гусеницы, *м*;

*Y*_{ЦП} – вертикальная координата центра правой гусеницы, *м*;

*Y*_{*U*} – вертикальная координата центра машины, *м*;

у – угол поперечного наклона ЦТЭ вследствие воздействия микрорельефа на ХО, *град*;

*H*_{*m*} – величина заглубления РО, *м*;

 $F_{\sigma cp}$ – сила реакции грунта на РО, *H*;

 Q_{Π}, Q_{Π} – силы реакции грунта на правую и левую гусеницы, H.

На основе анализа расчетной схемы на рис. 3.14 можно записать:

$$Y_{IIII} = \frac{Y_{IIII} + Y_{IIB}}{2}, \qquad (3.4.1)$$

$$Y_{\mu \pi} = \frac{Y_{\pi \pi} + Y_{\pi 3}}{2}, \qquad (3.4.2)$$

$$Y_{II} = \frac{Y_{IIII} + Y_{IIII}}{2},$$
 (3.4.3)

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{Y_{\mathcal{U}\mathcal{I}} - Y_{\mathcal{U}\mathcal{I}}}{L_b}\right),\tag{3.4.4}$$

$$Y_{PO} = \frac{Y_{II} \cdot L_{PO}}{0.5L}.$$
 (3.4.5)



Рисунок 3.14 – Пространственная расчетная схема цепного траншейного экскаватора

Зависимость 3.4.4 позволяет рассчитать угол наклона ЦТЭ в поперечной плоскости, а 3.4.5 – значение вертикальной координаты РО ЦТЭ в результате воздействия неровностей микрорельефа.

По уравнениям геометрических связей элементов конструкции ЦТЭ составлена имитационная модель (рис. 3.15). В подсистеме «Остов» блок-схемы РП ЦТЭ, кроме имитационной модели геометрических связей, используются имитационные модели расчета массы, приведенной к штоку каждого из гидроцилиндров подвески, и производительности ЦТЭ в зависимости от скорости перемещения машины и параметров РО.



Рисунок 3.15 – Структурная схема имитационной модели геометрических связей элементов конструкции цепного траншейного экскаватора, расчета массы, приведенной к штоку гидроцилиндра, и производительности цепного траншейного экскаватора

3.5 Математическая модель взаимодействия рабочего органа цепного траншейного экскаватора с разрабатываемым грунтом в поперечной плоскости

В результате возмущающего воздействия со стороны микрорельефа на XO, заглубленный PO вместе с остовом отклоняется от гравитационной вертикали в поперечной плоскости. Чтобы выровнять PO в поперечной плоскости, необходимо его повернуть в противоположную сторону. При этом возникает реакция разрабатываемого грунта, направленная против движения РО в поперечной плоскости [4, 6, 7, 8, 31, 43, 52].

Взаимодействие РО с разрабатываемой средой является одной из составляющих математической модели РП ЦТЭ [7, 8, 28, 43, 120]. Для описания этого взаимодействия составлена математическая модель реакции грунта в поперечной плоскости на РО ЦТЭ, при этом приняты следующие допущения [29, 43, 48, 106, 123, 120, 121]:

1) сила противодействия движению РО в поперечной плоскости со стороны грунта распределена равномерно по всей длине погруженной в грунт части РО;

2) РО постоянно заглублен в грунт;

3) рассматривается изменение только поперечной координаты положения РО;

4) машина представлена упрощенно в виде многозвенника, состоящего из рамы, левой и правой гусениц с ведущими звездочками, РО;

5) РО зафиксирован гидроцилиндром и перемещается вместе с остовом;

6) звенья многозвенника абсолютно жесткие;

7) гусеницы от опорной поверхности не отрываются.

Регулирование положения РО в поперечной плоскости происходит во время разработки траншеи. При этом РО взаимодействует с грунтом посредством режущих элементов, которые осуществляют непосредственное разрушение грунта. Для проведения исследований необходимо описать взаимодействие РО с грунтом.

В работе это взаимодействие рассматривается как сила реакции со стороны грунта, препятствующая перемещению РО ЦТЭ в поперченной плоскости, возникающая при поперечном копании грунта. На основе рассмотренной расчетной схемы (рис. 3.16) запишем силу реакции грунта на РО, в момент его перемещения при отклонении остова от гравитационной вертикали в поперечной плоскости на угол *у* [7, 8, 43, 45]:

$$F_{\sigma cp} = F_{\kappa on} \cdot \sin(\gamma), \qquad (3.5.1)$$

где *F_{коп}* – сила сопротивления копанию, направленная против движения цепи РО, Н.



Рисунок 3.16 – Расчетная схема взаимодействия рабочего органа с грунтом в поперечной плоскости

Для определения силы сопротивления копанию рассмотрим мощность, расходуемую на копание грунта [43]:

$$N = (k_{y\partial} \cdot \Pi_{\mathrm{T}}) / \eta_{\mu} = F_{\kappa o \mu} \cdot V_{\mu}$$
(3.5.2)

где $k_{y\partial}$ – удельное сопротивление грунта копанию, которое зависит от категории грунта, H/m^2 (для II категории – 196140 H/m^2 , III категории – 294210 H/m^2 , IV категории – 392280 H/m^2) [43]; $\Pi_{\rm T}$ – техническая производительность ЦТЭ, m^3/c ; η_{μ} – коэффициент полезного действия цепи РО (η_{μ} =0,7) [19]; V_{μ} – скорость движения цепи РО, m/c (для рассматриваемого ЦТЭ скорость движения цепи может принимать значение от 0 до 3,55 m/c).

Техническая производительность ЦТЭ определяется по формуле [43]:

$$\Pi_{\mathrm{T}} = V \cdot B_m \cdot H_m, \qquad (3.5.3)$$

где *V* – линейная скорость ЦТЭ, м/с; *B_m* – ширина разрабатываемой траншеи, м; *H_m* – глубина разрабатываемой траншеи, м.

Выразим из равенства 3.5.2 *F*_{кон}:

$$F_{\kappa o \mu} = \frac{k_{y \partial} \cdot V \cdot B_m H_m}{\eta_u \cdot V_u}.$$
(3.5.4)

Полученные уравнения (3.5.1 – 3.5.4) позволяют в программном комплексе MATLAB создать имитационную модель взаимодействия РО ЦТЭ с грунтом в

64

поперечной плоскости, которая войдет в состав обобщенной имитационной модели РП ЦТЭ [7, 8, 45]. В связи с тем, что сила реакции появляется только при изменении положения РО в поперечной плоскости за счет управления, структурная схема имитационной модели принимает вид (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 – Структурная схема имитационной модели взаимодействия рабочего органа цепного траншейного экскаватора с грунтом в поперечной плоскости в обозначениях MATLAB Simulink

3.6 Математичсекая модель изменения угла наклона рабочего органа от перемещения штока гидроцилиндра

Наряду с уравнениями геометрических связей, необходимо учесть процесс изменения угла наклона РО в поперечной плоскости от перемещения штоков гидроцилиндров (ГЦ) подвески остова. На рисунке 3.18 представлена расчетная схема, отражающая связь между изменением угла наклона РО в поперечной плоскости и перемещением штока ГЦ подвески.

При разработке математической модели изменения угла наклона РО от перемещения штока ГЦ подвески ЦТЭ были приняты следующие допущения [55, 106, 120]:

1) экскаватор является пространственным шарнирно-сочлененным многозвенником;

2) элементы экскаватора абсолютно жесткие;

3) люфты в шарнирных сочленениях отсутствуют.

На схеме представлены следующие обозначения: $O_0 X_0 Y_0 Z_0$ – правая ортогональная неподвижная система координат, в которой ось $O_0 X_0$ совпадает с направлением движения ЦТЭ; ось $O_0 Y_0$ направлена вертикально вверх; ось $O_0 Z_0$

направлена вправо; Y_{μ} , Y_{μ} – вертикальные координаты гусениц правой и левой соответственно; γ – угол отклонения РО в плоскости $O_0 Y_0 Z_0$, *град*; ΔX , ΔY_{μ} , $\Delta \alpha$ – изменения величин X, Y_{μ} и α соответственно.

Элементами плоской расчетной схемы (рис. 3.18) являются следующие основные узлы экскаватора, совершающие независимые перемещения друг относительно друга и определяющие его кинематические характеристики: PO, жестко сочлененный с базовым трактором (остовом); подвеска; гусеницы; выравнивающие гидроцилиндры подвески.

Для определения угла поворота РО в поперечной плоскости $O_0Y_0Z_0$ произвольных точек элементов расчетной схемы в любой момент времени и определения связи между углом наклона РО в плоскости $O_0Y_0Z_0$ и величиной выдвижения штока ГЦ получены уравнения геометрических связей звеньев экскаватора. Угол наклона РО в плоскости $O_0Y_0Z_0$ можно охарактеризовать величиной γ . Из расчетной схемы определена зависимость изменения угла наклона РО в плоскости $O_0Y_0Z_0$ от выдвижения штока ГЦ.

Из рис. 3.19 видно, что правая гусеница экскаватора наехала на неровность величиной $\Delta Y_{\mu\Pi}$, угол поворота РО в плоскости $O_0 Y_0 Z_0$ при этом равен γ . Для того, чтобы угол γ стал равен 0, необходимо выдвинуть шток ГЦ на величину ΔX . При этом изменится угол α на величину $\Delta \alpha$. Определим величину $\Delta \alpha$, для этого применим теорему косинусов:

$$\Delta \alpha = \arccos\left(\frac{a^2 + b^2 - \Delta x^2}{2 \cdot a \cdot b}\right),\tag{3.6.1}$$

где Δa – изменение угла между звеньями элементов подвески при выдвижении (втягивании) штока ГЦ, соответствующее углу наклона РО в поперечной плоскости, *град*; *a*, *b* – длины звеньев элементов подвески, *m*; Δx – перемещение штока ГЦ наклона РО в поперечной плоскости, *м*.

Уравнение 3.6.1 отражает зависимость изменения угла наклона РО экскаватора в поперечной плоскости вследствие перемещения штока ГЦ.

Учитывая обоснованный критерий эффективности, зависимость скорости изменения угла наклона остова и, как следствие РО ЦТЭ, в поперечной плоскости

(V_{угла}) от скорости выдвижения (втягивания) штока ГЦ (V_u) можно записать в виде:

$$V_{yzna} = \frac{V_{u} \cdot \cos(\chi)}{b} \cdot \frac{180}{\pi}.$$
(3.6.2)

где χ – угол между векторами скоростей точкек крепления ГЦ, совершающих равномерное вращательное движение по окружности радиусом *b*, *град*.



Рисунок 3.18 – Расчетная схема изменения угла наклона рабочего органа вследствие перемещения штока гидроцилиндра цепного траншейного экскаватора

Для того чтобы определить, на какой угол от гравитационной вертикали отклонится РО, необходимо рассчитать разницу между *Δ*α ГЦ подвески (рис. 3.19).



Рисунок 3.19 – Структурная схема имитационной модели изменения угла наклона рабочего органа от величины выдвижения штока гидроцилиндра

3.7 Математическая модель гидропривода устройства управления положением рабочего органа и скоростью движения цепного траншейного экскаватора

Для управления механизмами строительных машин в основном используют гидропривод (ГП), который позволяет создавать достаточно большие усилия для выполнения того или иного вида работ. В исследовании гидропривода важную роль играет математическое моделирование [3, 73]. В настоящее время для более точного и полного анализа математической модели широко используют современные компьютерные средства [8, 65].

Для решения задач данной работы при описании математической модели ГП РО были приняты следующие допущения [2, 12, 16, 32, 33, 75, 91, 98, 119, 127]:

1) объемный модуль упругости рабочей жидкости не изменяется;

2) инерционные свойства потока рабочей жидкости ГП не учитываются;

3) в связи с малостью не учитываются сжимаемость, утечки и силы сухого трения в ГЦ;

4) подача гидравлического насоса постоянная;

5) волновые процессы, протекающие в элементах гидросистемы, не учитываются

В работе рассматриваются такие элементы ГП, как электрогидрораспределитель (ЭГР), ГЦ, гидронасос и гидромотор.

В работе рассматриваются ЭГР дискретного и пропорционального действия, которые преобразуют электрический сигнал от УУ в перемещение золотника, направляя поток рабочей жидкости [2, 9, 12, 16, 32, 33, 47, 75, 91, 98, 106, 120, 127].

При математическом описании ЭГР были приняты следующие допущения [2, 4, 9, 36, 47, 88, 106, 120]:

1) вязкость рабочей жидкости не учитывается;

2) влияние волновых процессов на динамику привода не учитывается;

3) температура рабочей жидкости, а так же количество нерастворенного воздуха не изменяются в течение переходного процесса;

4) коэффициент расхода управляемых дросселей является постоянной величиной;

5) параметры гидроэлементов сосредоточены;

6) утечки жидкости в гидроэлементах не учитываются;

7) сжимаемость жидкости в рабочих полостях гидронасоса, гидромотора и гидроцилиндра не учитывается;

8) неравномерность подачи гидронасоса и неравномерность расхода гидромотора не учитывается;

9) силы сухого трения в элементах ГП не учитываются.

ЭГР дискретного действия предлагается использовать для направления потоков рабочей жидкости от насоса к гидроцилиндру при изменении наклона остова ЦТЭ, так как предусматривается частое регулирование. ЭГР пропорционального действия используется, чтобы плавно изменять скорость машины при отклонении РО ЦТЭ от гравитационной вертикали, при этом, чем дольше по времени происходит отклонение РО, тем медленнее движется экскаватор. Динамика перемещения золотника ЭГР, описывается уравнением [9, 35, 55, 106]:

$$m_{30,n} \frac{d^2 x_{30,n}}{dt^2} + c_2 \cdot \frac{dx_{30,n}}{dt} + c_3 x_{30,n} = c_1 \cdot u_{30,n} , \qquad (3.7.1)$$

где u_{307} – управляющее напряжение на обмотоке золотника, *B*; m_{307} – масса сердечника электромагнита и золотника, κ_2 ; c_1 – коэффициент, учитывающий пропорциональность напряжения в обмотках электромагнита и силой тяги электромагнита; c_2 – коэффициент вязкого трения в золотнике; c_3 – коэффициент упругой деформации пружин, удерживающих золотник в нейтральном положении [83].

С учетом запаздывания ГП перемещение золотника ЭГР запишем в виде передаточной функции [2, 4, 36, 47, 62, 88, 98, 106, 120]

$$W_{_{30,7}}(p) = \frac{x_{_{30,7}}(p)}{u_{_{30,7}}(p)} = e^{-\tau_{_{2n}} \cdot p} \cdot \frac{k_1}{T_{_{30,71}}^2 p^2 + T_{_{30,72}} p + 1},$$
(3.7.2)

где k_1 – коэффициент усиления; $T_{30,1}$ и $T_{30,2}$ – постоянные времени; τ_{2n} – общее время запаздывания гидропривода, *с*.

$$k_1 = \frac{c_1}{c_3}; \tag{3.7.3}$$

$$T_{30\pi1}^2 = \frac{m_3}{c_3}; \qquad (3.7.4)$$

$$T_{30\pi2} = \frac{c_2}{c_3}.$$
 (3.7.5)

Для управления исполнительным механизмом компенсации отклонения положения РО используется ЭГР, на вход которого может быть подан один из трех управляющих сигналов (X_{ynp}): +1 – жидкость поступает в штоковую полость гидроцилиндра, -1 – жидкость поступает в поршневую полость гидроцилиндра и 0 – сечения распределителя закрыты, шток неподвижен [2, 4, 9, 36, 47, 62, 65, 88, 98, 106, 120].

