

На правах рукописи



АГАПОВ МАКСИМ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ
РАБОЧЕГО ОРГАНА ЦЕПНОГО ТРАНШЕЙНОГО ЭКСКАВАТОРА**

Специальность 05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»

Научный руководитель:	Игнатов Сергей Дмитриевич , кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)», доцент кафедры «Техника для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур» (г. Омск).
Официальные оппоненты:	Абраменков Дмитрий Эдуардович , доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Здания, строительные конструкции и материалы» (г. Новосибирск). Чернявский Дмитрий Иванович , доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», профессор кафедры «Машиноведение» (г. Омск).
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (г. Иркутск).

Защита диссертации состоится «13» мая 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ВАК РФ Д 212.250.02 при ФГБОУ ВО «СибАДИ» по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, аудитория 3124.

Тел. (3812) 65–03–23, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СибАДИ» и на сайте университета по адресу: <https://sibadi.org/about/units/institut-magistrature-i-aspirantury/studies/dissertations/62955/>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет по адресу: 644080, г. Омск, пр. Мира, 5. Тел. (3812) 65–03–23, e-mail: dissovetsibadi@bk.ru.

Автореферат разослан «30» марта 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.250.02,
доктор технических наук, профессор



Кузнецова
Виктория Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время высокими темпами идет строительство трубопроводов, что невозможно без использования землеройных машин (ЗМ). 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 (СибНИИИстроймаш, 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, В.Ф. Амельченко, А.М. 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 уравнения геометрических связей основных элементов машин и их математическое описание. З.Е. Гарбузов, В.М. Донской подробно описали конструкции экскаваторов непрерывного действия, также рассматривали многоковшовые и скребковые рабочие органы ЦТЭ. А. К. Данилов изучал вопросы совершенствования 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 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 заключается:

1) в полученных функциональных зависимостях, связывающих технологические параметры рабочего процесса цепного траншейного экскаватора, параметры устройства управления положением рабочего органа в поперечной плоскости с критерием эффективности;

2) в аппроксимированных зависимостях критерия эффективности от исследуемых параметров цепного траншейного экскаватора и его рабочего процесса;

3) в разработанной математической модели рабочего процесса цепного траншейного экскаватора с усовершенствованным устройством управления положением рабочего органа в поперечной плоскости.

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;

3) 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 «Креативные подходы в образовательной, научной и производственной 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 научно-практическая конференция «Современные 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 издании, включенном в базу Scopus. 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, описана научная задача и пути ее решения, сформулирована цель работы.

В первой главе диссертационной работы проведен обзор конструкций ЦТЭ и особенностей их РП. Описываются требования, предъявляемые к траншеям и выемкам под различные коммуникации.

Проведен анализ предшествующих работ по исследованию РП ЗМ, существующих УУ положением РО в пространстве, процессов взаимодействия ходового оборудования (ХО) с грунтом.

Для проведения исследований РП ЦТЭ с УУ РО в поперечной плоскости, направленных на повышение эффективности РП, обоснован критерий эффективности РП ЦТЭ.

В качестве критерия выбран комплексный критерий эффективности, параметрами которого являются среднее квадратическое значение угла отклонения РО ЦТЭ от гравитационной вертикали (γ_{cp} , град) и производительность ЦТЭ (Π , м³/ч).

Частными целевыми функциями критерия эффективности РП ЦТЭ служат:

$$\begin{cases} \gamma_{cp} \rightarrow 0; \\ \Pi \rightarrow \max. \end{cases} \quad (1)$$

На эффективность РП влияют параметры УУ и технологические параметры, в частности скорость изменения угла наклона РО в поперечной плоскости ($V_{угла}$, град/с) и линейная скорость движения ЦТЭ (V , м/с). Оптимальные значения этих параметров позволят обеспечить повышение эффективности РП ЦТЭ. Одновременно достичь наилучших значений всех показателей критерия эффективности невозможно, поэтому для получения наибольшего эффекта необходимо определить рациональное соотношение между ними.

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

$$\frac{P(V_{\text{угла}}, V)}{P'(V_{\text{угла}}, V)} + \frac{\gamma_{\text{ср}}'(V_{\text{угла}}, V)}{\gamma_{\text{ср}}(V_{\text{угла}}, V)} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $P(V_{\text{угла}}, V)$ – целевая функция производительности в зависимости от скорости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости и линейной скорости экскаватора; $P'(V_{\text{угла}}, V)$ – наилучшее значение производительности в зависимости от скорости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости и линейной скорости экскаватора; $\gamma_{\text{ср}}(V_{\text{угла}}, V)$ – 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; $\gamma_{\text{ср}}'(V_{\text{угла}}, V)$ – наилучшее значение среднего квадратического значения угла отклонения РО от гравитационной вертикали в зависимости от скорости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости и линейной скорости ЦТЭ.

Граничные значения переменных целевой функций представлены в виде неравенств:

$$\begin{cases} V_{\text{угла}, \min} < V_{\text{угла}} \leq V_{\text{угла}, \max}; \\ V_{\min} < V \leq V_{\max}. \end{cases} \quad (3)$$

Во второй главе описана методика выполнения исследований, базирующихся на методологии системного анализа, определен метод научных исследований. Используемый комплексный метод предполагает проведение теоретических и экспериментальных изысканий, которые позволяют получить достоверную информацию об объекте исследования.

В работе использовано математическое моделирование отдельных подсистем и их связей, которые в совокупности дают математическую модель сложной динамической системы РП ЦТЭ. Цель экспериментальных исследований заключается в получении необходимых данных для подтверждения адекватности математической модели РП ЦТЭ и правомерности полученных теоретических выводов.

В работе проведены натуральные и машинные эксперименты. Машинные эксперименты реализованы на ЭВМ с помощью программного комплекса MATLAB. Натуральные эксперименты – на полигоне с ЦТЭ (ИшМЗ ТРС 950 БСЛ), оснащенным механизмом изменения положения РО в поперечной плоскости. Для проведения натурных экспериментов по подтверждению адекватности математической модели геометрических связей, сокращения времени и средств на проведение эксперимента, повышения достоверности результатов исследования применялось планирование эксперимента.

Принимая во внимание цель и задачи диссертационной работы, с учетом знаний, полученных предшествующими исследователями, сформирована структура работы.

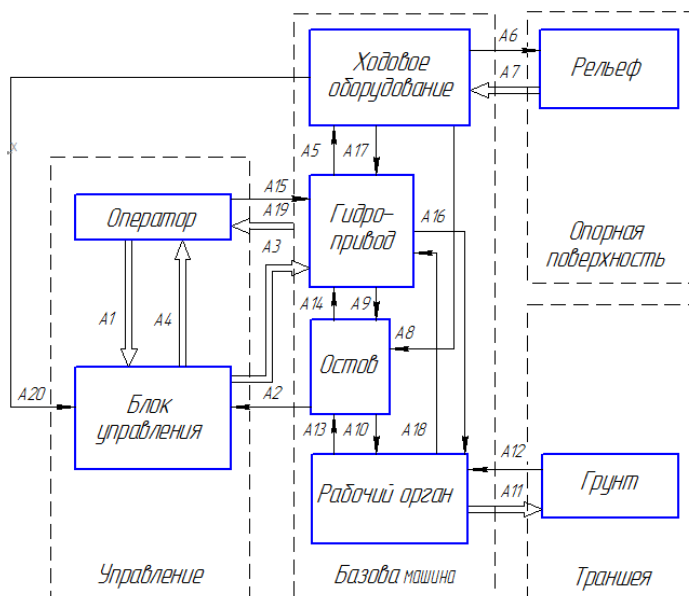


Рисунок 1 – Блок-схема сложной динамической системы рабочего процесса цепного траншейного экскаватора

В третьей главе представлена полученная в результате анализа РП ЦТЭ обобщенная математическая модель РП ЦТЭ, включающая в себя: уравнения геометрических связей элементов конструкции ЦТЭ; математические модели неровностей поверхности грунта, процесса взаимодействия гусеничного движителя с поверхностью грунта, гидропривода, процесса взаимодействия РО ЦТЭ с разрабатываемым грунтом в поперечной плоскости; зависимости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости от перемещения штока гидроцилиндра (ГЦ).

