

На правах рукописи



Батюков Александр Владимирович

**Методы, алгоритмы и устройство позиционирования мехатронного
тоннелепроходческого комплекса для прокладки подземных
коммуникаций**

Специальность 2.5.4 – «Роботы, мехатроника и робототехнические
системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Новочеркасск – 2024 г.

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика и электрические аппараты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Научный руководитель: **Павленко Александр Валентинович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Чернышев Вадим Викторович**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры «Динамика и прочность»
Волгоградского государственного технического
университета

Костюков Владимир Александрович
кандидат технических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный
университет,
доцент кафедры «Электротехника и
мехатроника»

Защита диссертации состоится 22.03.2023 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.06 при Южном федеральном университете по адресу: по адресу г. Таганрог, ул. Чехова-, 2, корп. «И», комн. 347.

С диссертацией можно ознакомиться в зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: 344103, г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж, а также на библиотечном портале ЮФУ:
<https://hub.sfedu.ru/storage/1/1324870/bf870e45-9f8d-491d-8f14-39dd6cb96f82/>

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета ЮФУ801.02.06,
Кандидат технических наук, доцент



Кухаренко А.П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Рост объемов строительства, повышение требований к безопасности ведения строительных работ при устройстве тоннелей и прокладке подземных инженерных коммуникаций в условиях плотной городской застройки приводит к необходимости использовать технические устройства, обеспечивающие проведение подземных выработок с минимальным воздействием на окружающую среду и земную поверхность. В значительной степени этим требованиям отвечают технические устройства, реализующие способы бестраншейной проходки методом продавливания, такие как мехатронные тоннелепроходческие комплексы (МТПК), которые являются альтернативой традиционной открытой технологии строительства. При этом предъявляются высокие требования к эксплуатационным показателям МТПК. Наиболее важным из них является точность определения координат и пространственного положения проходческого щита (ПЩ) при строительстве тоннеля, которые определяются с помощью специализированных устройств – систем позиционирования.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие эффективности функционирования тоннелепроходческого щитового оборудования, а также повышение точности позиционирования проходческих машин внесли ученые: А.И. Берон, В.А. Бреннер, Г.М. Водяник, А.Н. Дровников, В.Т. Загороднюк, Н.А. Глебов, Д.Я. Паршин, Л.И. Кантович, Н.Г. Картавый, М.Г. Крапивин, В.Г. Михайлов, Е.З. Позин, М.М. Протодьяконов, М.И. Слободкин, В.И. Солод, Н.И. Сысоев, А.М. Терпигорев, Г.Ш. Хазанович, Ю.М. Ляшенко, В.Г. Афанасьев и другие.

На сегодняшний день известно достаточно большое количество различных систем позиционирования, применяющихся для подземной навигации ПЩ, различающихся по принципу определения его местоположения:

– спутниковые навигационные системы, принцип действия которых заключается в использовании ретрансляторов спутникового сигнала, размещаемых на поверхности земли в зоне возведения тоннеля и приемника, который находится внутри проходческого щита;

– лазерные системы навигации (в том числе оптические), которые основаны на геодезических методах определения координат и имеют в своем составе источник лазерного излучения, расположенный в стартовом котловане и приемную мишень, закрепленную в хвосте проходческого щита;

– тахеометрические системы навигации, принцип действия которых сходен с лазерными, и отличается применением высокоточных дорогостоящих тахеометров и ответных призм, закрепленных на щите;

– инерциальные навигационные системы, с помощью которых определение местоположения движущегося объекта основывается на использовании законов инерции.

Обзор и анализ существующих технических решений показывает, что на сегодняшний день нет приборов, позволяющих определять координаты проходческих щитов модульной конструкции малого диаметра, совмещающих в себе малые габариты и имеющих возможность использования при строительстве криволинейных тоннелей методом продавливания, что говорит об актуальности темы исследований.

Объект исследования: Мехатронный тоннелепроходческий комплекс для строительства прямолинейных и криволинейных тоннелей методом продавливания в условиях плотной городской застройки.

Предмет исследования: Математические модели, методы, алгоритмы и технические средства устройства позиционирования микротоннелепроходческого комплекса.

Цель диссертационной работы: повышение эффективности позиционирования проходческих щитов малого диаметра, предназначенных для прокладки подземных коммуникаций в условиях плотной городской застройки при прямолинейной и криволинейной проходке методом продавливания.

Научная задача, решаемая в диссертации – разработка комплекса математических моделей, методов, алгоритмов и технических средств, обеспечивающих повышение эффективности позиционирования проходческих щитов мехатронных тоннелепроходческих комплексов малого диаметра, предназначенных для строительства подземных коммуникаций в условиях плотной городской застройки при прямолинейной и криволинейной проходке.

Для достижения поставленной цели и решения научной задачи необходимо:

1. Провести обзор и анализ устройств, технических решений и методов подземной навигации проходческих щитов.
2. Разработать математическую и численную модели процесса движения проходческого щита МТПК.
3. Разработать метод и алгоритм формирования требуемой комбинации гидроцилиндров перемещения проходческого щита МТПК.
4. Разработать метод и алгоритм определения координат проходческого щита и методику их преобразования в местную систему координат.
5. Разработать экспериментальный образец устройства позиционирования, его структурно-функциональную схему, определить основные схмотехнические решения. Разработать программное обеспечение для управления устройством позиционирования проходческого щита.
6. Провести экспериментальные исследования возможности применения разработанного устройства позиционирования проходческих щитов малого диаметра.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы мехатроники, математического и численного моделирования, аналитической геометрии, кинематического анализа и прикладного программирования. Исследование численной модели проведено на ПЭВМ, экспериментальные – на разработанном образце в лабораторных и

полевых условиях. Основные расчеты, моделирование и разработка управляющих программ выполнены с применением программных продуктов: OpenModelica, MathCAD, μ Vision IDE – Keil.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана математическая модель движения проходческого щита тоннелепроходческого комплекса и ее численная реализация, **отличающиеся** от известных тем, что для определения пространственного положения щита относительно базового направления движения и ведения его по заданной траектории, контролируются координаты одной точки оси щита и углы наклона между осью щита и её проекциями на координатные плоскости, позволяющие формировать траекторию движения проходческого щита при прокладке прямолинейных и криволинейных тоннелей.

2. Разработан метод и алгоритм формирования требуемой комбинации гидроцилиндров, для ведения проходческого щита в соответствии с проектным направлением, которые **отличаются** от известных тем, что комбинация гидроцилиндров определяется по величине «пространственного» управляющего сигнала, получаемого путем математического моделирования.

3. Предложен метод и алгоритм определения координат ножевой точки проходческого щита, основанный на регистрации координат хвостовой точки щита с помощью лазерного устройства, **отличающиеся** применением микроэлектромеханической системы на основе гироскопа, акселерометра и магнитометра для определения углов крена, тангажа и рысканья.

4. Предложена структура комбинированного устройства позиционирования, **отличающегося** от известных реализацией комбинации лазерного и инерциального методов определения координат, и позволяющего определять с требуемой точностью координаты мехатронных проходческих щитов малого диаметра.

Результаты, выносимые на защиту.

1. Математическая модель движения мехатронного проходческого щита тоннелепроходческого комплекса и ее численная реализация, **отличающиеся** от известных тем, что определение пространственного положения щита относительно базового направления движения и ведения его по заданной траектории осуществляется путем контроля одной точки оси щита и углов наклона между осью щита и её проекциями на координатные плоскости.

2. Метод и алгоритм формирования требуемой комбинации гидроцилиндров, для ведения проходческого щита в соответствии с проектным направлением, **отличающиеся** от известных формированием требуемой комбинации гидроцилиндров по управляющему сигналу, получаемому путем математического моделирования.

3. Метод и алгоритм определения координат ножевой точки проходческого щита, основанные на регистрации координат хвостовой точки щита с помощью лазерного устройства **отличающиеся** от известных применением микроэлектромеханической системы на основе гироскопа,

акселерометра и магнитометра для определения углов крена, тангажа и рысканья.

4. Структура комбинированного устройства позиционирования, **отличающегося** использованием лазерного приемо-передатчика, приемной фотопластины и микроэлектромеханической системы, позволяющего определять координаты проходческого щита при строительстве прямолинейных и криволинейных тоннелей методом продавливания.

Обоснование и достоверность результатов. Достоверность результатов подтверждается корректностью допущений, принимаемых при разработке моделей и алгоритмов, корректным применением методов измерения и обработки данных при проведении исследований, использованием поверенных средств измерений при проведении экспериментов, соответствием теоретических результатов экспериментальным исследованиям макетного образца системы подземной навигации в лабораторных и полевых условиях.

Теоретическая значимость работы.

Разработаны математическая и численная модели процесса движения проходческого щита тоннелепроходческого комплекса с комбинированной системой подземной навигации, реализующей лазерный и инерциальные методы определения пространственного положения щита.