Направление рабочей жидкости в различные полости гидроцилиндра изменяется сигналом управления *X_{vnp}* [2, 4, 36, 47, 62, 65, 88, 98, 106, 120]:

$$X_{ynp} = \begin{cases} +1 & npu \quad \gamma > +d_z; \\ 0 & npu \quad -d_z \le \gamma \le +d_z; \\ -1 & npu \quad \gamma < -d_z, \end{cases}$$
(3.7.6)

где d_z – ширина «зоны нечувствительности» срабатывания УУ положением РО в поперечной плоскости ЦТЭ, *град*, γ – угол отклонения РО от гравитационной вертикали в поперечной плоскости, *град*.

Для формирования этих сигналов в схеме присутствует пороговый элемент (рис. 3.20). Пороговый элемент является электронным реле с регулируемой зоной нечувствительности, равной 2dz [119, 126].



Рисунок 3.20 – Релейная характеристика порогового элемента

ЭГР описывают уравнением расходов через регулируемый дроссель [4, 40, 47, 106]:

$$Q_{HP} = \mu \cdot S_{P} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{\mathcal{K}}^{-1} \cdot |P_{P1} - P_{P2}|}, \qquad (3.7.7)$$

где Q_{HP} – расход на выходе распределителя, m^3/c ; P_{P1} и P_{P2} – давления соответственно на входе и выходе напорной магистрали ЭГР, Πa ; S_P – площадь проходного сечения местных сопротивлений напорной магистрали ЭГР, m^2 ; $\rho_{\mathcal{K}}$ – плотность рабочей жидкости, $\kappa c/m^3$, μ – коэффициент расхода.

При условии принятых в работе допущений определено, что при полном открытии проходного сечения ЭГР расход на выходе распределителя Q_{ch} соответсвует подаче гидронасоса Q_{h} . Соответственно существует прямая зависимость между открытием проходного сечения канала ЭГР и перемещением

золотника (x_{300}) , которая выражается в том, что максимальная величина x_{300} соответсвует диаметру проходного сечения канала дискретного ЭГР d_i .

Запишем зависимость расхода гидравлической жидкости на выходе ЭРГ от площади проходного сечения:

$$Q_{CH} = \frac{S_i \cdot Q_H}{S_{i.max}}, \qquad (3.7.8)$$

где S_i – площадь проходного сечения канала дискретного ЭГР; $S_{i.max}$ – максимальная площадь проходного сечения канала дискретного ЭГР ($S_{i.max} = \pi \cdot R_i^2$ или $S_{i.max} = \pi \cdot (d_i/2)^2$, где R и d_i радиус и диаметр проходного сечения канала дискретного ЭГР соответственно).

$$S_i = x_{307} \cdot \frac{S_{i.max}}{d_i} \,. \tag{3.7.9}$$

В результате получаем зависимость расхода гидравлической жидкости на выходе ЭРГ от перемещения золотника дискретного ЭГР:

$$Q_{CH} = x_{30\pi} \cdot \frac{Q_{H}}{d_{i}}.$$
 (3.7.10)

Для реализации математической модели дискретного ЭГР составлена имитационная модель по контуру управления положением РО (рис. 3.21).



Рисунок 3.21 – Структурная схема имитационной модели дискретного электрогидрораспределителя по контуру управления положением рабочего органа

Частота вращения вала гидромотора привода гусениц ЦТЭ зависит от расхода жидкости, которая поступает на его вход. Количество поступаемой жидкости зависит от степени одновременного открытия напорной магистрали ЭГР и закрытия проходного сечения сливной магистрали ЭГР напрямую в гидробак. В связи с этим количество жидкости, поступающее на вход гидромотора, примет следующее значение [4, 47, 55, 106]:

$$Q_{CM} = Q_H - Q_c, (3.7.11)$$

$$Q_c = \mu \cdot S_c \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{\mathcal{K}}^{-1} \cdot P_c}, \qquad (3.7.12)$$
где Q_c – расход рабочей жидкости через проходное сечение сливной магистрали ЭГР в гидробак, m^3/c ; P_c – давление на выходе сливной магистрали ЭГР, Πa ; S_c – площадь проходного сечения сливной магистрали ЭГР в гидробак, m^2 .

Для управления скоростью движения экскаватора используется ЭГР пропорционального действия, который имеет множество положений золотника. Сигнал управления, поступающий на золотник, представляет собой ток напряжением от 0 до U_{max} . Площадь проходного сечения S_p изменяется от 0 до πR^2 (рис. 3.22).

Максимальная площадь проходного сечения магистрали ЭГР:

$$S_{p.\max} = S_c + S_p = \pi R^2, \qquad (3.7.13)$$

где R – радиус проходного сечения канала ЭГР, *м*.

Зависимость площади проходного сечения канала ЭГР от величины напряжения сигнала управления:

$$S_p = \frac{S_{p.\max} \cdot U}{U_{\max}},\tag{3.7.14}$$

где U_{max} – максимальное напряжение на обмотке золотника, соответствующее максимальной площади проходного сечения канала ЭГР, *B*.



Рисунок 3.22 – Зависимость площади проходного сечения канала золотника от величины напряжения сигнала управления

Запишем зависимость площади проходного сечения канала пропорционального ЭГР от перемещения золотника:

$$S_p = x_{307} \cdot \frac{S_{p.\text{max}}}{2R}.$$
 (3.7.15)

Зависимость, позволяющая определить площадь сливной магистрали ЭГР:

$$S_c = S_{p.\text{max}} \cdot x_{307} \cdot \frac{S_{p.\text{max}}}{2R}.$$
 (3.7.16)

Решая совместно зависимости 3.7.11 – 3.7.16, получаем:

$$Q_{CM} = Q_H - \mu \cdot (S_{p.\max} - x_{307} \cdot \frac{S_{p.\max}}{2R}) \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{\mathcal{H}}^{-1} \cdot P_c}.$$
(3.7.17)

Полученная зависимость позволяет составить имитационную модель пропорционального ЭГР (рис. 3.23).



Рисунок 3.23 – Структурная схема имитационной модели пропорционального электрогидрораспределителя по контуру управления скоростью движения цепного траншейного экскаватора

С учетом того, что максимальной скорости движения ЦТЭ соответствует максимальное напряжение на обмотке золотника ЭГР, можно определить скорость машины при помощи зависимости:

$$V = \frac{U \cdot V_{\text{max}}}{U_{\text{max}}},$$
(3.7.18)

где V_{max} – максимальная скорость движения ЦТЭ, соответствующая полному открытию площади проходного сечения канала ЭГР, *м/c*, *V* – скорость движения ЦТЭ, *м/c*.

Напряжение на золотнике ЭГР при изменении скорости движения ЦТЭ U определяется:

$$U = U_{3a\partial} - \Delta U$$
, при $0 \le \Delta U \le U_{3a\partial}$ (3.7.19)

где U_{3ad} – напряжение на обмотке золотника ЭГР, соответсвующее заданной скорости движения ЦТЭ.

Если $\Delta U > U_{3ad}$, то напряжение на золотнике ЭГР при изменении скорости движения ЦТЭ *U* принимается равным 0.

Изменение напряжения на обмотке золотника происходит в зависимости от величины превышения допустимого угла отклонения РО в поперечной плоскости n_U , и будет иметь вид:

$$\begin{cases} \Delta U = n_U \cdot U_{\max}, \\ n_U = (\frac{\gamma}{d_z} - 1), \text{при } \gamma \ge d_z. \end{cases}$$
(3.7.20)

В результате получена имитационная модель ЭГР по двум контурам управления (рис. 3.24).



Рисунок 3.24 – Структурная схема имитационной модели гидрораспределителей двухконтурного управления

Для компенсации отклонения PO от гравитационной вертикали используется ГЦ, динамика которого может быть описана уравнением поступательного движения поршня под действием давления, внешней нагрузки, вязкого трения и уравнений расходов на входе и выходе без учета сжимаемости жидкости в полостях. На основании принятого допущения об отсутствии утечек, уравнения движения штока ГЦ можно представить в виде [47, 65, 68, 88, 106, 123 124]:

$$V'_{u} = \frac{1}{m_{u}} (P_{u1} \cdot S_{n} - P_{u2} \cdot S_{uu} - k_{u} \cdot V_{u} - F_{u}); \qquad (3.7.21)$$

$$V_{\mu} = -\frac{k_{\mu}}{S_n} P_{\mu 1} + \frac{1}{S_n} \cdot Q_{\mu \mu}; \qquad (3.7.22)$$

где V_{u} – скорость перемещения штока ГЦ, m/c; m_{u} – приведенная к штоку масса подвижных частей рабочего оборудования, κc ; P_{u1} , P_{u2} – давления соответственно в напорной и сливной полостях ГЦ, Πa ; S_n, S_m – рабочие площади соответственно в напорной и сливной полостях ГЦ, m^2 ; k_{II} – коэффициент вязкого трения; F_{II} – внешние силы, приведенные к штоку ГЦ, H; Q_{un} – расход рабочей жидкости через напорную гидролинию ГЦ, m^3/c .

ГЦ может находиться в одном из трех состояний: выдвижение штока, втягивание штока и состояние покоя. Учитывая это, можно записать уравнение движения как систему трех уравнений относительно давления в напорной полости ГЦ [36, 47, 65, 106]:

$$P_{u1} = \begin{cases} \frac{F_{u} + 0.25 \cdot \pi \cdot (D^{2} - d^{2}) \cdot P_{u2} + m_{u} \cdot V_{u}^{'} + k_{U} \cdot V_{u}}{0.25 \cdot \pi \cdot D^{2}}, & npu \quad X_{ynp} = +1; \\ 0, & npu \quad X_{ynp} = 0; \\ \frac{F_{u} + 0.25 \cdot \pi \cdot D^{2} \cdot P_{u2} + m_{u} \cdot V_{u}^{'} + k_{u} \cdot V_{u}}{0.25 \cdot \pi \cdot (D^{2} - d^{2})}, & npu \quad X_{ynp} = -1, \end{cases}$$
(3.7.23)

где P_{ul} – давление рабочей жидкости в напорной полости гидроцилиндра, Πa ; P_{u2} – давление рабочей жидкости в сливной линии гидроцилиндра, Πa ; D, d – диаметры соответственно внутренний и штока гидроцилиндра, m; X_{ynp} – сигнал управления, определяющий положение золотника распределителя; +1, -1 – сигналы управления ЭГР на выдвижение и втягивание штока соответственно.

$$P_{u2} = \frac{\rho_{\mathcal{H}} \cdot Q_{uc}^2}{2 \cdot \mu_c^2 \cdot f_c^2},$$
 (3.7.24)

где $\rho_{\mathcal{H}}$ – плотность рабочей жидкости, $\kappa c/m^3$; $Q_{\mu c}$ – расход рабочей жидкости через сливную гидролинию ГЦ, m^3/c ; μ_c – коэффициент расхода сливной гидролинии ГЦ; f_c – площадь проходного сечения местных сопротивлений сливной гидролинии ГЦ, m^2 .

Скорость движения штока ГЦ зависит от расхода и сжимаемости жидкости, поэтому запишем уравнения 3.7.17 как систему уравнений относительно скорости перемещения штока ГЦ [36, 47, 106]:

$$V_{ij} = \begin{cases} \frac{4 \cdot Q_{ij}}{\pi \cdot D^2} & npu \quad X_{ynp} = +1; \\ 0, \quad npu \quad X_{ynp} = 0; \\ \frac{-4 \cdot Q_{ij}}{\pi \cdot (D^2 - d^2)}, npu \quad X_{ynp} = -1. \end{cases}$$
(3.7.25)

Знак скорости движения штока ГЦ при его выдвижении положителен, что соответствует положительному углу отклонения РО от вертикали. При втягивании штока ГЦ – отрицательному углу отклонения РО от вертикали.

$$Q_{\mu c} = \begin{cases} 0,25 \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2) \cdot V_{\mu}, & npu \quad X_{ynp} = +1; \\ -0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot V_{\mu}, & npu \quad X_{ynp} = -1. \end{cases}$$
(3.7.26)

Уравнения (3.7.21)...(3.7.26) позволяют представить ГЦ в виде структурной схемы. Значения коэффициентов передачи и постоянных [36, 47, 65, 106]:

$$k_{\mu_1} = 0,25 \cdot \pi \cdot D^2; \qquad (3.7.27)$$

$$k_{\mu_2} = 0,25 \cdot \pi \cdot \left(D^2 - d^2\right); \qquad (3.7.28)$$

$$k_{II3} = \frac{4}{\pi \cdot D^2}; \qquad (3.7.29)$$

$$k_{II4} = \frac{4}{\pi \cdot \left(D^2 - d^2\right)}.$$
 (3.7.30)

В результате составлена имитационная модель ГЦ в программном комплексе MATLAB (рис. 3.25). Она состоит из двух частей: выдвижения штока ГЦ и втягивания штока ГЦ.



Рисунок 3.25 – Структурная схема имитационной модели гидроцилиндра

Для подачи гидравлической жидкости к потребителям используется гидронасос, который преобразует механическую энергию в кинетическую энергию жидкости.



Рисунок 3.26 – Расчетная схема гидронасоса

В настоящее время гидронасосы достаточно хорошо изучены. С учетом структурной схемы (рис. 3.26) и в соответствии с принятыми допущениями математическая модель гидронасоса постоянной подачи может быть описана уравнениями [120]:

$$P_2 = P_1 + M_{_H} \cdot \frac{\eta_{_{HM}}}{q_{_{HM}}}, \qquad (3.7.31)$$

$$Q_{\mu} = q_{\mu\nu} \cdot \omega_{\mu} \cdot \eta_{\mu\nu}, \qquad (3.7.32)$$

где Q_{μ} – подача насоса, m^3/c ; $q_{\mu m}$ – максимальный рабочий объем насоса, m^3 ; M_{μ} – момент сопротивления на валу насоса, H/m; P_1 , P_2 – давления соответственно

на входе и выходе (*P*₁=0,1 *МПа*), *Па*; $\eta_{\mu o}$, $\eta_{\mu m}$ – объемный и гидромеханический КПД гидравлического насоса.

С учетом использования на рассматриваемом ЦТЭ (ТРС 950 БСЛ «Доминик») насоса с постоянной подачей, в работе рассматривается насос постоянной подачи. В результате составлена имитационная модель гидронасоса в программном комплексе MATLAB Simulink (рис. 3.27).

В работе принято допущение, что двигатель внутреннего сгорания работает в одном режиме, поэтому угловая скорость на валу гидронасоса представлена в виде блока «Constant».



Рисунок 3.27 – Структурная схема имитационной модели гидронасоса

В системе присутствует гидромотор, который является гидравлическим двигателем для преобразования энергии жидкости во вращательное движение механизма. На рис. 3.28 показана расчетная схема гидромотора [34, 43, 60, 61, 92].