Разработана блок-схема сложной динамической системы РП ЦТЭ, позволяющая выявить влияющие на РП ЦТЭ взаимодействия элементов машины между собой, с внешней средой и элементами управления.

РП ЦТЭ рассматривается как сложная

динамическая система (рис. 1), состоящая из взаимодействующих между собой подсистем: «Базовая машина», «Управление», «Траншея» и «Опорная поверхность».

Подсистема «Базовая машина» представлена подсистемами «Остов», «Ходовое оборудование», «Гидропривод» и «Рабочий орган». Подсистема «Управление» представлена подсистемами «Оператор» и «Управляющее устройство». Подсистема «Траншея» представлена подсистемой «Грунт». Подсистема «Опорная поверхность» – подсистемой «Рельеф».

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 рельефа, представленного подсистемой «Рельеф» в блок-схеме РП ЦТЭ (рис. 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, а микрорельеф описывается по левой и правой колеям в соответствии с корреляционной функцией:

$$R(\tau) = \sigma^2 \cdot e^{-\alpha|\tau|} \cos(\beta \cdot \tau), \quad (4)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение исходного микрорельефа, м; α, β – коэффициенты затухания и периодичности корреляционных функций; τ – дискретное время, с.

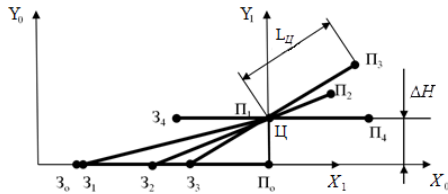


Рисунок 2 – Перемещение катковой тележки при наезде на ступенчатую неровность

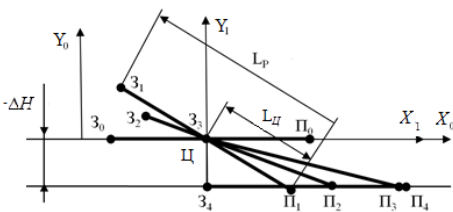


Рисунок 3 – Перемещение катковой тележки при съезде со ступенчатой неровности

де ступенчатой функции и рассмотрена зависимость $Y_{II}(t)$ и $Y_3(t)$ от $Y(t)$ при преодолении тележкой такого препятствия (рис. 2, 3).

Система уравнений, описывающая положение балки ПЗ при наезде на ступенчатую неровность $Y(t)=\Delta H$:

$$Y_{II}(t) = \left[1 + \frac{k_1}{p} (1 - e^{-\tau_K \cdot p}) - k_2 \cdot e^{-\tau_K \cdot p} \right] \cdot Y(t); \quad (5)$$

$$Y_3(t) = Y(t) \cdot e^{-\tau_K \cdot p}, \quad (6)$$

при съезде со ступенчатой неровности $Y(t)=\Delta H$:

$$Y_3(t) = \left[k_3 \cdot e^{-\tau_K \cdot p} + \frac{k_4}{p} (e^{-\tau_K \cdot p} - e^{-\tau_L \cdot p}) + e^{-\tau_L \cdot p} \right] \cdot Y(t); \quad (7)$$

$$Y_{II}(t) = Y(t) \cdot e^{-\tau_K \cdot p}, \quad (8)$$

где $k_1 = V/(L_P - L_{II})$ – коэффициент передачи, учитывающий нарастание X_{II} при заезде на ступеньку; $k_2 = L_{II}/(L_P - L_{II})$ – коэффициент передачи, обуславливающий положение Y_{II} в точке опрокиды-

вания; $\tau_K = L_{цл}/V$ – время транспортного запаздывания с момента воздействия на передний каток до точки опрокидывания, с; $k_3 = -(L_P - L_{цл})/L_{цл}$ – коэффициент передачи, обуславливающий положение X_3 в точке опрокидывания; $k_1 = V/L_{цл}$ – 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, с.

Учитывая уравнения геометрических связей ЦТЭ, можно записать

$$Y_{цл} = \frac{Y_{пл} + Y_{зл}}{2}; \quad Y_{цп} = \frac{Y_{пп} + Y_{зп}}{2}, \quad (9)$$

где $Y_{цп}$ – вертикальная координата центра правой гусеницы, м; $Y_{цл}$ – вертикальная координата центра левой гусеницы, м; $Y_{пп}$, $Y_{зп}$ – вертикальные координаты соответственно переднего и заднего катков правой гусеницы, м; $Y_{пл}$, $Y_{зл}$ – вертикальные координаты соответственно переднего и заднего катков левой гусеницы, м.

Перемещения и колебания РО в пространстве происходят за счет изменения вертикальной координаты центра гусениц в результате взаимодействия ХО и микрорельефа. На рисунках 4 и 5 в качестве примера представлены графики изменения вертикальных координат центров левой и правой гусениц, которые формируют наклон остова, а следовательно и РО в поперечной плоскости.

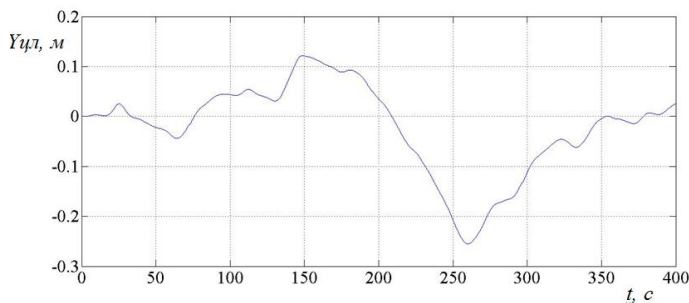


Рисунок 4 – Временная зависимость изменения вертикальной координаты центра левой гусеницы