Предложен метод и алгоритм определения координат ножевой точки проходческого щита, основанный на определении координат хвостовой точки проходческого щита, находящейся в зоне прямой видимости, с помощью комбинированного устройства, позволяющего определять значения углов крена, тангажа и рыскания, путем применения микроэлектромеханической системы на основе гироскопа, акселерометра и магнитометра.

Предложена методика преобразования координат из локальной системы координат устройства позиционирования в местную систему координат.

Практическая значимость. Предложена конструкция комбинированного устройства позиционирования, реализующего лазерный и инерциальные методы определения координат. Разработан метод формирования требуемой комбинации гидроцилиндров перемещения проходческого щита для повышения точности его ведения в соответствии с проектным направлением. Практическая значимость заключается в реализации устройства позиционирования, разработке алгоритмов работы комбинированного устройства позиционирования, в том числе алгоритма взаимодействия с системой управления МТПК, позволяющих с высокой точностью осуществлять управление проходческим щитом.

Реализация работы. Теоретические и практические результаты работы использовались при разработке устройств позиционирования для автоматизированной системы управления мехатронным тоннелепроходческим комплексом в НИИ Электромеханики при выполнении ряда проектов и в учебном процессе кафедры «Электромеханика и электрические аппараты» ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова.

Результаты диссертации использовались при выполнении следующих работ:

1. Проект в рамках постановления правительства РФ П218 по теме: «Создание высокотехнологичного производства импортозамещающего горнопроходческого оборудования, оснащенного интеллектуальными системами управления, для освоения подземного пространства городов». № 074-11- 2018-010 от «5» июня 2018 г.

2. Грант Российского Фонда Фундаментальных исследований по теме: «Исследование возможности применения комбинированной системы подземной навигации для системы управления проходческим щитом микротоннелепроходческого комплекса» № 20-38-90123\20.

3. Грант Фонда Содействия Инновациям в рамках программы УМНИК по теме: «Разработка системы позиционирования микротоннелепроходческих щитов модульной конструкции», договор № 16222ГУ/2021.

Связь работы с научными программами.

Работа соответствует научным направлениям ЮРГПУ (НПИ): «Развитие теории и практики создания интеллектуальных энергетических и электротехнических систем», «Теория и принципы создания энерго- и ресурсосберегающих мехатронных систем, интеллектуальных триботехнических систем, комплексов и технологий».

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Кибернетика энергетических систем» (2019 – 2021 гг.), ежегодных научно-технических конференциях студентов, аспирантов «Студенческая научная весна» в ЮРГПУ(НПИ) (2019 – 2021 гг.), на научных семинарах кафедры «Электромеханика и электрические аппараты».

Публикации: По теме работы опубликовано 17 печатных работ, в том числе 7 статей в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, получен 1 патент на изобретение, 2 свидетельства на программу для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 62 наименований и 6 приложений. Общий объем работы 136 страницы, включая 27 страниц приложений и 70 иллюстраций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.5.4. – Роботы, мехатроника и робототехнические системы, технической отрасли наук, в том числе следующим направлениям исследований:

п. 3. развитие принципов и методов построения мехатронных устройств и систем как результата синергетического объединения узлов, электротехнических, электропневматических, электрогидравлических, электронных и компьютерных компонентов с целью проектирования и практического применения качественно новых машин, систем и модулей с высокоэффективным цифровым управлением их функциональными движениями;

п. 4. математическое и полунатурное моделирование мехатронных и робототехнических систем, включая взаимодействие со средой, анализ их характеристик, оптимизация и синтез по результатам моделирования;

п. 5. методы, алгоритмы, программные и аппаратные средства управления роботами, робототехническими и мехатронными системами, включая адаптивное, оптимальное, распределенное, интеллектуальное и супервизорное управление.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи исследования, приведены основные достигнутые в диссертационной работе результаты и их научная новизна.

В первой главе выполнен анализ существующих конструкций устройств позиционирования проходческих щитов с целью поиска новых технических решений для высокоточного определения геодезических координат «хвост-нож» проходческого щита МТПК. Анализ научно-технической литературы показал, что существующие системы подземной навигации обладают рядом недостатков, не позволяющих использовать их при строительстве криволинейных тоннелей методом продавливания с помощью проходческого щита модульной конструкции.

В подземных условиях нет возможности автономного использования спутниковой навигационной аппаратуры типа GPS, так как земная поверхность препятствует прохождению сигнала от спутников. Определение координат проходческого щита с помощью спутниковых сигналов возможно при условии использования ретрансляторов, устанавливаемых на поверхности земли в районе проведения работ, однако данные устройства обеспечивают низкую точность, определения координат, а также имеют достаточно большие габариты, что накладывает ограничения на их применение в проходческих щитах малого диаметра. Системы «ELS-HWL» обладают высокой точностью и полностью автоматизированы, однако их применение возможно лишь при проходке прямолинейных тоннелей. Этот фактор является основным недостатком данных систем позиционирования. То же самое, можно сказать об оптической системе позиционирования «PERFORCAM-10» OSD OEN».

Таким образом, основным недостатком вышеописанных лазерных и оптических систем являются их конструктивные и технологические особенности и параметры точности позиционирования, вследствие которых они применяются только при прямолинейной проходке. Тахеометрические системы позиционирования отличаются высокой точностью и высокой степенью автоматизации, но также имеют и свои недостатки. Системы «SN-Pi», «SN-PA», «SN-PAi» не предназначены для определения координат при проходке криволинейных тоннелей методом продавливания. Навигационная система зарубежной фирмы VMT GmbH «SLS Microtunneling LT» позволяет вести работы при возведении тоннелей, коллекторов по криволинейной траектории. Однако отсутствует возможность их применения при

определении высокоточного положения «хвост-нож» модульного проходческого щита, а также «крена – деферента» корпуса модульного проходческого щита, кроме того, оснащение проходческого щита указанной тахеометрической системой налагает ограничения на использование различного вида оборудования для транспортировки отбитой горной массы в щитах с малым диаметром (от 360 мм до 2000 мм), также указанная система позиционирования требует постоянной калибровки тахеометра и призм после каждой продвигки тоннельной крепи и проходческого щита МТПК на шаг передвижки (0,5-1,5 м).

Применение инерциальных систем позиционирования «КомпаНав-2МТ» и «UNS» затруднено, а в иных случаях невозможно в связи с низкой точностью данных систем в автономном режиме и отсутствием возможности проведения калибровки датчиков, расположенных в тоннелях диаметром от 360мм до 1200мм. Для стабильной работы инерциальных систем позиционирования требуется постоянная высокая трудоемкость по коррекции параметров датчиков, входящих в ее состав через каждые 30-40 метров проведения тоннеля.

В соответствии с этим имеется необходимость разработки комбинированного устройства позиционирования, лишённого перечисленных выше недостатков, и объединяющего в себе необходимые конструктивные и схмотехнические решения, позволяющие определять координаты проходческого щита модульной конструкции при строительстве криволинейных тоннелей методом продавливания.

Во второй главе изложены вопросы разработки и исследования математической и численной моделей процесса движения проходческого щита тоннелепроходческого комплекса. Положение щита в пространстве определяется независимыми параметрами, число которых соответствует необходимому для управления числу степеней свободы и зависит от тех допущений, которые могут быть приняты, исходя из требований к положению проходимого тоннеля в неподвижной (базовой) системе координат. Для определения пространственного положения щита относительно базового направления движения и ведения его по заданной траектории, достаточно контролировать координаты двух точек продольной оси щита или координаты одной точки оси и углы наклона между осью щита и её проекциями на координатные плоскости.

При отклонении щита от проектной оси на величину более допустимой, необходимо выполнять корректировку его пространственного положения включением одного или нескольких гидроцилиндров отклонения (рис. 1).

Включение гидроцилиндров отклонения позволяет создавать управляющие моменты M_y , M_z относительно осей $O_{щ}Y_{щ}$ и $O_{щ}Z_{щ}$ и, как следствие, поворачивать проходческий щит. Таким образом, система вывода проходческого щита на заданную (проектную) ось должна формировать управляющий сигнал, соответствующий требуемому моменту согласно соотношениям:

$$M_y = \sum_{n=1}^k (r_{yn} \cdot P_{yn}); \quad M_z = \sum_{n=1}^k (r_{zn} \cdot P_{zn}),$$

где r_y, r_z – радиус-вектор точек приложения векторов сил P_y и P_z , создаваемых гидроцилиндрами передвижки щита относительно оси вращения; k – количество гидроцилиндров передвижки щита.