Рисунок 3.28 – Расчетная схема гидромотора

Учитывая допущения, запишем математическую модель гидромотора [36, 47, 65, 102, 106]:

$$M_{M} = q_{MM} \cdot (P_{2} - P_{1}) \cdot \eta_{MM} - J_{M} \cdot \dot{\omega}_{M}; \qquad (3.7.33)$$

$$\omega_{M} = Q_{CM} \cdot \eta_{OM} / q_{MM}, \qquad (3.7.34)$$

где Q_{CM} – расход гидромотора, m^3/c ; q_m – рабочий объем гидромотора, m^3 ; q_{MM} – максимальный рабочий объем гидромотора, m^3 ; ω_m – угловая скорость вала гидромотора, pad/c; J_m – момент инерции вращающихся масс, приведенный к валу гидромотора, $\kappa c/m^2$; M_m – крутящий момент на валу гидромотора, H/m; P_1 , P_2 – давления соответственно на входе и выходе (P_2 =0,1 *МПа*), *Па*; η_{om} , η_{MM} – КПД гидромотора, объемный и гидромеханический соответственно.

В работе гидромотор представлен зависимостью 3.7.29, которая определяет угловую скорость вала в зависимости от подачи гидронасоса. Структурная схема имитационной модели, составленная в программном комплексе MATLAB Simulink, представлена на рис. 3.29.



Рисунок 3.29 – Структурная схема имитационной модели гидромотора

Линейная скорость перемещения ЦТЭ зависит от угловой скорости вала гидромотора. Эту зависимость можно записать в виде [87]:

$$V = \frac{\omega_{\scriptscriptstyle M} \cdot n \cdot D_{\scriptscriptstyle 3}}{2}, \qquad (3.7.35)$$

где *n* – передаточное число механической передачи привода XO; *D*₃ – диаметр приводной звездочки гусеничного движителя ЦТЭ, *м*.

В результате составлена имитационная модель привода гусениц (рис. 3.30)



Рисунок 3.30 – Структурная схема имитационной модели привода гусениц

На основании представленных выше зависимостей, в программном комплексе MATLAB создана имитационная модель, которая будет использоваться в обобщенной имитационной модели РП ЦТЭ с УУ положением РО в поперечной плоскости, представленная на рис. 3.31 [133, 132].



Рисунок 3.31 – Структурная схема имитационной модели гидропривода

3.8 Математическая модель управляющего устройства

Для компенсации отклонения PO от гравитационной вертикали в поперечной плоскости необходимо обеспечить оптимальное управление положением PO при помощи УУ [6].

В работе используется УУ, обладающее набором отдельных, связанных между собой элементов для преобразования и передачи сигналов управления [63]. Любое УУ функционирует согласно определенному алгоритму. Разработанный алгоритм работы УУ положением РО в поперечной плоскости и скоростью движения ЦТЭ представлен на рисунке 3.32.

Алгоритм работы УУ положением РО в поперечной плоскости и скоростью движения ЦТЭ предназначен для определения последовательности выработки управляющих сигналов УУ при наличии возмущающего воздействия на ХО. Алгоритм работы УУ учитывает требования, предъявляемые к геометрической форме траншеи, параметры УУ, геометрические размеры звеньев ЦТЭ. Алгоритм позволяет определить последовательность выработки управляющих сигналов с УУ на ЭГР [6, 80, 108].

Разработанный алгоритм применяется при работе ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО в поперечной плоскости [5, 52].



Рисунок 3.32 – Блок-схема алгоритма работы устройства управления положением рабочего органа в поперечной плоскости и скоростью движения цепного траншейного экскаватора

Для функционирования алгоритма нужно задать необходимые начальные условия: τ – время запаздывания гидропривода, c; X_{ynp} – управляющий сигнал на золотник ЭГР наклона РО ЦТЭ; $S_{p.max}$ – максимальная площадь проходного сечения магистрали ЭГР; t_i – интервал времени опроса датчика угла наклона, c; R – радиус проходного сечения канала ЭГР, m; V – заданная скорость движения ЦТЭ, m/c; t – длительность подачи сигнала на обмотку золотника, c; U_{max} – напряжение на обмотке золотника, которое соответстветствует максимальной площади проходного сечения канала ЭГР, B; V_{y2na} – скорость изменения угла наклона РО экскаватора, 2pad/c.

Алгоритм работы УУ представлен в виде имитационной модели в программном комплексе MATLAB (рис. 3.33).





Рисунок 3.33 – Блок-схема имитационной модели устройства управления положением рабочего органа и скоростью цепного траншейного экскаватора

(а –управляющее устройство, б –контур управления положением рабочего органа, в – контур управления скоростью движения цепного траншейного экскаватора)

В соответствии с приведенными математическими моделями подсистем, участвующих в рабочем процессе ЦТЭ, составлена имитационная модель рабочего процесса ЦТЭ в программном продукте MATLAB Simulink, структурная схема которой представлена на рисунке 3.34.



MATLAB Simulink

траншейного экскаватора с усовершенствованным устройством управления положением Рисунок 3.34 – Структурная схема имитационной модели рабочего процесса цепного рабочего органа в поперечной плоскости, выполненная в программном комплексе

Выводы по главе

Представленное в главе математическое описание рабочего процесса цепного траншейного экскаватора позволяет сделать следующие выводы:

1. Составлены расчетные схемы и аналитические зависимости, позволяющие разработать математическую модель базовой машины и исследовать её динамические характеристики.

2. Проведены теоретические исследования, позволяющие составить математическую модель процесса взаимодействия грунта и рабочего органа в поперечной плоскости.

3. Разработана имитационная модель рабочего процесса цепного траншейного экскаватора, включающая себя основные В подсистемы: «Управляющее устройство», «Базовая машина», «Опорная поверхности» и «Траншея» и позволяющая проводить теоретические исследования рабочего процесса, легко реализуемая на компьютере с помощью приложения Simulink программного комплекса МАТLAВ.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования, проведенные в работе, направлены на анализ и синтез параметров УУ положением РО в поперечной плоскости, соответствующих обоснованному критерию эффективности РП ЦТЭ. Исследования проводились при помощи разработанной имитационной модели РП ЦТЭ (рис. 3.34) [131].

4.1 Обоснование параметров, исследуемых в работе

Прежде чем проводить теоретические исследования имитационной модели РП ЦТЭ необходимо распределить параметры модели на группы [14, 25, 119]:

1) с фиксированными значениями;

2) со случайными значениями;

3) варьируемые в процессе исследования.

Такое разделение требуется, чтобы определить области исследований и выявить параметры, которые влияют на РП ЦТЭ [119].

Фиксированные параметры имитационной модели РП ЦТЭ:

- параметры базовой машины: *L*, *L_M*, *L_{PO}*, *B_M*;

– параметры гидропривода: τ , D, d, c_1 , c_2 , c_3 , i_{307} ;

– параметры грунта и микрорельефа поверхности: σ_{Φ} , α_{Φ} , β_{Φ} , σ_{Z} , α_{Z} , β_{Z} , μ_{ρ} , γ_{ρ} , μ_{Γ} , k', γ' , ξ ;

параметры УУ: ширина зоны нечувствительности УУ (*d_z*); заданный угол отклонения РО от гравитационной вертикали (γ=0).

Параметры имитационной модели РП ЦТЭ, которые имеют случайный характер:

неровности микрорельефа – *Y*;

Согласно цели и задачам работы, исследуемые параметры, влияющие на эффективность РП, должны быть связаны с УУ положением РО ЦТЭ [65, 119]. При исследовании процесса формирования траншеи имеет большое значение анализ параметров УУ, которые существенно влияют на перемещение РО (скорость изменения угла наклона остова экскаватора ($V_{yzлa}$, *град/с*) и скорость перемещения экскаватора (V, M/c)), такие, как подача гидронасоса (Q_{H} , M^{3}/c), рабочий объем гидромотора привода гусениц (q_{M} , M^{3}) и параметры ГЦ (d, M – диаметр штока; D, M – диаметр поршня). Эти параметры напрямую влияют на точность и скорость позиционирования РО в поперечной плоскости и производительность ЦТЭ.

Варьируемыми параметрами для исследования приняты:

- скорость перемещения экскаватора – V, M/c,

- скорость изменения угла наклона остова ЦТЭ - V_{угла}, град/с.

Таким образом, теоретические исследования основных параметров УУ на имитационной модели РП ЦТЭ будут направлены на определение границ варьируемых параметров, на изучение влияния одних параметров на другие и поиск их оптимальных численных значений для конкретных внешних условий согласно выбранному критерию эффективности [65, 119].

4.2 Экспериментальные исследования

В работе используется комплексный метод исследования, который сочетает экспериментальные и теоретические исследования. Экспериментальные исследования – это средство для подтверждения адекватности математической модели, что служит доказательством ее способности отображать с нужной точностью характеристики процесса или объекта, рассмотренного в работе, при изменении его параметров и внешних воздействий [36, 119].

Объектом исследования является цепной траншейный экскаватор ТРС 950 БСЛ Доминик (рис. 4.1.). Исследования проведены в г. Омске на полигоне.



Рисунок 4.1 – Цепной траншейный экскаватор ТРС 950 БСЛ Доминик

Согласно методике был проведен натурный пассивный эксперимент.

Для проведения эксперимента были сооружены неровности высотой 0,2 м и длиной 1,35 м.

Цель эксперимента: подтверждение адекватности составленной математической модели цепного траншейного экскаватора.

Объект исследования: зависимость угла отклонения РО от гравитационной вертикали в поперечной плоскости (*γ*) от возмущающих воздействий микрорельефа на ходовое оборудование.

Приборы: индикатор угла наклона, установленный на цепном траншейном экскаваторе ТРС 950 БСЛ Доминик – 1 шт., линейка – 1 шт.

Ход эксперимента:

1) Экскаватор движется с постоянной скоростью. На первом этапе осуществляется наезд левой гусеницей на неровность, правая гусеница при этом двигается по горизонтальной поверхности на плоскости отсчета.

На втором этапе осуществляется наезд правой гусеницей на неровность, левая гусеница при этом двигается по горизонтальной поверхности на плоскости отсчета. На каждом этапе через равные промежутки времени (t=5 c) фиксируются показания индикатора угла наклона остова ЦТЭ (PO).

2) Результаты измерений заносятся в таблицу (таблица 4.1) и по полученным данным строятся графики изменения угла наклона остова во времени (рис. 4.2 – 4.3).

t, c угол наклона	0	5	10	15	20	25	30	35	40
үл, град	0	0,8	2,4	4	4,9	4	2,8	1	0
_{ү пр} , град	0	0,7	2	2,4	4,9	3,9	2,8	1,3	0









Рисунок 4.2 – Результаты изменения угла наклона остова цепного траншейного

экскаватора во времени при наезде левой гусеницей на неровность



Рисунок 4.3 – Результаты изменения угла наклона остова цепного траншейного экскаватора во времени при наезде правой гусеницей на неровность

3) Результаты эксперимента сравниваются с теоретическими значениями. Для этого необходимо выполнить моделирование процесса наезда на неровность гусеницами экскаватора. Это возможно осуществить, если задать возмущающее воздействие в виде неровности, которая определяется вертикальной координатой в момент фиксирования времени в процессе натурного эксперимента.

В качестве источника возмущающего воздействия на ходовое оборудование ЦТЭ используется блок Signal Builder из библиотеки Simulink, в котором задаются вертикальные координаты контрольных точек опорной поверхности гусеницы. Учитывая время, затраченное на проезд неровности, для натурного эксперимента время моделирования установлено 40 *с*.

Таблица 4.2.

<i>t, с</i> верт. координата	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Үл, м	0	0,03	0,09	0,15	0,2	0,17	0,1	0,04	0
Үпр, м	0	0,025	0,085	0,1	0,2	0,15	0,1	0,05	0

Результаты моделирования процесса перемещения левой и правой гусениц по неровности.

По данным таблицы 4.2 построены графики изменения вертикальных координат неровностей по левой и правой колеям, а также показания индикатора угла при наезде на неровности левой и правой гусеницами.



Рисунок 4.4 – Изменение вертикальной координаты неровности по левой колее



Рисунок 4.5 – Изменение вертикальной координаты неровности по правой колее

В результате моделирования получены значения угла наклона остова экскаватора при наезде на неровности.

Таблица 4.3.

Результаты моделирования процесса перемещения левой и правой гусениц по неровности.

<i>t</i> , <i>c</i>	0	5	10	15	20	25	30	35	40
үл, град	0	0,75	2,25	3,75	5	4,25	2,5	1	0
_{ү пр} , град	0	0,625	2,15	2,5	5	3,75	2,5	1,25	0



Рисунок 4.6 – График изменения угла наклона остова цепного траншейного экскаватора во времени при наезде на неровность левой гусеницей

91



Рисунок 4.7 – График изменения угла наклона остова цепного траншейного экскаватора во времени при наезде на неровность правой гусеницей

Адекватность модели подтверждается сравнением результатов моделирования и эксперимента, расхождение между которыми оценивается в процентах [25].



Рисунок 4.8 – Сравнение изменений угла наклона остова цепного траншейного экскаватора во времени при наезде на неровность левой гусеницей



Рисунок 4.9 – Сравнение изменений угла наклона остова цепного траншейного экскаватора во времени при наезде на неровность правой гусеницей

После сравнения полученных экспериментальных и теоретических зависимостей можно сделать вывод, что значения, полученные при проведении экспериментальных и теоретических исследований, расходятся не более чем на 11%. Это говорит об адекватности разработанной математической модели геометрических связей звеньев ЦТЭ.

Вывод: в результате проведенного эксперимента и сравнения полученных экспериментальных данных и данных, которые получены при моделировании перемещения ЦТЭ по неровностям поверхности грунта, можно заключить, что цель эксперимента достигнута – подтверждена адекватность математической модели геометрических связей звеньев ЦТЭ.

4.3 Теоретические исследования

4.3.1 Условия проведения теоретических исследований

Для проведения теоретических исследований в качестве примера был использован цепной траншейный экскаватор ТРС 950 Б СЛ. При исследовании скорость ЦТЭ изменялась от 0,013 м/с до 0,034 м/с Это соответствует скорости движения экскаватора на пониженной передаче во время РП.

Исследования РП, в качестве примера, проводились на модели неподготовленной поверхности микрорельефа с параметрами: $\sigma = 0.05 \ m$; $\alpha = 0.2 \ c^{-1}$; $\beta = 0.15 \ c^{-1}$. Время моделирования составляет 400 секунд. Глубина копания принята равной 1.8 *м*. Ширина копания принята равной 0.4 *м*.

Чтобы варьировать исследуемые параметры, требуется установить границы варьирования, основываясь на реальных технических характеристиках оборудования.

У современной гидроаппаратуры время запаздывания τ определяется временем запаздывания разгрузочного клапана, а также динамических запаздываний золотника ЭГР и ГЦ. Для современной аппаратуры общее время запаздывания гидропривода τ находится в пределах 0,1 - 0,3 c [60, 110]. В исследованиях время запаздывания гидропривода принято 0,1 c, что соответствует современному уровню техники.

При исследовании скорость изменения угла наклона РО экскаватора в поперечной плоскости варьировалась от 1,49 до 2,41 град/с, что соответствует подаче насоса от 0,0025 до 0,004 m^3/c .