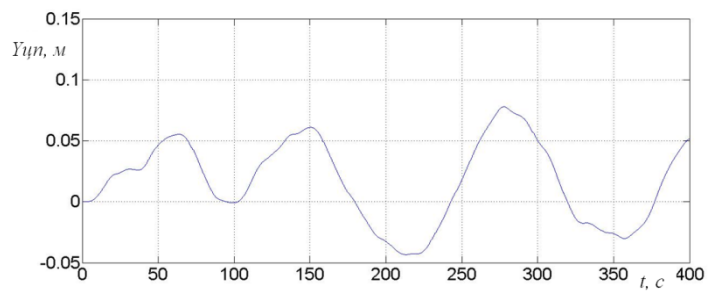
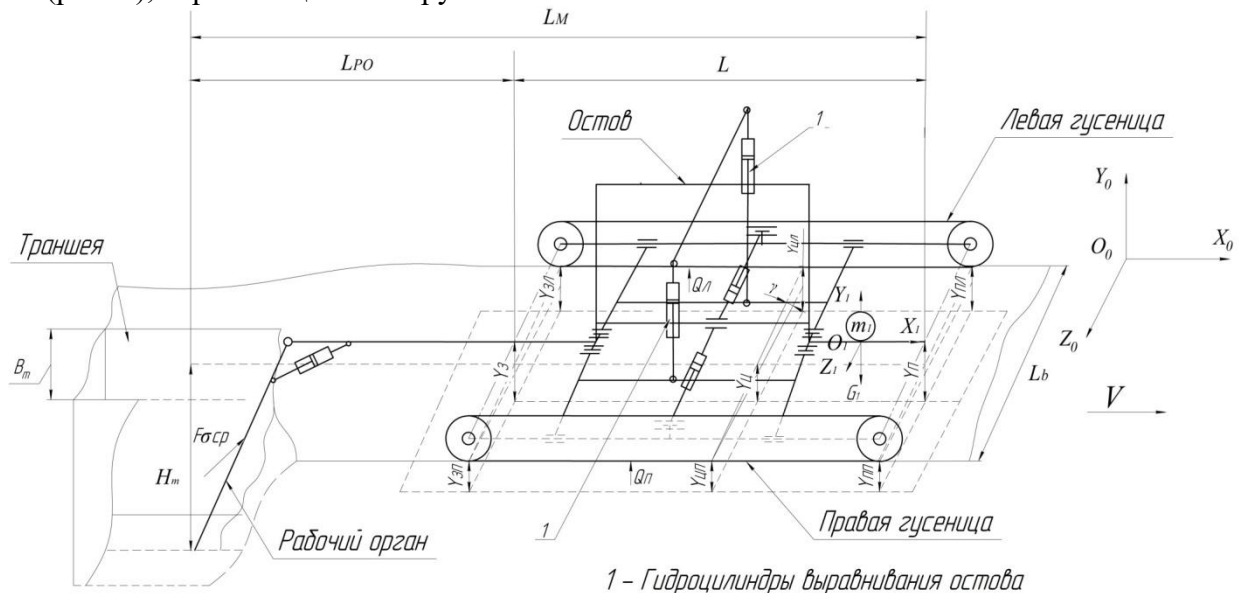


Рисунок 5 – Временная зависимость изменения вертикальной координаты центра правой гусеницы

Для представления связей между элементами конструкции ЦТЭ составлена расчетная схема (рис. 6), отражающая конструктивные особенности машины.



$$\gamma = \arcsin \left(\frac{Y_{цп} - Y_{цп}}{L_b} \right), \quad (11)$$

где $Y_{ц}$ – вертикальная координата центра машины, м; L_b – ширина базы машины, м.

Наряду с уравнениями геометрических связей были установлены зависимости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости от перемещений штоков ГЦ (12). На рисунке 7 представлена расчетная схема, отражающая связь между изменением угла наклона РО и перемещением штока ГЦ подвески.

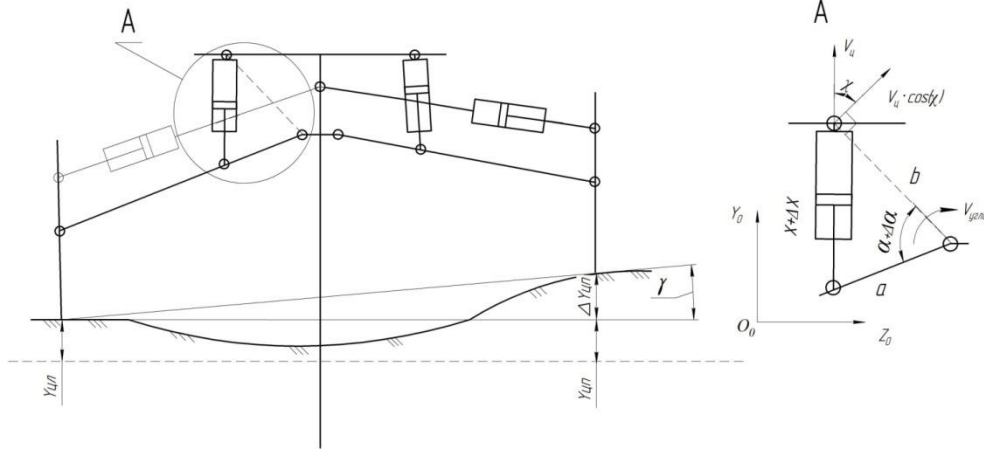


Рисунок 7 – Расчетная схема зависимости изменения угла наклона рабочего органа от перемещения штока гидроцилиндра цепного траншейного экскаватора

$$\Delta\alpha = \arccos \left(\frac{a^2 + b^2 - (\Delta x)^2}{2 \cdot a \cdot b} \right). \quad (12)$$

где $\Delta\alpha$ – изменение угла между звеньями элементов подвески при выдвигании (втягивании) штока ГЦ, соответствующее углу наклона РО в поперечной плоскости, град; a, b – длины звеньев элементов подвески, м; Δx – изменение длины ГЦ наклона РО в поперечной плоскости, м.

Представленные уравнения геометрических связей и уравнения, характеризующие зависимость изменения угла наклона РО в поперечной плоскости от перемещения штока ГЦ, позволили составить математическую модель системы, состоящей из подсистем «Остов» и «Рабочий Орган» (рис. 1).

Учитывая обоснованный критерий эффективности, зависимость скорости изменения угла наклона остова ЦТЭ и соответственно РО в поперечной плоскости ($V_{угла}$) от скорости выдвигания (втягивания) штока ГЦ (V_u), составлено уравнение:

$$V_{угла} = \frac{V_u \cdot \cos(\chi)}{b} \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (13)$$

где χ – угол наклона вектора скорости точки крепления ГЦ, совершающей вращательное движение по окружности радиусом b , град.

Одним из важнейших составляющих РП ЦТЭ является взаимодействие РО с разрабатываемой средой (подсистема «Грунт» на рис. 1). РП ЦТЭ сопровождается взаимодействием РО с разрабатываемой средой (грунтом), вследствие чего возникает сила ($F_{ср}$), препятствующая перемещению РО в поперечной плоскости (рис.8).

Это взаимодействие описано математической моделью реакции грунта на перемещение РО ЦТЭ в поперечной плоскости. В результате получены зависимости, которые позволили определить силу реакции грунта на часть РО, заглубленную в разрабатываемый грунт:

$$F_{ср} = F_{кон} \cdot \sin(\gamma); \quad (14)$$

$$F_{кон} = \frac{k_{уд} \cdot V \cdot B_m H_m}{\eta_u \cdot V_u}, \quad (15)$$

где $F_{кон}$ – сила сопротивления копанью, направленная против движения цепи РО, Н; $k_{уд}$ – удельное сопротивление грунта копанью, которое зависит от категории грунта, H/m^2 (для II категории – $196140 H/m^2$, III категории – $294210 H/m^2$, IV категории – $392280 H/m^2$); V – линейная

скорость ЦТЭ, м/с; B_m – ширина разрабатываемой траншеи, м; H_m – глубина разрабатываемой траншеи, м; P_T – техническая производительность ЦТЭ, м³/с; $\eta_{ц}$ – коэффициент полезного действия цепи РО; $V_{ц}$ – скорость движения цепи РО, м/с.