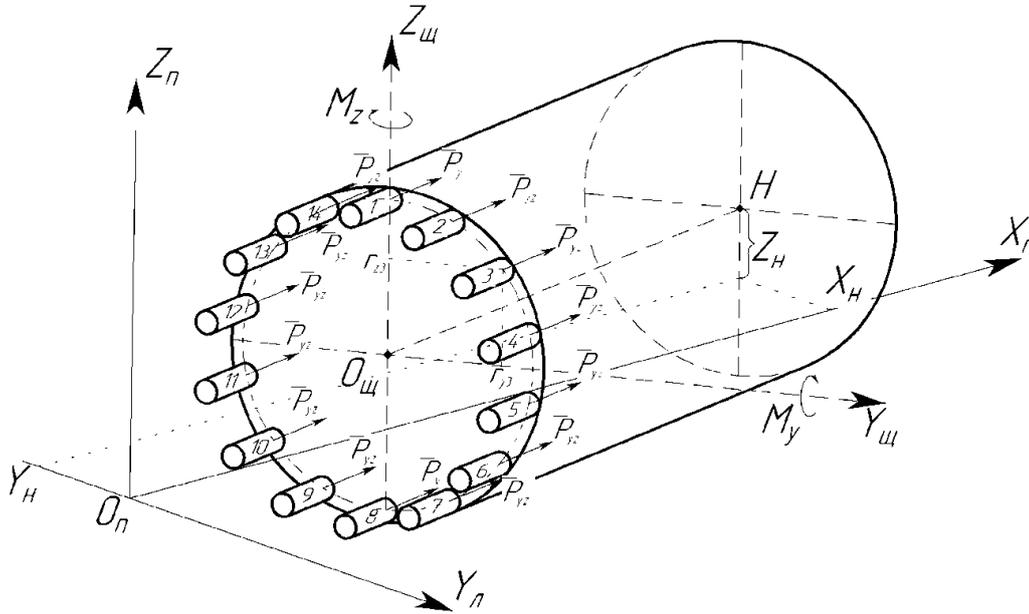


Рис. 1. Расположение гидроцилиндров передвижки щита и направление создаваемых ими сил

Усилия, развиваемые гидроцилиндрами передвижки щита, определяются по выражениям: $P_y = K_{ГЦ} \cdot U_y$; $P_z = K_{ГЦ} \cdot U_z$, где $K_{ГЦ}$ – коэффициент пропорциональности; U_y, U_z – управляющие сигналы регулятора в плане и профиле, формируемые по результатам определения пространственной ориентации щита относительно проектной оси с использованием координат хвостовой и ножевой точек щита.

В процессе работы МТПК на него оказывают влияние различные внешние и внутренние факторы, приводящие к изменению его пространственного положения и направления движения. Для анализа этих изменений необходимо составить математическую модель щита.

Рассмотрим движение щита в проектной системе координат $O_{П}X_{П}Y_{П}Z_{П}$ (рис. 2), связанной с маркшейдерской сетью опорных точек системы $OXYZ$. Начало координат совмещается с опорной точкой, в качестве которой может служить место установки задатчика направления движения щита. Ось $O_{П}X_{П}$ совмещается с направлением проектной оси тоннеля, а ось $O_{П}Z_{П}$ направляется вертикально вверх. При этом вместе с щитом перемещается локальная система координат щита $O_{щ}X_{щ}Y_{щ}Z_{щ}$, центр которой $O_{щ}$ совпадает с точкой разворота (ТР). Положение продольной оси щита полностью определяется координатами двух ее точек, лежащих в передней (ножевой) и задней (хвостовой) торцевых плоскостях с координатами $X_1Y_1Z_1$ и $X_2Y_2Z_2$ соответственно. Положение ножевой точки можно однозначно определять

координатами хвостовой точки и углами α и β между проекциями оси щита на плоскости $X_n O_n Z_n$, $X_n O_n Y_n$ и положительным направлением оси $O_{\Gamma} X_{\Gamma}$.

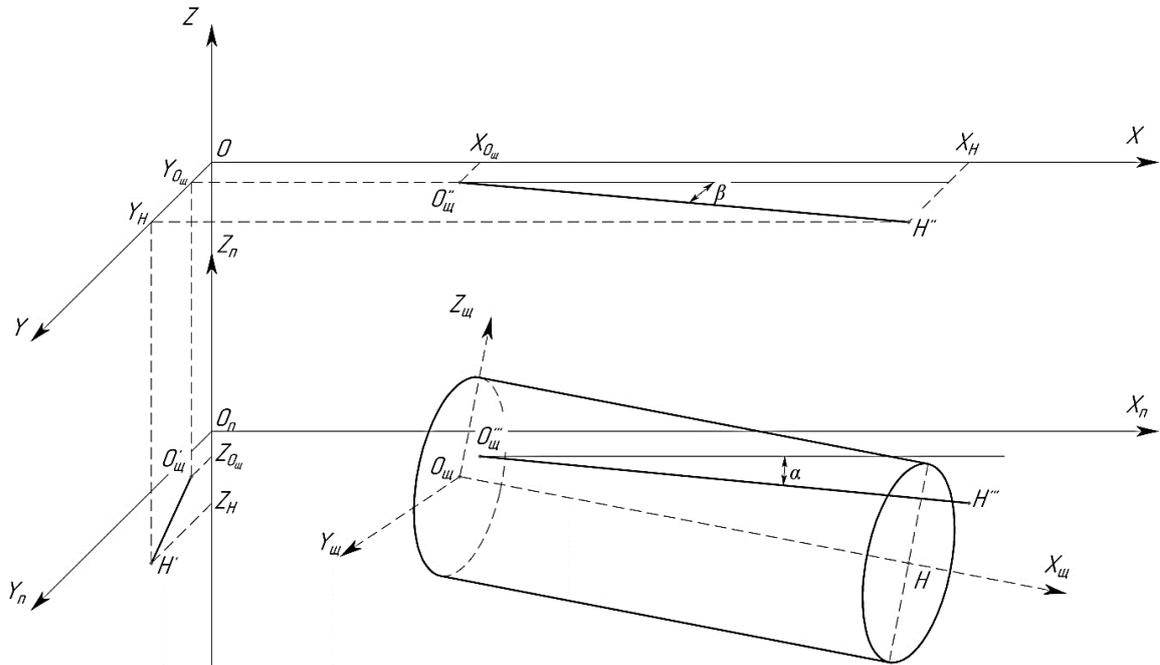


Рис. 2. Положение проходческого щита в проектной и локальной системах координат

Скорость отклонения ножевой (хвостовой) точки продольной оси щита складывается из скорости перемещения точки разворота и скорости вращения вокруг ТР:

$$\begin{aligned} \frac{dZ_1}{dt} &= V_z + a_1 \frac{da}{dt}; & \frac{dZ_2}{dt} &= V_z - a_2 \frac{da}{dt}; & \frac{dY_1}{dt} &= V_y + a_1 \frac{d\beta}{dt}; & \frac{dY_2}{dt} \\ &= V_y - a_2 \frac{d\beta}{dt}, \end{aligned}$$

где a_1 , a_2 – расстояния между ТР и ножевой (хвостовой) точками, соответственно, $V_z = V \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$, $V_y = V \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta$ – проекции скорости поступательного движения щита. Так как величины углов α и β не превышают нескольких градусов, то с достаточной точностью можно считать, что $\sin \alpha \approx \alpha$, $\cos \alpha \approx 1$; $\sin \beta \approx \beta$, $\cos \beta \approx 1$. Тогда уравнения проекций скорости V принимают вид: $V_z = V\alpha$; $V_y = V\beta$.

Следовательно, при малых углах α и β , пространственное движение щита можно представить совокупностью двух независимых движений в вертикальной (профильной) и горизонтальной (плановой) плоскостях.