Вследствие того, что площади поршневой и штоковой полости отличаются, скорости перемещения ГЦ на выдвижение штока (поршневая полость) и втягивание штока (штоковая полость) РО будут разными. Из-за различия скоростей движения обозначим V_{6bid} – скорость выдвижения штока, V_{6m} – скорость выдвижения штока, V_{6m} – скорость влягивания штока [65].

Автоколебания, возникающие в нелинейных системах управления, появляются вследствие влияния величины зоны нечувствительности порогового элемента d_z , и чем она меньше, тем система более склонна к возникновению автоколебаний [13, 86, 23, 120].

С учетом требований СНИП к траншеям и определенной ее глубины, примем ширину зоны нечувствительности УУ (*d_z*) в 2 градуса.

94

4.3.2 Исследование гидропривода наклона рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости

При наезде ЦТЭ на неровность изменяется угол наклона остова (PO) в поперечной плоскости. УУ позволяет компенсировать этот угол, наклоняя остов машины при помощи ГЦ. При исследовании модели гидропривода наклона PO ЦТЭ в поперечной плоскости, в качестве возмущающего воздействия на ее вход подается искуственное ступенчатое воздействие, при этом графики, представленные на рисунках 4.10 и 4.11, являются откликами модели.



Рисунок 4.11 – Изменение угла наклона рабочего органа вследствие наезда на ступенчатую неровность одной гусеницей (с устройством управления)

На рисунке 4.10 можно наблюдать, как изменяется угол наклона остова (PO) в поперечной плоскости при подаче искусственной ступенчатой неровности 0,2 м, после чего УУ обеспечивает компенсацию угла отклонения.

На рисунке 4.10 представлен график выдвижения штока ГЦ во времени при компенсации отклонения.

В результате анализа полученных зависимостей (рис. 4.11) установлено, что присутствует статическая ошибка, которая возникает в результате запаздывания элементов гидропривода, а также наличия границ срабатывания УУ.

Из рисунка 4.11 видно, что колебания отсутствуют. Это положительно сказывается на долговечности оборудования из-за снижения количества включений.

4.3.3 Исследование имитационной модели взаимодействия рабочего органа цепного траншейного экскаватора с грунтом в поперечной плоскости

Так как при разработке траншеи РО заглублен в грунт (в работе рассматривается глубина *1,8 м*), то, при изменении угла наклона остова машины, грунт будет препятствовать перемещению РО в поперечной плоскости. В результате анализа имитационной модели взаимодействия РО с грунтом в поперечной плоскости получен график изменения силы действия грунта на РО (рис. 4.12).

Полученная зависимость представляет собой ступенчатое изменения силы сопротивления движению РО при отклонении РО ЦТЭ от гравитационной вертикали и компенсации этого отклонения при подаче искусственного ступенчатого сигнала на вход имитационной модели. Можно сделать вывод, что взаимодействие РО с грунтом в поперечной плоскости не существенно влияет на процесс работы УУ. Сила, препятствующая перемещению РО, воздействует на гидропривод наклона РО экскаватора, тем самым затрудняя (замедляя) регулирование.



при компенсации угла отклонения на величину 5°

В результате анализа графика можно заключить, что при регулировании отклонения PO от гравитационной вертикали появляется боковая составляющая силы сопротивления копанию грунта, которая препятсвует перемещению PO в поперечной плоскости. В период регулирования величина этой силы уменьшается из-за уменьшения угла отклонения до тех пор, пока величина угла отклонения PO не станет меньше допустимой величины.

Исследования взаимодействия РО с грунтом проводились для грунтов II, III и IV категорий.

4.3.4 Исследование имитационной модели рабочего процесса цепного траншейного экскаватора

Выходными параметрами динамической системы РП ЦТЭ является угол отклонения РО от гравитационной вертикали (у) и производительность ЦТЭ (П). Для определения целесообразности совершенствования УУ положением РО в поперечной плоскости необходимо провести сравнение выходных параметров математической модели РП ЦТЭ при отсутствии и наличии УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости.

Для исследования РП ЦТЭ без УУ положением РО в поперечной плоскости и скоростью движения ЦТЭ используем имитационную модель без УУ (рис. 4.13),

97

выполненную в программном продукте MATLAB. Исследования проводились при условии, что скорость движения ЦТЭ *V* была фиксирована и равна 0,03 *м/с*.



Рисунок 4.13 – Структурная схема имитационной модели рабочего процесса цепного траншейного экскаватора без УУ положением РО в поперечной плоскости, выполненная в программе MATLAB Simulink

В результате анализа имитационной модели РП ЦТЭ без УУ положением РО и скоростью движения ЦТЭ получены графики изменения угла наклона γ РО в поперечной плоскости и длины разработанной траншеи L_m во времени (рис. 4.14, 4.15). В результате анализа полученных графиков видно, что РО ЦТЭ существенно отклоняется от гравитационной вертикали, среднее квадратическое значение отклонения РО γ_{cp} при этом составляет 1,42 *град*. При этом максимальное отклонение РО ЦТЭ от гравитационной вертикали составляет 7,8 *град*, что недопустимо, так как параметры произведенной траншеи не соответствуют требованиям проектной документации, СНиП и СП.

Зависимость изменения длины разработанной траншеи L_m во времени является линейной, так как ЦТЭ без УУ движется с постоянной скоростью. В результате, учитывая заданные параметры траншеи (глубина, ширина), была рассчитана производительность ЦТЭ за время моделирования, которая определяется количеством извлеченного грунта за время и в данном случае равна

77,76 $M^3/4$.



Рисунок 4.14 – Изменение угла наклона рабочего органа цепного траншейного экскаватора без устройства управления положением рабочего органа



Рисунок 4.15 – Изменение длины траншеи, разработанной цепным траншейный экскаватором без устройства управления положением рабочего органа

Анализ полученных зависимостей показал необходимость использования УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости для обеспечения правильной формы траншеи и соответствия уложенных коммуникаций требованиям проектной документации. В результате анализа имитационной модели РП ЦТЭ с УУ положением РО и скоростью движения ЦТЭ получены графики изменения угла наклона РО в поперечной плоскости γ и длины разработанной траншеи L_m во времени (рис. 4.16, 4.17). Для исследования РП ЦТЭ с УУ положением РО в поперечной плоскости γ и длины разработанной траншеи L_m во времени (рис. 4.16, 4.17). Для исследования РП ЦТЭ с УУ положением РО в поперечной плоскости используем имитационную модель, выполненную в программном продукте МАТLAB (рис. 3.34). Исследования проводились при

условии, что начальная скорость движения ЦТЭ *V* равна 0,03 *м/с* и скорость изменения угла наклона РО ЦТЭ *V*_{угла} равна 1,84 *град/с*. Значение *V*_{угла} определено, исходя из параметров гидропривода.



Рисунок 4.16 - Изменение угла наклона рабочего органа цепного траншейного экскаватора, оснащенного устройством управления положением рабочего органа



Рисунок 4.17 – Изменение длины траншеи, разработанной цепным траншейный экскаватором, оснащенным устройством управления положением рабочего органа

В результате анализа графиков (рис. 4.16, 4.17) установлено, что отклонение РО ЦТЭ от гравитационной вертикали не превышает допустимого значения, среднее квадратическое значение отклонения РО от вертикали при этом составляет 1,174 *град*. При этом параметры разработанной траншеи находятся в

допустимом интервале согласно требованиям проектной документации. Также, при условии постоянных глубины и ширины траншеи, зависимость изменения длины разработанной траншеи L_m во времени дает представление о производительности ЦТЭ за время моделирования, которая будет равна в данном случае 76,95 $m^3/4$.

В результате использования усовершенствованного УУ положением РО в поперечной плоскости и скоростью движения ЦТЭ получены результаты, удовлетворяющие требованиям проектной и технической документации. Но для получения максимально возможного эффекта необходимо решить задачу оптимизации параметров $V_{v2лa}$ и V.

4.4. Аппроксимация зависимостей

Чтобы вычислить целевые функции и решить задачи оптимизации, была проведена аппроксимация зависимостей $\gamma_{cp}(V_{yena}, V)$ и $\Pi(V_{yena}, V)$, входящих в критерий эффективности РП ЦТЭ, методом наименьших квадратов с помощью программного продукта MATLAB. Этот программный продукт позволяет не только определять уравнение регрессии для функциональной зависимости вида z=f(x,y), но и определять численные значения его коэффициентов.

Апроксимация зависимости критерия эффективновности от параметров V_{yzna} , *V* проведена по алгоритму, представленному графически в виде блок-схемы на рисунке 4.18, которая состоит из последовательности действий [115, 116, 119]:

1) чтение массивов входных $V_{y_{27,a}}$, V и выходных γ_{cp} , Π переменных;

2) выбор вида уравнения регрессии, запись файла-функции $\gamma_{cp} = f(V_{y_{27}a}, V)$ и $\Pi = f(V_{y_{27}a}, V)$ с уравнением регрессии в рабочую область MATLAB;

3) расчет коэффициентов уравнения регрессии и коэффициента детерминации R^2 , запись их в рабочую область MATLAB;

4) проверка достоверности полученных уравнений по величине R^2 .

Согласно рассмотренному методу, самыми наилучшими параметрами a_1 , a_2 ... a_m в представленной эмпирической зависимости учитываются те, для которых сумма квадратов отклонений минимальна [47, 103, 106, 115, 116, 119]:

$$F(a_1, a_2 \dots a_m) = \sum_{i=1}^n \left[y_i - f(x_i, a_1, a_2 \dots a_m) \right]^2 = min.$$
(4.4.1)



Рисунок 4.18 — Блок-схема алгоритма аппроксимации зависимостей критерия эффективности $\gamma_{cp} = f(V_{y_{27a}}, V)$ и $\Pi = f(V_{y_{27a}}, V)$

Так как необходимо, чтобы соблюдалось условие экстремума функции многих переменных, частные производные этой функции по варьируемым параметрам приравниваются нулю [47, 103, 106, 107, 115, 116, 119]:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(a_1, a_2 \dots a_m)}{\partial a_1} = 0; \\ \frac{\partial F(a_1, a_2 \dots a_m)}{\partial a_2} = 0; \\ \dots \dots \dots \dots \\ \frac{\partial F(a_1, a_2 \dots a_m)}{\partial a_m} = 0. \end{cases}$$
(4.4.2)

Частные производные функции *F*(*a*₁, *a*₂... *a*_m) по параметрам, которые варьируются:

$$\frac{\partial F(a_1, a_2 \dots a_m)}{\partial a} = -2\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i, a_1, a_2 \dots a_m)] f'_{a_1}(x_i, a_1, a_2 \dots a_m).$$
(4.4.3)

По остальным параметрам a_2 , a_3 ... a_m частные производные имеют аналогичный вид [47, 103, 106, 107, 115, 116]:

Если решить эту систему относительно a_1 , a_2 ... a_m , то это даст искомые оптимальные значения параметров. Регрессионные зависимости можно оценить мерой достоверности R^2 , которая варьируется [47, 103, 106, 107, 115, 116, 119]:

$$0 \le R^2 \le 1.$$
 (4.4.5)

Если $R^2 = 0$, то величины, для которых определяют уравнения регрессии, будут независимыми; если $R^2 = 1$, то зависимость будет функциональная, а не статистическая. Считается допустимым значение $R^2 \ge 0,7$ [47, 103, 106, 107, 115, 116].

Полученные уравнения регрессий, которые апроксимирут зависимости критерия эффективности РП от исследуемых параметров, представлены в таблицах 4.4 и 4.5. Для различных категорий грунта были построены графические зависимости $\gamma_{cp} = f(V_{yzna}, V)$ и $\Pi = f(V_{yzna}, V)$ (рис. 4.19 - 4.24).

Таблица 4.4

Категор ия грунта	Уравнения регрессии, аппроксимирующие зависимости $\gamma_{cp}(V_{y_{27}a}, V)$	R^2
II	$\gamma_{cp} = f(V_{y_{27a}}, V) = 2,6-0,3069 \cdot V_{y_{27a}} - 132 \cdot V - 0,4083 \cdot V_{y_{27a}}^{2} + 57,4 \cdot V_{y_{27a}} \cdot V + 3254 \cdot V^{2} + 0,1584 \cdot V_{y_{27a}}^{3} - 11,58 \cdot V_{y_{27a}}^{2} \cdot V - 343,3 \cdot V_{y_{27a}} \cdot V^{2} - 3,088 \cdot 10^{4} \cdot V^{3}$	0,7983
III	$\gamma_{cp} = f(V_{yzna}, V) = 1,326 + 1,776 \cdot V_{yzna} - 129 \cdot V - 1,533 \cdot V_{yzna}^{2} + 56,25 \cdot V_{yzna} \cdot V + +3181 \cdot V^{2} + 0,3637 \cdot V_{yzna}^{3} - 12,66 \cdot V_{yzna}^{2} \cdot V - 239,2 \cdot V_{yzna} \cdot V^{2} - 3,246 \cdot 10^{4} \cdot V^{3}$	0,8222
IV	$\gamma_{cp} = f(V_{y_{27a}}, V) = 2,602 - 0,2462 \cdot V_{y_{27a}} - 133,4 \cdot V - 0,4528 \cdot V_{y_{27a}}^{2} + 58,55 \cdot V_{y_{27a}} \cdot V + + 3273 \cdot V^{2} + 0,1717 \cdot V_{y_{27a}}^{3} - 12,66 \cdot V_{y_{27a}}^{2} \cdot V - 288,2 \cdot V_{y_{27a}} \cdot V^{2} - 3,246 \cdot 10^{4} \cdot V^{3}$	0,8104

Категор ия грунта	Уравнения регрессии, аппроксимирующие зависимости П=f (V _{угла} , V)	R^2
II	$\Pi = f(V_{yzna}, V) = -40,23 + 104,4 \cdot V_{yzna} + 1053 \cdot V - 45,75 \cdot V_{yzna}^{2} + 1978 \cdot V_{yzna} \cdot V6,453 \cdot 10^{4} \cdot V^{2} + 5,52 \cdot V_{yzna} - 190,3 \cdot V_{yzna}^{2} \cdot V - 2,847 \cdot 10^{4} \cdot V_{yzna} \cdot V^{2} + 1,104 \cdot 10^{6} \cdot V^{3}$	0,9139
III	$\Pi = f(V_{yzna}, V) = -318, 7 + 552, 9 \cdot V_{yzna} + 838, 8 \cdot V - 264, 4 \cdot V_{yzna}^{2} - 925, 2 \cdot V_{yzna} \cdot V + +5,072 \cdot 10^{4} \cdot V^{2} + 39, 6 \cdot V_{yzna}^{3} + 735, 4 \cdot V_{yzna}^{2} \cdot V - 3,986 \cdot 10^{4} \cdot V_{yzna} \cdot V^{2} - 1,203 \cdot 10^{5} \cdot V^{3}$	0,9739
IV	$\Pi = f(V_{y27a}, V) = -273, 2+458, 6 \cdot V_{y27a} + 1882 \cdot V - 219, 1 \cdot V_{y27a}^{2} + 787, 7 \cdot V_{y27a} \cdot V6,345 \cdot 10^{4} \cdot V^{2} + 33,36 \cdot V_{y27a}^{3} + 15,43 \cdot V_{y27a}^{2} \cdot V - 2,222 \cdot 10^{4} \cdot V_{y27a} \cdot V^{2} + 1,082 \cdot 10^{6} \cdot V^{3}$	0,9548



Рисунок 4.19 – Функциональная зависимость среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа от гравитационной вертикали от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта II)

Таблица 4.5



Рисунок 4.20 – Функциональная зависимость среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа от гравитационной вертикали от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта III)



Рисунок 4.21 – Функциональная зависимость среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа от гравитационной вертикали от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта IV)



Рисунок 4.22 – Функциональная зависимость производительности от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта II)



Рисунок 4.23 – Функциональная зависимость производительности от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта III)

106



Рисунок 4.24 – Функциональная зависимость производительности от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта IV)

В результате получены функциональные зависимости среднего квадратического значения угла отклонения РО ЦТЭ в поперечной плоскости и производительности от скорости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости (*V_{угла}*, *град/с*) и скорости движения ЦТЭ (*V*, *м/с*) в качестве примера для грунта II категории (рис. 4.25 – 4.28).