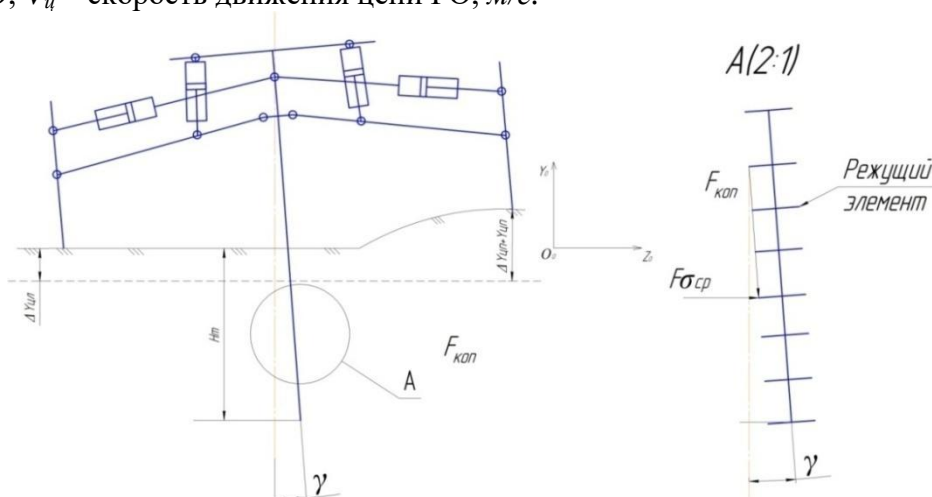


Рисунок 8 – Расчетная схема взаимодействия рабочего органа с грунтом в поперечной плоскости

Процесс управления положением РО ЦТЭ реализуется при помощи гидропривода, который представлен в работе совокупностью таких элементов, как электрогидрораспределитель (ЭГР), ГЦ, гидронасос и гидромотор. В работе рассмотрено двухконтурное управление РП ЦТЭ. В случае если скорости перемещения штока ГЦ не хватает для компенсации угловых отклонений РО от вертикали, возможно уменьшение скорости перемещения ЦТЭ.

Для управления потоком рабочей жидкости использован ЭГР дискретного и пропорционального действия, в которых золотник перемещается за счет электрических сигналов, поступающих из УУ (рис. 4).

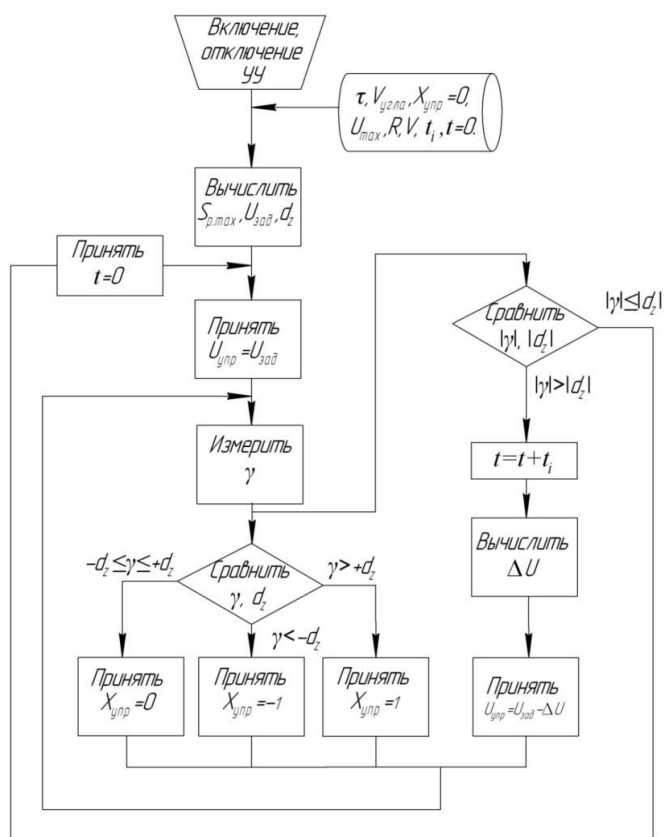


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма работы устройства управления положением рабочего органа в поперечной плоскости и скоростью движения цепного траншейного экскаватора

ЭГР дискретного действия предназначен для направления потоков рабочей жидкости от насоса к ГЦ при изменении угла наклона РО ЦТЭ. ЭГР пропорционального действия используется для плавного изменения скорости машины при отклонении РО ЦТЭ от гравитационной вертикали.

На вход дискретного ЭГР поступает один из трех управляющих сигналов ($X_{упр}$): +1 – жидкость поступает в штоковую полость ГЦ, -1 – жидкость поступает в поршневую полость ГЦ и 0 – сечения ЭГР закрыты, шток ГЦ неподвижен:

$$X_{упр} = \begin{cases} +1 & \text{при } \gamma > +d_z; \\ 0 & \text{при } -d_z \leq \gamma \leq +d_z; \\ -1 & \text{при } \gamma < -d_z, \end{cases} \quad (16)$$

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

Для формирования управляющих сигналов, поступающих на ЭГР, используется УУ, реализующее алгоритм управления положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости и скоростью движения ЦТЭ (рис. 9).

Разработанный алгоритм учитывает требования, предъявляемые к геометрической форме траншеи, параметры УУ и ЦТЭ, и позволяет определить последовательность выработки управляющих сигналов на ЭГР для компенсации угловых отклонений РО поперечной плоскости относительно гравитационной вертикали и для изменения скорости движения ЦТЭ.

Для формирования управляющих сигналов УУ содержит пороговый элемент, позволяющий определить условия срабатывания УУ.

Условия срабатывания определяются с учетом допустимых отклонений формируемой траншеи, регламентируемых СНиП и СП. В частности, они касаются прямолинейности и формы траншеи, выражаются в предельных отклонениях различных параметров траншеи от проектной документации:

- отклонения дна выемок от проектных при черновой разработке траншейными экскаваторами допускается $\pm 0,1$ м;
- максимальные отклонения от проектного положения осей напорных трубопроводов не должны превышать $\pm 0,1$ м в плане.

В диссертационной работе допустимый угол отклонения РО в поперечной плоскости от гравитационной вертикали составляет $\pm d_z$ и определяется по формуле:

$$d_z = \arcsin \left(\frac{0,1}{H_m} \right), \quad (17)$$

где H_m – глубина траншеи, м.

Контур управления скоростью перемещения ЦТЭ реализован с учетом того, что электрический сигнал управления изменяется от 0 до U_{max} , площадь проходного сечения S_p изменяется от 0 до πR^2 .

Зависимость площади проходного сечения канала ЭГР от сигнала управления представлена в виде:

$$S_p = \frac{S_{p,max} \cdot U}{U_{max}}, \quad (18)$$

где S_p – площадь проходного сечения канала ЭГР, $м^2$; U_{max} – максимальное напряжение на обмотке золотника, соответствующее максимальной площади проходного сечения канала ЭГР, В; максимальная площадь проходного сечения магистрали ЭГР:

$$S_{p,max} = \pi R^2, \quad (19)$$

где R – радиус проходного сечения канала ЭГР, м.

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

$$V = \frac{U \cdot V_{max}}{U_{max}}, \quad (20)$$

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

При изменении скорости движения ЦТЭ напряжение на золотнике ЭГР определяется:

$$U = U_{зад} - \Delta U, \text{ при } 0 \leq \Delta U \leq U_{зад}, \quad (21)$$

где $U_{зад}$ – напряжение на обмотке золотника гидрораспределителя, соответствующее заданной скорости движения ЦТЭ.