Закон формирования углов α и β может быть получен из уравнений равновесия моментов относительно осей $O_{\Pi} Y_{\Pi}$ и $O_{\Pi} Z_{\Pi}$:

$$I_y \frac{d\omega_y}{dt} = r_z P - f_m G \frac{D}{2} - Ga - B_1 \omega_y - B_2 \alpha; \quad I_z \frac{d\omega_z}{dt} = r_y P - B_1 \omega_z - B_2 \beta,$$

где I_y , I_z – моменты инерции щита относительно осей $O_{\Pi} Y_{\Pi}$ и $O_{\Pi} Z_{\Pi}$, проходящих через точку разворота щита; ω_y, ω_z – угловые скорости вращения щита вокруг осей $O_{\Pi} Y_{\Pi}$ и $O_{\Pi} Z_{\Pi}$; $M_{\partial y}$, $M_{\partial z}$ – движущие моменты,

создаваемые проталкивающими гидроцилиндрами относительно осей $O_{щ}Y_{щ}$ и $O_{щ}Z_{щ}$; M_{cy} , M_{cz} – моменты сопротивления повороту относительно осей $O_{щ}Y_{щ}$ и $O_{щ}Z_{щ}$, P – равнодействующая усилий $P_1...P_i$ гидроцилиндров и возникающей силы упругости; r_z , r_y – проекции радиуса вектора r точки приложения равнодействующей усилий гидроцилиндров на оси $O_{щ}Y_{щ}$ и $O_{щ}Z_{щ}$, $a = \frac{L_{щ}}{2} - a_1$ – расстояние между центром тяжести щита и ТР; a_1 – расстояние между ножевой точкой и точкой разворота; $L_{щ}$ – длина щита; B_1 – коэффициент, учитывающий вязкое трение, определяемое свойствами пород в которых производится сооружение тоннеля и параметры щита; B_2 – коэффициент, учитывающий геометрию щита, величину зазора между оболочкой щита и стенками выработки, вес щита и глубину его вдавливания в стенки; f_m – коэффициент трения корпуса щита по породе; G – вес щита; D – наружный диаметр щита. С учетом принятых допущений и пренебрегая силой трения поршня о стенки гидроцилиндра, а также массой поршня, так как она мала по сравнению с массой тоннелепроходческого комплекса уравнение поступательного движения щита будет иметь вид:

$$m_{щ} \frac{d^2 x_{щ}}{dt^2} = P - F_{ТР} - F_c - \sigma V.$$

Скорость поступательного движения щита определяется из уравнения расхода гидросистемы:

$$Q_n = n_2 A_n V + k_{ym} P_n + \frac{v n_r}{2 E_0} \cdot \frac{d P_n}{dt}.$$

Измерение отклонения щита от проектного направления движения производится с помощью системы определения пространственных координат, быстродействие которой значительно выше, чем скорость изменения выходной координаты щита, поэтому ее можно представить в виде безынерционного звена: $U_{n.nл} = k_{\partial} Y_1$; $U_{x.nл} = k_{\partial} Y_2$; $U_{n.np} = k_{\partial} Z_1$; $U_{x.np} = k_{\partial} Z_2$, где $U_{n.nл}$, $U_{x.nл}$, $U_{n.np}$, $U_{x.np}$ – напряжения на выходе измерительной системы, соответствующие отклонениям ножевой точки в профиле и плане, и хвостовой точки в профиле и плане; k_{∂} – коэффициент передачи системы определения пространственных координат щита.

Объединив вышеприведенные уравнения получим систему уравнений, описывающую пространственное движение проходческого щита тоннелепроходческого комплекса:

$$\begin{aligned} \frac{dZ_1}{dt} &= V\alpha + a_1 \frac{da}{dt}; \frac{dZ_2}{dt} = V\alpha - a_2 \frac{da}{dt}; \frac{dY_1}{dt} = V\beta + a_1 \frac{d\beta}{dt}; \frac{dY_2}{dt} = V\beta - a_2 \frac{d\beta}{dt}; \\ I_y \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + B_1 \frac{d\alpha}{dt} + B_2 \alpha &= r_z P - f_m G \frac{D}{2} - Ga; I_z \frac{d^2 \beta}{dt^2} + B_1 \frac{d\beta}{dt} + B_2 \beta = r_y P; \\ m_{щ} \frac{dV}{dt} &= P - F_{mp} - F_c - \sigma V; Q_n = n_2 A_n V + k_{ym} P_n + \frac{v n_r}{2 E_0} \cdot \frac{d P_n}{dt}; \\ U_{n.nл} &= k_{\partial} Y_1; U_{x.nл} = k_{\partial} Y_2; U_{n.np} = k_{\partial} Z_1; U_{x.np} = k_{\partial} Z_2. \end{aligned}$$

Численное моделирование процесса движения щита было проведено при следующих исходных данных: масса щита – 10000 кг, скорость движения – 0,041 м/с, усилие гидроцилиндров передвигки – 2000 кН, диаметр щита –

1,42 м, длина щита – 4 м, момент инерции щита относительно оси – 14590 кг·м².

Численная модель, выполненная в программном комплексе OpenModelica представлена на рисунке 3.

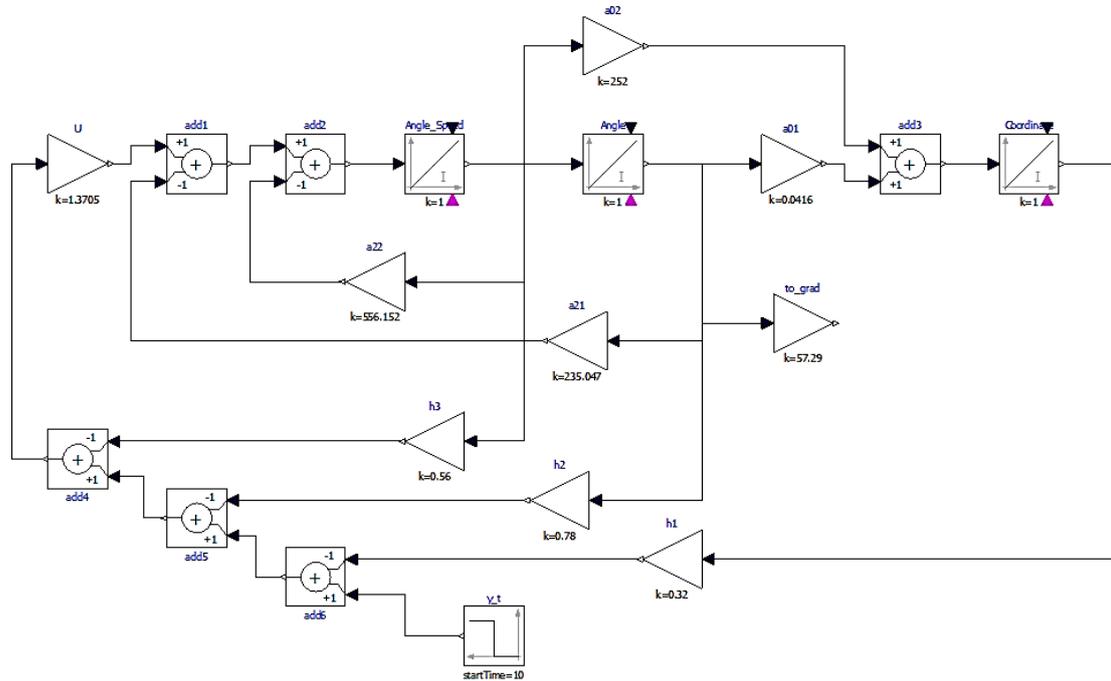


Рис.3. Численная модель проходческого щита с регулятором

В результате моделирования получены графические зависимости изменения угловой скорости ω_y , угла поворота α и координаты ножевой точки щита Z_1 при смещении радиус-вектора r_z точки приложения усилия гидроцилиндров передвижки щита. (рис. 4, 5).

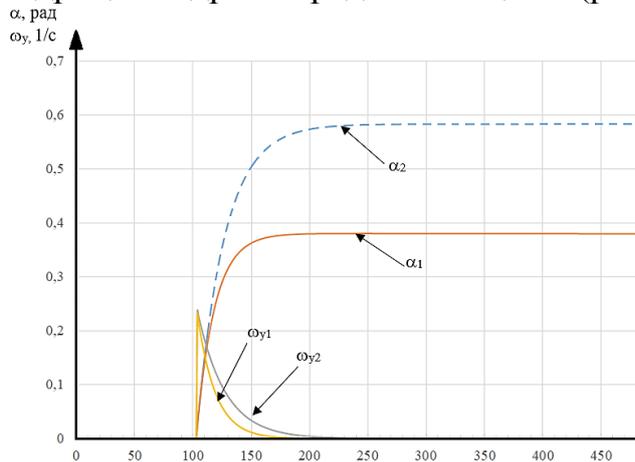


Рис.4. График изменения угловой скорости и угла поворота щита при смещении радиус-вектора точки приложения усилия гидроцилиндров передвижки щита

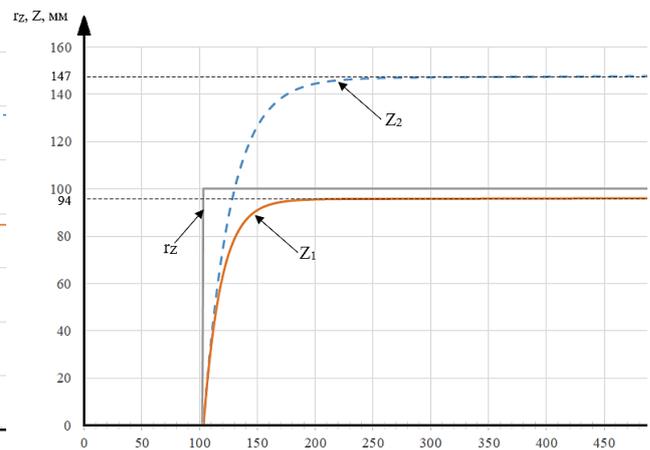


Рис.5. График изменения координаты ножевой точки щита и смещения радиус-вектора точки приложения усилия гидроцилиндров передвижки щита

В результате моделирования установлено, что без использования в численной модели оптимального регулятора, отклонение фактических координат ножевой точки проходческого щита Z_2 от заданного значения составляет 47 %. При использовании оптимального регулятора в численной модели управления движением проходческого щита отклонение координаты

ножевой точки щита Z_I при изменении управляющего воздействия r_z сокращается до 4% и составляет 4 мм.