Рисунок 4.25 – Функциональная зависимость среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа



Рисунок 4.26 – Функциональная зависимость среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа от скорости движения цепного траншейного экскаватора



Рисунок 4.27 – Функциональная зависимость производительности цепного траншейного экскаватора от скорости изменения угла наклона рабочего органа


Рисунок 4.28 – Функциональная зависимость производительности цепного траншейного экскаватора от скорости его движения

В результате анализа графиков можно сделать вывод, что характер зависимости нелинейный и при изменении значений $V_{y_{27}a}$ и V наблюдается наличие экстремума функций $\gamma_{cp}=f(V_{y_{27}a})$ и $\gamma_{cp}=f(V)$, $\Pi=f(V_{y_{27}a})$ и $\Pi=f(V)$. Это свидетельствует о том, что в дальнейшем можно решить задачу оптимизации соответствующих параметров УУ.

4.5 Решение задачи оптимизации

В процессе проектирования обычно ставится задача определения наилучших значений параметров объектов. Эту структуры или задачу называют оптимизационной. При этом если оптимизация заключается В расчёте оптимальных значений каких-либо параметров при заданной структуре объекта исследования, то она называется параметрической оптимизацией, а соотношения, устанавливающие пределы возможного изменения ЭТИХ параметров ограничениями [55, 73].

Исходя из построенных функциональных зависимостей (рис. 4.19-4.24) и полученных уравнений регрессий (таблицы 4.4, 4.5), можно определить

109

экстремум целевой функции как внутренний, т. к. он соответствует внутренней области данных.

На основании рассмотренного критерия эффективности и установленных ограничений, накладываемых на переменные целевых функций (V_{yzna} , V), в виде неравенств (равенств) можно охарактеризовать оптимизацию как условную.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что в работе решается классическая задача условной параметрической оптимизации, которая заключается в оптимизации целевой функции:

$$y = F(x_1, x_2, ..., x_n) = extr,$$
 (4.5.1)

т.е. определяются такие значения независимых переменных (параметров УУ) *x_i*, при которых целевая функция приобретает внутреннее экстремальное значение с учетом всякого рода ограничений.

Задачу условной оптимизации в совокупности можно представить в виде [67]

$$F = f(x_j) \rightarrow \min(\max);$$

$$g_i(x_j) \le b_i;$$

$$d_j \le x_j \le D_j;$$

$$i = 1...m, j = 1...n.$$

$$(4.5.2)$$

Но в обоснованном критерии эффективности ограничения представлены в виде граничных условий, при которых возможен поиск экстремума. Если детально рассмотреть граничные условия, можно заключить, что область поиска экстремума может изменяться с изменением требований к рассмотренным параметрам ($V_{yzлa}$, V) (расширяться или сужаться). Результатом оптимизации должно быть наилучшее значение рассматриваемых параметров в независимости от граничных условий, которые не имеют конкретного численного значения. Поэтому можно прийти к выводу, что область поиска экстремума ничем не ограничена. Отсюда возможно принять допущение, что в работе рассматривается задача безусловной оптимизации, решить которую можно при помощи программного комплекса MATLAB [73, 84]. Этот комплекс позволяет определить экстремум функции симплекс-методом Нелдера-Мида, который является развитием симплексного метода Спендли, Хекста и Химсворта.

Для нахождения минимума целевой функции угла отклонения *у* воспользуемся функцией fminsearch.

Сначала необходимо создать скрипт с именем, например, «ugol.m», в котором зададим целевую функцию угла отклонения *у*.

function fun=ugol(X) fun=2.6-132*X(1)-0.3069*X(2)+3254*X(1).^2+57.4*X(1).*X(2)--0.4083*X(2).^2-3.088*10^4*X(1).^3-11.58*X(2).^2.*X(1)--343.3*X(2).*X(1).^2+0.1584*X(2).^3; end

При этом под X(1) подразумевается переменная V, а под X(2) – переменная $V_{y_{27a}}$.

Для выполнения скриптов необходимо задать требуемую точность к переменной Х. В данном случае вычисления проводились с минимальным шагом по аргументу 1.10⁻⁵:

 $\mathbf{x} = 0.00001: 0.00001: 10$

После этого в командной строке прописывается стандартная функция MATLAB:

[z,f,exitflag,output] = fminsearch(@ugol, [0.025,2.0], optimset('TolX',1e-5))

Координаты [0.025,2.0] являются координатами начальной точки поиска.

Результаты оптимизации представлены на рис. 4.29.

В результате расчетов были получены координаты минимума целевой функции угла отклонения γ [0.0186, 1.9221]. Значение функции при этом f=1.1264.В переменных exitflag и output помещены условия прерывания процесса поиска и информация об оптимизации соответственно.



Рисунок 4.29 – Оптимизация параметров целевой функции угла отклонения γ в MATLAB симплекс-методом Нелдера-Мида

Для нахождения максимума целевой функции производительности воспользуемся такой же функцией fminsearch. Для того, чтобы это осуществить, необходимо рассмотреть обратную целевую функцию $f(V, V_{yzna})=1/\Pi(V, V_{yzna})$.

Создадим скрипт с именем, например, «pro.m», в котором зададим обратную целевую функцию:

 $\begin{array}{c} \mbox{function fun=pro(X)} \\ \mbox{fun=1./(-40.23+1053.*X(1)+104.4.*X(2)-6.453*10^{4}*(X(1).^2)+} \\ \mbox{+1978*X(1).*X(2)-45.75*X(2).^2+1.104*10^{6}*X(1).^3-190.3*X(2).^2.*X(1)-} \\ \mbox{2.847*10^{4}*X(2).*X(1).^2+5.52*X(2).^3);} \\ \mbox{end} \end{array}$

Под x(1) подразумевается переменная V, а под x(2) – переменная $V_{y_{27,a}}$.

В командной строке прописываем функцию:

[z,f,exitflag,output] = fminsearch(@pro, [0.025,2.0], optimset('TolX',1e-5))

Результаты оптимизации представлены на рисунке 4.30.



Рисунок 4.30 – Оптимизация параметров целевой функции производительности П в MATLAB симплекс-методом Нелдера-Мида

В результате расчетов были получены координаты минимума обратной целевой функции производительности *П* [0.0290, 1.9724]. Значение функции при этом *f*=0,0129. С учетом обратного перехода к целевой функции производительности получаем значение функции *f*=77,5194.

После определения наилучших значений целевых функций $\Pi'(V, V_{yzna})$ и $\gamma'(V, V_{yzna})$ можно определить оптимальные значения параметров обобщенной целевой функции (1.25).

Создадим скрипт с именем, например, «got.m», в котором зададим обратную целевую функцию:

function fun=got(X)

 $\begin{array}{l} \mbox{fun=1./(((-40.23+1053.*X(1)+104.4.*X(2)-6.453*10^{4}*(X(1).^2)+ \\ +1978*X(1).*X(2)-45.75*X(2).^2+1.104*10^{6}*X(1).^3- \\ -190.3*X(2).^2.*X(1)-2.847*10^{4}*X(2).*X(1).^2+5.52*X(2).^3)./77.5194)+ \\ +(0.2347./(2.6-132*X(1)-0.3069*X(2)+3254*X(1).^2+57.4*X(1).*X(2)- \\ -0.4083*X(2).^2-3.088*10^{4}*X(1).^3-11.58*X(2).^2.*X(1)- \\ -343.3*X(2).*X(1).^2+0.1584*X(2).^3))); \\ \mbox{end} \end{array}$

Под x(1) подразумевается переменная *V*, а под x(2) – переменная $V_{y_{27,0}}$. D командной строке прописываем функцию:

[z,f,exitflag,output] = fminsearch(@got, [0.025,2.0], optimset('TolX',1e-5))

Результаты оптимизации представлены на рисунке 4.31.

В результате расчетов были получены координаты минимума обобщенной целевой функции f [0.0232, 1.9765]. Значение функции при этом f=0,5063. С учетом обратного перехода к целевой функции критерия эффективности получаем значение функции f=1,9751.

В результате оптимизации получены рациональные значения технологических параметров РП ЦТЭ и конструктивных параметров УУ для II категорий грунта на основании предложенного критерия эффективности: $V_{yena}=1,9765 \ epad/c, \ V=0,0232 \ m/c.$ При этом среднее квадратическое значение отклонения РО составляет 1,14 *град*, а производительность ЦТЭ за время работы равна 76,66 $m^3/4$.

Аналогично получены значения для III категории грунта ($V_{yzna}=2,134 \ zpad/c$, $V=0,0206 \ m/c$) и IV категории грунта ($V_{yzna}=2,19 \ zpad/c$, $V=0,0183 \ m/c$). На основе этой информации инженер-конструктор, с учетом конструктивных и технологических возможностей, определяет, за счет каких параметров ГП можно обеспечить приведенные значения V_{yzna} и V.



Рисунок 4.31 – Оптимизация параметров целевой функции обобщенного критерия эффективности в MATLAB симплекс-методом Нелдера-Мида

Полученные оптимальные зачения технологических параметров РП ЦТЭ позволяют рассчитать значения основных параметров УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости, используя зависимости 3.6.20, 3.6.27, 3.6.29, 3.6.30, 3.7.4. Конструктор-проектировщик имеет возможность выбора конструктивного параметра УУ, который необходимо изменить, чтобы достичь оптимальных значений V_{yzna} и V. Такими параметрами могут быть подача гидронасоса (Q_{μ} , m^{3}/c), рабочий объем гидромотора привода гусениц (q_{μ} , m^{3}) или параметры ГЦ (d, m; D, m), а также все перечисленные в совокупности. В результате будут получены оптимальные значения параметров УУ, соответствующих целевой функции для заданной категории грунта.

4.6 Инженерная методика оптимизации параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости



Рисунок 4.32 – Блок-схема инженерной методики

Исследования, проведенные в работе, легли в основу инженерной методики оптимизации параметров УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости (блок-схема методики представлена на рисунке 4.32).

Методика заключается в следующем:

1. Задать параметры математической модели РП ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО и скоростью ЦТЭ в поперечной плоскости: геометрические параметры звеньев элементов конструкции цепного траншейного экскаватора (L_b , L, a, b, x); глубину копания (*H_m*); подачу гидронасоса, параметры гидроцилиндра и гидромотора (Q_н, Q_{μ} , e_{μ} , ω_{μ} , V_{μ} ; коэффициент затухания (α), среднеквадратическое отклонение (σ) И коэффициент периодичности (β) для модели микрорельефа; требуемое значение угла наклона рабочего органа поперечной В плоскости ($\gamma = 0$).

2. Сформулировать задачу оптимизации: выбрать уравнения регрессии частных целевых функций, соответствующие категории грунта.

3. Провести расчет математической модели на ЭВМ. Получить численные параметры выходных характеристик (*у*, *П*) при изменении исследуемых параметров V_{угла} и V.

4. Аппроксимировать зависимости выходных характеристик от исследуемых параметров $\gamma_{cp} = f(V_{vzna}, V)$ и $\Pi = f(V_{vzna}, V)$ методом наименьших квадратов.

5. Решить задачу безусловной оптимизации симплекс-методом Нелдера-Мида.

6. Вывести оптимальные значения технологических параметров РП ЦТЭ (V) и конструктивных параметров УУ (V_{y27a}), соответствующие целевой функции для заданной категории грунта.

7. Рассчитать оптимальные значения основных параметров УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости.

Вывести оптимальные значения параметров УУ, соответствующие целевой функции для заданной категории грунта Q_{μ} , (m^3/c) , q_{M} (m^3) , d (m), D (m).

4.7 Расчет экономического эффекта

Расчет экономического эффекта производился при условии использования ЦТЭ в аренде на срочных работах. За показатель произведенной работы взята траншея длинной 1000 *м*, глубиной 1,8 *м* и шириной 0,4 *м*.

Прокладка магистральных коммуникаций производится при различных характеристиках рельефа местности. Использование ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО в поперечной плоскости, дает возможность выполнять работы по строительству траншеи без подготовки (выравнивая) поверхности. Ниже представлен расчет возможного экономического эффекта от использования ЦТЭ, оснащенного усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости, при разработке траншеи глубиной 1,8 метров (H_m =1,8 *м*) в грунте II категории. Экономический эффект рассчитан в результате сравнения стоимости разработки траншеи при помощи ЦТЭ без УУ, ЦТЭ с неусовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости и ЦТЭ с усовершенствованным УУ. Расчеты проводились при $V_{yzna} = 2,134 \ zpad/c, d_z = 2 \ zpad$.

Расчет стоимости работ с применением ЦТЭ без УУ положением РО.

Для строительства траншеи с применением ЦТЭ без УУ положением РО в поперечной плоскости необходимо использовать дополнительно землеройную технику для подготовки опорной поверхности на пути следования экскаватора. Учитывая объемы работ, для этих целей используют бульдозеры. Средняя скорость ЦТЭ без УУ при производстве траншеи (V_1) берется равной 100 *м*/ч.

Затраты (3_1) на строительство траншеи длинной (L_m) 1000 *м* с использованием ЦТЭ без УУ положением РО в поперечной плоскости состоят из:

стоимости аренды ЦТЭ без УУ положением РО (Саэl) – 1500 рублей/час
 [19, 20];

– стоимости аренды бульдозера (*C*_{*aб1*}) – 1250 рублей/час (в качестве примера взят распространенный бульдозер ДТ-75) [119,120].