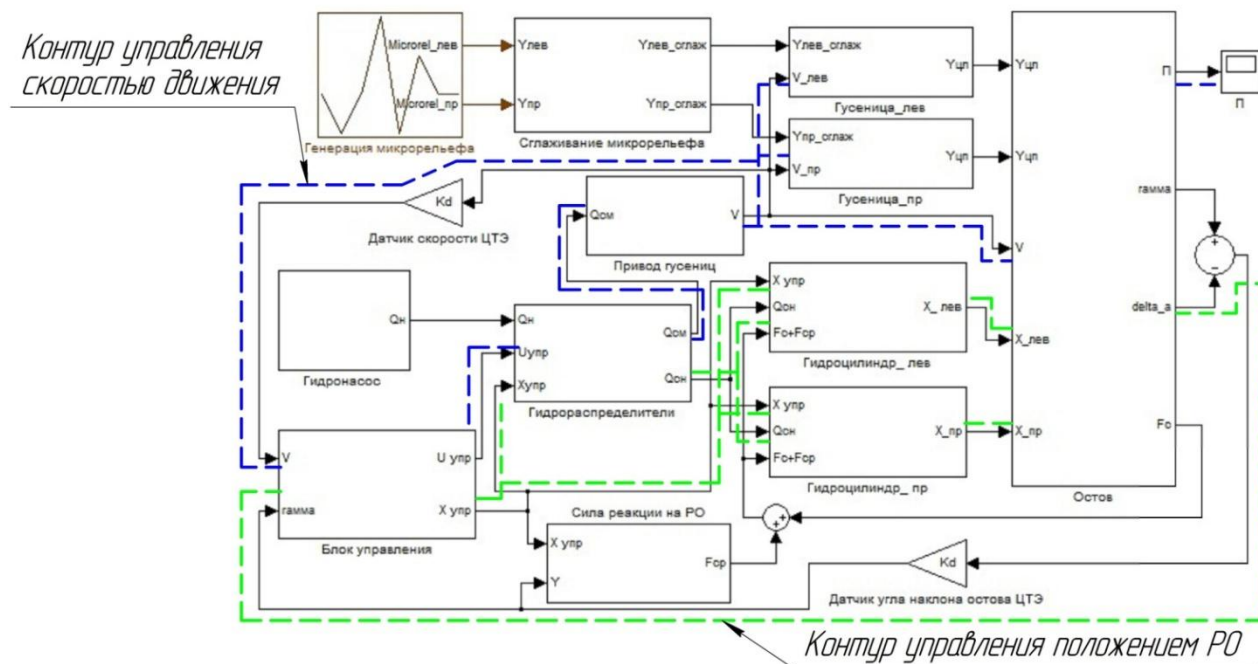
Если $\Delta U > U_{зад}$, то напряжение на золотнике ЭГР при изменении скорости движения ЦТЭ U принимается равным 0.

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

$$\begin{cases} \Delta U = n_U \cdot U_{max}, \\ n_U = \left(\frac{\gamma}{d_z} - 1 \right), \text{ при } \gamma \geq d_z. \end{cases} \quad (22)$$

В результате разработана имитационная модель РП ЦТЭ с усовершенствованным УУ положением РО в поперечной плоскости (рис. 10), позволившая осуществить теоретические ис-

Контур управления
скоростью движения



В четвертой главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на выявление зависимости среднего квадратического значения угла отклонения РО от гравитационной вертикали в поперечной плоскости и производительности ЦТЭ от технологических параметров РП и параметров УУ, существенно влияющих на эффективность РП. Учитывая обоснованный критерий эффективности, такими параметрами являются скорость изменения угла наклона РО в поперечной плоскости ($V_{угла}$) и линейная скорость движения ЦТЭ (V). Обоснованы исследуемые параметры и проведены теоретические исследования имитационной модели РП ЦТЭ с УУ РО в поперечной плоскости.

- скорость движения экскаватора – V , м/с;
- скорость изменения угла наклона РО ЦТЭ – $V_{\text{УГЛ}}$, град/с.

Эксперимент заключался в следующем: при движении с постоянной скоростью осуществлялся наезд ЦТЭ левой и правой гусеницами на искусственные неровности, при этом фиксировались значения угла крена остова. Далее, параметры неровностей моделировались на ЭВМ и определялся угол крена остова. Значения угла крена остова, полученные во время эксперимента и моделирования, сравнивались между собой (рис. 11).

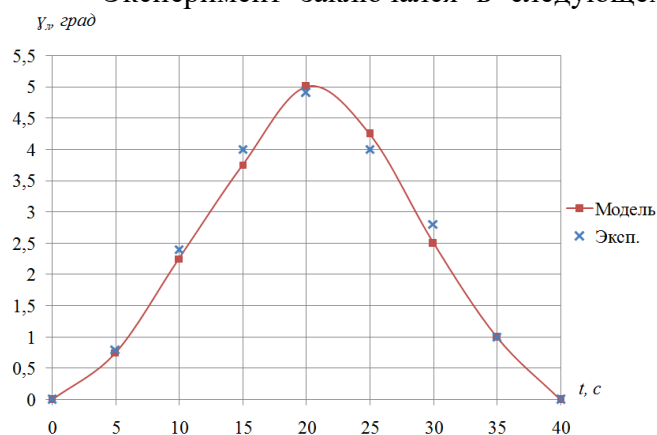


Рисунок 11 – Сравнение зависимостей угла крена остова цепного траншейного экскаватора от времени при наезде на неровность левой гусеницей

Для проведения теоретических исследований определены параметры с фиксированными

значениями, параметры со случайными значениями и параметры с варьируемыми значениями. Согласно цели и задачам работы, исследуемые параметры, влияющие на эффективность РП, должны быть связаны с УУ положением РО ЦТЭ.

При исследовании процесса формирования траншеи особенно важно рассмотреть параметры, существенно влияющие на динамику перемещения РО (скорость изменения угла наклона РО экскаватора ($V_{\text{угла}}$, град/с) и скорость перемещения экскаватора (V , м/с)). Такими параметрами являются: подача гидронасоса (Q_n , м³/с), рабочий объем гидромотора привода гусениц (q_m , м³) и параметры ГЦ (d – диаметр штока, м; D – диаметр поршня, м). Они непосредственно влияют на точность и скорость позиционирования РО ЦТЭ в поперечной плоскости и производительность ЦТЭ.

Выходными параметрами разработанной имитационной модели РП ЦТЭ являются угол отклонения РО от гравитационной вертикали (γ) и производительность ЦТЭ (I). Для того, чтобы убедиться в целесообразности совершенствования УУ положением РО в поперечной плоскости, необходимо было сравнить выходные параметры имитационных моделей РП ЦТЭ, оснащенного УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости, и без УУ.

Для исследования РП ЦТЭ без УУ положением РО в поперечной плоскости и скоростью движения ЦТЭ использована имитационная модель (рис. 10) с отключенным УУ, выполненная в программном продукте MATLAB. Исследования проводились при условии, что скорость движения ЦТЭ V была фиксирована и равна 0,03 м/с, ширина траншеи 0,4 м и глубина траншеи 1,8 м.