При изменении внешних условий проходки путем изменения соответствующего коэффициента обратной связи в численной модели изменяется характер движения проходческого щита (рис. 6, 7).

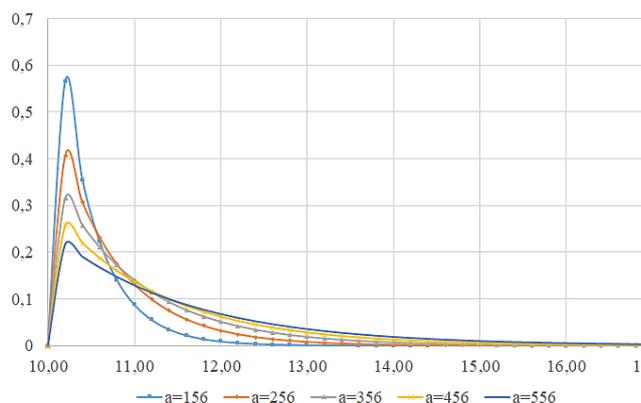


Рис. 6. График изменения угловой скорости при изменении коэффициента учитывающего условия проходки

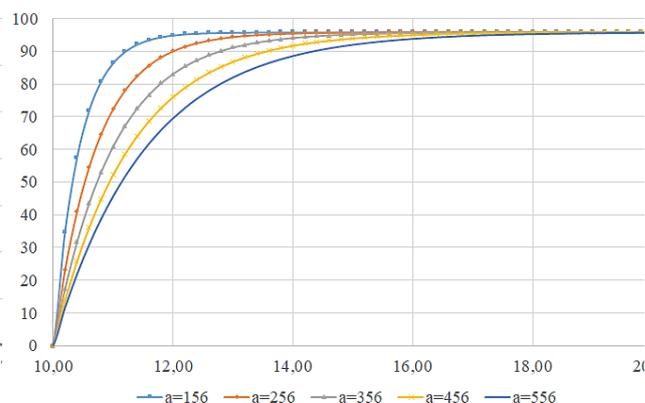


Рис. 7. График изменения координаты ножевой точки при изменении коэффициента учитывающего условия проходки

Анализ полученных графиков показывает, что изменение коэффициента, учитывающего условия проходки щита приводят к изменению скорости поворота ножевой точки проходческого щита на заданное значение. При этом, как видно из графиков, независимо от изменения условий проходки, точность вывода ножевой точки проходческого щита на заданную координату не изменяется.

Таким образом, по результатам исследования численной, компьютерной модели, введение оптимального регулятора в систему управления движением проходческим щитом позволяет многократно повысить точность ведения щита в соответствии с проектным направлением.

Третья глава посвящена разработке методов и алгоритмов управления движением проходческого щита и определения его координат.

Предложен метод и алгоритм формирования комбинации гидроцилиндров перемещения, для ведения проходческого щита в соответствии с проектным направлением. Суть предлагаемого метода заключается в том, что требуемая комбинация гидроцилиндров формируется по величине «пространственного» управляющего сигнала, т.е. сигнала, определенного на основании сигналов управления в вертикальной и горизонтальной плоскостях, полученных в результате исследования численной модели движения проходческого щита.

Формирование необходимой комбинации гидроцилиндров осуществляется по алгоритму, в котором управляющему моменту ставится в соответствие управляющий сигнал на выходе регулятора согласно соотношениям:

$$M_y = \mu_y \cdot U_y, M_z = \mu_z \cdot U_z,$$

где M_y, M_z – проекции главного момента системы сил гидроцилиндров на оси OY и OZ ; μ_y, μ_z – коэффициенты пропорциональности, определяемые

опытным путем. С другой стороны, проекции главного момента: $M_y = b_z \cdot P_x$; $M_z = b_y \cdot P_x$. Проекции b_y , b_z могут определяться через проекции радиус-векторов точек приложения усилий отдельных гидроцилиндров:

$$b_y^* = r \sum_{i=1}^n g_i \sin \xi_i; \quad b_z^* = r \sum_{i=1}^n g_i \cos \xi_i,$$

где r – расстояние от продольной оси щита до линии действия усилий i -го гидроцилиндра, g_i – флаг состояния i -го гидроцилиндра (0 или 1), ξ_i – угол между радиус-вектором i -го гидроцилиндра и осью OZ , n – количество одновременно включенных гидроцилиндров. (рис. 8).

Из вышеуказанных уравнений получим выражения для определения проекции главного момента: $M_y = P_x \cdot r \cdot \sum_{i=1}^n g_i \cos \xi_i$; $M_z = P_x \cdot r \cdot \sum_{i=1}^n g_i \sin \xi_i$. Отсюда видно, что величина моментов M_y и M_z зависит не только от числа включенных гидроцилиндров и величины силы сопротивления, но и от комбинации включенных гидроцилиндров.

Проекции радиус-вектора b определяются как $b_z = \mu_y \cdot U_y / P_x$; $b_y = \frac{\mu_z \cdot U_z}{P_x}$. С другой стороны, каждому значению b_y и b_z соответствует определенная комбинация гидроцилиндров.

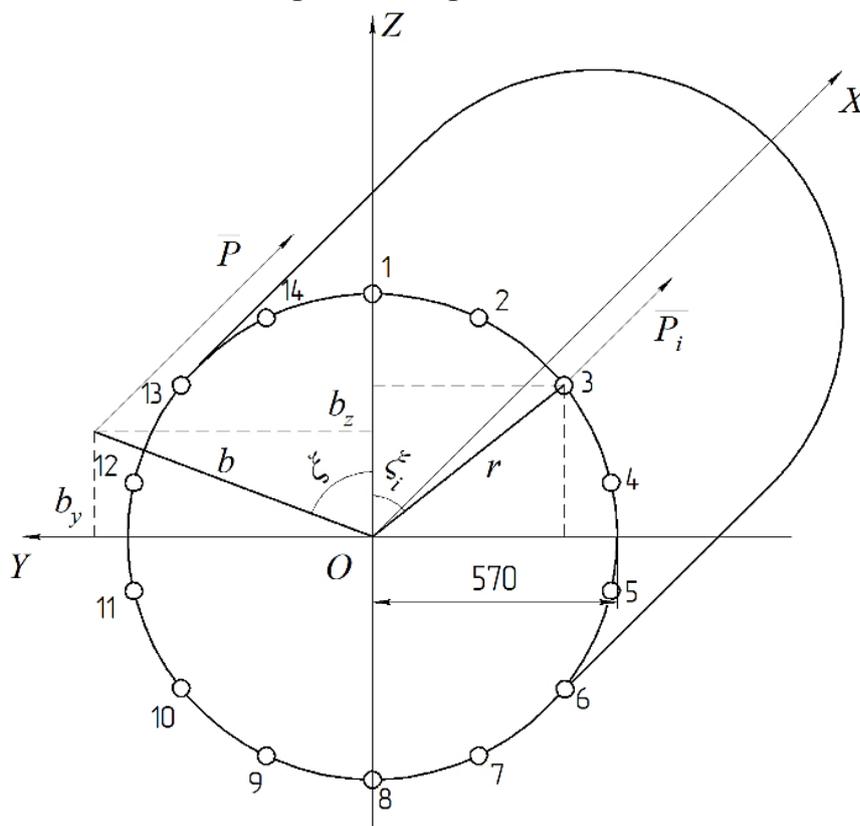


Рис. 8. Расположение гидроцилиндров проходческого щита и направление главного вектора \vec{P} системы сил

При формировании комбинаций гидроцилиндров необходимо также учесть, что минимальное количество гидроцилиндров, необходимых для преодоления сопротивления грунта при продавливании равно 7;

Формирование комбинаций осуществлялось с помощью программного кода, реализованного на языке C++ в среде разработки Microsoft Visual Studio. Суть программы формирования комбинаций гидроцилиндров заключается в формировании бинарной последовательности 0 и 1, которая

реализуется с использованием кода Грея [9, 10]. В результате расчета было получено 898 комбинаций.