Для определения стоимости работы ЦТЭ без УУ положением РО в поперечной плоскости необходимо рассчитать время, затраченное ЦТЭ на производство траншеи длиной 1000 м:

$$t_{p \ni l} = L_m / V_l = 1000 / 100 = 10 \text{ часов}$$
 (4.7.1)

С учетом рабочего времени, рассчитаем затраты на аренду ЦТЭ:

$$3_{\mathfrak{I}} = C_{\mathfrak{a}\mathfrak{I}} \cdot t_{\mathfrak{p}\mathfrak{I}} = 1500 \cdot 10 = 15000$$
 рублей. (4.7.2)

Произведем расчеты для бульдозера, приняв среднюю скорость движения бульдозера V_{δ} равной 1300 м/ч. Для подготовки поверхности бульдозеру потребуется минимум четыре прохода. Определим время работы бульдозера:

$$t_{p\delta} = L_m / V_{\delta} = 1000 / 1300 \cdot 4 = 3,08 \text{ часа.}$$
 (4.7.3)

С учетом рабочего времени, определим затраты на аренду бульдозера:

$$3_{\delta 1} = C_{a\delta 1} \cdot t_{p\delta} = 1250 \cdot 3,08 = 3850$$
 рублей. (4.7.4)

В результате получаем затраты на разработку траншеи длинной 1000 м с применением ЦТЭ без УУ положением РО в поперечной плоскости:

$$3_l = 3_{\mathfrak{I}l} + 3_{\mathfrak{I}l} = 15000 + 3850 = 18850$$
 рублей. (4.7.5)

Расчет стоимости работ с применением ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО в поперечной плоскости.

Заданная скорость ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО в поперечной плоскости, при производстве траншеи (V₂) принята равной 100 м/ч.

При использовании ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО в поперечной плоскости, затраты на строительство траншеи (*3*₂) длинной 1000 м состоят из:

стоимости аренды ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО в поперечной плоскости (*C*_{a>2}) – 1500 рублей/час [19, 20].

Для определения стоимости работы ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО в поперечной плоскости, необходимо рассчитать время, затраченное ЦТЭ на производство траншеи длиной 1000 *м*:

$$t_{p_{2}} = L_m / V_2 = 1000 / 100 = 10$$
 часов. (4.7.6)

С учетом рабочего времени рассчитаем затраты на аренду ЦТЭ, оснащенного неусовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости:

$$3_{32} = C_{a32} \cdot t_{p32} = 1500 \cdot 10 = 15000$$
 рублей. (4.7.7)

Во время РП, оснащенного неусовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости, ЦТЭ, двигаясь с постоянной скоростью, не в состоянии мгновенно компенсировать отклонение РО. В результате появляются участки траншеи с нарушенной формой. Чтобы устранить эти нарушения необходимо произвести зачистные работы. Для определения объема таких работ необходимо рассмотреть РП ЦТЭ, оснащенного усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости.

Расчет стоимости работ с применением ЦТЭ, оснащенного усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости.

Использование ЦТЭ, оснащенного усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости, позволяет сократить длину участков траншеи с нарушенной формой. Это достигается за счет регулирования скорости движения ЦТЭ, а именно, за счет остановки ЦТЭ при отклонении его РО от гравитационной вертикали на величину, превышающую допустимую. Заданная скорость ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО в поперечной плоскости, при производстве траншеи (V_3) в соответствии с рекомендаціями инжененрной методики принимается 93,6 *м*/ч.

Затраты (*3*₃) на разработку траншеи длинной 1000 *м* с использованием ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО в поперечной плоскости, состоят из:

стоимости аренды ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО в поперечной плоскости (*C_{aэ3}*) – 1500 рублей/час [18, 19, 20].

Для определения стоимости работы ЦТЭ, оснащенного усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости, необходимо определить время, затраченное ЦТЭ на производство траншеи длиной 1000 м:

$$t_{p_{3}} = L_m / V_3 = 1000 / 93, 6 = 10,684$$
 часов. (4.7.8)

С учетом рабочего времени определим затраты при использовании ЦТЭ, оснащенного усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости:

$$3_3 = 3_{33} = C_{a_33} \cdot t_{p_33} = 1500 \cdot 10,684 = 16026$$
 рублей. (4.7.9)

В результате анализа РП ЦТЭ, оснащенного усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости, можно сделать вывод, что участки траншеи с нарушенной формой отсутствуют за счет остановки ЦТЭ в момент компенсации угла отклонения РО в поперечной плоскости.

Определим длину участков траншеи с нарушенной формой за время РП ЦТЭ с неусовершенствованным УУ положением РО. Для этого рассчитаем общее время остановки ЦТЭ при компенсации отклонения РО:

$$t_{ocm} = t_{p_{2}} - t_{p_{2}} = 10,684 - 10 = 0,684 \text{ vac.}$$
(4.7.10)

Учитывая скорость движения ЦТЭ (0,1 *м/с*), можно определить длину участка траншеи с нарушенной формой:

$$L_1 = 0,684 \cdot 100 = 68,4 \, \text{M}. \tag{4.7.11}$$

Чтобы определить объем грунта, который необходимо зачистить, необходимо рассчитать средний угол *уоткл* отклонения РО от допустимого

значения d_z за время t_{ocm} при формировании траншеи длинной 1000 *м* в течение 10 часов с учетом рекомендуемой скорости изменения угла наклона РО V_{yzna} :

 $\gamma_{omkn} = t_{ocm} 3600 \cdot V_{vzna} / 36000 = 0,684 \cdot 3600 \cdot 2,134 / 36000 = 0,146 \ rpad.$ (4.7.12)



Далее необходимо рассмотреть сечение траншеи (рис. 4.33).

Исходя из расчетной схемы, можно определить площадь среза (сечения) грунта $2S_{cpesa}$ при отклонении РО от допустимых значений d_{z} :



 $2S_{cpesa} = H_m^2 \cdot tg(0,146) = 1,8^2 \cdot 0,0026 = 0,008424 \, m^2. \tag{4.7.13}$

Рассчитаем объем грунта, который необходимый зачистить вручную:

$$V_{\mathcal{Z}_1} = 2S_{cpesa} \cdot L_m = 0,008424 \cdot 1000 = 8,424 \,\,\text{m}^3. \tag{4.7.14}$$

С учетом стоимости земляных работ, выполняемых вручную, определим затраты (3_{361}) на зачистку разработанной траншеи в объеме 8,424 m^3 . Стоимость разработки 1 m^3 принимаем равной 400 рублей [53]:

$$3_{36l}$$
=400·8,424 = 3369,6 рублей. (4.7.15)

Основываясь на проведенных вычислениях, рассчитаем затраты на разработку траншеи длинной 1000 *м* с применением ЦТЭ, оснащенного неусовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости:

$$3_2 = 3_{31} + 3_{361} = 15000 + 3369,6 = 18369,6$$
рублей. (4.7.16)

Полученные в результате расчетов сведены в таблицу 4.6.

Таблица 4.6. Результаты расчетов экономического эффекта

п\п	Условия	Затраты, руб.
№ 1	Затраты на строительство траншеи длинной 1000 м с использованием ЦТЭ без УУ положением РО в поперечной плоскости	18850
Nº 2	Затраты на строительство траншеи длинной 1000 м с испо- льзованием ЦТЭ, оснащенного неусовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости	18369,6
Nº 3	Затраты на строительство траншеи длинной 1000 м с испо- льзованием ЦТЭ, оснащенного усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости	16026

Таким образом, с учетом полученных результатов, определим экономический эффект от использования ЦТЭ, оснащенного усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости при длине разработанной траншеи 1000 *м*:

$$\mathcal{P}=(3_1+3_{361})-3_2=18369,6-16026=2343,6$$
 рубля. (4.7.17)

Для наглядного представления результатов построим диаграмму (рис. 4.34).



Рисунок 4.34- Диаграмма затрат на разработку траншеи длинной 1000 м

Выводы по главе

1. Проведенные исследования позволили подтвердить адекватность математической модели уравнений геометрических связей элементов конструкции цепного траншейного экскаватора.

2. Теоретические исследования позволили выявить функциональные зависимости среднего квадратического угла отклонения РО от гравитационной вертикали и производительности машины от параметров УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости ($\gamma_{cp}=f(V_{v2na}, V)$ и $\Pi=f(V_{v2na}, V)$).

3. Реализованный алгоритм оптимизационного синтеза параметров УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости позволяет найти рациональные значения *V*_{угла} и *V* для различных категорий грунта.

4. Результатом проведенных исследований стала разработанная методика оптимизации параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости.

5. Произведенный расчет экономического эффекта позволил определить экономию от использования ЦТЭ, оснащенного усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости, на 1000 *м* разработанной траншеи, которая составила 2343,6 рубля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в работе исследования позволили сформулировать основные результаты и выводы.

1. Проведенный анализ требований, предъявляемых к параметрам траншеи, и существующих систем управления землеройными машинами позволил определить способы повышения эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора.

2. Выбран и обоснован комплексный критерий эффективности рабочего процесса цепного траншейного экскаватора с усовершенствованным устройством управления положением рабочего органа в поперечной плоскости, слагаемыми которого являются отношения минимального среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости (γ'_{cp} , *град*) к фактическому значению угла отклонения (γ_{cp} , *град*) и фактического значения производительности цепного траншейного экскаватора (Π , $m^{3}/4$) к максимальному значению производительности (Π' , $m^{3}/4$).

3. Разработанная математическая модель рабочего процесса цепного траншейного экскаватора с устройством управления положением рабочего органа в поперечной плоскости, описывающая рабочий процесс как сложную динамическую систему, состоящую из математических моделей подсистем «Базовая машина», «Управление», «Траншея» и «Опорная поверхность», позволила решить задачи анализа и синтеза основных параметров устройства управления и технологических параметров рабочего процесса, определяющих эффективность рабочего процесса цепного траншейного экскаватора.

4. Проведенный анализ математической модели сложной динамической системы рабочего процесса цепного траншейного экскаватора позволил установить зависимости, связывающие среднее квадратическое значение угла отклонения рабочего органа в поперечной плоскости (γ_{cp} , *град*) и производительность цепного траншейного экскаватора (Π , $m^3/4$), а также сформированный комплексный критерий эффективности со скоростью изменения

угла наклона рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости (V_{y27a} , cpad/c) и скоростью движения цепного траншейного экскаватора (V, m/c), которые позволяют оптимизировать параметры V_{y27a} и V. Получены временные зависимости изменения среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа от гравитационной вертикали с учетом категорий грунтов.

5. Разработанная инженерная методика оптимизации параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости позволила: определить оптимальные значения скорости изменения угла наклона рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости (V_{yeza} , epad/c) и скорости движения цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости (V_{yeza} , epad/c) и скорости движения цепного траншейного экскаватора (V, M/c) для различных категорий грунта [II категория ($V_{yeza}=1,9765$ epad/c, V=0,0232 M/c); III категория ($V_{yeza}=2,134$ epad/c, V=0,0206 M/c); IV категория ($V_{yeza}=2,19$ epad/c, V=0,0183 M/c)]; сформировать рекомендации по определению оптимальных значений параметров устройства управления плоскости, а именно: подачи гидронасоса ($Q_{\mu\nu}$, M^3/c), рабочего объема гидромотора ($q_{\mu\nu}$, M^3) и параметров гидроцилиндра (d, M), (D, M). Экономический эффект от использования усовершенствованного устройства управления составил 2343,6 рубля на 1000 м разработанной траншеи.

Направлениями и перспективами дальнейшей разработки темы являются исследования, направленные на совершенствование конструкции цепного траншейного экскаватора и устройства управления положением рабочего органа для обеспечения точности формирования траншеи, а также исследования способов комбинированного управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора в продольной и поперечной плоскостях.

126 СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ГП гидропривод;
- ГЦ гидроцилиндр;
- ЗМ землеройная машина;
- РП рабочий процесс;
- РО рабочий орган;
- СУ система управления;
- УУ устройство управления;
- ХО ходовое оборудование;
- ЦТЭ цепной траншейный экскаватор;
- ЭГР электрогидрораспределитель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов, М. Е. Использование траншейных экскаваторов при возведении газо- и нефтепроводов / М. Е. Агапов // Сборник трудов региональной научнотехнической конференции молодых ученых, студентов, аспирантов (с международным участием) ОИВТ (филиал) ФГОУ ВПО «НГАВТ». – Омск, 2010. - С. 174-177.

2. Агапов, М. Е. Математические модели электрогидро-распределителей траншейного экскаватора / М. Е. Агапов // Техника и технологии строительства: научно-практический сетевой электронный журнал. – 2016. - Вып. 3 (7). - С. 87-91. - URL: <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=27712201</u> (дата обращения: 03.13.2015).

3. Агапов, М. Е. Обеспечение точности геометрических размеров траншеи при строительстве трубопроводных объектов / М. Е. Агапов, В. В. Михеев, С. В. Савельев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. - № 1. – С. 3-11. - URL: <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=41296202</u> (дата обращения: 14.11.2014).

4. Агапов, М. Е. Система управления цепного траншейного экскаватора / М. Е. Агапов // Развитие дорожно-транспортного и строительного комплексов и освоение стратегически важных территорий Сибири и Арктики: вклад науки : материалы Международной научно-практической конференции / СО АВН, СибАДИ]. - Омск : СибАДИ, 2014. – Кн. 2. - С. 43-45. - URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=22725214 (дата обращения: 25.12.2016).

 Агапов, М. Е. Эффективность рабочего процесса цепного траншейного экскаватора / М. Е. Агапов, С. Д. Игнатов // Вестник современных исследований: сборник по материалам международной научно-практической конференции «Вопросы современных научных исследований» - Омск : ОРКА, 2019г – с. 24 – 28. - URL: <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=38567118</u> (дата обращения: 10.10.2016).

6. Агапов, М. Е. Алгоритм работы устройства управления рабочим органом в поперечной плоскости цепного траншейного экскаватора / М. Е. Агапов // Современные научные исследования: актуальные проблемы и тенденции : международная научно-практическая конференция. Омск, 23 декабря 2014 г. /

Омский институт водного транспорта. - Омск, 2014. - С. 9-14. - URL: https://https:elibrary.ru/item.asp?id=25074730 (дата обращения: 15.12.2019).

7. Агапов, М. Е. Взаимодействие рабочего органа цепного траншейного экскаватора с грунтом в поперечной плоскости / М. Е. Агапов // Вестник СибАДИ. - 2013. - Вып. 5 (33). - С. 7-9 : схемы. - URL: <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=20679636</u> (дата обращения: 12.08.2015).

8. Агапов, М. Е. Моделирование процесса взаимодействия рабочего органа цепного траншейного экскаватора с грунтом в поперечной плоскости в программном комплексе MATLAB / М. Е. Агапов // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2014. - № 3 (86). - С. 21-24. - URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21365737 (дата обращения: 25.07.0216).

9. Агапов, М. Е. Устройство управления положением рабочего органа в поперечной плоскости цепного траншейного экскаватора / М. Е. Агапов // Вестник СибАДИ. - 2015. - Вып. 1 (41). - С. 7-10 : ил. - Библиогр. в конце ст. (8 назв.). - URL: <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=23057931</u> (дата обращения: 14.12.2019).

10. Агапов, М. Е. Эффективность рабочего процесса цепного траншейного экскаватора / М. Е. Агапов // Техника и технологии строительства : научно-практический сетевой электронный журнал. - 2019. - Вып. 2 (18). - С. 4-8. - URL: <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=38239674</u> (дата обращения: 19.09.2019).

11. Алексеев, В.А. Исследование системы стабилизации положения рабочего органа бульдозера на базе колесного тягача : специальность 05.05.04 : Дис. на соис. ст. канд. техн. наук / В.А. Алексеева ; науч. рук. Т.В. Алексеева, В.Ф. Амельченко – Омск: СибАДИ, 1973. – 142 с.