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. 12, 13). В результате анализа полученных зависимостей видно, что РО ЦТЭ существенно отклоняется от гравитационной вертикали, среднее квадратическое значение отклонения РО $\gamma_{\text{ср}}$ при этом составляет 1,42 град. В результате параметры разработанной траншеи не соответствуют требованиям проектной документации.

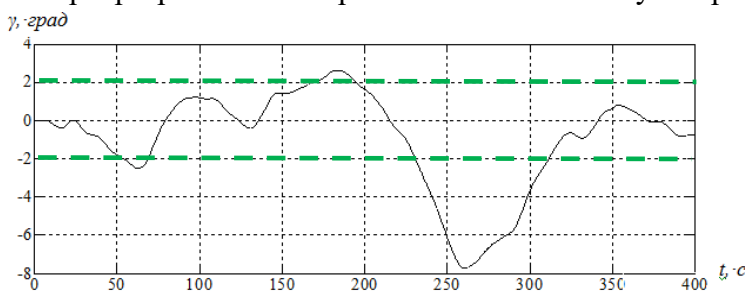


Рисунок 12 – Изменение угла наклона рабочего органа цепного траншейного экскаватора без устройства управления положением рабочего органа

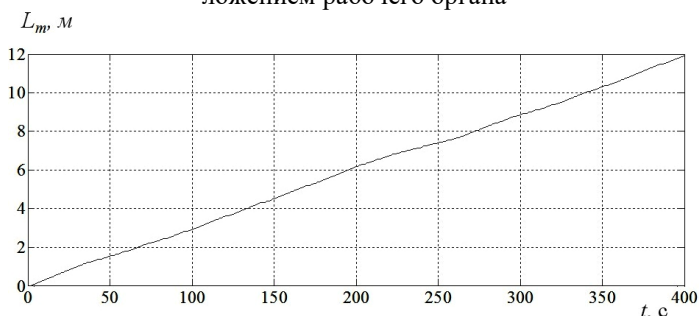


Рисунок 13 – Изменение длины траншеи, разработанной цепным траншейным экскаватором без устройства управления положением рабочего органа

шии L_m во времени (рис. 14, 15). Для исследования РП ЦТЭ с УУ положением РО в поперечной плоскости использована имитационная модель, выполненная в программном продукте MATLAB (рис. 13). Исследования проводились при условии, что начальная скорость движения ЦТЭ V равна 0,03 м/с и скорость изменения угла наклона РО ЦТЭ $V_{\text{угла}}$ равна 1,84 град/с. Значение $V_{\text{угла}}$ установлено согласно параметрам гидропривода.

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 м³/ч.

Анализ полученных зависимостей показал необходимость использования УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости для обеспечения требуемой 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 зависимости изменения угла наклона РО в поперечной плоскости γ и объема длины разработанной траншеи

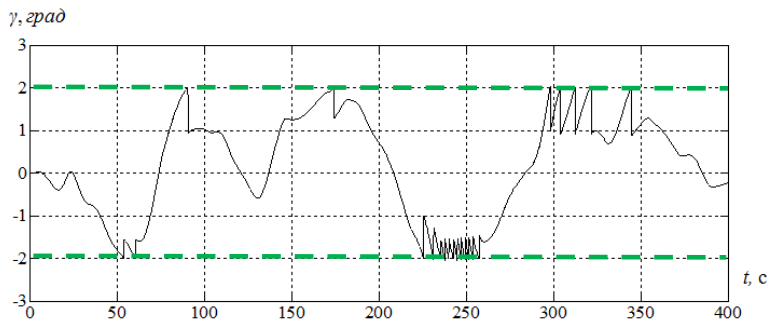


Рисунок 14 – Изменение угла наклона рабочего органа цепного траншейного экскаватора, оснащенного устройством управления положением рабочего органа

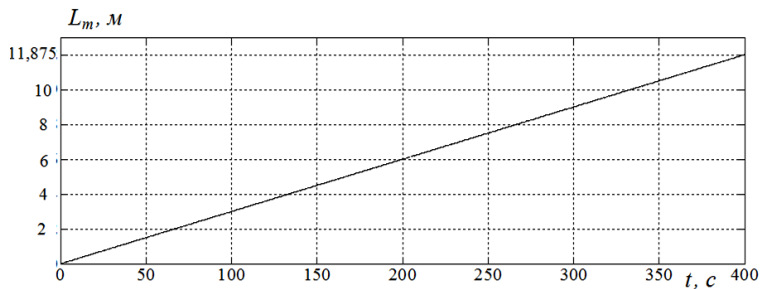


Рисунок 15 – Изменение длины траншеи, разработанной цепным траншейным экскаватором, оснащенный устройством управления положением рабочего органа

решена задача оптимизации значений $V_{\text{угла}}$ и V .

Для вычисления целевых функций и решения задач оптимизации была проведена аппроксимация зависимостей $\gamma_{cp}(V_{\text{угла}}, V)$ и $\Pi(V_{\text{угла}}, V)$, входящих в критерий эффективности РП ЦТЭ, методом наименьших квадратов с помощью программного продукта MATLAB. Этот программный продукт позволил не только определить уравнение регрессии для функциональной зависимости вида $z=f(x,y)$, но и определять численные значения коэффициентов.

Полученные уравнения регрессий, аппроксимирующие зависимости критерия эффективности от исследуемых параметров, представлены в таблицах 1 и 2. Для различных категорий грунта были построены графические зависимости $\gamma_{cp}=f(V_{\text{угла}}, V)$ и $\Pi=f(V_{\text{угла}}, V)$ (рис. 16-21).

Таблица 1

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

Таблица 2

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

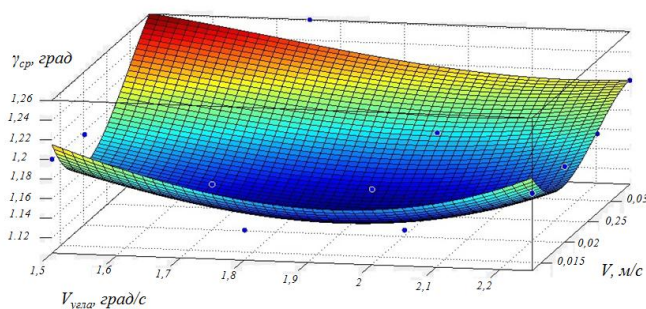


Рисунок 16 – Функциональная зависимость среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа от гравитационной вертикали от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта II)

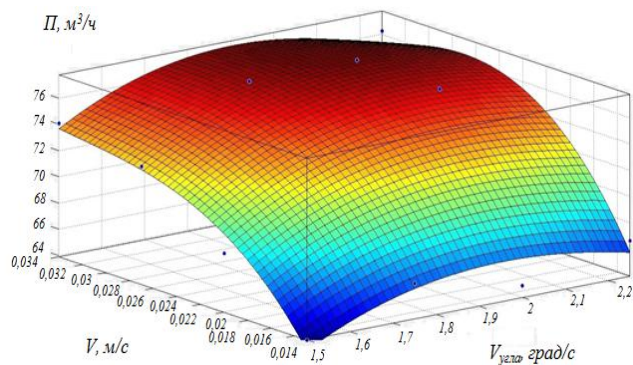


Рисунок 17 – Функциональная зависимость производительности от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта II)