В результате расчета получим следующую картину распределения b_y^* и b_z^* (рис. 9). Сравним рассчитанные значения b_y^* и b_z^* b_y и b_z :

$$b_y - b_y^* = \min, \quad b_z - b_z^* = \min.$$

При этом соотношения должны выполняться одновременно:

$$|b_y - b_y^*| + |b_z - b_z^*| = \min.$$

Программа сравнения соотношений реализована на языке C++ и работает следующим образом: входными данными являются величины отклонения ножевой точки щита от проектной оси, которые вводятся оператором, после чего вычисляются необходимые b_y и b_z . Из файла данных, в котором содержатся строки с комбинациями гидроцилиндров и соответствующим им b_y^* и b_z^* в программе формируются массивы чисел, для поэлементного сравнения.

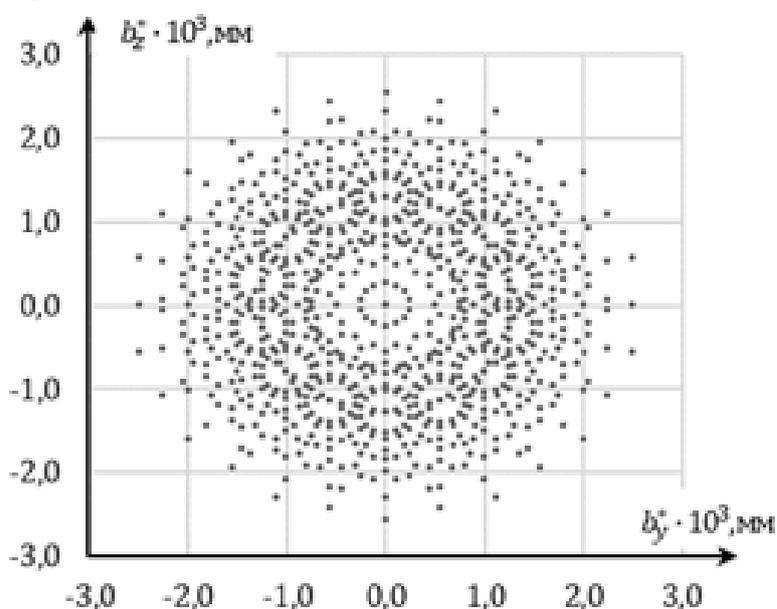


Рис. 9. Распределение b_y^* и b_z^* в соответствии с заданными комбинациями гидроцилиндров

Таблица 1

Заданное значение Y, мм	Заданное значение Z, мм	B _y	B _z	Комбинация ГЦ	B _y комбинации	B _z комбинации	Y фактич.	Z фактич	ΔY абс	ΔZ абс
82	44	786.6	422.08	11111111011011	803.03	386.7	83.71	40.30	1.71	3.692
186	154	1784.3	1477.3	11111110000011	1804.3	1439	188.09	150	2.09	3.997
164	25	1573.2	239.82	11111110110001	1557.1	214.6	162.32	22.37	1.67	2.628
52	56	498.82	537.19	11111110011110	494.64	569.9	51.56	59.41	0.43	3.414
32	89	306.97	853.75	11111100111011	308.39	956.7	32.14	99.72	0.14	10.727
44	100	422.08	959.27	11111110101111	445.62	925.3	46.45	96.46	2.45	3.539
112	45	1074.4	431.67	11111110011010	1050.4	443.1	109.49	46.19	2.50	1.194

21	78	201.45	748.23	11111100111101	198.34	728.1	20.67	75.90	0.32	2.099
74	13	709.86	124.7	11111111011101	692.98	158.1	72.24	16.48	1.76	3.482
135	10	1295	95.92	11111101110001	1309.8	158.2	136.53	16.48	1.53	6.487
Среднее значение отклонения, мм									1.465	4.126

Таким образом, каждому значению координат ставится в соответствие определенная комбинация гидроцилиндров передвижки проходческого щита МТПК, наилучшим образом преобразующая выходной сигнал регулятора в вектор главного момента сил. Используя вышеприведенные формулы и полученные значения b_y и b_z получим значения отклонения Y и Z , после включения соответствующей комбинации гидроцилиндров (табл.1). Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что предложенный алгоритм осуществляет выбор гидроцилиндров таким образом, что фактическое отклонение ножевой точки щита при включении выбранной комбинации гидроцилиндров, в среднем отличается от заданного не более чем на 5 мм.

Разработан метод и алгоритм вычисления координат проходческого щита модульной конструкции и их преобразования в местную систему координат.

Координаты мишени, расположенной в хвостовой части щита определяются по известному углу поворота платформы лазерного приемопередатчика и расстоянию от источника лазерного излучения до мишени.

В плоскости XOY (рисунок 10, б) координаты вычисляются по формулам:

$$x_1 = x_0 + \cos \alpha \cdot r + \sin \gamma \cdot h;$$

$$y_1 = y_0 + \sin \alpha \cdot r - \sin \varphi \cdot h;$$

где α – угол поворота платформы в плоскости XOY , r – расстояние от источника до мишени, γ – угол наклона щита (тангаж), φ – угол крена (рисунок 8, в), определяемый инклинометром, h – расстояние от мишени до центральной оси щита.

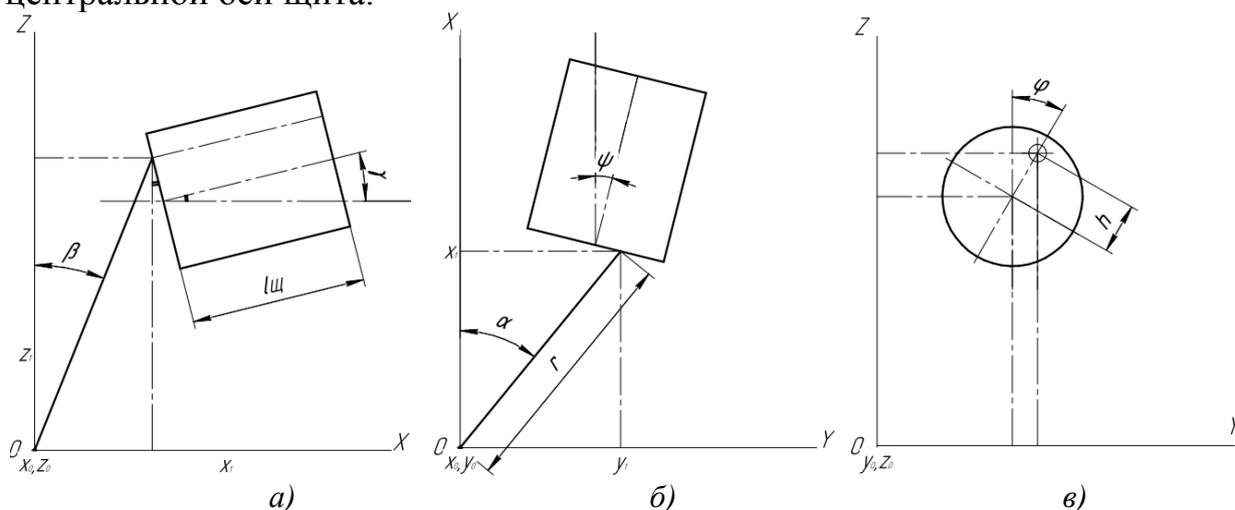


Рис. 10 - Определение координат точек щита

В плоскости XOZ (рисунок 10, а):

$$z_1 = y_0 + \sin \beta \cdot r - \cos \varphi \cdot h - \cos \gamma \cdot h;$$

где β – угол поворота платформы в плоскости XOZ .

Координаты ножевой части щита определяются по найденным координатам хвостовой части и определяемым гироскопом, и инклинометром курсовому углу и углу наклона (тангажа):

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 + \cos \psi \cdot l_{щ}; \\y_2 &= y_1 + \sin \psi \cdot l_{щ}; \\z_2 &= z_1 + \sin \gamma \cdot l_{щ};\end{aligned}$$

где ψ – курсовой угол, $l_{щ}$ – расстояние от хвостовой точки щита до ножевой.

Ввиду того, что изначально координаты опорных точек модулей определяются в локальной системе координат (ЛСК) устройства позиционирования, возникает необходимость преобразования полученных координат в координаты местной системы координат (МСК), принятой на строящемся объекте. При размещении приемо-передатчика в стартовой шахте тоннеля возможны случаи, когда направления осей локальной системы координат не совпадают с направлениями осей МСК, и отличаются на некоторые углы, определяемые МЭМС. Тогда преобразование координат из ЛСК в МСК становится возможным с помощью матриц поворота.

Матрицей поворота (или матрицей направляющих косинусов) называется ортогональная матрица, которая используется для выполнения собственного ортогонального преобразования в евклидовом пространстве. При умножении любого вектора на матрицу поворота длина вектора сохраняется. Определитель матрицы поворота равен единице. Любое вращение в трехмерном пространстве может быть представлено как композиция поворотов вокруг трех ортогональных осей (например, вокруг осей декартовых координат). Этой композиции соответствует матрица, равная произведению соответствующих трех матриц поворота. Матрицами вращения вокруг оси декартовой системы координат на угол α в трёхмерном пространстве вокруг осей X , Y и Z являются матрицы:

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}; M_y = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}; M_z = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где φ , α , β – углы вращения вокруг осей X , Y , Z , соответственно.