12. Алексеева, Т. В. Гидравлические машины и гидропривод мобильных машин : учеб. пособие / Т. В. Алексеева, Н. С. Галдин, Э. Б. Шерман. - Новосибирск : Издательство Новосибирского университета, 1994. - 212 с.

13. Алексеева, Т. В. Разработка следящих систем управления рабочим процессом землеройно-транспортных машин с целью повышения их эффективности / Т. В. Алексеева. – Омск : [б. и.], 1974. - 175 с.

14. Алексеева, Т. В. Оценка и повышение точности землеройнотранспортных машин : учеб. пособие / Т. В. Алексеева, В. С. Щербаков; СибАДИ.
- Омск : СибАДИ, 1981. - 99 с.

15. Амельченко, В. Ф. Управление рабочим процессом землеройнотранспортных машин / В. Ф Амельченко. – Омск: Зап.-сиб. кн. изд-во, Омское отделение, 1975. – 232 с.

16. Анализ схем объемного гидропривода хода двухгусеничных дорожностроительных машин / В. С. Щербаков, С. Т. Бирюков, Л. Г. Додин, Е. А. Зимин. – Омск : СибАДИ, 1985.- 15 с.- Деп. в ЦНИИТЭСтроймаше 15 авг. 1985 г., №101сд-85.

17. Арбатский, Э. А. Исследование и обоснование параметров системы стабилизации тяговой мощности гусеничного бульдозера с гидромеханической трансмиссией: автореф. дис... канд. техн. наук / Э. А. Арбатский; СибАДИ. - Омск : [б. и.], 1982. - 19 с.

18. Аренда спецтехники в России // Авито — сайт объявлений : [сайт]. – 2019.
 – URL:

https://www.avito.ru/rossiya/predlozheniya_uslug/transport_perevozki/spetstekhnika (дата обращения: 10.10.2019).

19. Аренда траншеекопателя // Экскаватор Ру : [сайт]. – 2019. – URL: <u>https://exkavator.ru/trade/arenda/zemlerojnaya-tehnika/transheekopateli/</u> (дата обращения: 10.10.2019).

20. Аренда траншейного экскаватора (траншеекопателя) в Омске // АрендаСмены.py : [сайт]. – 2019. – URL: <u>http://omsk.arendasmeni.ru/transhejnye-</u> <u>ekskavatory-transheekopateli/</u> (дата обращения: 10.10.2019).

21. Артемьев, К. А. Теория резания грунтов землеройно-транспортными машинами : учеб. пособие / К. А. Артемьев ; СибАДИ. - Омск : ОмПИ, 1989. - 80 с.

22. Байкалов, В. А. Исследование системы управления рабочим органом автогрейдера с целью повышения эффективности профилировочных работ : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. А.Байкалов ; науч. рук. Д. М.

Беленький ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1981. - 21 с. - URL: http://bek.sibadi.org/fulltext/ED361.pdf (дата обращения: 29.11.2019).

23. Бакалов, А. Ф. Совершенствование системы стабилизации положения рабочего органа автогрейдера: дис. ... канд. тех. наук : 05.05.04 / А. Ф. Бакалов ; рук. работы Т. В. Алексеева ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1985. - 192 с.

24. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М. : Машиностроение, 1994. – 432с.

25. Беляев, В. В. Повышение точности планировочных работ автогрейдерами с дополнительными опорными элементами рабочего органа : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. В. Беляев ; рук. работы Т. В. Алексеева ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1987. - 230 с.

26. Бузин, Ю. М. Энергетическая основа рабочего процесса землеройнотранспортной машины / Ю. М. Бузин // Строительные и дорожные машины. -2002. - N 4. - C. 32-35.

27. Васьковский А.М. Исследование рабочего процесса землеройнопланировочных машин в связи с вопросами их автоматизации: специальность 05.00.00 : Дис. на соис. ст. канд. техн. наук / А.М. Васьковский – Москва: 1968. – 206 с.

28. Ветров, Ю. А. Расчеты сил резания и копания грунтов / Ю. А. Ветров ; Киевский инженерно-строительный ин-т. - Киев : Издательство Киевского университета, 1965. - 167 с.

29. Ветров, Ю. А. Резание грунтов землеройными машинами / Ю. А. Ветров. -М. : Машиностроение, 1971. - 357 с.

30. Ветров, Ю. А. Машины для специальных земляных работ : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Ветров, В. Л. Баладинский. - Киев : Вища школа, 1980. - 191 с.

31. Воронцова, М. И. Исследование процесса взаимодействия отвала автогрейдера с грунтом : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / М. И. Воронцова ; рук. работы К. А. Артемьев ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1980. - 185 с.

32. Галдин, Н. С. Элементы объемных гидроприводов мобильных машин. Справочные материалы : учеб. пособие / Н. С. Галдин ; Федеральное агентство по образованию, СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2005. - 127 с.

33. Гарбузов, З. Е. Экскаваторы непрерывного действия: учеб. пособие / З.
Е. Гарбузов, В. М. Донской. - З-е изд., перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 1987.
- 288 с.

34. Гинзбург, Ю. В. Промышленные тракторы / Ю. В. Гинзбург, А. И. Швед,А. П. Парфенов. - М. : Машиностроение, 1986. - 296 с.

35. Глушец, В. А. Перспективы систем управления дизельными двигателями / В. А. Глушец // Многоцелевые гусеничные и колесные машины : разработка, производство, боевая эффективность, наука и образование: Материалы Межрегиональной научно-технической конференции – Омск : ОТИИ, 2002. – С. 90–93.

36. Глушец, В. А. Совершенствование системы управления рыхлительным агрегатом : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 /; науч. рук. В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск, 2004. - 204 с.

37. Гуськов, В. В. Оптимальные параметры сельскохозяйственных тракторов : выбор и обоснование некоторых параметров / В. В. Гуськов. - М. : Машиностроение, 1966. - 196 с.

38. Данилов, А. К. Совершенствование элементов и систем приводов цепных рабочих органов траншейных экскаваторов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / А. К. Данилов. - Красноярск, 2006. - 23 с.

39. Дегтярев, В. С. Основы автоматизации землеройных машин : учеб. пособие / МАДИ ; ред. Г. Г. Зеличенок. - М. : Высшая школа, 1969. - 91 с.

40. Денисов, В. П. Оптимизация тяговых режимов землеройно-транспортных машин : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.04 / В. П. Денисов ; науч. рук. В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2006. - 261 с.

41. Домбровский, Н. Г. Многоковшовые экскаваторы. Конструкции, теория и расчет / Н. Г. Домбровский. - М. : Машиностроение, 1972. - 432 с.

42. Домбровский, Н. Г. Землеройно-транспортные машины : учебник / Н. Г. Домбровский, М. И. Гальперин. - М. : Машиностроение, 1965. - 276 с.

43. Дорожные машины. - М. : Машиностроение, 1972 - 197*. - Ч.
1 : Машины для земляных работ: (Теория и расчет) / Т. В. Алексеева, К. А.
Артемьев, А. А. Бромберг [и др.]. - 1972. - 504 с.

44. Доценко, А. И. Строительные машины и основы автоматизации : учебное. для строит. вузов / А. И. Доценко. - М. : Высшая школа, 1995. - 400 с.

45. Евтушенко, М. Ю. Сила сопротивления движению рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости / М. Ю. Евтушенко, М. Е. Агапов // Техника и технологии строительства : научно-практический сетевой электронный журнал. - 2015. - Вып. 3 (3). - С. 32-36 - URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25141005 (дата обращения: 15.12.2019).

46. Ерофеев, А. А. Автоматизированные системы управления строительными машинами / А. А. Ерофеев. - Ленинград : Машиностроение, 1977. - 224 с.

47. Жданов, А. В. Обоснование основных конструктивных параметров гидравлических рулевых механизмов строительных и дорожных машин с шарнирно-сочлененной рамой : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / А. В. Жданов; науч. рук. В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2007. - 239 с.

48. Завьялов, А. М. Основы теории взаимодействия рабочих органов дорожностроительных машин со средой. 05.05.04 - Дор. и строит. Машины : автореф. дис... доктора техн. наук / А. М. Завьялов; Д. П. Волков ; СибАДИ. - Омск : [б. и.], 1999. - 36 с.

49. Зайдель, А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А. Н. Зайдель ; Академия наук СССР. - 3-е изд., испр. и доп. - Ленинград : Наука, 1968. - 96 с.

50. Зедгенизов, В. Г. Методология создания машин для прокладки гибких подземных коммуникаций : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.04 / В. Г. Зедгенизов ; конс. И. А. Недорезов ; ИрГТУ. - Иркутск, 2005. - 234 с.

51. Зеленин, А. Н. Машины для земляных работ. Основы теории разрушения грунтов, моделирование процессов, прогнозирование параметров : учеб. пособие

для вузов / А. Н. Зеленин, В. И.Баловнев, И. П. Керов. - М. : Машиностроение, 1975. - 424 с.

52. Зеленин, А. Н. Основы разрушения грунтов механическими способами : производственно-практическое издание / А. Н. Зеленин. - 2-е изд., перераб. и доп.
- М. : Машиностроение, 1968. - 375 с.

53. Земляные работы. Расценки// SV777.RU : [сайт]. – 2019. – URL: <u>http://sv777.ru/index.php/%D0%A0%D0%B0%D1%81%D1%86%D0%B5%D0%BD</u> <u>%D0%BA%D0%B8.%20%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D1%8F%D0%BD</u> %D1%8B%D0%B5%20%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D1%8B.ht <u>ml</u> (дата обращения: 11.12.2019).

54. Игнатов, С. Д. Математическая модель рабочего процесса дорожной фрезы при разрушении асфальтобетона / Н. С. Шерстнев // Вестник СибАДИ – 2015 г. – № 4(44) – С.120-125 - <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=24194038/</u> (дата обращения 11.07.2016).

55. Игнатов, С. Д. Система автоматизации проектирования основных геометрических параметров траков гусеничной ленты цепного траншейного экскаватора : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / С. Д.Игнатов ; науч. рук. Р. Ю. Сухарев ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2012. - 165 с.

56. Каджая, Т. Г. Определение рациональных параметров рабочего органа цепного траншейного экскаватора : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Т. Г. Каджая. – М. : МАДИ, 1991. - 189 с.

57. Кассандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений / Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. – М.: Наука, 1970. – 104 с.

58. Княжев, Ю. М. Теоретические основы методов управления оптимальными режимами рабочих процессов землеройно-транспортных машин : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Ю. М. Княжев ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1996. - 42 с. - URL: http://bek.sibadi.org/fulltext/ED305.pdf (дата обращения: 18.05.2019).

59. Колякин, В. И. Совершенствование планировочных машин на базе промышленных тракторов с целью повышения точности разработки грунта : дис.

... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. И. Колякин ; науч. рук.: Т. В. Алексеева, В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1991. - 187 с.

60. Коновалов, В. Ф. Динамическая устойчивость тракторов / В.
Ф. Коновалов. - М. : Машиностроение, 1981. - 144 с.

61. Кононыхин Б.Д. Исследование и разработка лазерной системы стабилизации рабочего органа автогрейдера: специальность 05.00.00 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Б.Д. Кононыхин; науч. рук. – Москва, 1972. – 176 с.

62. Корчагин, П. А. Совершенствование одноковшового экскаватора с целью снижения динамического воздействия на рабочее место человека-оператора (на примере экскаватора второй размерной группы) : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / П. А. Корчагин ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1997. - 188 с.

63. Крутов, В. И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания : пособие для вузов / В. И. Крутов. - 5-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1989. - 416 с.

64. Кузин, Э. Н. Повышение эффективности землеройных машин непрерывного действия на основе увеличения точности позиционирования рабочего органа : Дис. ... докт. техн. наук / Э. Н. Кузин. – М.: ВНИИСДМ, 1984. – 443 с.

65. Лазута, И. В. Система автоматизации проектирования устройства управления рабочим органом бульдозерного агрегата : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.12 / И. В. Лазута ; науч. рук. В. С. Щербаков ; СибАДИ, Кафедра АППиЭ. - Омск : СибАДИ, 2010. - 149 с.

66. Львов, Е. Д. Теория трактора [Текст] : учебник для втузов / Е. Д. Львов. -5-е изд., перераб. и сокр. - М. : Машгиз, 1960. - 252 с.

67. Любченко, Е. А. Планирование и организация эксперимента : учеб. пособие. / Е. А. Любченко, О. А.Чуднова. – Владивосток : Изд-во ТГЭУ, 2010. – 156 с.

68. Малиновский, Е. Ю. Математическое моделирование в исследовании строительных машин / Е. Ю. Малиновский, Л. Б. Зарецкий. – М., [б. и.], 1966. – 113 с.

69. Мартюченко, И. Г. Исследование в области разработки мерзлых и прочных грунтов / И. Г. Мартюченко, М. И. Стрелюхин // Механизация и автоматизация земляных работ: Материалы XIV Международной научнотехнической конференции / Киевский инженерно-строительный ин-т. – Киев, 1991. – С. 40 – 42.

70. Математические основы теории автоматического регулирования : учеб.
пособие. - М. : Высшая школа, 1977 - . Т. 1 / Ред. Б. К. Чемоданов. - 2-е изд., доп. - 1977. - 366 с.

71. Математические основы теории автоматического регулирования : учеб. пособие. - М. : Высшая школа, 1977 - . Т. 2 / Ред. Б. К. Чемоданов. - 2-е изд., доп. - 1977. - 455 с.

72. Машины для земляных работ : учебник для вузов / Д. П. Волков, В.Я. Крикун, П. Е. Тотолин и др. ; Под ред. Д. П. Волкова. - М. : Машиностроение, 1992. - 448 с.

73. Мещеряков, В. А. Адаптивное управление рабочими процессами землеройно-транспортных машин : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.04 / В. А. Мещеряков ; науч. конс. А. М. Завьялов ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2007. - 303 с.

74. Моделирование и визуализация движений механических систем в MATLA
В : учеб. пособие / В. С. Щербаков [и др.] ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2008. - 84
с.

75. Налимов, В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М. : Наука, 1971. – 260 с.

76. Недорезов И. А. Моделирование взаимодействия скребкового рабочего органа цепного траншейного экскаватора с грунтом / И.А. Недорезов, В.Г. Зедгенизов, А.Н. Стрельников А.Н., С.А. Гусев // Строительные и дорожные машины. – 2002. – №12. – С. 24 – 26.

77. Никитин, А. О. Избранные труды : сборник научных трудов / А. О. Никитин. - М. : МАДИ, 1993. – 116 с.

78. Основы научных исследований : учеб. для вузов / В. И. Крутов, И. М. Грушко, В. В. Попов и др. - М. : Высшая школа, 1989. - 400 с.

79. Павлов, В. В. Тягово-скоростные свойства транспортных машин : Теория и расчет : учеб. пособие / В. В. Павлов. – М. : МАДИ, 1991. – 119 с.

80. Патент на изобретение 150665 Российская Федерация, МПК B62D37/04.
Устройство повышения поперечной устойчивости гусеничной машины / В. С.
Щербаков [и др.]. - № 2014127771 ; Заявл. 08.07.2014 ; опубл. .2016, Бюл. №. - URL : https://elibrary.ru/item.asp?id=23738674 (дата обращения: 19.08.2018).