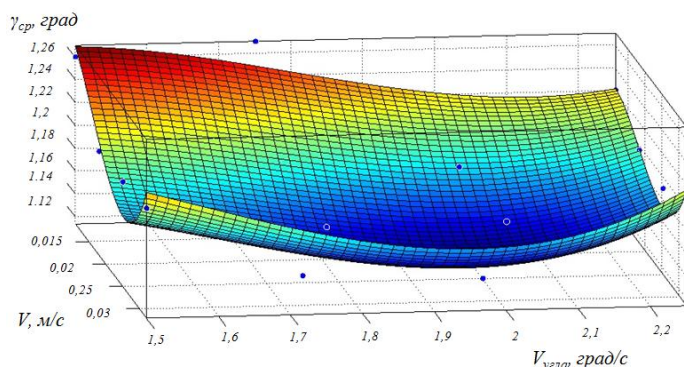


Рисунок 18 – Функциональная зависимость среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа от гравитационной вертикали от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта III)

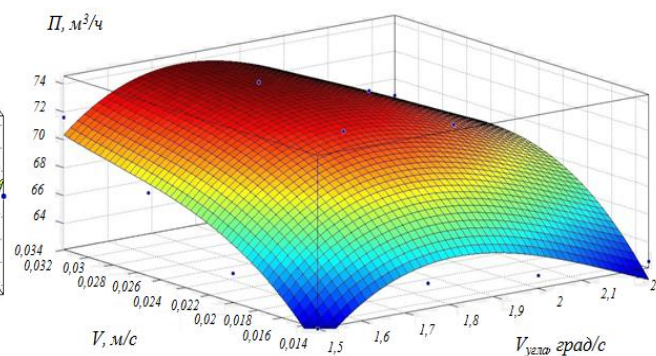


Рисунок 19 – Функциональная зависимость производительности от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта III)

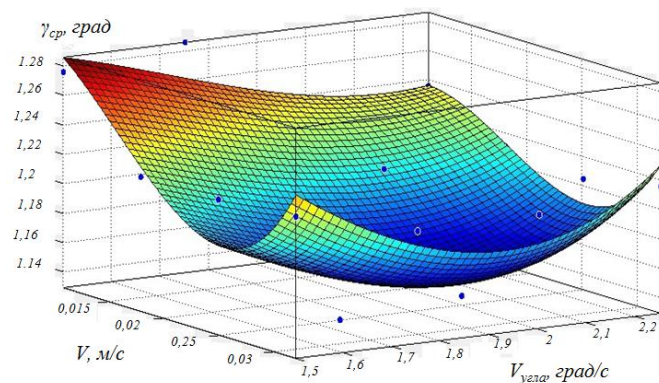


Рисунок 20 – Функциональная зависимость среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа от гравитационной вертикали от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта IV)

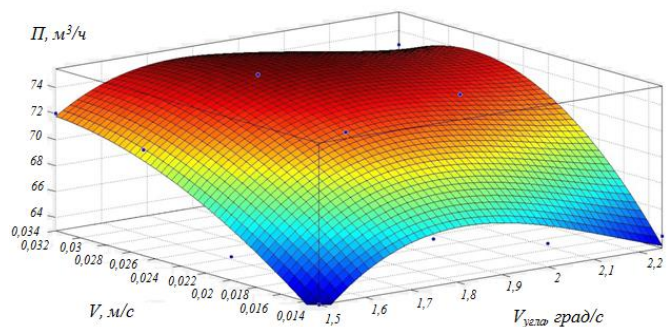


Рисунок 21 – Функциональная зависимость производительности от скорости изменения угла наклона рабочего органа в поперечной плоскости и скорости движения цепного траншейного экскаватора (категория грунта IV)

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 ($V_{\text{угла}}$) и скорости движения ЦТЭ (V) в качестве примера для грунта II категории (рис. 22-25).

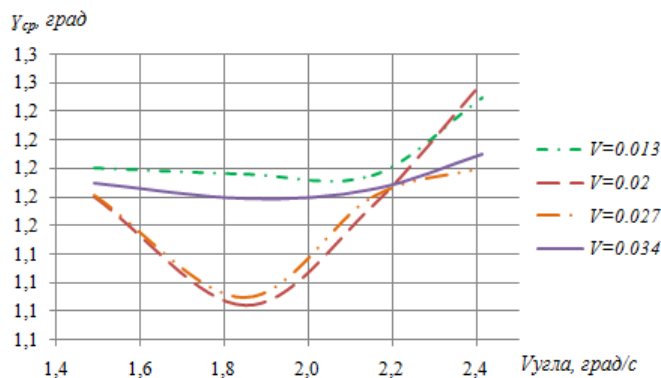


Рисунок 22 – Функциональная зависимость среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа от скорости изменения угла наклона рабочего органа

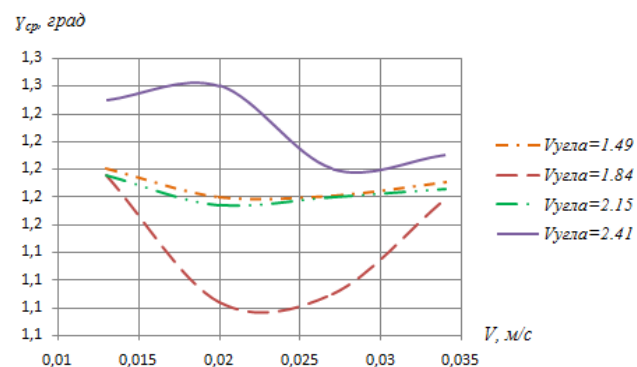


Рисунок 23 – Функциональная зависимость среднего квадратического значения угла отклонения рабочего органа от скорости движения цепного траншейного экскаватора

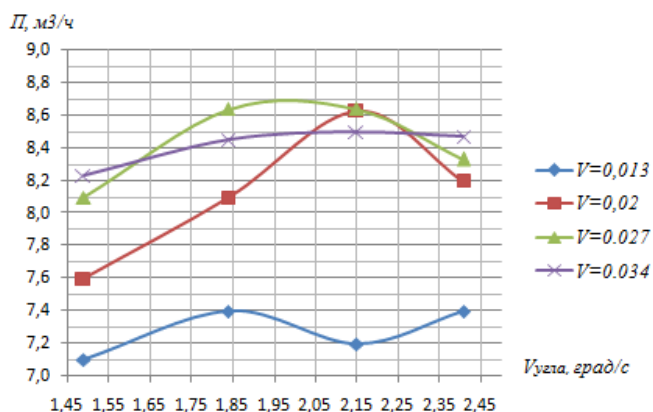


Рисунок 24 – Функциональная зависимость производительности цепного траншейного экскаватора от скорости изменения угла наклона рабочего органа

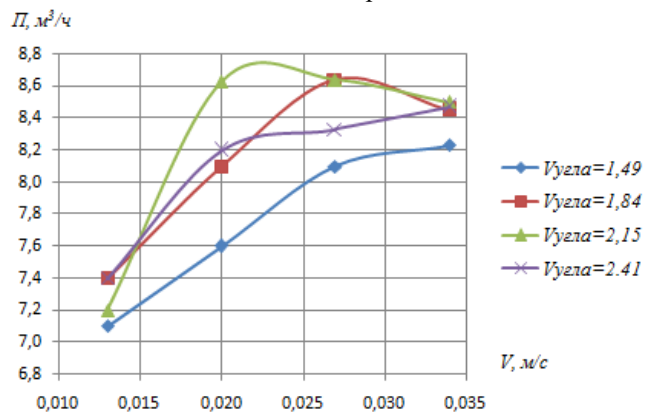


Рисунок 25 – Функциональная зависимость производительности цепного траншейного экскаватора от скорости его движения

В результате анализа полученных зависимостей сделан вывод, что характер зависимости нелинейный и при изменении значений $V_{угла}$ и V наблюдается наличие экстремума функций $\gamma_{ср}=f(V_{угла})$ и $\gamma_{ср}=f(V)$, $\Pi=f(V_{угла})$ и $\Pi=f(V)$. Это позволило решить задачу оптимизации соответствующих параметров УУ.

В обоснованном критерии эффективности ограничения переменных $V_{угла}$, V представлены в виде граничных условий конкретных численных значений. Область поиска экстремума зависит от требований, предъявляемых к этим переменным, причем границы области нечеткие. В связи с этим было принято допущение, что в работе рассматривается задача безусловной оптимизации, которая решена при помощи программного комплекса MATLAB. При помощи симплекс-метода Нелдера-Мида определен экстремум обобщенной целевой функции обоснованного критерия эффективности РП ЦТЭ.

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

Аналогично были получены значения для III категории грунта ($V_{угла}=2,134 \text{ град/с}$, $V=0,0206 \text{ м/с}$) и IV категории грунта ($V_{угла}=2,19 \text{ град/с}$, $V=0,0183 \text{ м/с}$). На основе этой информации инженер-конструктор, с учетом конструктивных и технологических возможностей, может определить, за счет каких параметров ГП можно обеспечить приведенные значения $V_{угла}$ и V .

Экономический эффект от использования усовершенствованного УУ составил $2343,6 \text{ руб.}$ на 1000 м разработанной траншеи.

Исследования, проведенные в работе, легли в основу инженерной методики оптимизации параметров УУ положением РО ЦТЭ в поперечной плоскости (рис. 26).

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 ЦТЭ (L_b, L, a, b, x); глубину копания (H_m); подачу гидронасоса, параметры ГЦ и гидромотора ($Q_n, Q_m, e_m, \omega_m, V_u$); среднеквадратическое отклонение (σ), коэффициент периодичности (β) и коэффициент затухания (α) для модели микрорельефа; требуемое значение угла наклона РО в поперечной 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 (γ, Π) при изменении исследуемых параметров $V_{угла}$ и V .

4. Аппроксимировать зависимости выходных характеристик от исследуемых параметров $\gamma_{cp} = f(V_{угла}, V)$ и $\Pi = f(V_{угла}, V)$ 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 ($V_{угла}$), соответствующие целевой функции для заданной категории грунта.

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

8. Вывести оптимальные значения параметров УУ, соответствующие целевой функции для заданной категории грунта Q_n (m^3/c), q_m (m^3), d (m), D (m).

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 ($\gamma'_{cp}, град$) к фактическому значению угла отклонения ($\gamma_{cp}, град$) и фактического значения производительности цепного траншейного экскаватора ($\Pi, m^3/ч$) к максимальному значению производительности ($\Pi', m^3/ч$).

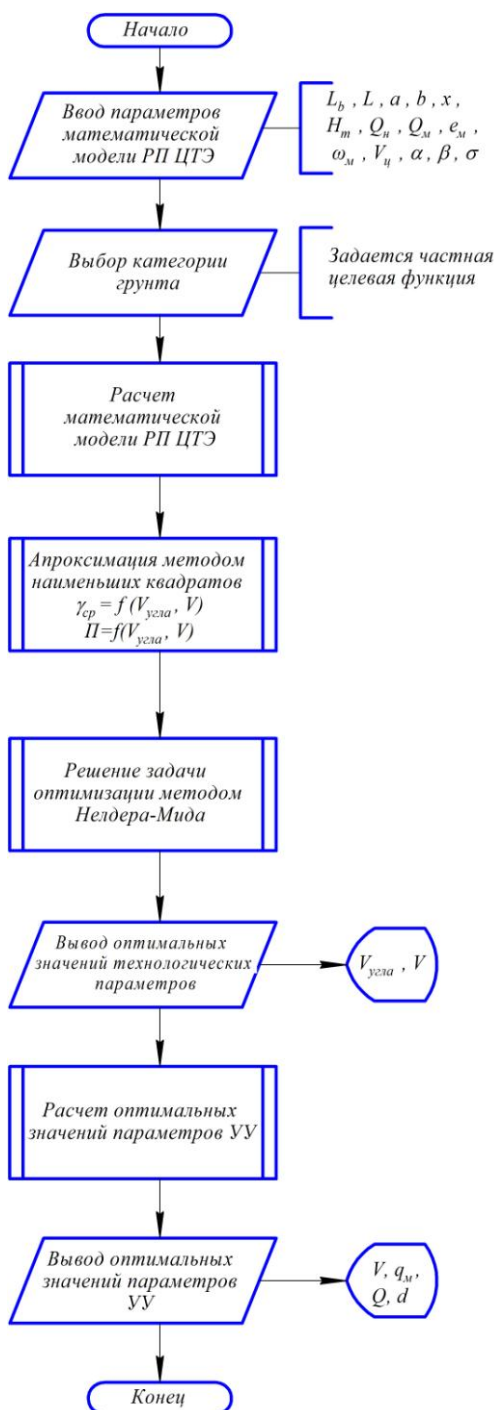


Рисунок 26 – Блок-схема инженерной методики

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 ($\gamma_{ср}$, град) и производительность цепного траншейного экскаватора (Π , $\text{м}^3/\text{ч}$), а также сформированный комплексный критерий эффективности со скоростью изменения угла наклона рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости ($V_{\text{угла}}$, град/с) и скоростью движения цепного траншейного экскаватора (V , м/с), которые позволяют оптимизировать параметры $V_{\text{угла}}$ 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 ($V_{\text{угла}}$, град/с) и скорости движения цепного траншейного экскаватора (V , м/с) для различных категорий грунта [II категория ($V_{\text{угла}}=1,9765$ град/с, $V=0,0232$ м/с); III категория ($V_{\text{угла}}=2,134$ град/с, $V=0,0206$ м/с); IV категория ($V_{\text{угла}}=2,19$ град/с, $V=0,0183$ м/с)]; сформировать рекомендации по определению оптимальных значений параметров устройства управления положением рабочего органа цепного траншейного экскаватора в поперечной плоскости, а именно: подачи гидронасоса (Q_n , $\text{м}^3/\text{с}$), рабочего объема гидромотора (q_m , м^3) и параметров гидроцилиндра (d , м), (D , м). 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.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. 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.
2. 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.
3. 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.).

В изданиях, индексируемых в Scopus

1) 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.

В других изданиях:

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

2) 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.

3) 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.

4) 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.

5) Агапов, М. Е. Математические модели электрогидрораспределителей траншейного экскаватора / М. Е. Агапов // Техника и технологии строительства: научно-практический сетевой электронный журнал. – 2016. – Вып. 3 (7). – С. 87–91.

6) 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.

7) 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.

8) 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.

9) Агапов М.Е., Щербаков В.С., Игнатов С.Д. Алгоритм работы устройства управления положением рабочего органа в поперечной плоскости и скоростью движения цепного траншейного экскаватора / Хроники объединенного фонда электронных ресурсов Наука и образование – г. Москва: ИУО РАО, 2016 г., № 6 (85), с. 56.