Общая матрица поворота получается путем перемножения трех вышеуказанных матриц: $M_{xyz} = M_x \cdot M_y \cdot M_z$.

После перемножения матрица получает следующий вид:

$$M_{xyz} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix},$$

где: $M_{11} = \cos \alpha \cdot \cos \beta$; $M_{12} = -\cos \alpha \cdot \sin \beta$; $M_{13} = \sin \alpha$;

$M_{21} = \sin \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \varphi \cdot \sin \beta$;

$M_{22} = \cos \varphi \cdot \cos \beta - \sin \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta$;

$M_{23} = -\sin \varphi \cdot \cos \alpha$; $M_{31} = \sin \varphi \cdot \sin \beta - \cos \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$;

$M_{32} = \cos \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta + \sin \varphi \cdot \cos \beta$; $M_{33} = \cos \varphi \cdot \cos \alpha$.

Отсюда:

$$X' = \cos \beta \cdot (X \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \cdot (Z \cdot \cos \alpha - Y \cdot \sin \varphi) + \sin \beta \cdot (Y \cdot \cos \varphi + Z \cdot \sin \varphi));$$

$$Y' = -\sin \beta \cdot (X \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \cdot (Z \cdot \cos \alpha - Y \cdot \sin \varphi) + \cos \beta \cdot (Y \cdot \cos \varphi + Z \cdot \sin \varphi));$$

$$Z' = X \cdot \sin \alpha + \cos \alpha \cdot (Z \cdot \cos \varphi - Y \cdot \sin \varphi),$$

где X, Y, Z – координаты точки в ЛСК, X', Y', Z' – координаты в МСК.

Четвертая глава посвящена практической реализации устройства комбинированной системы позиционирования и проведению экспериментальных исследований.

Разработанное устройство представляет собой комбинированную систему, имеющую в своем составе стартовый лазерный приемо-передатчик, находящийся в стартовой шахте, промежуточные модули, которые жестко закрепляются в бетонных кольцах тоннеля при криволинейной проходке, и приемную фотомишень с инерциальной системой определения пространственного положения, расположенную в хвосте каждого из модулей проходческого комплекса. Принцип определения координат хвостовой части щита основан на применении тахеометрического хода, с помощью которого можно определить планово-высотное положение точки в пространстве. Координаты ножевой точки щита определяются путем расчета, на основе данных наклона и поворота щита в пространстве.

Стартовый лазерный приемо-передатчик (ЛПП) (рис. 10, а) состоит из источника лазерного излучения и лазерного дальномера, закрепленных на подвижной платформе. Платформа приводится в движение в вертикальной и горизонтальной плоскостях с помощью двух электроприводов с обратной связью, которая реализована с помощью абсолютных многооборотных энкодеров высокого разрешения, регистрирующих углы поворота платформы в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Аналогичным образом устроен промежуточный модуль, располагаемый в тоннеле при криволинейной проходке.

Приемная фотомишень (рис. 10, б) состоит из фотодиодной матрицы, регистрирующей лазерное излучение, и микроэлектромеханической системы (МЭМС), содержащей гироскоп, инклинометр и магнитометр, с помощью которой определяются углы наклона и поворота щита в пространстве. Взаимодействие модулей устройства позиционирования осуществляется по собственному протоколу на базе проводного интерфейса RS-485, а для обмена информацией с системой управления МТПК используется проводной интерфейс RS-485 ModBus RTU. Фотомишень, располагаемая в первом модуле МТПК, выступает ведомым устройством в сети протокола ModBus RTU (рис. 11). Аппаратная часть системы определения местоположения выполнена на базе 32 разрядного ARM микроконтроллера фирмы STMicroelectronics.

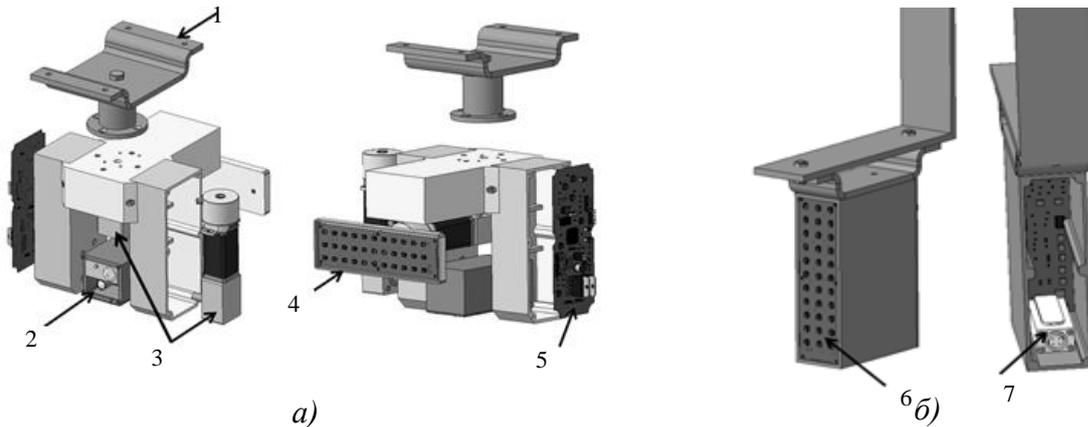


Рис. 10. Комбинированное устройство позиционирования: 1 – крепление; 2 – источник лазерного излучения/лазерный дальномер; 3 – мотор-редуктор с абсолютным энкодером; 4 – приемная фотомишень промежуточного модуля; 5 – плата управления; 6– фотоматрица; 7 – устройство определения пространственного положения



Рис. 11. Расположение модулей устройства позиционирования

Основная задача ведущего устройства – ожидание наличия команд от автоматизированной системы управления МТПК. При отсутствии неисправностей в устройстве позиционирования оператор проходческого щита посредством панели управления вводит координаты базового лазерного приемо-передатчика (установлен в стартовой шахте) и координаты мишени. Затем координаты установленных модулей по интерфейсу RS-485 ModBus RTU передаются в контроллер устройства позиционирования. Данные о координатах сохраняются в энергонезависимую память контроллера, и инициируется режим определения координат хвостовой части щита, в ходе которого лазерный приемо-передатчик целеуказателем позиционируется на центр фотомишени, установленной в хвостовой части проходческого щита. Измеренные значения являются базовыми для расчета координат при движении щита МТПК.

Алгоритм определения координат опорных точек модулей микротоннелепроходческого комплекса включает следующие шаги:

1) стартовый приемо-передатчик устанавливается в стартовой шахте и направляется на приемную фотомишень, установленную в хвосте модуля МТПК;

2) с помощью стороннего устройства (тахеометра) определяются начальные координаты стартового приемо-передатчика и приемной фотомишени в МСК строящегося объекта;

3) координаты приемной фотомишени определяются в ЛСК стартового приемо-передатчика, после чего определяются углы поворота ЛСК приемо-передатчика относительно МСК;

4) по координатам размещения приемной фотомишени в корпусе модуля МТПК и его углам наклона в пространстве рассчитываются координаты хвостовой и ножевой точек модуля проходческого МТПК;

5) полученные координаты в локальной системе координат преобразовываются в координаты в МСК.

После завершения цикла передвижки приемо-передатчиком осуществляется поиск приемной фотомишени путем поворота в вертикальной и горизонтальной плоскостях, на основании известных углов поворота определяются новые координаты приемной фотомишени в ЛСК, определяются координаты хвостовой и ножевой точек модуля и преобразовываются в координаты МСК.

Экспериментальные исследования были проведены в лабораторных и полевых условиях (рис. 12, 13).



Рис. 12. Лабораторные испытания экспериментального образца системы подземной навигации



Рис.13. Экспериментальный образец лазерного приемо-передатчика и приемной фотомишени в процессе полевых испытаний

Испытания устройства показали, что последнее отвечает всем выдвигаемым требованиям: определяет координаты приемной фотомишени с точностью до ± 10 мм, определяет углы наклона проходческого щита в пространстве, позволяет определять координаты проходческого щита при прямолинейной и криволинейной проходке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

На основании теоретических и экспериментальных исследований в диссертации решена актуальная научно-техническая задача разработки комплекса математических моделей, алгоритмов, методик и технических средств, обеспечивающих повышение эффективности позиционирования проходческих щитов малого диаметра, предназначенных для строительства подземных коммуникаций в условиях плотной городской застройки при прямолинейной и криволинейной проходке методом продавливания на основе использования комбинированной системы подземной навигации. В процессе выполнения работы были получены следующие результаты, имеющие как научное, так и практическое значение.