81. Пивцаев, А. Н. Математическая модель экскаватора : депонированная рукопись / А. Н. Пивцаев, В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск : [б. и.], 1982. - 43 с.

82. Пономарев, А. Б. Методология научных исследований: учеб. пособие / А.
Б. Пономарев, Э. А. Пикулева. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. унта, 2014. – 186 с.

83. Портнова, А. А. Совершенствование рулевого управления автогрейдера с шарнирно-сочлененной рамой : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / А. А. Портнова ; науч. рук. В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2015. - 190 с.

84. Потемкин, В. Г. Вычисления в среде MATLAB : учеб. пособие / В.
Г. Потемкин. - М. : Диалог-Мифи, 2004. - 720 с.

85. Привалов, В. В. Повышение точности планировочных работ, выполняемых автогрейдерами с дополнительными рабочими органами : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. В. Привалов ; науч. рук.: Т. В. Алексеева, В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1988. - 148 с.

86. Проектирование систем управления рабочим процессом ЗТМ : учеб.
пособие / Алексеева Т. В., Амельченко В. Ф., Александров Ю. В., Евдокимов Б.
Л.; НИСИ, СибАДИ. - Новосибирск : [б. и.], 1977 - 19*. - Ч. 1. - 1977. - 99 с.

136

87. Проектирование систем управления рабочим процессом ЗТМ : учеб.
пособие / Алексеева Т. В., Амельченко В. Ф., Александров Ю. В., Евдокимов Б.
Л.; НИСИ, СибАДИ. - Новосибирск : [б. и.], 19**. -. Ч. 2. - 1977. - 58 с.

88. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / под ред. Е. Ю. Малиновского. – М. : Машиностроение, 1980. – 216 с.

89. Реброва, И. А. Теория планирования эксперимента : учеб. пособие: [для изучения дисциплин «Планирование эксперимента» и «Теория планирования эксперимента» магистрами и аспирантами всех направлений подготовки всех форм обучения] / И. А. Реброва ; СибАДИ, кафедра "Автоматизация производственных процессов и электротехника". - Омск : СибАДИ, 2016. - URL: <u>http://bek.sibadi.org/fulltext/esd104.pdf</u> (дата обращения: 03.09.2019).

90. Реброва, И. А. Планирование эксперимента : учебное пособие / И. А. Реброва ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2010. - 106 с. - URL: <u>http://bek.sibadi.org/fulltext/EPD38.pdf</u> (дата обращения: 03.09.2019).

91. Руппель, А. А. Повышение точности разработки грунта одноковшовым экскаватором с гидроприводом : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / А. А. Руппель ; рук. работы Т. В. Алексеева ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1986. - 267 с.

92. Савенко, В. А. Комплексная механизация сооружения магистральных трубопроводов / В. А. Савенко. – М. : Недра, 1981. – 295 с.

93. Скловский, А. А. Автоматизация дорожных машин / А. А. Скловский. – Рига: Авотс, 1979. – 308 с.

94. Скокан, А. И. Планирование экспериментальных исследований в дорожном и строительном машиностроении : обзор / А. И. Скокан. - М. : ЦНИИТЭстроймаш, 1974. - 74 с.

95. СНиП 12-04-2002. Безопасность труда в строительстве. - Изд. официальное. - М. : Госстрой России, 2005. – 29 с.

96. СНиП 3.05.04-85. Наружные сети и сооружения водоснабжения и канализации / ГОССТРОЙ СССР. - Изд. официальное. - М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. - 49 с.

97. Софина, С. Н. Математическое описание рабочих процессов строительных и дорожных машин методом однородных координат / С. Н. Софина, М. Е. Агапов, Ю. И. Привалова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации : материалы Международной научно-практической конференции 7-9 декабря 2016 года / СибАДИ. - Омск, 2016. - С. 814-820.

98. Софиян, А. П. Исследование взаимодействия движителей гусеничного трактора с почвой : дис. ... канд. техн. наук. / А. П. Софиян. – М. : [б. и.], 1955. – 154 с.

99. СП 45.13330.2012. Земляные сооружения, основания и фундаменты. - Изд. официальное. - Москва, 2013. - 165 с.

100. Спирин, Н. А. Методы планирования и обработки материалов инженерного эксперимента : Конспект лекций / Н. А. Спирин, В. В. Лавров. – Екатеринбург: «УТУ-УПИ», 2004. – 258 с.

101. Стрельников А. Н. Определение рациональных режимов цепных траншейных экскаваторов со скребковым рабочим органом : специальность 05.05.04 – «Дорожные строительные и подъемно-транспортные машины»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. Н. Стрельников ; науч. рук. В. Г. Зедгенизов ; ИрГТУ. - Омск : СибАДИ, 2003. - 16 с.

102. Суковин М.В. Снижение вредного воздействия токсичных веществ на организм человека при работе цепного траншейного экскаватора / В. В. Столяров, Д. С. Алешков // Известия Тульского Государственного Университета – 2015 г. – № 8-2 – С.165-174 - <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=25476011/</u> (дата обращения 06.08.2016).

103. Суковин, М. В. Система автоматизации проектирования устройства управления гидрообъёмной трансмиссией цепного траншейного экскаватора : дис.

... канд. техн. наук : 05.13.12 / М. В. Суковин ; науч. рук. Р. Ю. Сухарев ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2010. - 156 с.

104. Сухарев Р. Ю. Моделирование трехмерного микрорельефа для теоретических исследований дорожных и строительных машин / Р.Ю. Сухарев // Вестник СибАДИ. – Омск : СибАДИ, 2014. – С. 108-111 - <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=22863120/</u> (дата обращения 20.04.2016).

105. Сухарев Р. Ю. Система автоматизации проектирования устройства управления гидрообъёмной трансмиссией цепного траншейного экскаватора : монография / Р. Ю. Сухарев, М. В.Суковин ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2014. - 120 с. - URL: https://lib.sibadi.org/katalog/ed2204/ (дата обращения: 24.04.2017).

106. Сухарев, Р. Ю. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Р. Ю. Сухарев ; науч. рук. В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2008. - 184 с.

107. Танский В. В. Совершенствование рабочего оборудования кранатрубоукладчика с целью снижения неуправляемых колебаний перемещаемого груза : специальность 05.05.04. : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. В. Танский; науч. рук. Р.Ю. Сухарев; СибАДИ – Омск: СибАДИ, 2017. – 165 с.

108. Тарасов, В. Н. Динамика систем управления рабочими процессами землеройно-транспортных машин / В. Н. Тарасов ; СибАДИ. - Омск : Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1975. - 182 с.

109. Титенко, В. В. Повышение производительности автогрейдера, выполняющего планировочные работы, совершенствованием системы управления : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. В. Титенко ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1997. - 172 с.

110. Устинов, А. В. Совершенствование скребкового грунтоуборщика с целью повышения производительности бесковшового цепного траншеекопателя : дис. ... канд.техн.наук / А. В. Устинов ; ТГАСУ. – Томск : ТГАСУ, 2006. – 168 с.

111. Федоров, Д. И. Рабочие органы землеройных машин / Д. И. Федоров. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1990. - 360 с.

112. Фрейнкман, И. Е. Землеройные машины / И. Е. Фрейнкман, В. К. Ильгисонис ; ред. Н. Г. Домбровский. - 2-е изд., перераб. и доп. - Ленинград : Машиностроение, 1972. - 320 с.

113. Холодов А.М. Основы динамики землеройно-транспортных машин : учебник / А.М. Холодов – Москва: Машиностроение, 1968. – 323 с.

114. Хоменко, А. П. Системный анализ и математическое моделирование в мехатронике виброзащитных систем : монография / А. П. Хоменко, С. В. Елисеев, Ю. В. Ермошенко ; ИрГУПС. - Иркутск : ИрГУПС, 2012. - 287 с.

115. Шабалин А. Н. Модель взаимодействия гусеничного движетеля с грунтом для моделирования дорожных и строительных машин Matlab SimMechanics / А. Н. Шабалин. - Текст : непосредственный // Механизация строительства. - 2013. - № 9 (831). - С. 38-40. - URL: <u>https://elibrary.ru/item.asp?id=21006890</u> (дата обращения: 18.08.2015).

116. Шабалин А. Н. Совершенствование крана-трубоукладчика и устройства управления комплектом машин, обеспечивающих грузовую устойчивость трубоукладочной колонны: : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / А. Н. Шабалин ; науч. рук. М.С. Корытов ; Омск: СибАДИ, 2014. – 157 с.

117. Щербаков, В. С. Исследование системы управления одноковшового гидравлического экскаватора с целью повышения точности разработки грунта [Рукопись] : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / В. С.Щербаков ; науч. рук.: Т. В. Алексеева, В. Ф. Амельченко ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1974. - 155 с.

118. Щербаков, В. С. Математическое описание механических систем в однородных координатах / В. С. Щербаков. // Роботы и робототехнические системы : сборник научных трудов / Иркут. политехн. ин-т. - Иркутск, 1984. - С. 82-88.

119. Щербаков, В. С. Методы управления комплектом машин трубоукладочной колонны : монография / В. С. Щербаков, А. Н. Шабалин, М. С. Корытов. – Омск : СибАДИ, 2014. – 152 с. - ISBN 978–5–93204–678–4

120. Щербаков, В. С. Научные основы повышения точности работ, выполняемых землеройно-транспортными машинами : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.04 / В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск, 2000. - 416 с.

121. Щербаков, В. С. Научные основы повышения точности работ, выполняемых землеройно-транспортными машинами : автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.04 / В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск, 2000. - 39 с. - URL: <u>http://bek.sibadi.org/fulltext/ED281.pdf</u> (дата обращения: 16.09.2013).

122. Щербаков, В. С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде MatLab и Simulink : учеб. пособие / В. С. Щербаков, А. А. Руппель, В. А. Глушец. - Омск : СибАДИ, 2003. - 160 с.

123. Щербаков, В. С. Совершенствование системы управления рабочим органом цепного траншейного экскаватора : монография / В. С. Щербаков, Р. Ю. Сухарев ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2011. - 149 с. URL: <u>https://lib.sibadi.org/katalog/epd303/</u> (дата обращения: 28.11.2013).

124. Щербаков, В. С. Составление структурных схем землеройнотранспортных машин как объектов автоматизации : учеб. пособие для вузов / В. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 2001. - 46 с.

125. Щербаков, В. С. Статическая и динамическая устойчивость фронтальных погрузчиков : Монография / В. С. Щербаков, М. С. Корытов ; СибАДИ. - Омск : СибАДИ, 1998. - 100 с.

126. Щербаков, В. С. Шаговый электропривод золотников гидрораспределителей дорожных и строительных машин / В. С. Щербаков, В. П. Денисов. – Омск : СибАДИ, 1987.- 12 с. - Деп. в ЦНИИТЭСтроймаше 19 сент. 1987 г., №124-сд87.

127. Щербаков, В. С. Математическое моделирование гидроприводов на ЭВМ методом многомерных объектов / В. С. Щербаков, С. Т. Бирюков, В. Ф. Раац. // Проектирование и эксплуатация промышленных гидроприводов и систем гидропневмоавтоматики : тезисы докл. к зональной конф. (16-17 июня 1986 г.) / Пензин. политехн. ин-т. - Пенза, 1986. - С. 18-19.

128. Щербаков, В. С. Теория автоматического управления. Линейные непрерывные системы : учеб. пособие / В. С. Щербаков, И. В. Лазута. - Омск : СибАДИ, 2013. - 142 с. - URL: <u>http://bek.sibadi.org/fulltext/EPD798.pdf</u> (дата обращения: 04.07.2014).

129. Щербаков, Е. С. Исследование неуправляемых перемещений рыхлительного агрегата с целью повышения эффективности разработки мерзлых грунтов [Текст] : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.05.04 / Е. С. Щербаков ; СибАДИ. - Омск, 1980. - 25 с. - URL: <u>http://bek.sibadi.org/fulltext/ED344.pdf</u> (дата обращения: 11.09.2016).

130. Agapov M. E. Assurance of precision for geometric dimensions of trench during pipeline development /M. E. Agapov, V. V. Mikheyev, S. V. Saveliev - DOI 10.1088/1742-6596/1441/1/012082 // 2020 Journal of Physics: Conference Series, 2020. – ст. № 012082.

131. Blouin, S., Hemami, A., Lipsett, M. Review of resistive force models for earthmoving processes / S. Blouin, A. Hemami, M. Lipsett // Journal of Aerospace Engineering. – 2001. - no. 814 (3). - pp. 102-111.

132. Lateral soil-pipeline interaction in sand backfill: Effect of trench dimensions(Article) / Y. K. Chaloulos, G. D. Bouckovalas, S. D. Zervos, A. L. Zampas // Computers and Geotechnics. National Technical University of Athens. Zografou (Greece). -: 2015. –Vol. 69, no. September 01. - Pp. 442-451.

133. Matlab. Reference Manual, 2013.

134. Matlab. SimMechanics First-Generation Reference Manual, 2013.

Wijeyesekera, D.C., Warnakulasuriya, S. Effects of soil arching on the behaviour of flexible pipes buried in trenches of varying widths / D. C. Wijeyesekera, S.

Warnakulasuriya // International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2000. - URL: <u>https://www.onepetro.org/conference-paper/ISRM-IS-2000-613</u> (дата обращения: 18.12.2017).

ПРИЛОЖЕНИЯ


УТВЕРЖДАЮ Первый заместитель генерального конструктора АО «Омсктрансмаль K.T.H В.В.Беляев

AKT

внедрения инженерной методики оптимизации параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости

АО «Омсктрансмаш» приняло к использованию инженерную методику оптимизации параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора, разработанную старшим преподавателем ФГБОУ ВО «СибАДИ» Агаповым М.Е.

Методика включает в себя математическую модель и алгоритм оптимизации параметров устройства управления.

Инженерная методика оптимизации параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора предназначена для определения рациональных значений скорости изменения угла наклона остова экскаватора и скорости перемещения экскаватора для различных категорий разрабатываемого грунта.

Использование методики позволяет повысить эффективность рабочего процесса цепного траншейного экскаватора а также получить траншею, отвечающую требованиям конструкторской документации, без использования дополнительных затрат на зачистные работы и подготовку поверхности.

> Главный конструктор по разработке специальной и гражданской продукции

Б.И.Еременко

УТВЕРЖДАЮ проректор по учебной работе ФГБОУ ВО «СибАДИ» Мельник С.В. 2019г. (130) alkel

Акт

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы Агапова М.Е. на тему «Совершенствование устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора»

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс, государственном бюджетном федеральном осуществляемый B образования «Сибирском учреждении высшего образовательном автомобильно-дорожном университете (СибАДИ)», государственном результатов исследований, проводимых диссертационной работе. В Предложенные в работе научные знания используются в курсовом и дипломном проектировании при подготовке студентов на кафедре «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» по специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», транспортнобакалавров ПО направлению 23.03.02 «Наземные 23.04.02 магистров ПО направлению технологические комплексы», «Наземные транспортно-технологические комплексы».

Зав. кафедрой «ТНКИ» к.т.н., профессор

А.И. Демиденко