1. В результате анализа существующих технических решений показано, что устройства и технологии, предназначенные для определения координат при строительстве криволинейных тоннелей малого диаметра методом продавливания, не отвечают требованиям, необходимым для успешного определения координат и ведения проходческого щита. Сделан вывод о необходимости разработки комбинированной системы, сочетающей в себе преимущества лазерного метода определения координат и инерциальных методов определения пространственного положения проходческого щита.

2. Разработаны и исследованы математическая и численная модели процесса движения проходческого щита с регулятором, которые позволили установить закономерности и особенности процесса движения проходческого щита при его ведении по заданной траектории с контролем координат продольной оси, углов наклона между осью щита и её проекциями на координатные плоскости.

3. Разработан метод формирования комбинации гидроцилиндров перемещения проходческого щита, формирующий вектор приложения силы, для ведения проходческого щита в соответствии с проектным направлением, основанный на формировании требуемой комбинации гидроцилиндров по величине «пространственного» управляющего сигнала, определяемого по сигналам управления в вертикальной и горизонтальной плоскостях и получаемого путем математического моделирования. Результаты численного моделирования показали, что предложенный метод позволяет формировать комбинации включаемых гидроцилиндров перемещения таким образом, что погрешность отклонения ножевой точки проходческого щита от заданного проектного направления не превышает 5 мм.

4. Разработанный метод определения координат ножевой точки проходческого щита, основанный на вычислении координат хвостовой точки проходческого щита, находящейся в зоне прямой видимости лазерным устройством и возможностью определения углов крена, тангажа и рыскания с помощью микроэлектромеханической системы на основе гироскопа, акселерометра и магнитометра, позволяет определять координаты

проходческого щита при криволинейной проходке, а также повысить точность позиционирования.

5. Предложена методика преобразования локальной системы координат проходческого щита в местную систему координат.

6. Разработаны алгоритмы функционирования устройства в целом и ее компонентов в частности. Разработано программное обеспечение микроконтроллеров, входящих в устройство и обеспечивающее работу в соответствии с заданным алгоритмом в составе системы управления МТПК.

6. В соответствии с результатами, полученными в ходе теоретических исследований, был разработан экспериментальный образец устройства, позволивший провести лабораторные и полевые исследования. В результате испытаний установлено, что разработанное устройство отвечает всем предъявляемым требованиям в отношении точности определения координат и может быть применено для позиционирования проходческого щита модульной конструкции при строительстве криволинейных тоннелей малого диаметра методом продавливания с требуемой точностью, а также обмениваться информацией с другим оборудованием, входящим в состав системы управления тоннелепроходческим комплексом.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные научные результаты отражены:

В работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях (ВАК)

1. Анализ систем позиционирования микротоннелепроходческих комплексов / А. В. Батюков, А. А. Гуммель, В. С. Пузин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2019. – № 2(202). – С. 26-36. – DOI 10.17213/0321-2653-2019-2-26-36.

2. Математическая модель пространственного движения проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса / А. В. Батюков, А. А. Гуммель, Н. А. Глебов, М. А. Земляной // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. – № 4(200). – С. 72-78. – DOI 10.17213/0321-2653-2018-4-72-78.

3. Численное моделирование процесса движения щита микротоннелепроходческого комплекса / А. В. Батюков, Н. А. Глебов, А. В. Павленко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2019. – № 4(204). – С. 44-50. – DOI 10.17213/0321-2653-2019-4-44-50.

4. Программное обеспечение верхнего уровня вычислительной системы мобильного диспетчерского пункта микротоннелепроходческого комплекса / М. Б. Хорошко, А. А. Гуммель, А. В. Батюков [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2020. – № 2(206). – С. 41-47. – DOI 10.17213/1560-3644-2020-2-41-47.

5. Моделирование процесса управления движением проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса / А. В. Батюков, Н. А. Глебов, А. В. Павленко [и др.] // Известия высших учебных заведений.

Электромеханика. – 2020. – Т. 63, № 5. – С. 55-60. – DOI 10.17213/0136-3360-2020-5-55-60

6. Батюков, А. В. Комбинированное устройство позиционирования для системы управления микротоннелепроходческим комплексом / А. В. Батюков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – Т. 64, № 2. – С. 65-70. – DOI 10.17213/0136-3360-2021-2-65-70.

7. Батюков, А. В. Разработка и экспериментальное исследование комбинированного устройства позиционирования для системы управления микротоннелепроходческим комплексом / А. В. Батюков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2022. – № 3(215). – С. 57-63. – DOI 10.17213/1560-3644-2022-3-57-63

Патентах и свидетельствах о регистрации программ:

8. Патент №2733256 С1 Российская Федерация, МПК E21D 9/02, E21C 35/08. Система позиционирования проходческого комплекса в пространстве : № 2019140622 : заявл. 10.12.2019 : опубл. 30.09.2020, Бюл. № 28 / Батюков А. В., Павленко А. В., Гуммель А. А., Живодерников А. В., Земляной М. А. ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью проектно-строительная компания "Гидрострой".

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020619901 Российская Федерация. Программа сенсорных панелей СП310-Р, СП315-Р аппаратуры сигнализации и управления микротоннелепроходческого комплекса : № 2020617963 : заявл. 24.07.2020 : опубл. 25.08.2020, Бюл. № 9 / Батюков А. В., Павленко А. В., Гуммель А. А., Живодерников А. В., Земляной М. А. ; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью проектно-строительная компания "Гидрострой".

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023616826 Российская Федерация. Программа микроконтроллера системы позиционирования проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса : № 2023615478 : заявл. 22.03.2023 : опубл. 03.04.2023, Бюл. № 4 / Батюков. А. В.

Публикациях в других изданиях:

11. Система позиционирования микротоннелепроходческого комплекса / А. А. Гуммель, А. В. Батюков, А. С. Косарев, М. А. Земляной // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов ХLI международной научно-технической конференции, 15-17 октября 2019 года, г. Новочеркасск / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2020. – С. 350-355

12. Батюков, А. В. Системы позиционирования микротоннелепроходческих комплексов. Обзор и анализ технических решений / А. В. Батюков, В. В. Медведев // Студенческая научная весна-2019 : материалы региональной научно-технической конференции (конкурса научно-технических работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ростовской области / Министерство науки и высшего образования

Российской Федерации, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. – Новочеркасск : ЮРГТУ (НПИ), 2019. – С. 169-170

13. Батюков, А. В. Способ автоматизированного управления проходческим щитом микротоннелепроходческого комплекса и прогнозирование траектории движения / А. В. Батюков, А. А. Гуммель, В. С. Пузин // Кибернетика энергетических систем : сборник материалов XLII Международной научно-технической конференции, 24-26 ноября 2020 года, г. Новочеркасск / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова ; редакционная коллегия: А. С. Засыпкин - ответственный редактор [и др.]. – Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2020. – С. 343-346

14. Алгоритм работы системы позиционирования проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса / А. В. Живодерников, А. В. Батюков, Д. А. Щучкин, И. А. Большенко // Кибернетика энергетических систем : сборник материалов XLII Международной научно-технической конференции, 24-26 ноября 2020 года, г. Новочеркасск / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова ; редакционная коллегия: А. С. Засыпкин - ответственный редактор [и др.]. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2020. – С. 339-342

15. Система управления микротоннелепроходческим комплексом / А. В. Живодерников, А. В. Батюков, А. А. Гуммель, А. С. Косарев // Кибернетика энергетических систем : сборник материалов XLIII международной научно-технической конференции, 19-22 октября 2021 года, Новочеркасск / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южно-Российский государственный политехнический университет имени М. И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ). – С. 410-413. – Режим для доступа: <https://clck.ru/36sr7k> (дата обращения 01.12.2023)

16. Батищев, Д. В. Система позиционирования проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса / Д. В. Батищев, А. В. Батюков, А. А. Авакян // Студенческая научная весна - 2020: материалы региональной научно-технической конференции (конкурса научно-технических работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ростовской области, г. Новочеркасск, 13-14 мая 2020 г. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2020. – С. 59-60

17. Батюков, А. В. Способ определения пространственного положения проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса / А. В. Батюков // Студенческая научная весна - 2021: материалы региональной научно-технической конференции (конкурса научно-технических работ) студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Ростовской области, г. Новочеркасск, 13-14 мая 2021 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2021. – С. 77-78.

Вклад автора в результаты работ, опубликованных в соавторстве, состоит в участии в анализе научно-технической литературы [1, 2, 12], разработке численных моделей [3, 5], методов и алгоритмов [6, 9, 10, 14, 15, 17], разработке конструктивных решений [7, 8, 11, 12, 16], проведении экспериментальных исследований [4, 13].

БАТЮКОВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

**УСТРОЙСТВО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ТОННЕЛЕПРОХОДЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ
ОСВОЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРОДОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук