

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НПИ) ИМЕНИ М.И. ПЛАТОВА»
(ФГБОУ ВО «ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова», ЮРГПУ(НПИ))

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор А.В. Павленко

Новочеркасск – 2023 г.

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Обзор и анализ устройств и методов определения координат проходческих щитов. Исследование существующих технических решений в области подземной навигации проходческих щитов при проходке криволинейных тоннелей.	12
1.1 Спутниковые навигационные устройства позиционирования	12
1.2 Лазерные и оптические устройства позиционирования	13
1.3 Тахеометрические навигационные устройства позиционирования	20
1.4 Инерциальные навигационные устройства позиционирования	24
1.5 Выводы по главе 1	27
2 Разработка математической и численной моделей процесса движения проходческого щита при работе системы управления совместно с устройством навигации.....	30
2.1 Разработка математической модели процесса движения проходческого щита	30
2.2 Разработка численной модели процесса движения проходческого щита	39
2.2.1 Обзор существующих программно-аппаратных средств для численного моделирования динамических процессов	39
2.2.2 Синтез наблюдающего устройства	42
2.2.3 Синтез системы автоматического управления движением щита тоннелепроходческого комплекса	45

2.2.4	Численное моделирование процесса движения проходческого щита МТПК	48
2.3	Результаты и выводы по главе 2	53
3	Разработка методов и алгоритмов управления движением проходческого щита	55
3.1	Разработка метода определения комбинации гидроцилиндров перемещения проходческого щита.....	61
3.2	Программная реализация метода формирования комбинации гидроцилиндров перемещения проходческого щита	63
3.3	Разработка алгоритмов вычисления координат проходческого щита модульной конструкции для устройства позиционирования	66
3.3.1	Расчет координат проходческого щита	66
3.3.2	Разработка методики преобразования координат	67
3.4	Результаты и выводы по главе 3	70
4	Разработка экспериментального образца устройства позиционирования. Экспериментальные исследования	72
4.1	Структура экспериментального образца устройства позиционирования. Выбор и расчет компонентной базы	72
4.1.1	Расчеты, подтверждающие адекватность выбора компонентов устройства позиционирования.....	77
4.2	Разработка программного обеспечения устройства позиционирования	83
4.2.1	Описание программного обеспечения устройства позиционирования.....	83
4.2.2	Порядок работы программного обеспечения СП ПЩ МТПК....	85
4.3	Порядок работы устройства позиционирования в составе системы управления микротоннелепроходческим комплексом.....	88

4.4	Экспериментальное исследование устройства позиционирования	91
4.4.1	Лабораторные исследования устройства позиционирования	91
4.4.2	Экспериментальные полевые исследования устройства позиционирования	96
4.5	Результаты и выводы по главе 4	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		98
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....		101
ПРИЛОЖЕНИЕ А		107
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....		112
1.	Разработка электрических принципиальных схем устройства позиционирования.....	112
1.1.	Обоснование выбора функциональных элементов устройства позиционирования.....	112
1.2.	Разработка электрических принципиальных схем устройства позиционирования.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ В		118
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....		128
ПРИЛОЖЕНИЕ Д		131
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....		133
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж		136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. 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 – устройств позиционирования.

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. Протодяконов, 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 устройств 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 адекватных приборов, позволяющих определять координаты проходческих щитов модульной конструкции малого диаметра, совмещающих в себе малые габариты, возможность использования при строительстве криволинейных тоннелей методом продавливания, что подтверждает актуальность темы исследований.

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

Предмет исследования: Подземная навигация тоннелепроходческого комплекса.

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

Задачи, решаемые в диссертации:

1. Обзор и анализ устройств и методов подземной навигации проходческих щитов. Исследование существующих технических решений в области подземной навигации проходческих щитов. Постановка задачи исследований.

2. Разработка математической и численной модели процесса движения проходческого щита МТПК.

3. Разработка метода определения комбинации гидроцилиндров перемещения проходческого щита МТПК.

4. Разработка алгоритмов вычисления координат проходческого щита модульной конструкции и методики их преобразования в местную систему координат.

5. Разработка экспериментального образца устройства позиционирования. Разработка структурно-функциональной схемы устройства. Выбор основных схмотехнических решений. Разработка программного обеспечения.

6. Экспериментальное исследование возможности применения разработанного устройства позиционирования в проходческих щитах малого диаметра.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использованы методы мехатроники и робототехники, математического и численного моделирования, аналитической геометрии, кинематического анализа и прикладного программирования. Аналитические исследования проведены 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, µVision IDE – Keil.

Научная новизна:

1. Предложена новая методика определения координат ножевой точки проходческого щита модульной конструкции, основанная на определении

координат хвостовой точки проходческого щита модульной конструкции, находящейся в зоне прямой видимости с помощью лазерного устройства, позволяющего регистрировать координаты хвостовой точки методом тахеометрического хода, отличающаяся возможностью определения углов крена, тангажа и рыскания путем применения микроэлектромеханической системы на основе гироскопа, акселерометра и магнитометра.

2. Разработана математическая и численная компьютерная модели движения проходческого щита тоннелепроходческого комплекса, отличающиеся от известных тем, что для определения пространственного положения щита относительно базового направления движения и ведения его по заданной траектории, контролируются координаты двух точек продольной оси щита или координаты одной точки оси и углы наклона между осью щита и её проекциями на координатные плоскости.

3. Разработан метод определения комбинации гидроцилиндров перемещения для ведения проходческого щита в соответствии с проектным направлением, который отличается от известных тем, что требуемая комбинация гидроцилиндров формируется по величине «пространственного» управляющего сигнала, определяемого по сигналам управления в вертикальной и горизонтальной плоскостях, получаемым путем математического моделирования.

4. Предложены новые алгоритмы вычисления координат проходческого щита модульной конструкции и методика их преобразования в местную систему координат путем применения матриц поворота.

Обоснование и достоверность результатов. Достоверность результатов подтверждается корректностью допущений, принимаемых при выведении формул и разработке моделей и алгоритмов, применением традиционных принципов методологии современной науки для выполнения исследований, использованием поверенного оборудования при проведении экспериментов, экспериментальными исследованиями экспериментального образца системы подземной навигации в лабораторных и полевых условиях.

Теоретическая значимость работы.

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

Предложена новая методика определения координат ножевой точки проходческого щита модульной конструкции, основанная на определении координат хвостовой точки проходческого щита модульной конструкции, находящейся в зоне прямой видимости с помощью лазерного устройства с возможностью определения углов крена, тангажа и рыскания путем применения микроэлектромеханической системы на основе гироскопа, акселерометра и магнитометра. Предложена методика преобразования координат из локальной системы координат в местную систему координат.

Практическая значимость. Предложена новая конструкция комбинированной устройства, объединяющая в себе лазерный и инерциальный метод на основе микроэлектромеханических устройств. Разработан метод определения комбинации гидроцилиндров перемещения проходческого щита для его ведения в соответствии с проектным направлением. Практическая значимость заключается в создании новых алгоритмов работы устройства позиционирования, в том числе в передаче информации и взаимодействии с системой управления МТПК, практической реализации устройства позиционирования.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов подтверждается корректностью используемых допущений при разработке математических и компьютерных моделей, экспериментальными исследованиями экспериментального образца системы подземной навигации в лабораторных и полевых условиях.

Реализация работы. Теоретические и практические результаты работы использовались при разработке устройства позиционирования для автоматизированной системы управления мехатронным

тоннелепроходческим комплексом в НИИ Электромеханики и кафедре «Электромеханика и электрические аппараты» ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова при выполнении ряда проектов:

1. Проект в рамках постановления правительства 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 устройства 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».

Результаты, выносимые на защиту.

1. Математическая и численная компьютерная модели процесса движения проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса, алгоритм выбора комбинации гидроцилиндров перемещения проходческого щита, позволяющий с высокой точностью обеспечить ведение проходческого щита в соответствии с проектным направлением.

2. Методика определения координат ножевой точки проходческого щита модульной конструкции, основанная на вычислении координат хвостовой

точки проходческого щита модульной конструкции, 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, позволяющая повысить точность позиционирования.

3. Метод определения комбинации гидроцилиндров перемещения, для ведения проходческого щита в соответствии с проектным направлением.

4. Структура комбинированного устройства позиционирования, включающая лазерный приемо-передатчик и приемную фотопленку с микроэлектромеханической системой определения пространственного положения.

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

Публикации: По теме работы опубликовано 14 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 137 страницы, включая 27 страницы приложений и 68 иллюстраций.

1 Обзор и анализ устройств и методов определения координат проходческих щитов. Исследование существующих технических решений в области подземной навигации проходческих щитов при проходке криволинейных тоннелей.

Известно несколько типов устройств позиционирования щита МТПК, которые различны по способу определения местоположения проходческого щита: спутниковые навигационные системы, системы навигации на основе лазеров (в том числе оптические), тахеометров и инерциальные навигационные системы.

1.1 Спутниковые навигационные устройства позиционирования

Способ, основанный на применении GNSS устройств позиционирования для контроля местоположения в подземном пространстве проходческого щита, заключается в использовании ретрансляторов низкой частоты, которые располагаются на поверхности земли по трассе возведения тоннеля, коллектора. Определение координат объекта производится методом радиопеленгации источника электромагнитного излучения (эмиттера) закрепленного на проходческом щите.

В открытых источниках известна система подземного позиционирования UGPS (Under Ground Positioning System) производства Швейцарии [1]. Она состоит из 4-х приемников, располагаемых на поверхности, переносного передатчика-эмиттера, расположенного на корпусе проходческого щита, блока управления, компьютера со специализированным программным обеспечением (рисунок 1.1). Приемники устанавливаются на дневной поверхности по трассе возведения тоннеля, коллектора в фиксированных точках с известными геодезическими координатами. С помощью радиосвязи обеспечивается взаимодействие между приемниками, передатчиком-эмиттером и компьютером, визуализирующем сигнал из-под земли на экране.



Рисунок 1.1 - Общий вид системы UGPS

Передатчик-эмиттер, находящийся в тоннеле, излучает сигнал, улавливаемый приемниками, после чего компьютер определяет его точное местоположение в пространстве. Такой метод позволяет отслеживать движущийся под землей проходческий щит на площади 300х300 м без переустановки приемников. Глубина измерения данной системой – до 200 м. Точность измерения до 10 см на каждые 100 м глубины.

Во всем мире насчитывается более 70 компаний, производящих GNSS (Global Navigation Satellite System) - оборудование геодезического класса. На сегодняшний день в России наиболее широко представлены следующие фирмы-производители аппаратуры геодезического класса [2]: Javad, Leica Geosystems, NavCom Technology Inc., NovAtel, Septentrio, Topcon-Sokkia, Trimble Navigation.

Недостатки спутниковой навигационной устройства позиционирования: передатчик имеет сравнительно громоздкие размеры 25х45 см и вес 8кг, это усложняет его размещение в корпусе проходческого щита малого диаметра.

1.2 Лазерные и оптические устройства позиционирования

Способ определения координат с помощью лазерных устройств позиционирования заключается в следующем.

Источник лазерного излучения формирует лазерный луч, направленный вдоль проектной оси тоннеля на приемную мишень, расположенную в хвостовой части проходческого щита. Приемная мишень представляет собой матрицу из

фоточувствительных элементов. Попадание лазерного луча на фотэлемент регистрируется микроконтроллером, вследствие чего осуществляется вычисление отклонения координат щита относительно проектного положения.

Известно устройство фирмы VMT GmbH GB «SLS Microtunnelling L» [3] (предназначено для проходки прямых тоннелей небольшой длины), которое определяет вертикальное и горизонтальное положение (наклон и крен) машины, используя лазерный луч, направленный на мишень (рисунок 1.2).

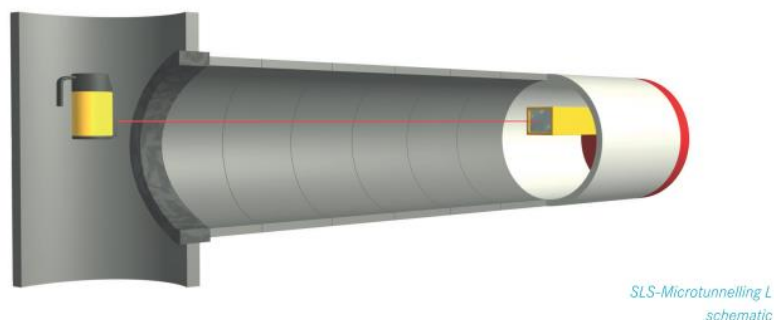


Рисунок 1.2 - Устройство системы SLS-Microtunnelling L

Фирмой Herrenknecht (Германия) разработана система навигации «ELS» (Electronic Laser System) (рисунок 1.3) [4].

Лазер, неподвижно установленный в стартовой шахте, нацелен на электронную мишень «ELS Target», смонтированную внутри щита. Для обработки сигналов электронной мишени и визуализации данных о положении щита используется промышленный компьютер.

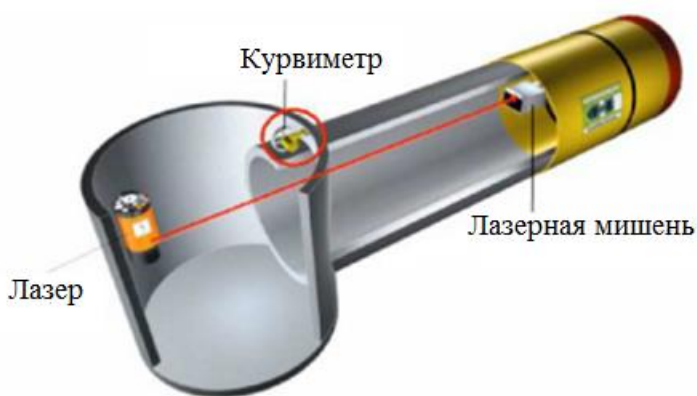


Рисунок 1.3 - Устройство системы «ELS»

Откалиброванное оборудование генерирует лазерный луч, в направлении оси возводимого тоннеля. Точка попадания лазерного луча на поверхность мишени определяется при помощи электроники и передается по каналам передачи данных на

компьютер в пульте управления. Там данные этих измерений представляются на мониторе в графическом и цифровом форматах.

Для измерения расстояния до мишени проходческого щита используется курвиметр, закрепленный в стартовом котловане, данные о количестве оборотов и угловом положении которого передаются в промышленный компьютер лазерной устройства позиционирования.

В состав устройства позиционирования входят следующие компоненты: курвиметр с датчиком угловых перемещений, лазер, лазерная мишень, компьютер с монитором, принтер, кабель для передачи данных.

Для увеличения дальности проходки прямолинейных участков длиной до 400 метров применяется система ELS-HWL - электронная лазерная система с гидростатическим водяным уровнем (рисунок 1.4). Применение гидростатического водяного уровня позволяет снизить влияние рефракции лазерного луча вследствие перепада температур по длине тоннеля и тем самым достичь приемлемой точности на большем расстоянии проходки.

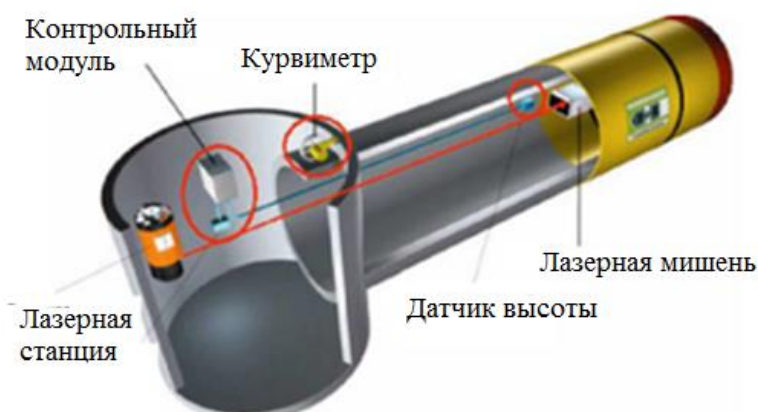


Рисунок 1.4 – Устройство системы «ELS-HWL» с электронным уровнем

Система оптической навигации PERFORCAM-10” OSD OEN [5] предназначена для управления пилотным бурением и включает в себя следующие части (рисунок 1.5): 1- диодная мишень PERFORLUX; 2-камера; 3- монитор; 4 -соединительные кабели.

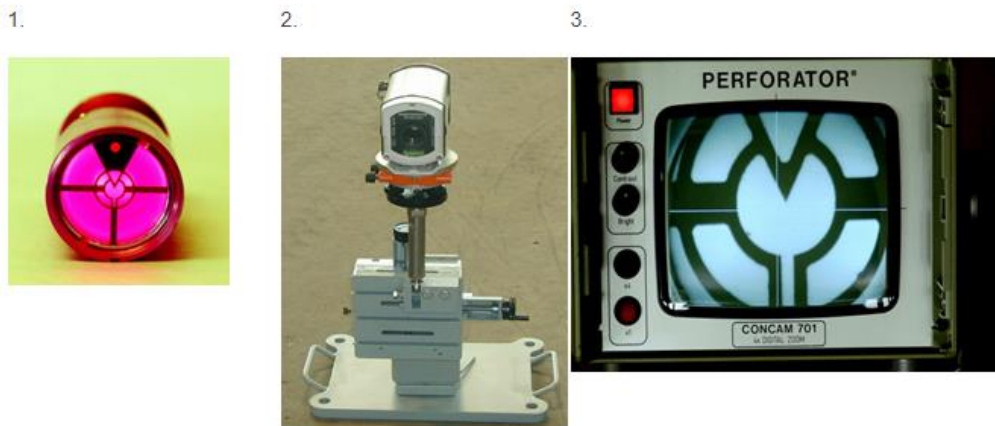


Рисунок 1.5 - Основные части системы PERFORCAM-10”

Камера располагается в задней части стартового котлована и передает изображение диодной мишени по оптическому каналу на монитор. Таким образом, у оператора имеется возможность сразу исправлять возможное отклонение пилотной буровой головки от заданной траектории. Поскольку камера соединена с оптической системой, то с увеличением расстояния изображение на мониторе становится меньше. Однако монитор дополнительно оснащен электронным масштабированием, что позволяет достигать при пилотном бурении длины в 150 м. Точность навигационной системы составляет ± 15 мм на 100 м.

Известное по патенту RU № 2197616 [6] устройство предназначено для автоматического контроля положения проходческих комплексов, применяемых при строительстве тоннелей и коллекторов. Изобретение включает в себя задатчик направления проходки и визирную цель – видеодатчик. При этом, задатчик направления проходки выполнен в виде теодолита, а визирная цель представляет собой линейку фоточувствительных элементов, размещенных в хвостовой части щита проходческого комплекса в плоскости, перпендикулярной его продольной оси и симметрично относительно этой оси. При этом, в исходном положении, оптическая ось видеодатчика проходческого комплекса коллинеарна с осью визирной цели. Проектное направление проходки задают с помощью теодолита.

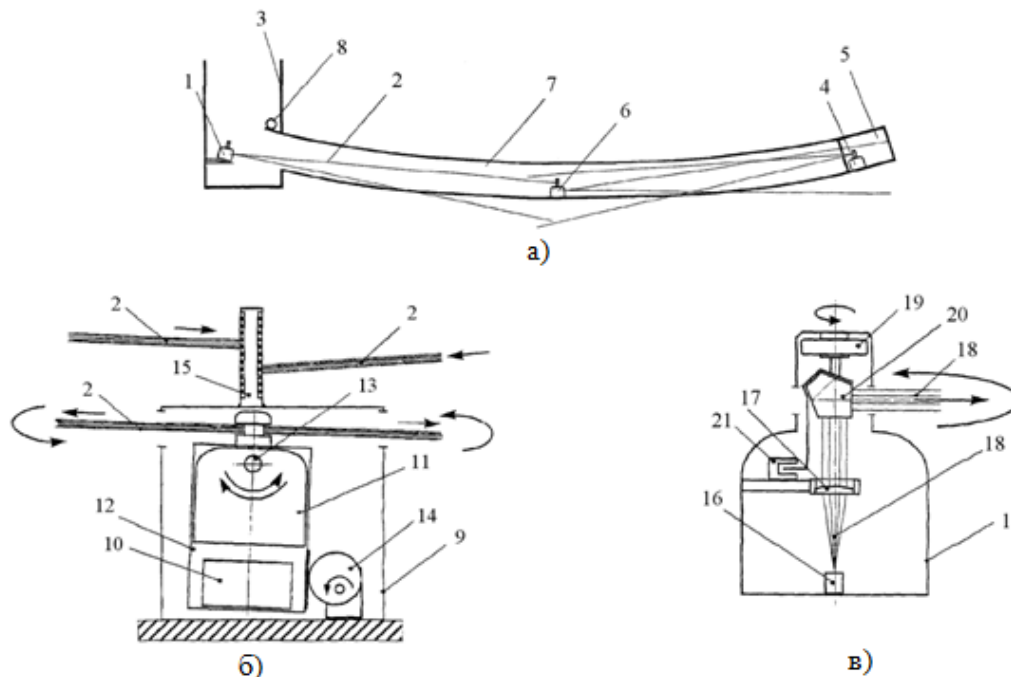
При продвижении головной части щита методом продавливания крепи вероятны боковые, вертикальные, скручивающие или комбинированные отклонения ее от заданной трассы. В результате этих отклонений происходит смещение визирной цели от исходного положения. Величина и характер этих отклонений фиксируются

матрицей видеодатчика, сигналы с которого поступают в автоматизированную систему для последующей обработки, и выдачи на монитор оператору полученных данных, который после чего осуществляет действия по дальнейшей работе проходческого комплекса. Описанное устройство автоматического контроля положения проходческого комплекса может быть применено при строительстве прямолинейных тоннелей и коллекторов.

Недостатки указанных лазерных и оптических устройств позиционирования: отсутствие возможности высокоточного определения геодезических координат проходческого щита при возведении тоннеля по криволинейной траектории.

Еще одним устройством, представляющим интерес, является разработка ООО «Альянс-К» (Российская Федерация) [7]. Данное изобретение предназначено для определения ориентации проходческого комплекса при строительстве криволинейных тоннелей (рисунок 1.6).

Устройство содержит источник опорного лазерного излучения, установленный в стартовой шахте, лазерную мишень, установленную на проходческом щите, промежуточные лазерные модули, установленные на расстоянии друг от друга в пределах обеспечения прямой видимости в возведенной части тоннеля, измеритель длины проходки и каналы передачи данных между блоками системы управления устройством и компьютером с монитором. При этом источник опорного лазерного излучения, лазерная мишень и промежуточные лазерные модули выполнены в виде унифицированных модулей, каждый из которых содержит размещенные на общей платформе двухкоординатный инклинометр, лазерный ротационный нивелир и регистратор лазерного излучения, при этом платформа выполнена с возможностью колебательного движения вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной оси тоннеля.



1 – источник опорного лазерного излучения; 2 – лазерное излучение; 3 – стартовая шахта; 4 – лазерная мишень; 5 – проходческий комплекс; 6 – промежуточный лазерный модуль; 7 – возведенная часть тоннеля; 8 – измеритель длины проходки; 9 – унифицированный модуль; 10 – двухкоординатный инклинометр; 11 – лазерный ротационный нивелир; 12 – платформа; 13 – горизонтальная ось; 14 – привод качания; 15 – регистратор лазерного излучения; 16 – лазер; 17 – линза; 18 – лазерный луч; 19 – двигатель; 20 – призма; 21 – датчик фазы вращения двигателя

Рисунок 1.6 – Иллюстрации к патенту RU № 2385418

Также известно изобретение патент №2405937 [8], в котором описана система контроля положения и управлением движением минищита для строительства минитоннелей.

В задачи системы входит контроль положения минищита относительно проектного направления движения, опрос датчиков состояния технологического оборудования, предварительная обработка полученных данных и обмен информацией с ЭВМ оператора по лазерным каналам передачи информации.

Система представляет собой 2 модуля (рисунок 1.7), предназначенных для монтажа в стартовом котловане (аппаратура оператора) и в минищите (аппаратура минищита).



Рисунок 1.7 – Структурная схема системы контроля положения проходческого щита

В состав аппаратуры оператора входят:

- Пульт управления, являющийся основным узлом обработки информации процесса строительства тоннеля;
- Микроконтроллер, собирающий информацию с установленных в котловане датчиков, формирующих локальные команды управления аппаратурой оператора и обменивающийся информацией с пультом управления;
- блок управления лазером, лазер и модулятор, передающая антенна и отклоняющая оптика (задают режим полупроводникового лазера, формируют его направленное излучение с требуемым диаметром луча);
- приемная антенна, фотодетектор, усилитель, дифференциатор, фильтр и пороговое устройство, позволяющие осуществить фокусировку лазерного излучения, поступающего по обратному каналу связи на фотодетектор, провести его детектирование, усиление, фильтрацию и восстановление первоначальной формы сигнала для последующей его передачи через интерфейс, выполняющий согласование уровней логических сигналов в вычислительное устройство.

В состав аппаратуры минищита входят:

- две фотоматрицы, содержащие набор фотодетекторов, с помощью которых осуществляется регистрация лазерного излучения прямого канала;

- блоки сопряжения 1 и 2, предназначенные для коммутации ячеек фотоматриц на усилитель, дифференциатор, фильтр и пороговое устройство для усиления регистрируемого фотодетекторами сигнала и восстановления его формы;

- микроконтроллер, предназначенный для управления работой входящих в состав аппаратуры минищита блоков в соответствии с требуемым алгоритмом; выполняет сканирование фотоматриц для определения координат засвеченных лазерным излучением прямого канала фотодетекторов, рассчитывает координаты центра луча в локальной системе координат, обменивается информацией с локальной системой управления работой оборудования минищита, принимает, декодирует и исполняет команды управления, передаваемые с пульта оператора посредством лазерного излучения прямого канала, осуществляет передачу посредством блока управления лазером, лазера, модулятора и передающей антенны служебной информации на пульт управления.

Недостатки устройства определения ориентации проходческого комплекса при строительстве криволинейных тоннелей. Отсутствует возможность применения указанного устройства на проходческом щите, состоящего из нескольких модулей. Отсутствует возможность применения указанного устройства для обоснования расчетной траектории выведения модульного щита МТПК на заданную ось, отсутствует определение геодезических координат нож-хвост модульного проходческого щита, а также его крена и деферента.

1.3 Тахеометрические навигационные устройства позиционирования

В тахеометрических (призменных) навигационных системах позиционирования для определения положения проходческого щита используется тахеометр, который измеряет координаты нескольких призм, жестко закрепленных на щите. Крен и продольный уклон могут как вычисляться по координатам призм, так и измеряться электронным инклинометром [9].

Координаты призм вычисляются геодезическими методами вычисления координат: тригонометрическим нивелированием и полигонометрией.

К подземным навигационным устройствам позиционирования на основе тахеометров относятся модели «SN-Pi», «SN-PA», «SN-PAi» российской компании «Навигатор», система «ACS II» фирмы TACS GmbH (Германия), система SLS Microtunnelling LT фирмы VMT (Германия).

В состав систем «SN-PA» входят тахеометр фирмы Leica TCA 1203, промышленный компьютер, проводная связь между тахеометром и компьютером, 3 призмы в корпусе (рисунок 1.8, 1.9).

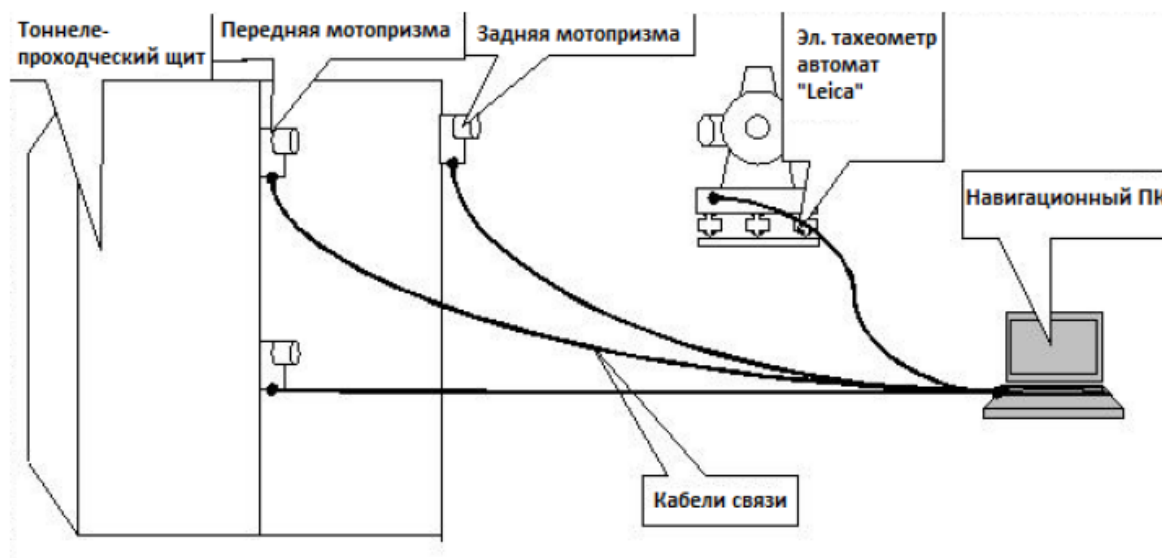


Рисунок 1.8 – Устройство навигационной системы SN-PA

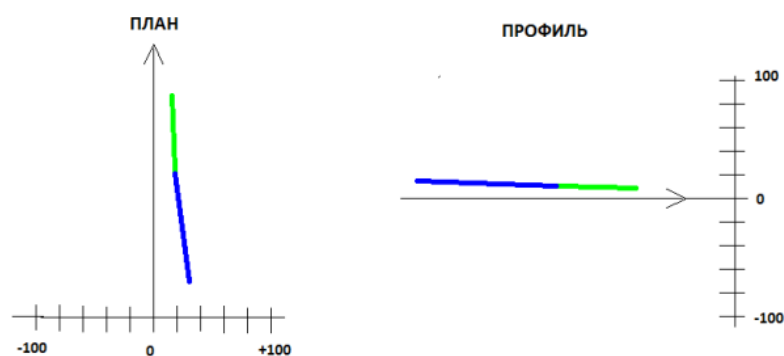


Рисунок 1.9 - Определение положения проходческого щита с помощью навигационной системы SN-PA

В системе «SN-Pi» позиция проходческого щита определяется после введения координат 2-х призм, закрепленных в задней части щита. Крен и продольный уклон автоматически измеряются с помощью электронного инклинометра.

В системе «SN-PA» во время проходки производятся непрерывные автоматические замеры с помощью тахеометра. Актуальные координаты (в том числе

продольный уклон и крен) щита определяются после определения координат 3-х призм, закрепленных в его хвостовой части.

Система «SN-PAi» определяет координаты проходческого щита тахеометром в автоматическом режиме по двум мотопризмам, закрепленным на щите. Крен и продольный уклон автоматически измеряется электронным инклинометром.

Недостатком вышеприведенных тахеометрических устройств позиционирования является отсутствие возможности их применения при строительстве тоннелей малого диаметра (от 360 – 1400 мм), а также криволинейных тоннелей, коллекторов, высокая трудоемкость работ, наличие высококвалифицированного персонала. Кроме того, существует необходимость калибровки тахеометра и призм после каждого перемещения тоннельной крепи и проходческого щита МТПК.

Система «SLS-Microtunneling LT» разработана для проходки длинных криволинейных участков трасс. Она состоит из автоматического тахеометра VMC Leica TCA 1203plus, имеющего встроенный лазер, который монтируется внутри тоннеля и движется вместе с трубопроводом, а также сенсорной системы, с помощью которой автоматически настраиваются призмы [10]. Координаты тахеометра непрерывно вычисляются по известным координатам секций тоннельной крепи (рисунок 1.10).

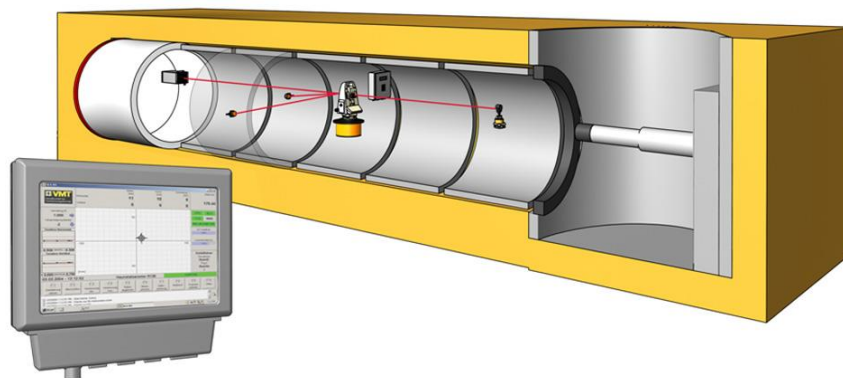
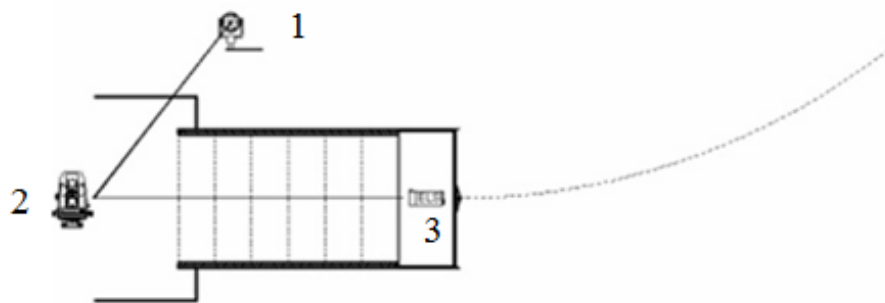


Рисунок 1.10 – Устройство системы «SLS Microtunnelling LT»

В начальной стадии, когда мишень находится в прямой видимости тахеометра, система монтируется в стартовой шахте тоннеля. Для получения координат в глобальной системе отсчета устанавливается опорная призма с известными координатами (рисунок 1.11).



1-Опорная призма; 2 – Тахеометр; 3- Мишень

Рисунок 1.11 – Установка системы в начальной фазе

По мере продвижения проходческого щита мишень покидает зону прямой видимости тахеометра. Для продолжения определения координат, тахеометр устанавливается внутри тоннеля с помощью кронштейна с автоматическим трегером (используется для горизонтирования тахеометра) и инклинометром. Любые отклонения, вызванные вращением трубопровода, фиксируются инклинометром, расположенным на тахеометре, и учитываются при вычислении координат (рисунок 1.12).

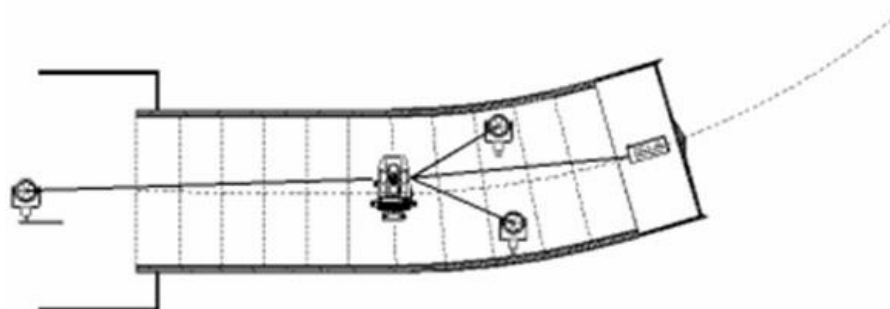


Рисунок 1.12 – Определение координат в криволинейном тоннеле

Перед тахеометром с помощью кронштейнов закрепляются две контрольные призмы. Они предназначены для определения фактического положения продвигающегося тоннеля перед тахеометром, чтобы определить расхождение между измеренным положением секций крепи и теоретическим положением проходческого щита. Задняя обратная призма устанавливается в стартовой шахте в точке с известными координатами. При наличии большого расстояния она может не определяться тахеометром и в этом случае устанавливается в тоннеле вместе с вспомогательным инклинометром, который позволяет учесть в расчетах возможное вращение труб (рисунок 1.13). При определенных условиях для обеспечения точного

пикетирования проходческого щита в стартовой шахте на трубах устанавливается курвиметр.

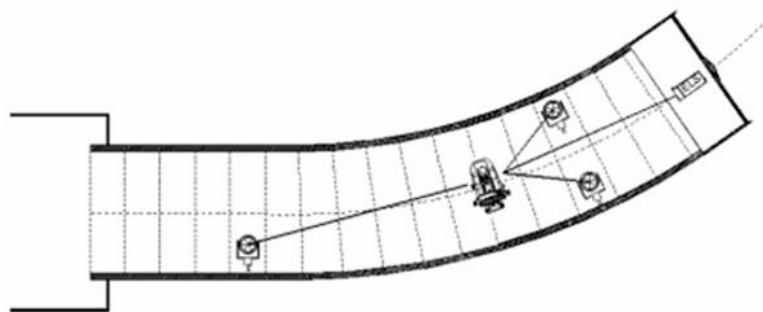


Рисунок 1.13 - Третий этап проходки криволинейного тоннеля

Недостатком «SLS-Microtunneling LT» - тахеометрической устройства позиционирования является отсутствие возможности 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 транспорта отбитой горной массы в щитах с малым диаметром (от 360 мм до 2000 мм). Также, необходима калибровка тахеометра и призм после каждого перемещения тоннельной крепи и проходческого щита МТПК.

1.4 Инерциальные навигационные устройства позиционирования

С помощью инерциальной навигационной устройства позиционирования производится определение местоположения движущегося объекта, которое основано на использовании законов инерции [11]. В этом способе не требуется внешней информации, полученной оптическими средствами, радиосредствами или другими способами.

Инерциальные навигационные устройства позиционирования предназначены для определения координат местоположения, параметров движения и углов ориентации подвижного объекта. В общем случае они состоят из блока волоконно-оптических или микроэлектромеханических инерциальных датчиков (гироскопов, акселерометров) со встроенным приемником спутниковой навигационной системы и

подключаемой антенны. В процессе работы системы приёмник спутниковой навигационной системы осуществляет определение текущих координат местоположения объекта. Блок инерциальных датчиков определяет параметры углового и линейного движения объекта, а встроенный в него высокоскоростной вычислитель осуществляет расчёт углов ориентации (крена, тангажа и путевого угла), коррекцию координат местоположения, после чего выдает навигационную информацию оператору.

Как видно из технических характеристик, приведенных в таблице 1.1 [12], системы подобного рода (например, продукт «КомпаНав-2МТ» (рисунок 1.14)) не могут обеспечить достаточную точность определения положения без коррекции от спутниковой навигационной системы.

Таблица 1.1 – Технические характеристики системы «КомпаНав-«МТ»

	Интегрированный режим (ИНС/СНС)	Без коррекции от СНС	Режим коррекции от одометра
Углы ориентации (крен, тангаж)			
Прямолинейное движение	0,3°	0,5°	0,4°
Маневрирование	0,8°	1°	0,8°
Курс (путевой угол)			
Динамическая точность	0,5°	5° (5 мин)	5° (5 мин)
Путевая скорость	0,3 м/с	5 м/с (5 мин)	1,5 м/с (10 мин)
Горизонтальные координаты	6 м	600 м (5 мин)	2,5% от ПП (10 мин)
Высота	10 м	15 м	15 м

Условные обозначения к таблице 1: ПП – Пройденный Путь

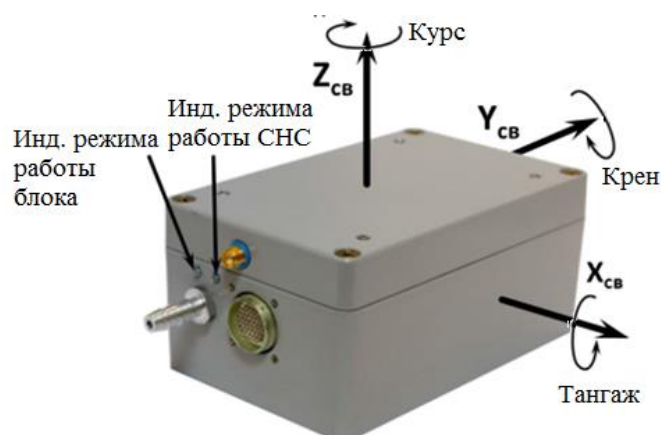


Рисунок 1.14 - Инерциальная система навигации КомпаНав-2МТ

Устройство позиционирования UNS (Universal Navigation System) (рисунок 1.15) представляет собой инерциальную систему на основе использования гироскопа и электронного гидростатического уровня. Она не требует обеспечения прямой видимости между всеми ее элементами, что позволяет осуществлять криволинейную проходку диаметром от 800мм с достаточной точностью и не зависит от температуры воздуха по длине тоннеля. Вычисление текущего положения объекта производится на основе ускорения объекта и его угловых скоростей по трем осям с дискретизацией во времени, в связи с чем при определении положения будет накапливаться ошибка измерения.

Для компенсации погрешностей в углах ориентации и координатам, свойственных инерциальным устройствам позиционирования, в системе UNS необходимо каждые 40 метров производить калибровку позиционирования датчиков в составе инерциальной системы, установленной на проходческом щите МТПК [13]. Данная система предназначена для возведения прямолинейных и криволинейных участков трассы длиной до 200 метров точность проходки – отклонение не более 30 мм на 100 м при калибровке системы каждые 40 м.



Рисунок 1.15 - Система навигации UNS

К недостаткам инерциальных устройств позиционирования относится необходимость корректировки показаний, компенсирующей появление возможной ошибки при интегрировании данных, получаемых с инерционных датчиков.

Данные, полученные в результате обзора существующих устройств позиционирования проходческих щитов МТПК, сведены в таблицу 2.

Таблица 1.2 - Показатели существующих устройств позиционирования проходческих щитов МТПК

Системы навигации	Показатели					
	Проходка криволинейных тоннелей	Возможность применения систем навигации на проходческих щитах диаметром от 360мм до 1400мм	Степень автоматизации	Точность	Уровень стоимости	Определение координат «хвост-нож» многосекционного щита
Спутниковые:						
UGPS	+	-	низкая	низкая	высокая	нет
Лазерные и оптические:						
«SLS Microtunnelling L»	-	+	высокая	высокая	высокая	нет
«ELS-HWL»	+	+	средняя	высокая	высокая	нет
Патент RU №2197616	-	+	средняя	-	высокая	нет
Патент RU №2385418	+	-	высокая	-	высокая	нет
Патент RU №2405937	-	-	низкая	±20 мм	высокая	нет
«PERFORCAM-10” OSD OEN»	-	+	высокая	±15 мм	средняя	нет
Тахеометрические:						
«SN-P»	+	-	низкая	±5 мм	средняя	нет
«SN-PA»	+	-	высокая	±5 мм	средняя	нет
«SN-PAi»	+	-	высокая	±5 мм	средняя	нет
«SLS-Microtunneling LT»	+	+	высокая	±5 мм	высокая	нет
Инерциальные:						
«КомпаНав-2MT»	+	-	высокая	низкая	низкая	нет
«UNS»	+	-	средняя	±30 мм	высокая	нет

1.5 Выводы по главе 1

В настоящем разделе выполнен анализ существующих устройств и методов для определения координат проходческих щитов, установлены основные недостатки существующих устройств позиционирования, не позволяющие использовать их при строительстве криволинейных тоннелей методом продавливания. В связи с этим возникает необходимость разработки комбинированной системы подземной навигации, лишенной перечисленных выше недостатков, и объединяющей в себе необходимые конструктивные и схмотехнические решения, позволяющие

определять координаты проходческого щита модульной конструкции при строительстве криволинейных тоннелей методом продавливания.

Создаваемое, устройство позиционирования должно определять показатели координат: центральной оси в «хвосте» секции «модуля ручного управления», «носовой» части секции «модуля ручного управления», центральной оси в «хвосте» секции «модуля машинного отделения», «носовой» части секции «модуля машинного отделения», в «хвосте» секции «ножевого модуля» и в «носовой» секции «ножевого модуля», а также позиционирования с высокой степенью точности измерять крен и деферент каждого из модулей «хвост-нож» модульного проходческого щита МТПК.

Обзор и анализ показали, что наиболее приемлемым из существующих способов определения координат и положения проходческого щита в пространстве является применение лазерного устройства позиционирования при условии использования промежуточных модулей с учетом установки стационарной базовой станции (точки постоянного закрепления) в стартовом котловане, на которые в автоматическом режиме производится визирование мобильной лазерной установки, смонтированной в тоннеле. Это позволит использовать данное устройство при проходке по криволинейной траектории и обеспечит совместное применение инерциальной системы определения пространственного положения для каждого модуля корпуса проходческого щита МТПК. Установка промежуточных модулей устройства позиционирования позволит избежать искажений лазерного луча, проявляющихся на больших расстояниях из-за разности температур воздуха в тоннеле.

Применение совместно с лазерным устройством позиционирования инерциальной системы позиционирования обеспечит заданную точность определения геодезических координат «хвост-нож» модульного проходческого щита МТПК, а также высокую точность угла крена и угла деферента каждого модуля проходческого щита МТПК. Точность такой системы позволит выполнить требования нормативных документов, регламентирующих работы при проходке тоннелей бестраншейным способом. В соответствии с этим задачи диссертационной работы могут быть сформулированы в следующем виде:

1. Разработка математической и численной моделей процесса движения проходческого щита МТПК.

2. Разработка метода определения комбинации выдвижения гидроцилиндров перемещения проходческого щита МТПК.

3. Разработка алгоритмов вычисления координат проходческого щита модульной конструкции и их преобразования в местную систему координат,

4. Разработка экспериментального образца устройства позиционирования. Разработка структурно-функциональной схемы устройства. Выбор основных схемотехнических решений. Разработка программного обеспечения.

5. Экспериментальное исследование возможности применения разработанного устройства позиционирования в проходческих щитах малого диаметра в лабораторных и полевых условиях.

2 Разработка математической и численной моделей процесса движения проходческого щита при работе системы управления совместно с устройством навигации.

Одной из главных задач при строительстве инженерных сооружений с использованием МТПК является обеспечение точности выполнения работ в соответствии с проектом. При прокладке тоннелей с использованием проходческих комплексов, формирование направления оси возводимого сооружения производится путем изменения угла наклона режущей плоскости относительно оси проходческого щита.

В качестве объекта управления движением, проходческий щит МТПК можно представить как твердое тело, управление движением которого производится в горизонтальной, вертикальной плоскостях, а также в плоскости крена.

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 [14, 15].

2.1 Разработка математической модели процесса движения проходческого щита

При математическом описании движения проходческого щита принимаются следующие допущения [16]:

-проходческий щит представляет собой однородный цилиндр, который движется под действием сил гидродомкратной установки и сил реакции выработки;

- реактивный момент взаимодействия исполнительного органа с забоем не влияет на отклонение щита, так как он продвигается в выработанное пространство;
- крен щита относительно продольной оси не влияет на его движение в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- направление действия силы гидроцилиндров параллельно продольной оси щита;
- расстояние между мгновенным центром поворота и центром тяжести щита не изменяется;
- волновые процессы в гидравлических магистралях вследствие малой длины не влияют на динамику привода;
- модуль упругости жидкости - величина постоянная, не зависящая от давления и температуры; нерастворенный воздух в жидкости отсутствует;
- коэффициент вязкости жидкости является постоянной величиной;
- температура в течение рассматриваемого динамического процесса не изменяется;
- гидравлические потери в трубопроводах между гидроцилиндрами и гидродвигателями малы и ими можно пренебречь.

Поворот щита в пространстве осуществляется за счет асимметричного включения гидроцилиндров относительно вертикальной или горизонтальной оси щита в его поперечном сечении.

Для того чтобы направление пройденного тоннеля соответствовало проектному, необходимо, чтобы продольная ось щита совпадала с осью тоннеля на прямолинейных участках или была касательной к ней на криволинейных участках тоннеля. Таким образом, задача управления направленным движением проходческого щита сводится к управлению положением продольной оси щита относительно оси тоннеля. Принимая жесткость оболочки щита бесконечно большой, и учитывая, что механизмы внутри него расположены равномерно, щит с достаточной для управления точностью можно считать однородным цилиндром.

Рассмотрим движение щита в неподвижной системе координат $O_{\Pi}X_{\Pi}Y_{\Pi}Z_{\Pi}$ (рисунок 2.1), связанной с маркшейдерской сетью опорных точек. Начало координат совмещается с опорной точкой, в качестве которой может служить место установки

здатчика направления движения щита. Ось $O_{\Pi}X_{\Pi}$ совмещается с направлением проектной оси тоннеля, а ось $O_{\Pi}Z_{\Pi}$ направляется вертикально вверх. При этом вместе с щитом перемещается связанная система координат $O_{щ}X_{щ}Y_{щ}Z_{щ}$, 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 $X_nO_nZ_n$, $X_nO_nY_n$ и положительным направлением оси $O_{\Pi}X_{\Pi}$.

В процессе движения щит может поворачиваться вокруг своей продольной оси на угол φ , однако такое вращение не оказывает существенного влияния на динамику его поступательного движения и поэтому дальнейшее рассмотрение будем проводить без учета угла крена.

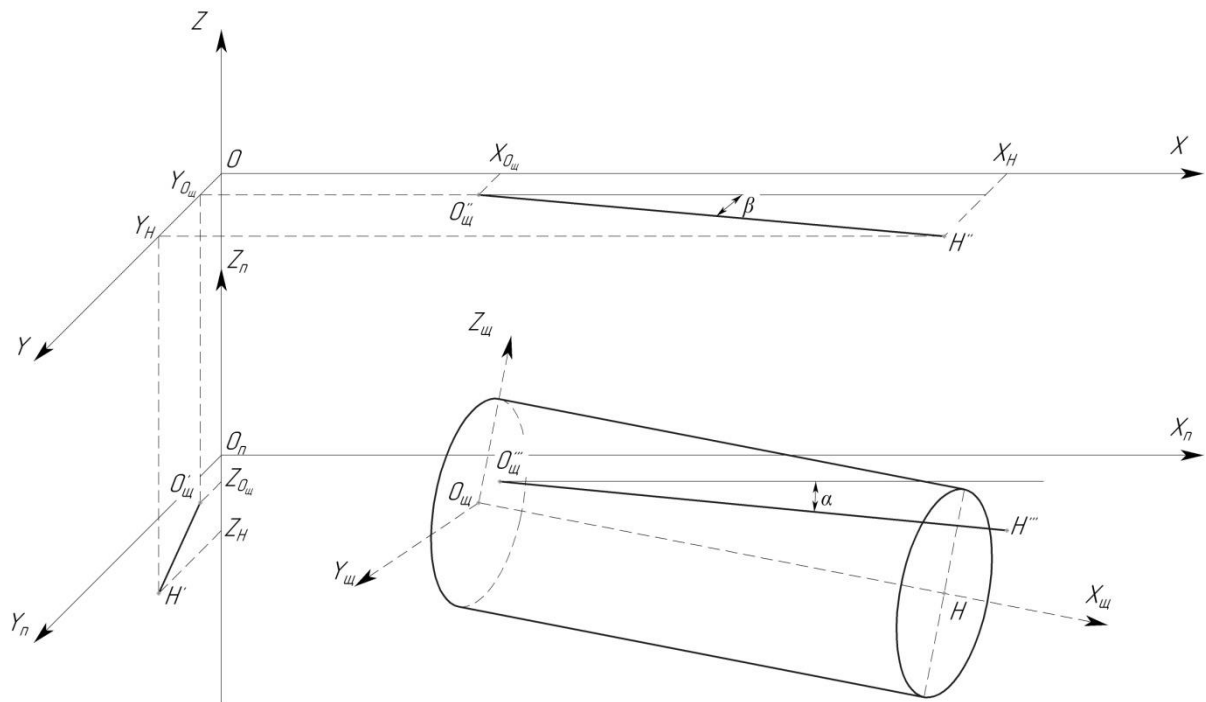


Рисунок 2.1 - Положение проходческого щита в глобальной и локальной системе координат

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

$$\frac{dZ_1}{dt} = V_z + a_1 \frac{da}{dt}, \quad \frac{dZ_2}{dt} = V_z - a_2 \frac{da}{dt},$$

$$\frac{dY_1}{dt} = V_y + a_1 \frac{d\beta}{dt}, \frac{dY_2}{dt} = V_y - a_2 \frac{d\beta}{dt}, \quad (2.1)$$

где $a_1 a_2$ - расстояние 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:

$$V_z = V\alpha; V_y = V\beta. \quad (2.2)$$

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

Закон формирования углов α и β получим из уравнений равновесия моментов относительно осей $O_{щ}Y_{щ}$ и $O_{щ}Z_{щ}$:

$$\begin{cases} I_y \frac{d\omega_y}{dt} = r_z P - f_m G \frac{D}{2} - Ga - B_1 \omega_y - B_2 \alpha \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} = r_y P - B_1 \omega_z - B_2 \beta \end{cases} \quad (2.3)$$

где I_y, I_z - моменты инерции щита относительно осей $O_{щ}Y_{щ}$ и $O_{щ}Z_{щ}$, проходящих через точку разворота щита; ω_y, ω_z - угловые скорости вращения щита вокруг осей $O_{щ}Y_{щ}$ и $O_{щ}Z_{щ}$; $M_{\partial y}, M_{\partial z}$ - 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 $P_1 \dots P_t$ гидроцилиндров и возникающей в трубе 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.

Динамику поступательного движения комплекса можно рассматривать как динамику нагруженного поршня эквивалентного гидроцилиндра, масса которого равна суммарной массе поршней гидроцилиндров перемещения. Площадь поршня эквивалентного гидроцилиндра равна сумме площадей поршней, участвующих в перемещении [17].

С учетом принятых допущений и пренебрегая силой трения поршня о стенки гидроцилиндра, а также массой поршня, так как она мала по сравнению с массой проходческого щита уравнение поступательного движения будет иметь вид:

$$m_{щ} \frac{d^2 X_{щ}}{dt^2} = P - F_{тр} - F_c - \sigma V \quad (2.4)$$

где $P = P_H A_{п} n_{г}$, $m_{щ}$ — суммарная масса щита с оборудованием; P_H - перепад давления в полостях гидроцилиндра; $A_{п}$ - площадь поршня гидроцилиндра; $n_{г}$ - количество одновременно включенных гидроцилиндров; F_c - сила трения поршня о стенки гидроцилиндра; $X_{щ}$ - перемещение тоннелепроходческого щита; $F_{тр}$ - сила трения по породе оболочки внедрённой в грунт трубы; σ - коэффициент пропорциональности, учитывающий вязкое трение комплекса по породе; v - скорость движения трубы (щита).

Сила сопротивления F_c представляет собой сумму нескольких сил, препятствующих движению щита:

$$F_c = F_1 + F_2,$$

где F_1 - сила трения наружной оболочки корпуса щита по породе, в которой осуществляется проходка тоннеля; F_2 - сила сопротивления внедрения головной части щита в забой. Причем величины усилий F_1 и F_2 определяются по следующим формулам [18]:

$$F_1 = f_m [2(l + \xi_6) P_1 L_{щ} + G]$$

здесь f_m - коэффициент трения стального корпуса щита о грунт; l - периметр ножевой части щита, м; ξ_6 - коэффициент бокового давления грунта; P_1 - вертикальное горное давление на 1 метр длины щита, определяемое по формуле: $P_1 = \gamma_2 D^2 \cdot 3tkp$,

где y_2 - объёмная масса грунта, т/м³; tkp - коэффициент крепости грунта.

Сила сопротивления F_2 определяется из соотношения:

$$F_2 = q_c \cdot l,$$

где q_c - удельное сопротивление вдавливанию ножа щита в грунт.

Скорость поступательного движения щита определяется из уравнения расхода гидросистемы:

$$Q_n = n_c A_n V + k_{ym} P_n + \frac{v n_r}{2 E_0} \cdot \frac{dP_n}{dt} \quad (2.5)$$

где Q_n - расход на выходе электрогидроклапана; k_{ym} -коэффициент утечек, учитывающий утечки жидкости через уплотнения и щели, а также перетечки жидкости из полости наполнения в полость опорожнения гидроцилиндра; v - эквивалентный объём рабочей камеры гидроцилиндра; E_0 - эффективное значение обобщенного модуля упругости.

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:

$$U_{n.pl} = k_\partial Y_1, U_{x.pl} = k_\partial Y_2, U_{n.pr} = k_\partial Z_1, U_{x.pr} = k_\partial Z_1 \quad (2.6)$$

где $U_{n.pl}, U_{x.pl}, U_{n.pr}, U_{x.pr}$ - 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 уравнения (2.1), (2.2), (2.3), (2.4), (2.5), (2.6) получим систему уравнений, описывающую пространственное движение мехатронного микротоннелепроходческого щита:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dZ_1}{dt} = V\alpha + a_1 \frac{da}{dt} ; \frac{dZ_2}{dt} = V\alpha - a_2 \frac{da}{dt} \\ \frac{dY_1}{dt} = V\beta + a_1 \frac{d\beta}{dt} ; \frac{dY_2}{dt} = V\beta - a_2 \frac{d\beta}{dt} \\ I_y \frac{d^2\alpha}{dt^2} + B_1 \frac{d\alpha}{dt} + B_2\alpha = r_z P - f_m G \frac{D}{2} - Ga \\ I_z \frac{d^2\beta}{dt^2} + B_1 \frac{d\beta}{dt} + B_2\beta = r_y P \\ m_{\text{ш}} \frac{d^2V}{dt^2} = P - F_{mp} - F_c - \sigma V \\ Q_H = n_c A_n V + k_{ym} P_H + \frac{vn_r}{2E_0} \cdot \frac{dP_H}{dt} \\ U_{H.n\pi} = k_{\partial} Y_1; U_{x.n\pi} = k_{\partial} Y_2; U_{H.n\pi} = k_{\partial} Z_1; U_{x.n\pi} = k_{\partial} Z_1 \end{array} \right. \quad (2.7)$$

В силу сделанных выше допущений об отсутствии взаимного влияния движений в плане и профиле, систему (2.7) можно разбить на две системы описывающих динамику щита в профиле:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dZ_1}{dt} = V\alpha + a_1 \frac{da}{dt} \\ \frac{dZ_2}{dt} = V\alpha - a_2 \frac{da}{dt} \\ I_y \frac{d^2\alpha}{dt^2} + B_1 \frac{d\alpha}{dt} + B_2\alpha = r_z P - f_m G \frac{D}{2} - Ga \\ m_{\text{ш}} \frac{d^2V}{dt^2} = P - F_{mp} - F_c - \sigma V \\ Q_H = n_c A_n V + k_{ym} P_H + \frac{vn_r}{2E_0} \cdot \frac{dP_H}{dt} \\ U_{H.n\pi} = k_{\partial} Z_1; U_{x.n\pi} = k_{\partial} Z_1 \end{array} \right. \quad (2.8)$$

и плане:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dY_1}{dt} = V\beta + a_1 \frac{d\beta}{dt} \\ \frac{dY_2}{dt} = V\beta - a_2 \frac{d\beta}{dt} \\ I_z \frac{d^2\beta}{dt^2} + B_1 \frac{d\beta}{dt} + B_2\beta = r_y P \\ Q_H = n_c A_n V + k_{ym} P_H + \frac{vn_r}{2E_0} \cdot \frac{dP_H}{dt} \\ U_{H.n\pi} = k_{\partial} Y_1; U_{x.n\pi} = k_{\partial} Y_2 \end{array} \right. \quad (2.9)$$

В установившемся режиме щит движется поступательно с постоянной скоростью, при этом в общем случае $\alpha = const$. Так как целью управления является ведение щита вдоль проектного направления, будем считать, что в установившемся режиме $\alpha = 0$.

Предположим, что произошло изменение точки приложения равнодействующей сил проталкивающих гидроцилиндров на величину Δr_z , тогда все переменные тоже получают приращение:

$$U_{н.нр} = (U_{н.нр})_0 + \Delta U_{н.нр}, Z_1 = Z_{1,0} + \Delta Z_1, \\ \alpha = \alpha_0 + \Delta \alpha, r_z = r_{z,0} + \Delta r_z$$

где $(U_{н.нр})_0, Z_{1,0}, \alpha_0, r_{z,0}$ - значения переменных в точке линеаризации.

Подставляя полученные значения в уравнения системы (2.8) и вычитая почленно соответствующие уравнения, получим уравнения в отклонениях или уравнения возмущенного движения щита:

$$\begin{cases} \Delta U_{н.нр} = k_\partial \Delta Z_1; \Delta U_{х.нр} = k_\partial \Delta Z_2 \\ \frac{d\Delta Z_1}{dt} = a_1 \frac{d\Delta \alpha}{dt} + V\Delta \alpha; \frac{d\Delta Z_2}{dt} = -a_2 \frac{d\Delta \alpha}{dt} + V\Delta \alpha \\ I_y \frac{d^2 \Delta \alpha}{dt^2} + B_1 \frac{d\Delta \alpha}{dt} + B_2 \Delta \alpha = \Delta r_z P \end{cases} \quad (2.10)$$

Решив систему (2.10) относительно входной r_z и выходной $U_{н.нр}$ переменных, с учётом ранее полученных выражений, получим дифференциальное уравнение движения микротоннелепроходческого щита:

$$I_y \frac{d^3 Z_1}{dt^3} + B_1 \frac{d^2 Z_1}{dt^2} + B_2 \frac{dZ_1}{dt} = a_1 (F_{mp} + F_c) \frac{dr_z}{dt} + (F_{mp} + F_c) V r_z \quad (2.11)$$

Перейдя к изображениям по Лапласу, уравнение (2.11) можно записать в следующем виде:

$$(I_y p^2 + B_1 p + B_2) p Z_1(p) = (a_1 p + V) (F_{mp} + F_c) \cdot r_z(p) \quad (2.12)$$

Из уравнения (2.12) находится передаточная функция микротоннелепроходческого щита по управляющему воздействию [19]:

$$W(p) = \frac{Z_1(p)}{r_z(p)} = \frac{k_v (T_1 + 1)}{(T_2^2 p^2 + T_3 p + 1)p} \quad (2.13)$$

$$\text{где } k_v = \frac{(F_{mp} + F_c)(n_z A_n Q_n - k_{ym}(F_{mp} + F_c))}{B_2[(n_z A_n)^2 k_{ym} \sigma]}; T_1 = \frac{a_1}{V}; T_2^2 = \frac{I_y}{B_2}; T_3 = \frac{B_1}{B_2}.$$

Чтобы получить уравнение статики необходимо, чтобы все отклонения переменных и их производные были равны нулю. Так как уравнение движения щита (2.11) содержит астатический элемент, то статическая зависимость $Z_1 = f(r_z)$ не существует, однако можно найти зависимость $\frac{dZ_1}{dt} = f(r_z)$:

$$\frac{dZ_1}{dt} = k_v r_z, \quad (2.14)$$

Подставляя k_v из (2.13) в (2.14), получим

$$\frac{dz_1}{dt} = \frac{(F_{mp} + F_c)(n_z A_n Q_n - k_{ym}(F_{mp} + F_c))r_z}{B_2[(n_z A_n)^2 k_{ym} \sigma]} \quad (2.15)$$

Введя обозначения $X_0 = Z_1$, $X_1 = \alpha$, $X_2 = \omega_y$, $U = r_z$ систему (2.10) для формирования отклонения ножевой точки перепишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= a_{01}x_1 + a_{02}x_2; \\ \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \mu U, \end{aligned} \quad (2.16)$$

где $a_{01} = k_d v$; $a_{02} = k_d a_1$; $a_{21} = -\frac{B_2}{I_z}$; $a_{22} = -\frac{B_1}{I_z}$; $\mu = \frac{R}{I_z}$.

Здесь v – линейная скорость движения щита; a_1 – расстояние между ножевой точкой щита и точкой разворота; x – координаты точек оси щита; B_1 – коэффициент вязкого трения; B_2 – коэффициент, учитывающий параметры щита; I_z – момент инерции; R – сила, развиваемая гидроцилиндрами перемещения щита; U – управляющее воздействие, k_d – коэффициент пропорциональности.

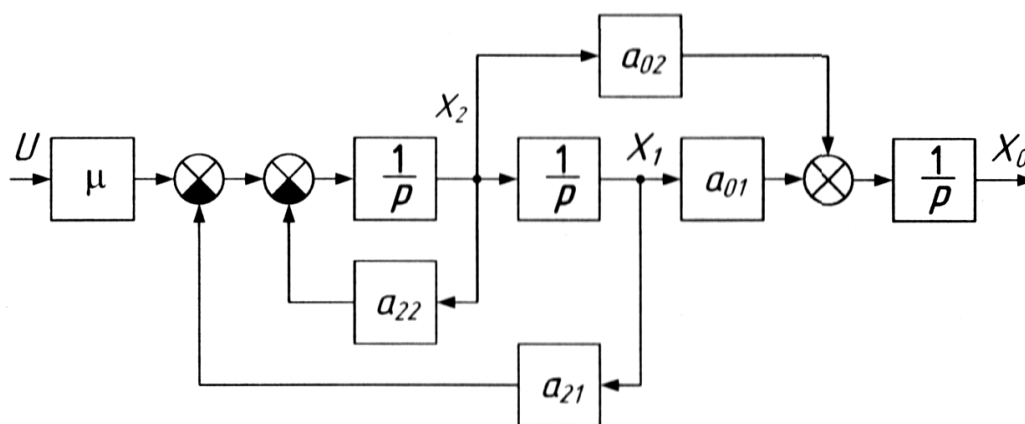


Рисунок 2.2 - Структурная схема линеаризованной математической модели

Система (2.16) представляет собой линейную систему обыкновенных дифференциальных уравнений в форме Коши. Системе уравнений (2.16) соответствует схема математической модели, представленная на рисунке 2.2, которая справедлива для движения щита как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях.

Коэффициенты системы (2.16) изменяются при изменении условий проходки тоннеля, но, так как в течение времени регулирования условия практически не изменяются, то их можно считать постоянными.

2.2 Разработка численной модели процесса движения проходческого щита

2.2.1 Обзор существующих программно-аппаратных средств для численного моделирования динамических процессов

2.2.1.1 Описание программного пакета MatLab Simulink

Пакет Simulink представляет собой библиотеку блоков и инструмент для моделирования и анализа динамических систем. Пакет разработан компанией The MathWorks и работает в составе MATLAB. MATLAB (сокращение от "Matrix Laboratory") обозначает одновременно пакет прикладных программ для решения задач численного анализа и используемый в этом пакете язык программирования. MATLAB позволяет легко производить матричные вычисления, визуализировать математические функции и экспериментальные данные, реализовывать вычислительные алгоритмы, конструировать графический интерфейс пользователя для решения специфических задач, а также через специальные интерфейсы взаимодействовать с другими языками программирования и программами. Хотя MATLAB специализируется на численных вычислениях, с помощью специализированного инструментального пакета, он может взаимодействовать с символьным процессором программы Maple, что превращает его в законченную систему с возможностью выполнения символьных вычислений [24].

Simulink широко используется в теории управления и цифровой обработке сигналов для моделирования и разработки различных систем. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты.

Часть входящих в состав MATLAB пакетов имеет инструменты, встраиваемые в Simulink (например, LTI-Viewer приложения Control System Toolbox – пакета для

разработки систем управления). Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (например, Power System Blockset – моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset – набор блоков для разработки цифровых устройств и т.д.).

При работе с Simulink пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков.

При моделировании пользователь может выбрать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц.

Преимущество Simulink заключается также в том, что он позволяет пополнять библиотеки блоков с помощью подпрограмм написанных как на языке MATLAB, так и на языках C ++, Fortran и Ada.

Важными достоинствами пакета MATLAB являются его открытость и расширяемость. Большинство команд и функций системы реализованы в виде текстовых m-файлов (с расширением .m) и файлов на языке Си, причем все файлы доступны для модификации. Пользователю дана возможность создавать не только отдельные файлы, но и библиотеки файлов для реализации специфических задач.

2.2.1.2 Описание программного пакета Modelica

Modelica - объектно-ориентированный, декларативный, мультидоменный язык моделирования для компонентно-ориентированного моделирования сложных систем, в частности, систем, содержащих механические, электрические, электронные, гидравлические, тепловые, энергетические компоненты, а также компоненты управления и компоненты, ориентированные на отдельные процессы. Modelica разработана некоммерческой организацией Modelica Association. Эта компания также разрабатывает свободно распространяемую стандартную библиотеку Modelica

Standard Library, в версии 3.2.1 содержащую порядка 1360 типичных элементов моделей и 1280 функций из различных областей.

Первые усилия по созданию языка Modelica были предприняты в сентябре 1996 года Хильдингом Эльмквистом (Hilding Elmqvist). Цель этих усилий состояла в разработке объектно-ориентированного языка для моделирования технических систем, пригодного для многократного использования моделей динамических систем и обмена между этими моделями в стандартизированном формате. Modelica 1.0 основывалась на диссертационной работе Хильдинга Эльмквиста и на опыте использования языков моделирования Allan, Dymola, NMF, ObjectMath, Omola, SIDOPS+ и Smile. Хильдинг Эльмквист является основным архитектором языка Modelica.

Modelica представляет собой среду визуального моделирования, включающую универсальный объектно ориентированный язык Modelica для моделирования сложных физических систем и собственно инструментальные средства, такие как пакеты Dymola или MathModelica. Язык Modelica, наряду с ASCEND, Smile, VHDL-AMS и др. относится к группе так называемых неказуальных языков, т.е. языков физического моделирования.

Как и во всех рассматриваемых пакетах, в Modelica используется компонентный принцип задания исходной информации об исследуемой системе, однако используемые компоненты имеют не входы и выходы, а выводы, или контакты, как правило, имеющие ясный физический смысл. Это делает пакет привлекательным для специалистов нематематического профиля и более простым для понимания и использования в целом.

Пакет Dymola (Dynamic Modeling Laboratory), поддерживающий язык моделирования Modelica, является комплексным инструментом для моделирования и исследования сложных систем в таких областях, как мехатроника, автоматика, аэрокосмические исследования и др.

Возможность объединения в одной модели компонентов различной физической природы позволяет строить модели сложных систем, лучше соответствующие реальности, и получать более точные и прозрачные результаты.

Стандартная библиотека Dymola включает элементарные компоненты, относящиеся к электротехнике, механике, гидравлике и т. (Специализированные библиотеки содержат модели устройств и явлений для конкретной области.

Например, MultiBody Library содержит трехмерные механические компоненты, предназначенные для моделирования роботов, искусственных спутников Земли или транспортных средств. Это модели твердых тел, шарниров, источников и средств анимации. Такие же библиотеки разработаны для электротехники, гидравлики и т. п.

Кроме собственного языка, Dymola (Modelica) поддерживает интеграцию с такими программными средствами как Fortran, C, Simulink, и некоторыми другими. Возможность взаимодействия разработанных моделей с системой MATLAB/Simulink позволяет объединить сильные стороны структурного и физического моделирования [25, 26].

2.2.2 Синтез наблюдающего устройства

Особенностью проходческого щита, как объекта системы автоматического управления, является то, что вследствие специфичности конструкции, непосредственному измерению доступна только выходная координата, т.е. всего одна координата вектора состояния. Однако, недоступные непосредственному измерению координаты вектора состояния могут быть вычислены по измеренной выходной координате хвостовой части корпуса щита, угла поворота и угловой скорости с высокой точностью косвенными методами.

Одним из возможных путей оценки недоступных непосредственному измерению координат вектора состояния является применение наблюдающего устройства [17, 18, 19, 20]. Наблюдающее устройство дает возможность на основании управляющего сигнала и сигнала, пропорционального выходной координате, оценить все остальные координаты вектора состояния.

В современных тоннелепроходческих комплексах для передвижения щита применяются гидравлические схемы с объемной гидропередачей, включающей гидравлический насос и гидроцилиндры.

В матричной форме линеаризованные уравнения (2.16), описывающие движение щита с гидроприводом на плоскости, принимают вид:

$$\dot{x}(t) = Ax + BU; \quad y(t) = Cx, \quad (1.17)$$

$$\text{где } A = \begin{bmatrix} 0 & a_{01} & a_{02} \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \mu \end{bmatrix}, C = [1 \quad 0 \quad 0].$$

Удовлетворить требованию точности ведения проходческого щита можно применением оптимальной системы управления. Чтобы реализовать оптимальный закон управления $u = \sum_{i=1}^n h_i x_i$, где h_i – элементы матрицы регулятора, необходимо иметь информацию обо всех координатах вектора состояния щита. При проектировании системы управления необходимо предварительно оценить его управляемость и наблюдаемость. Для этой цели, на основании системы уравнений (2.17) могут быть составлены матрицы управляемости Q_U (2.18) и наблюдаемости Q_H (2.19) и по их структуре выполнена оценка.

$$Q_U = \begin{bmatrix} 0 & \mu \cdot a_{02} & \mu(a_{01} + a_{02} \cdot a_{22}) \\ 0 & \mu & \mu \cdot a_{22} \\ \mu & \mu \cdot a_{22} & \mu(a_{21} + a_{22}^2) \end{bmatrix}; \quad (2.18)$$

$$Q_H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{01} & a_{02} \cdot a_{21} \\ 0 & a_{02} & (a_{01} - a_{02} \cdot a_{22}) \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Для оценки недоступных непосредственному измерению координат проходческого щита: угла поворота α и угловой скорости ω синтезировано наблюдающее устройство [21]. Система уравнений «объект – наблюдающее устройство» имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= a_{01}x_1 + a_{02}x_2; \\ \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \mu U; \\ \dot{x}_3 &= x_4 + l_0 a_{01}(x_1 - x_3) + l_0 a_{02}(x_2 - x_4); \end{aligned}$$

$$\dot{x}_4 = a_{21}x_3 + a_{22}x_4 + l_1 a_{01}(x_1 - x_3) + l_1 a_{02}(x_2 - x_4) + \mu U, \quad (2.20)$$

где x_3, x_4 – координаты вектора состояния наблюдающего устройства;
 l_0, l_1 – элементы матрицы L связи объекта с наблюдающим устройством.

Системе дифференциальных уравнений (2.20) соответствует структурная схема, приведенная на рисунок 1, где $\hat{x}_1 = x_3$; $\hat{x}_2 = x_4$. Выбором матрицы $L = [l_0 \ l_1]^T$ можно обеспечить требуемый вид переходного процесса для оценки ошибки. Кроме того, задаваясь распределением корней характеристического полинома наблюдающего устройства, можно определить значение элементов матрицы L .

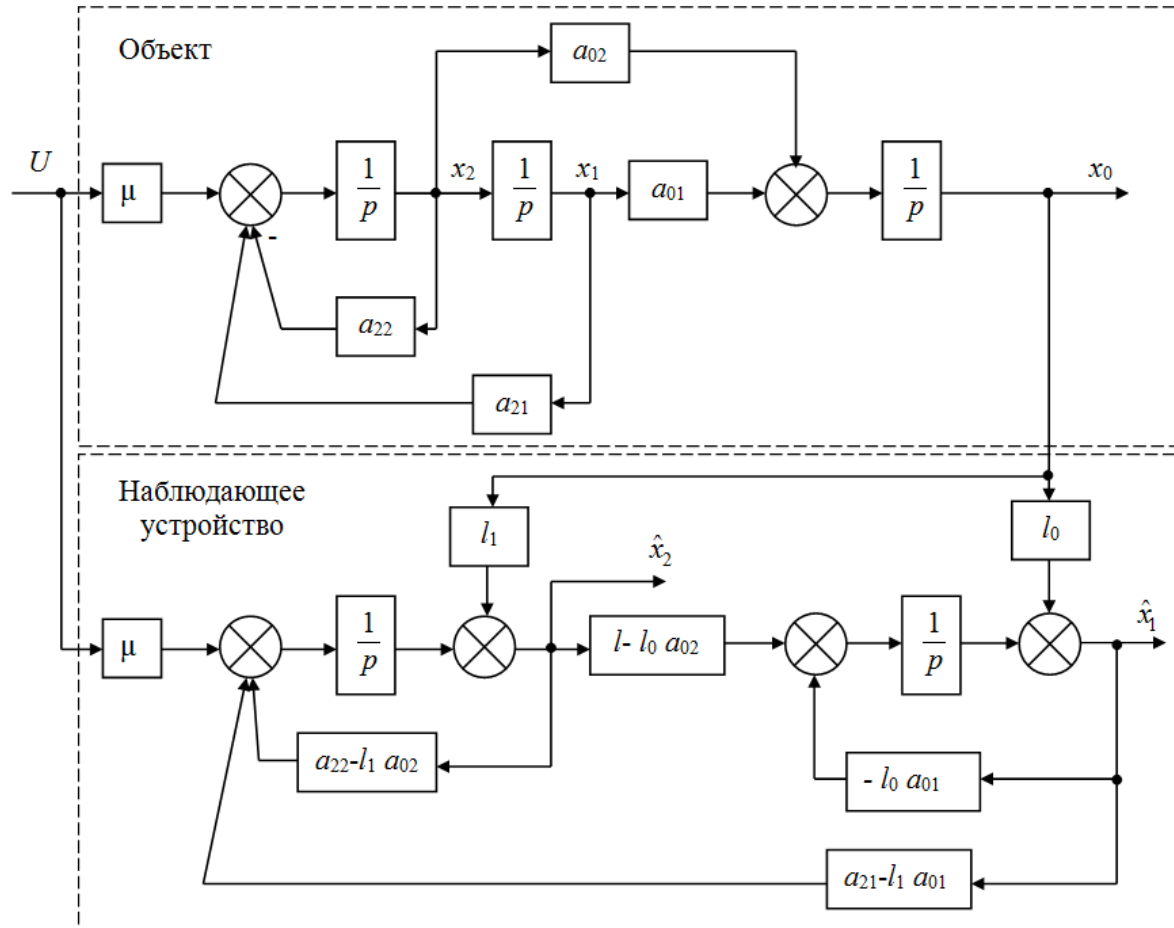


Рисунок 2.3. Структурная схема объекта и редуцированного наблюдающего устройства второго порядка

Численное моделирование наблюдающего устройства было выполнено в программном комплексе OpenModelica. При моделировании исследовано влияние изменения параметров объекта на точность оценки его координат наблюдающим устройством. При этом система уравнений (2.20) была решена при различных значениях коэффициентов a_{ij} . В результате моделирования установлено, что при изменении скорости движения щита v и расстояния от мгновенного центра поворота до ножевой точки щита наблюдающее устройство абсолютно точно оценивает координаты $x_1(t)$ и $x_2(t)$.

Появление на входе объекта постоянного возмущающего воздействия приводит к появлению статической ошибки в оценке координаты x_1 равной 11,2% ($\hat{W}_0$), при этом координата x_2 ($\hat{W}_1$) оценивается точно (рисунок 2.4).

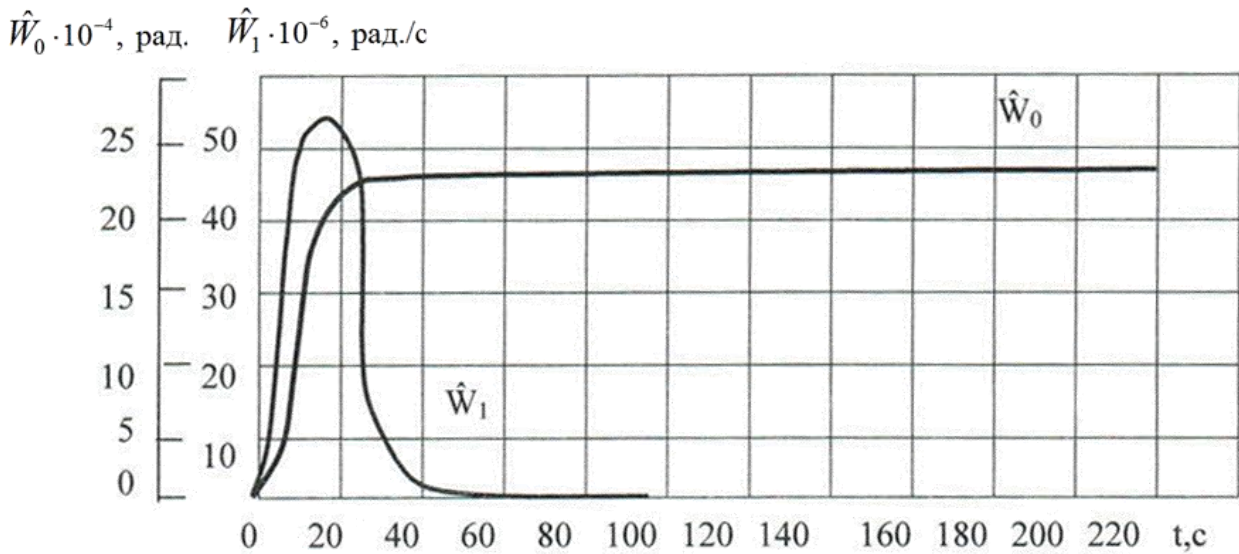


Рисунок 2.4. Зависимость ошибок оценивания координат x_1 и x_2 от изменения коэффициента передачи объекта

Результаты численного эксперимента показывают, что при изменении параметров объекта, как при оценке одной, так и двух координат вектора состояния, ошибка оценивания переходного процесса стремится к нулю.

Угол разворота щита в процессе выхода на проектное направление не должен превышать заданного значения, определяемого из технологических условий строительства коммуникационных тоннелей. Для удовлетворения этого требования регулятор необходимо строить по принципу подчиненного управления.

2.2.3 Синтез системы автоматического управления движением щита тоннелепроходческого комплекса

При проектировании системы управления считаем, что все координаты вектора состояния объекта доступны измерению или оценены с помощью наблюдающего устройства. Очевидно, что возможность обеспечения оптимального переходного процесса зависит от полной управляемости объекта по состоянию X от входного сигнала U . То есть необходимо установить, существует ли ограниченный входной сигнал U , переводящий объект за конечный интервал времени из любого начального состояния X_0 в любое наперед заданное состояние X .

Условием полной управляемости объекта по критерию Калмана является равенство ранга его матрицы Q_U порядку n объекта. Матрица управления (2.18) имеет ранг равный трем. Это указывает на возможность построения регулятора, обеспечивающего любое желаемое расположение корней характеристического полинома системы управления. Для синтеза оптимальной системы автоматического управления воспользуемся принципом Л.С. Понтрягина [22, 23]. Предположим, что оптимальное управление является кусочно-непрерывной функцией $|U| \leq U_{max}$.

В качестве критерия оптимальности примем квадратичный функционал вида:

$$I(U) = \int_0^\infty (q_1 \eta_1^2 + q_2 \eta_2^2 + q_3 \eta_3^2 + U^2) dt, \quad (2.20)$$

где q_i ($i = 1, 2, 3$) – весовые коэффициенты;

η_i ($i = 1, 2, 3$) – координаты возмущенного движения объекта, причем

$$\eta_1 = x_0 - x_1^*; \eta_2 = x_1 - x_1^*; \eta_3 = x_2 - x_2^*,$$

где x_j^* ($j = 1, 2, 3$) – координаты желаемого движения объекта.

Требуется перевести систему из положения $\eta_1(0) = \eta_1^0$ при $t = 0$ в положение $\eta_1 = 0$ при $t \rightarrow \infty$ и найти такой закон управления, чтобы при ограничении на величину управляющего сигнала минимизировать функционал.

Уравнения (2.16) возмущенного движения объекта запишем в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_1 &= a_{12}\eta_2 + a_{13}\eta_3; \\ \dot{\eta}_2 &= \eta_3; \\ \dot{\eta}_3 &= a_{32}\eta_2 + a_{33}\eta_3 + \mu U, \end{aligned} \quad (2.21)$$

где $a_{12} = a_{01}$, $a_{13} = a_{02}$, $a_{32} = a_{21}$, $a_{33} = a_{22}$.

Запишем оптимальный закон управления:

$$U = -(h_1\eta_1 + h_2\eta_2 + h_3\eta_3), \quad (2.22)$$

где h_j ($j = 1, 2, 3$) – коэффициенты обратных связей регулятора.

Для определения коэффициентов h_j ($j = 1, 2, 3$) оптимального закона управления воспользуемся двумя формами записи характеристического уравнения оптимальной системы. Допустим, что корни λ_1 , λ_2 , λ_3 характеристического уравнения известны. Тогда характеристическое уравнение оптимальной системы можно записать в следующем виде:

$$(p + \lambda_1)(p + \lambda_2)(p + \lambda_3) = 0. \quad (2.23)$$

После преобразований уравнение (2.23) может быть представлено в виде:

$$p^3 + \gamma_1 p^2 + \gamma_2 p + \gamma_3 = 0, \quad (2.24)$$

где $\gamma_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$; $\gamma_2 = \lambda_1 \lambda_3 + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_1 \lambda_2$; $\gamma_3 = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$.

С другой стороны, оптимальной системе соответствует характеристический определитель:

$$\det(pI - D_1) = \begin{vmatrix} p & -a_{12} & -a_{13} \\ 0 & p & -1 \\ \mu h_1 & (\mu h_2 - a_{32}) & [p + (\mu h_3 - a_{33})] \end{vmatrix}. \quad (2.25)$$

Раскрыв определитель (2.25) получим характеристическое уравнение:

$$p^3 + p^2(\mu h_3 - a_{33}) + p(\mu h_2 - a_{32} + \mu h_1 a_{13}) + \mu h_1 a_{12} = 0. \quad (2.26)$$

Сравнив коэффициенты при одинаковых степенях p в уравнениях (2.25) и (2.26), получим систему алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \mu h_3 - a_{33} &= \gamma_1; \\ \mu h_2 - a_{32} + \mu h_1 a_{13} &= \gamma_2; \\ \mu h_1 a_{12} &= \gamma_3. \end{aligned} \quad (2.27)$$

После преобразования из системы (2.27) получим выражения для определения h_1, h_2, h_3 :

$$h_1 = \frac{\gamma_3}{\mu a_{12}}; \quad h_2 = \frac{a_{12}(\gamma_2 + a_{32}) - \gamma_3 a_{13}}{\mu a_{12}}; \quad h_3 = \frac{\gamma_1 + a_{33}}{\mu}.$$

Структурная схема объекта с регулятором, которая справедлива для движения щита, как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях показана на рисунке 2.5.

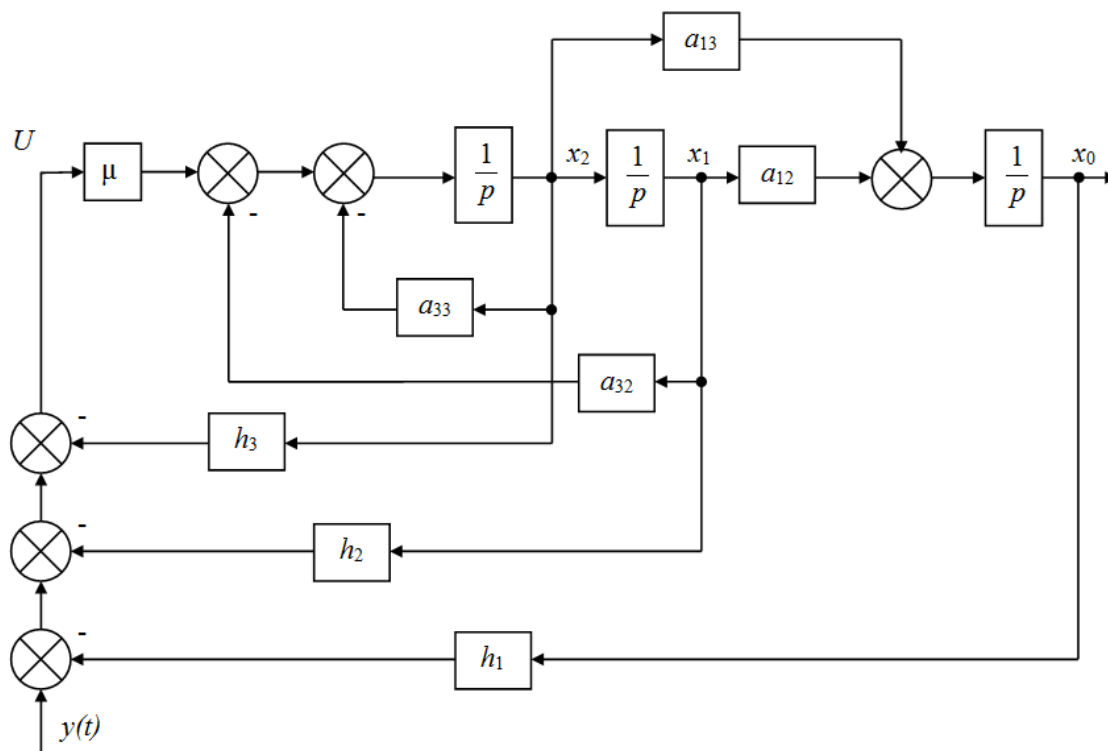


Рисунок 2.5 - Структурная схема проходческого щита с оптимальным регулятором

Вышеприведенная структурная схема соответствует системе уравнений математической модели движения проходческого щита. Коэффициенты обратной связи оптимального регулятора позволят повысить точность ведения проходческого щита в соответствии с проектным направлением.

2.2.4 Численное моделирование процесса движения проходческого щита МТПК

Численное моделирование процесса движения щита [26, 27] было проведено при следующих исходных данных:

масса щита – 10000 кг,

скорость движения – 0,041 см/с,

усилие гидроцилиндров перемещения - 2000 кН,

диаметр щита – 1,42 м,

длина щита – 4 м.

Проведем расчет момента инерции проходческого щита относительно одной из Y учитывая принятые ранее допущения:

$$I_y = m_{\text{ш}} \left(\frac{r_{\text{ш}}^2}{4} + \frac{L_{\text{ш}}^2}{12} \right) = 10000 \cdot \left(\frac{0.7^2}{4} + \frac{4^2}{12} \right) = 14558,33 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

момент инерции щита относительно оси – 14590 кг·м².

Исследование проводилось для двух численных моделей движения проходческого щита - с оптимальным регулятором и без него. На вход модели подается управляющее воздействие, которое зависит от величины отклонения ножевой точки проходческого щита от условных координат проектной

трассы тоннеля, полученной путем вычисления координат с помощью устройства позиционирования. Численная модель движения проходческого щита, соответствующая структурной схеме линеаризованной математической модели движения проходческого щита, выполненная в программном комплексе OpenModelica представлена на рисунке 2.6.

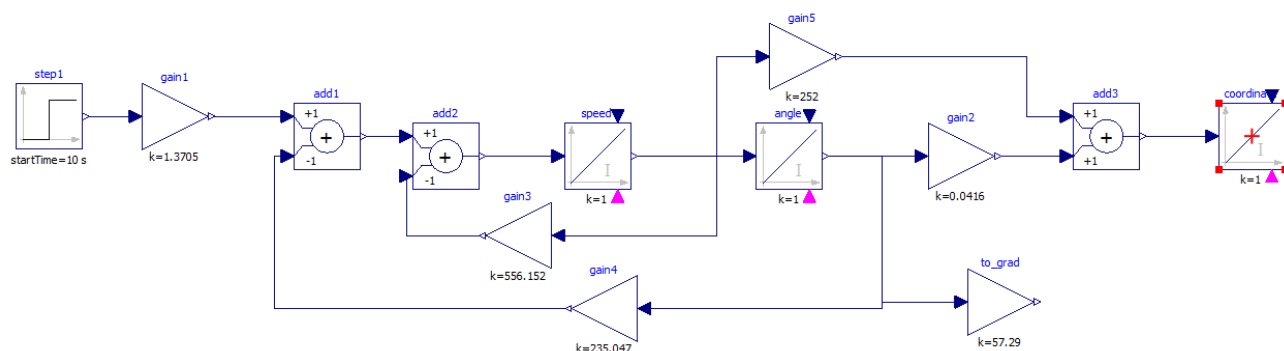


Рисунок 2.6 - Численная модель проходческого щита

Численная модель движения проходческого щита с оптимальным регулятором, выполненная в программном комплексе OpenModelica представлена на рисунке 2.7.

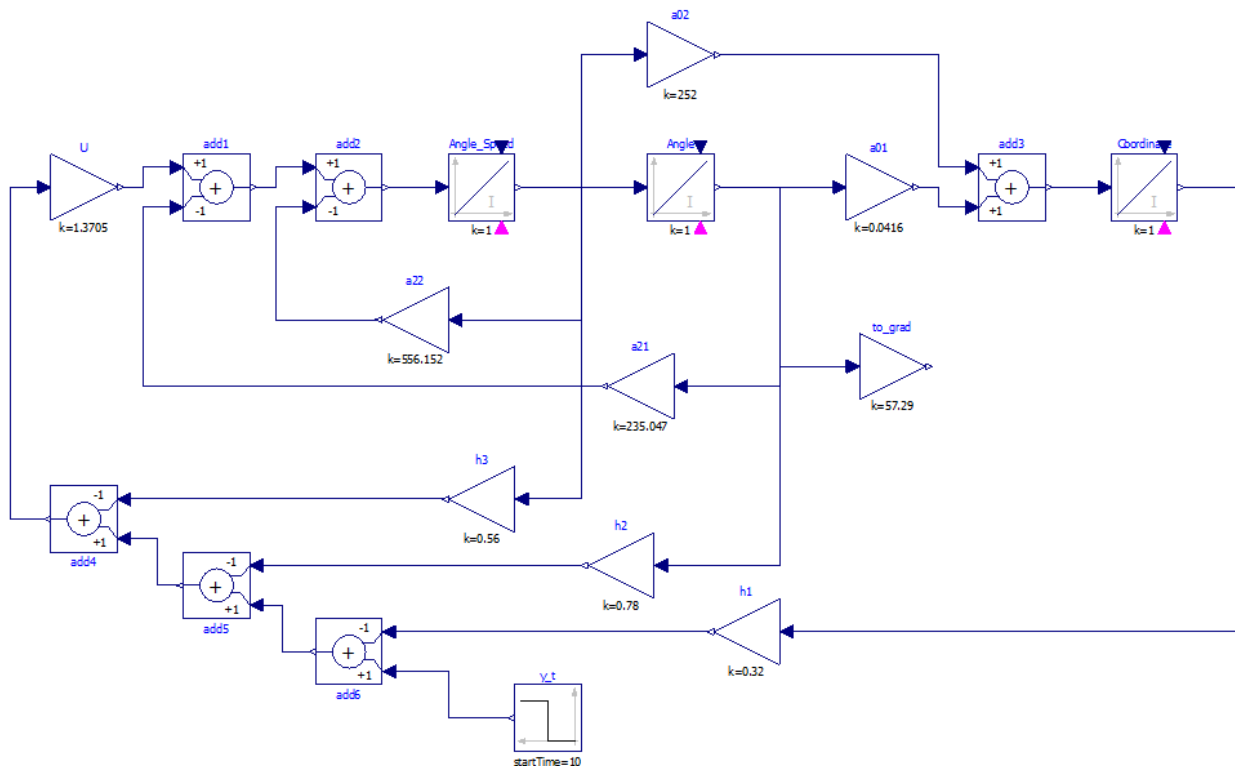


Рисунок 2.7 - Численная модель проходческого щита с регулятором

В результате анализа численных моделей проходческого щита были получены графические зависимости изменения следующих параметров движения:

ω_{y1} - угловая скорость с использованием оптимального регулятора,

ω_{y2} - угловая скорость без оптимального регулятора,

α_1 - угол поворота щита с оптимальным регулятором,

α_2 - угол поворота щита без оптимального регулятора,

Z_1 - координата ножевой точки щита в модели с оптимальным регулятором,

Z_2 - координата ножевой точки щита в модели без регулятора,

r_z - смещение радиус-вектора точки приложения усилия гидроцилиндров перемещения щита. (рисунок 2.8, 2.9).

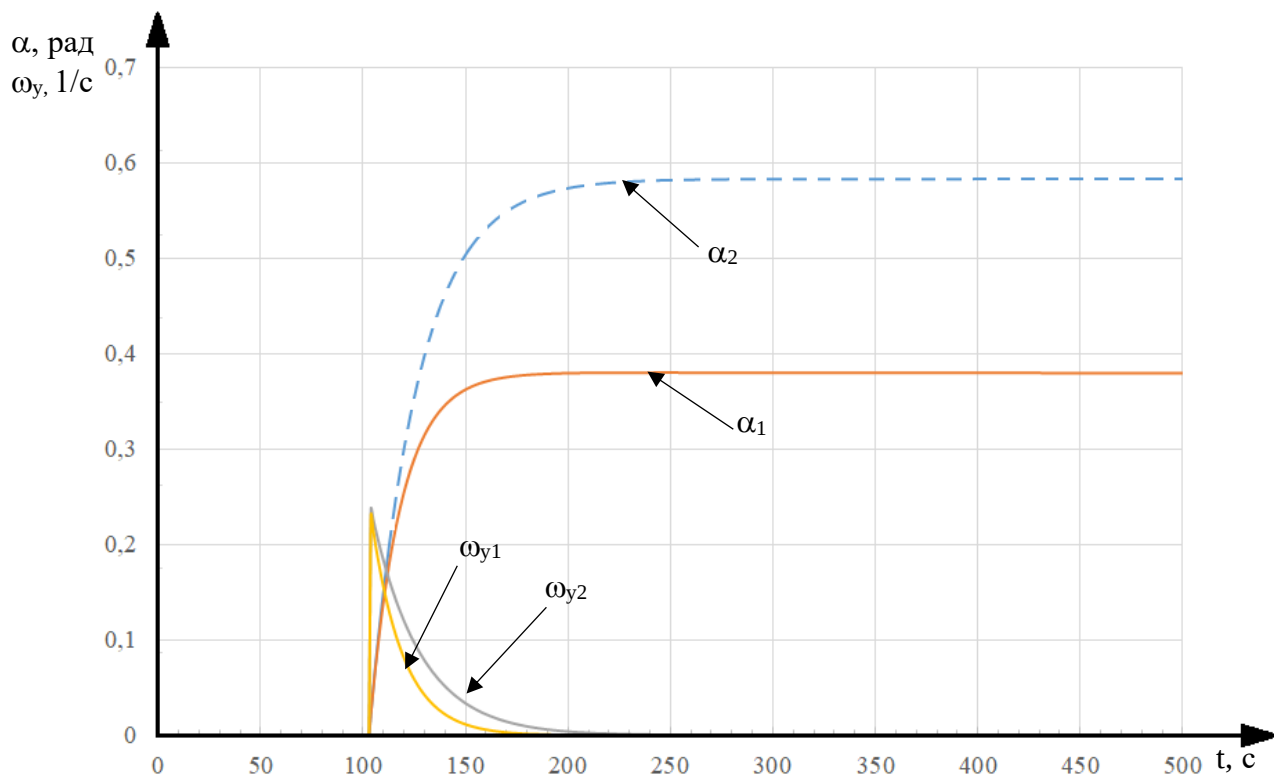


Рисунок 2.8 - График изменения угловой скорости и угла поворота щита при смещении радиус-вектора точки приложения усилия гидроцилиндров перемещения щита

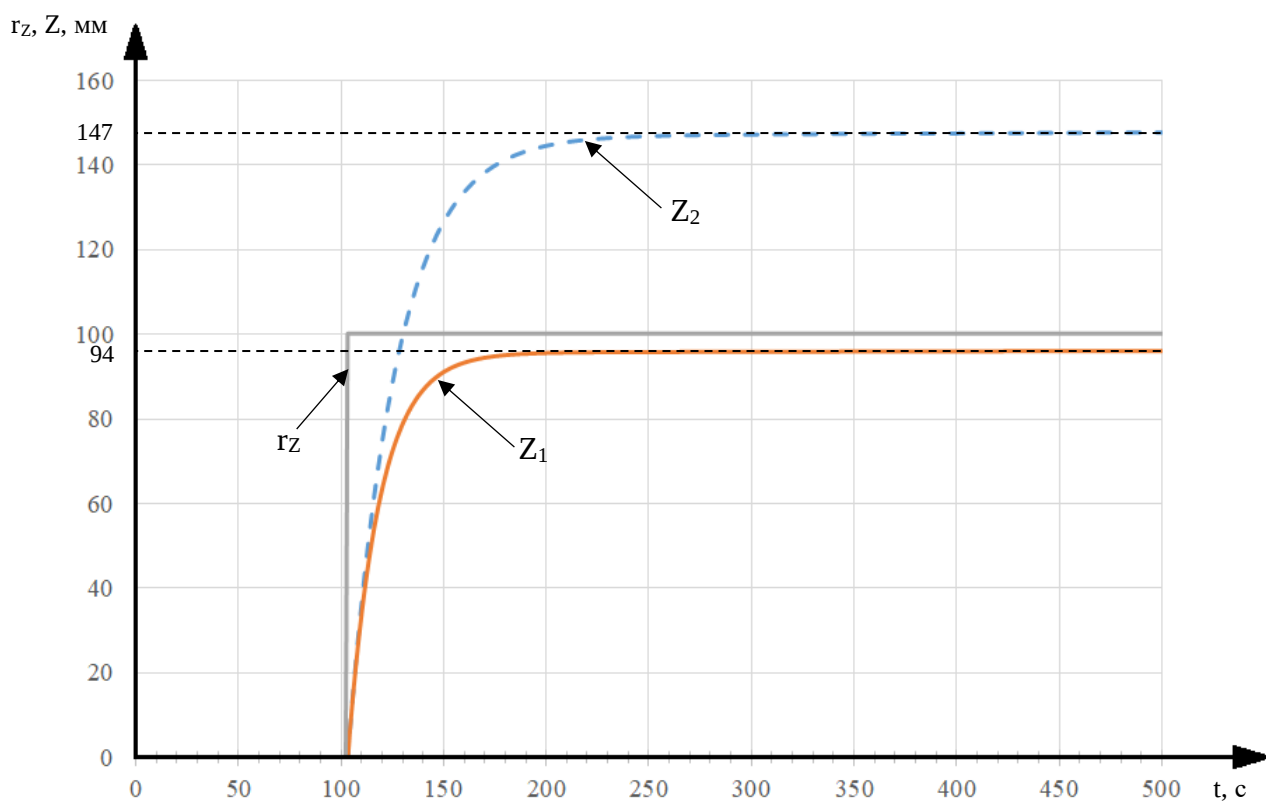


Рисунок 2.9 - График изменения координаты ножевой точки щита и смещения радиус-вектора точки приложения усилия гидроцилиндров перемещения щита

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_1 при изменении управляющего воздействия r_z сокращается до 4% и составляет 4 мм.

Проведем численное моделирование процесса движения проходческого щита при изменении условий проходки.

Как было отмечено выше, в системе уравнений учитываются условия проходки щита. Например, коэффициент вязкого трения (a_{22}), изменяя который, можно проследить изменение характера движения проходческого щита в процессе моделирования. Графики изменения скорости движения и координаты ножевой точки проходческого щита при различных значениях коэффициента a_{22} приведены на рисунках 2.10 и 2.11.

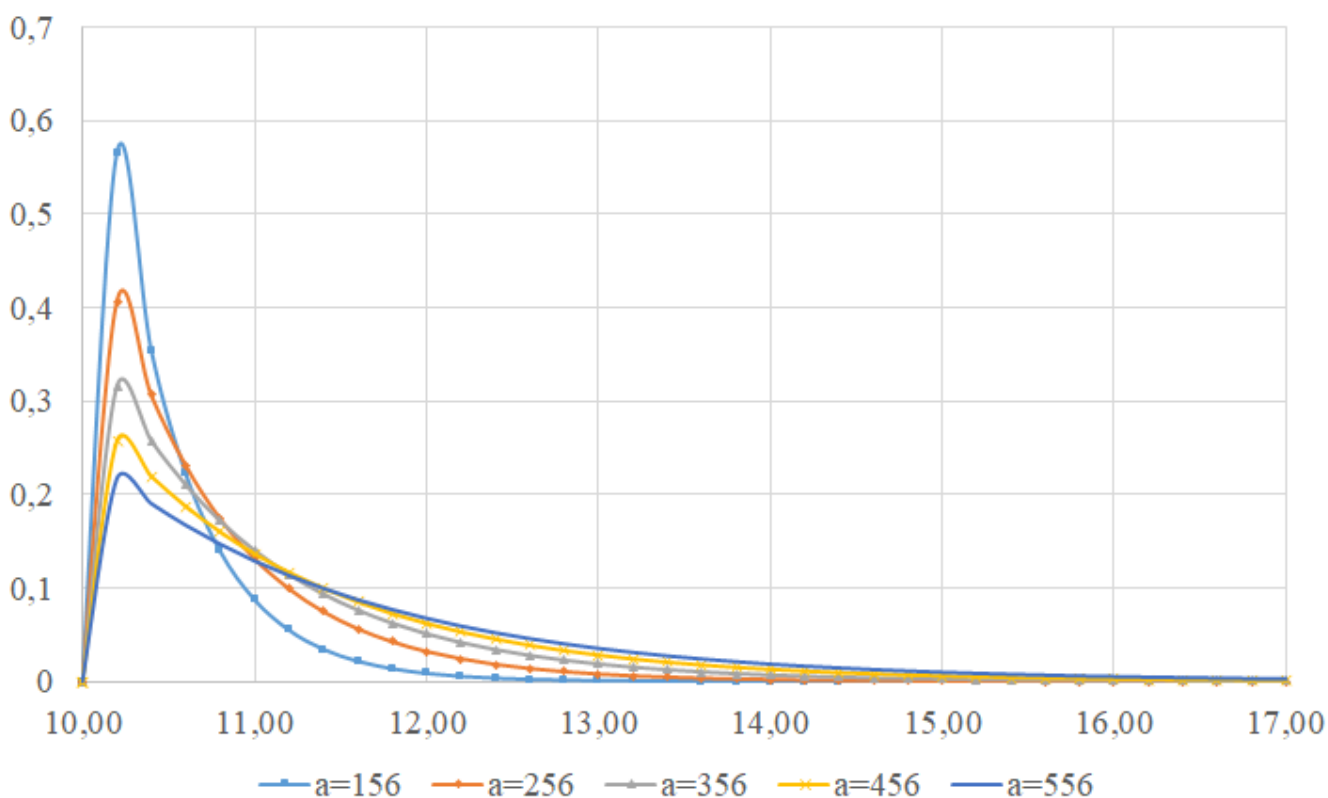


Рисунок 2.10 - График изменения угловой скорости при изменении коэффициента учитывающего условия проходки

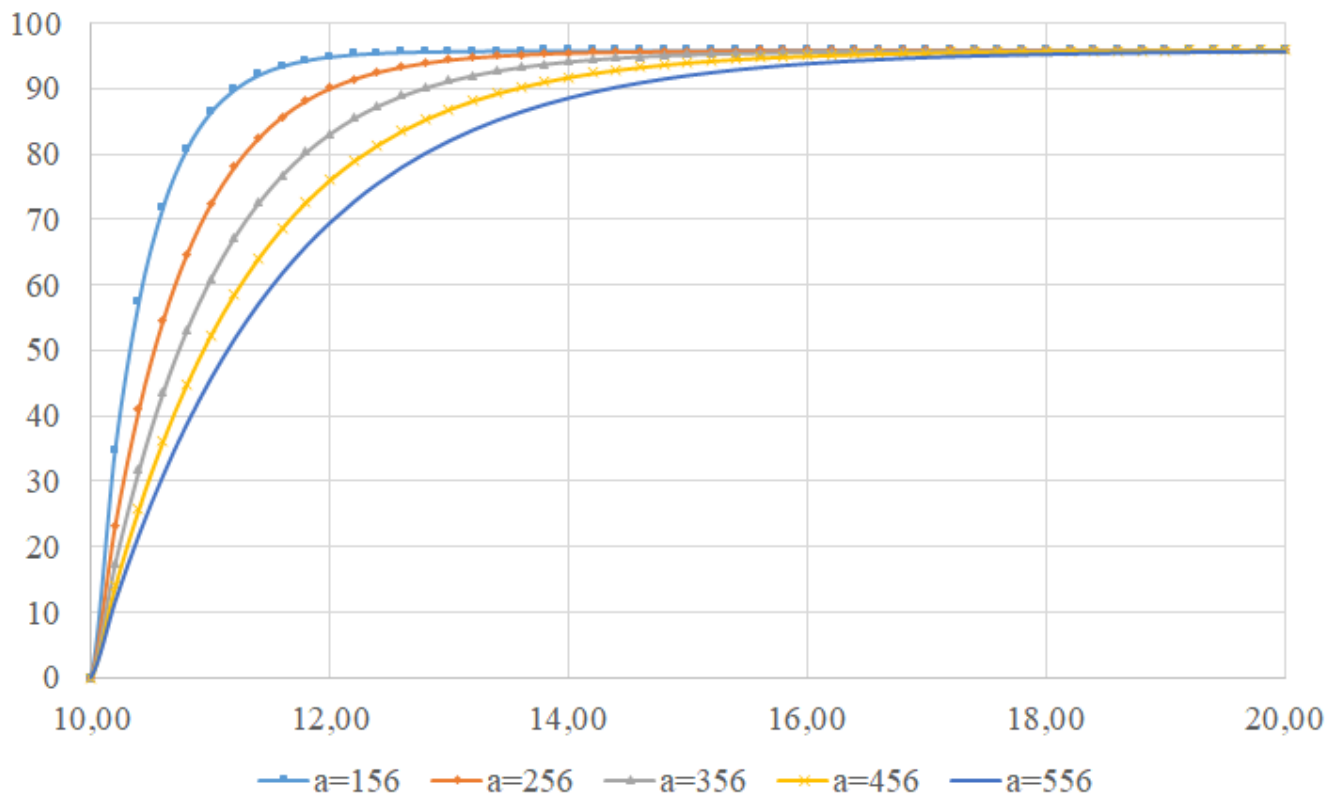


Рисунок 2.11 - График изменения координаты ножевой точки при изменении коэффициента учитывающего условия проходки

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

Таким образом, введение оптимального регулятора в систему управления движением проходческим щитом позволяет многократно повысить точность ведения щита в соответствии с проектным направлением.

2.3 Результаты и выводы по главе 2

На основе имеющихся параметров проходческого щита была разработана математическая и численная модель в программном пакете OpenModelica. В результате численного моделирования были получены графики отклонения хвостовой точки в зависимости от управляющего воздействия.

На основании анализа полученных графических зависимостей можно отметить, что проходческий щит является неустойчивым объектом, т.е. при воздействии на него внешних дестабилизирующих факторов, приводящих к смещению точки приложения равнодействующей усилий гидроцилиндров перемещения, щит начинает отклоняться от первоначального направления движения, поворачивается на определенный угол и продолжает свое движение в новом направлении. На основании этого, можно сделать вывод, что для успешного ведения тоннелепроходческого щита по проектному направлению необходимо осуществлять корректировку его пространственного положения с помощью различных методов и средств, при этом постоянно измеряя и контролируя его координаты относительно проектной оси проходки тоннеля.

Также была рассмотрена возможность применения в численной модели наблюдающего устройства, для определения координаты ножевой точки проходческого щита, недоступной прямому измерению. Использование наблюдающего устройства в численной модели движения проходческого щита позволило оценить недоступные измерению координаты вектора состояния проходческого щита и определить ошибку при оценке неизвестных координат. Результаты численного моделирования системы с наблюдающим устройством, показали, что для корректного ведения щита в соответствии с проектным направлением, в системе управления необходимо использовать регулятор, построенный по принципу подчиненного управления.

Было показано, что изменение коэффициентов численной модели движения проходческого щита, учитывающих внешние условия проходки, влияют на характер его движения - изменяется скорость поворота ножевой точки щита. При этом точность изменения координаты ножевой точки проходческого щита не изменяется.

Введение оптимального регулятора в систему автоматического управления движением проходческого щита позволило снизить отклонение координат ножевой точки проходческого щита и ошибку определения коэффициентов обратной связи при изменении управляющего воздействия, и тем самым увеличить точность ведения проходческого щита в соответствии с проектным направлением.

3 Разработка методов и алгоритмов управления движением проходческого щита

Одной из важнейших задач, решаемых при разработке системы автоматического управления движением проходческого щита, является преобразование сигнала, полученного на выходе регулятора в величину управляющего момента. В свою очередь величина управляющего момента определяется тем, какие гидроцилиндры в данный момент времени включены.

Таким образом, задачу можно сформулировать в следующем виде. По величине управляющего сигнала необходимо определить комбинацию номеров гидроцилиндров, которые создают момент, пропорциональный величине управляющего воздействия. При этом необходимо учесть, как величину управляющего сигнала в плане, так и в профиле. В работе [29] предложено два способа формирования комбинации гидроцилиндров по величине управляющего воздействия.

Первый способ заключается в том, что каждому значению управляющего сигнала приводится в соответствие комбинация гидроцилиндров, определенная методом обработки на ЭВМ статистических данных по ведению щита вручную. Однако, этот способ, во-первых, требует обработки большого массива данных по ведению щита в различных горно-геологических условиях. Во-вторых, для каждого конкретного щита и горно-геологических условий требуется корректировка алгоритма, так как в процессе статистической обработки происходит усреднение различных факторов, влияющих на точность ведения щита, в-третьих, правильность алгоритма зависит от субъективного фактора, определяемого опытом маркшейдера.

При втором способе каждому значению управляющего воздействия из некоторого интервала его изменения соответствует жестко определенная комбинация гидроцилиндров. Причем комбинация гидроцилиндров выбирается таким образом, чтобы момент, создаваемый ими, был пропорционален величине суммарного отклонения щита от заданного направления. Однако, при этом управление ведется

отдельно в вертикальной и горизонтальной плоскостях, поэтому общая комбинация гидроцилиндров (составленная по сигналам двух каналов управления) не обеспечивает требуемого управляющего момента как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях.

Указанные недостатки не позволяют использовать ни один из вышеприведенных способов для реализации управляющего сигнала.

В процессе движения проходческий щит может принимать различные положения относительно проектной оси, как в плане, так и в профиле. Возможные варианты пространственного положения проходческого щита относительно проектной оси тоннеля показаны на рисунке 3.1.

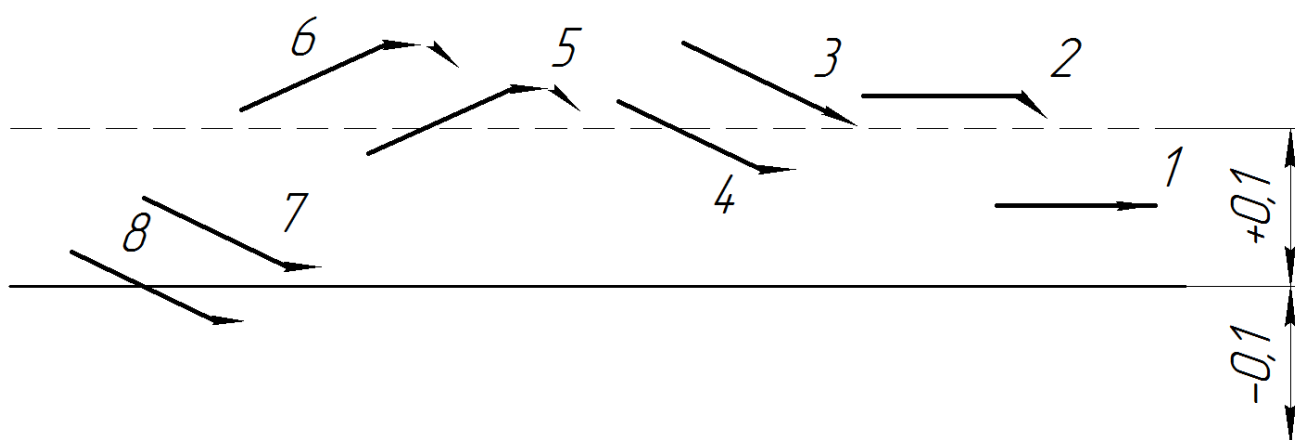


Рисунок 3.1 – Возможные положения проходческого щита относительно проектной оси

Варианты положения проходческого щита, приведенные на рисунке, имеют место быть как в плане, так и в профиле, поэтому для упрощения будем рассматривать вариант в одной плоскости.

Рассмотрим более подробно варианты положения щита, изображенные на рисунке 3.1. Здесь сплошной линией обозначена проектная ось тоннеля, пунктирной линией обозначается допустимое отклонение координат щита от проектного (коридор). Пронумерованные отрезки со стрелками обозначают варианты положения щита, где стрелка указывает на направление движения щита. Варианты положения щита относительно проектной оси следующие:

1 – ось щита параллельна проектной оси и щит находится в коридоре, в данном случае отклонять щит не требуется и должны быть включены все гидроцилиндры одновременно;

2 – щит находится вне допустимого коридора и его ось параллельна проектной, в данном случае необходимо направить носовую точку щита к проектной оси, чтобы щит вернулся в коридор;

3 – щит находится за пределами коридора и направлен к проектной оси, в этом случае вектор «хвост-нож» направлен к проектной оси и отклонять щит от его фактического направления движения не требуется, пока он не пересечет допустимый коридор, следовательно, должны быть включены все гидроцилиндры; однако в этом положении необходимо принять во внимание расстояние от ножевой точки до проектной оси, т.к. в случае существенного отдаления существует вероятность увеличения времени выхода на проектную ось; для определения степени отдаления будем сравнивать расстояние от середины вектора направления щита до точки пересечения его с проектной осью(рис. 3.2).

4 – ножевая точка лежит в допустимом коридоре, хвостовая точка находится за пределами, в этом случае необходимо отклонять щит таким образом, чтобы вектор «хвост-нож» стал параллелен проектной оси, в этом случае после перемещения щита обе точки окажутся в пределах допустимых значений;

5 – ножевая точка лежит за пределами коридора, хвостовая находится в коридоре, в этом случае щит направлен от проектной оси, и необходимо отклонить его в сторону проектной оси, в этом случае в процессе проходки щит будет принимать положения 2 и, затем 4, и вернется в коридор;

6 – в данном случае обе точки щита лежат за пределами коридора и щит направлен от проектной оси, данный случай аналогичен случаю 5: необходимо путем отклонения ножевой точки сориентировать щит так, чтобы он был направлен к проектной оси;

7 – в данном случае обе точки щита находятся в коридоре, и вектор движения щита направлен к проектной оси, однако дальнейшее движение проходческого щита в прямом направлении приведет к пересечению им проектной оси и дальнейшему отклонению от нее, поэтому в таком случае необходимо отклонять ножевую точку щита от проектной оси таким образом, чтобы ось щита была параллельна проектной оси;

8 – порядок действий в этом случае аналогичен действиям в случае 7.

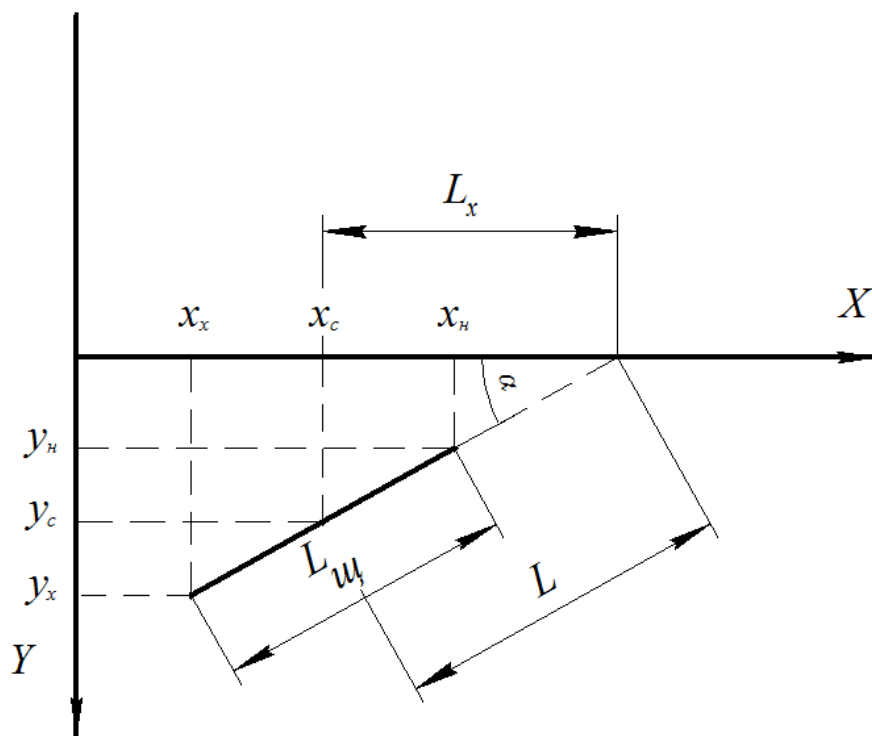


Рисунок 3.2 – к расчету расстояния до проектной оси

По рисунку 3.2 можно вывести формулы определения расстояния от средней точки оси проходческого щита до точки пересечения траектории щита с проектной осью в плоскости XOY :

$$L_{щ} = \sqrt{(x_h - x_x)^2 + (y_x - y_h)^2}, \quad (3.1)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{y_x - y_h}{x_x - x_h}, \quad (3.2)$$

$$y_c = y_h + \frac{y_h - y_x}{2}, \quad (3.3)$$

$$L_x = \frac{y_c}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (3.4)$$

Аналогичным образом определяется расстояние до проектной оси в плоскости XOZ :

$$L_{щ} = \sqrt{(x_h - x_x)^2 + (z_x - z_h)^2}, \quad (3.5)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{z_x - z_h}{x_x - x_h}, \quad (3.6)$$

$$z_c = z_h + \frac{z_h - z_x}{2}, \quad (3.7)$$

$$L_x = \frac{z_c}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (3.8)$$

Введем плоскость ZOY , перпендикулярную проектной оси щита, причем проектная ось проходит через точку $O(0,0)$ и ножевая точка ПЩ принадлежит данной плоскости ZOY , а точка «х» является проекцией хвостовой точки щита на плоскость ZOY (рисунок 3.3).

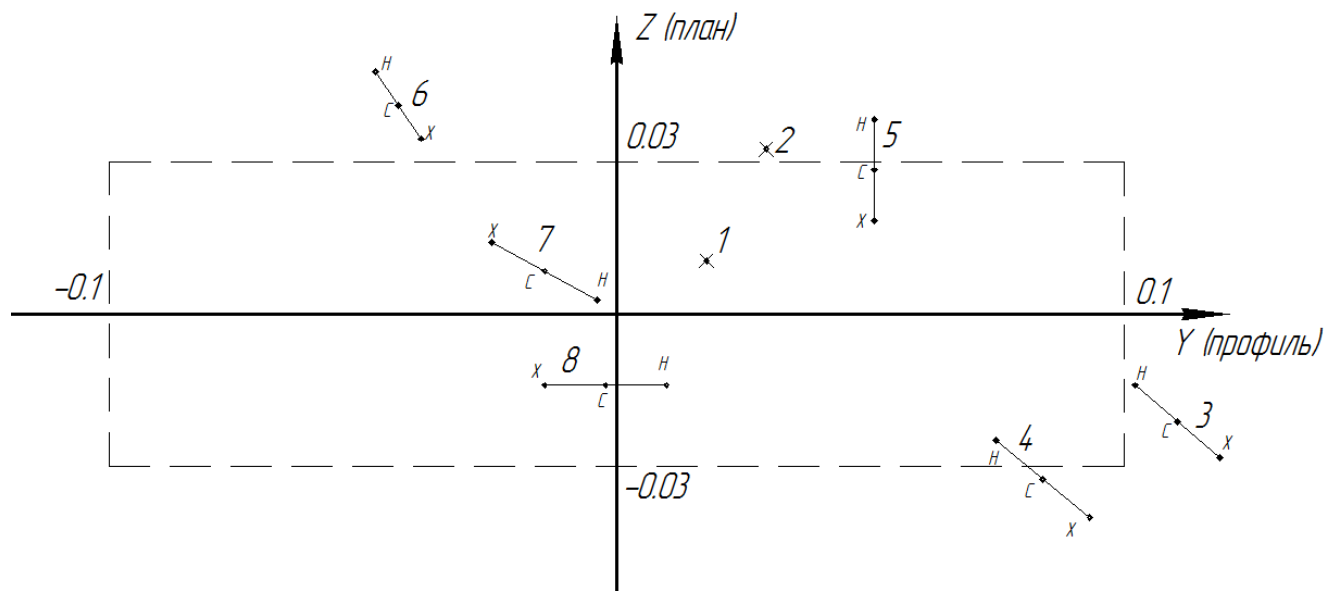


Рис. 3.3 – к вариантам пространственного положения проходческого щита относительно проектной оси

На рисунке 3.3 изображены проекции хвостовой и ножевой точек проходческого щита на плоскость, перпендикулярную проектной оси, где H – координата ножевой точки щита, X – координата хвостовой точки щита, спроецированной на плоскость ZOY , C – координаты середины отрезка XH (центр проходческого щита), цифры 1-8 соответствуют вариантам пространственного положения щита относительно проектной оси.

Анализируя рисунок 3.3 можно сделать вывод, что существует два случая ведения проходческого щита по проектной оси:

- в первом случае, которому соответствуют варианты 2, 3, 4, 6 (рисунок 3.3), координаты средней точки ПЩ находятся за пределами допустимых значений, и ножевую точку ПЩ следует вести к проектной оси;

- во втором случае средняя точка ПЩ и его ножевая или хвостовая точки лежат в диапазоне допустимых значений отклонения от проектной оси, чему соответствуют варианты 5, 7, 8 (рисунок 3.3). В таком случае требуется выровнять ПЩ в

пространстве таким образом, чтобы ось проходческого щита была параллельна проектной оси тоннеля.

Исходя из вышесказанного, возможны два варианта определения отклонения ножевой точки Δ и вычисления комбинации гидроцилиндров перемещения ПЩ.

1. Первый случай возникает, когда выполняется условие $\Delta Z_H > Z_{\max}$ или $\Delta Y_H > Y_{\max}$. Тогда отклонение ножевой точки Δ будет рассчитываться относительно нулевых координат плоскости, т.е. относительно координат проектной оси (рисунок 3.4).

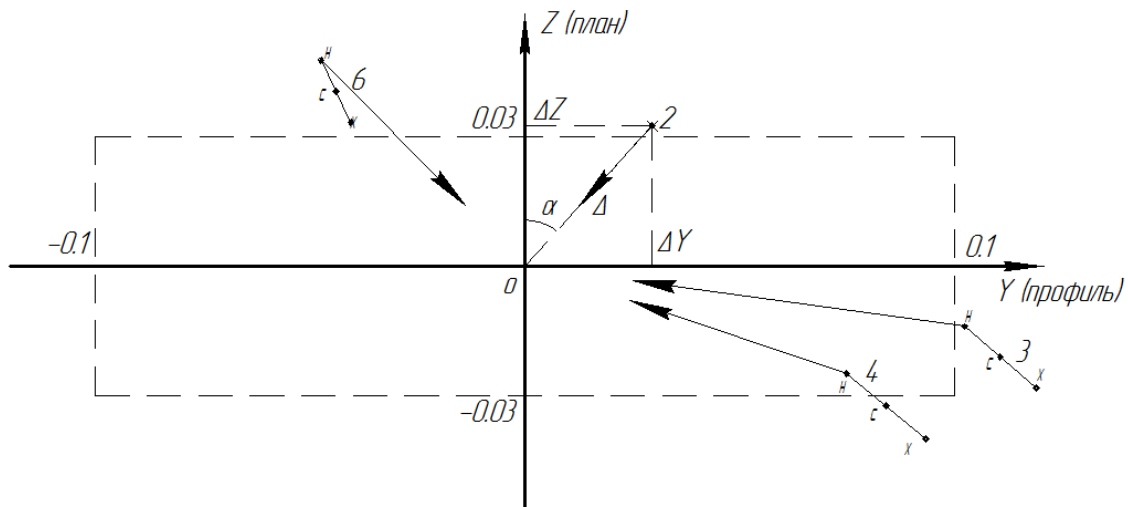


Рис. 3.4 – К расчету отклонения ножевой точки от координат проектной оси

Во втором случае, когда выполняется условие, $\Delta Z_H < Z_{\max}$ или $\Delta Y_H < Y_{\max}$ отклонение будет рассчитываться как разность координат между ножевой и хвостовой точкой, т.е. хвостовая точка будет приниматься как начало координат (рисунок 3.5).

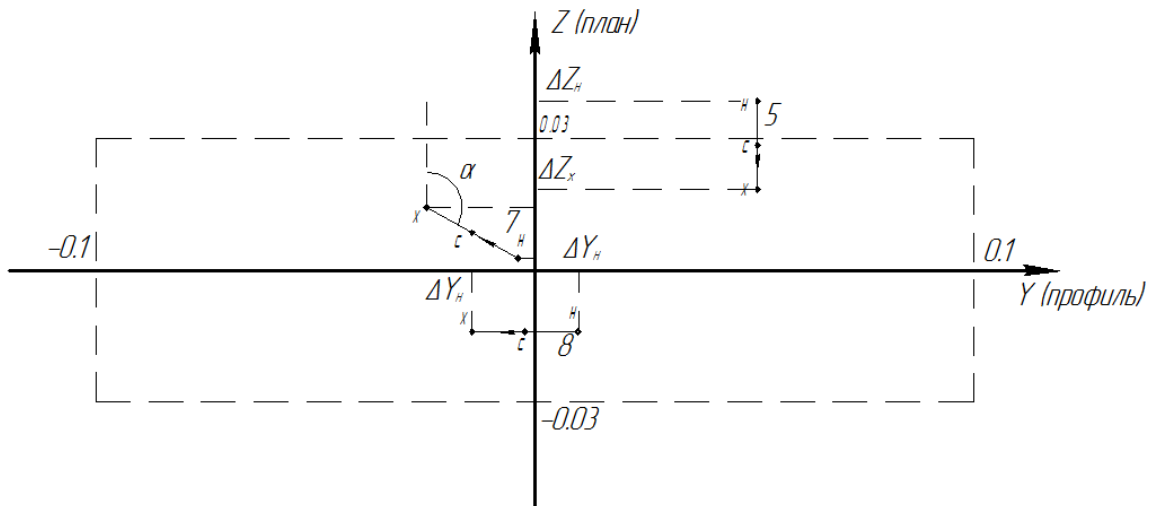


Рис. 3.5 – К расчету отклонения ножевой точки от координат хвостовой точки ПЩ

3.1 Разработка метода определения комбинации гидроцилиндров перемещения проходческого щита

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 проходческого щита с оптимальным регулятором, описанной в [30] (рисунок 3.6) и имеющей следующие исходные данные: масса щита – 10000 кг, скорость движения – 0,041 м/с, усилие гидроцилиндров - 2000 кН, диаметр щита – 1,42 м, длина щита – 4 м, момент инерции щита относительно оси – 14590 кг·м², количество гидроцилиндров – 14 шт. При этом соответствующий управляющий момент реализуется комбинацией гидроцилиндров, определенных методом перебора на ЭВМ.

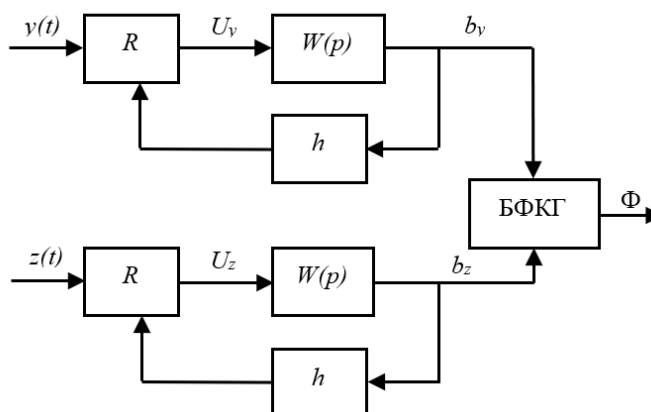


Рисунок 3.6 - Структурная схема системы определения управляющих сигналов и комбинации гидроцилиндров проходческого щита

Используя имеющуюся численную модель (п. 2.2.3), с помощью которой рассчитывается управляющее воздействие, получим следующую схему системы ведения проходческого щита в соответствии с проектным направлением (рисунок 3.1), где $y(t)$, $z(t)$ – координаты ножевой точки щита относительно проектной оси в горизонтальной и вертикальной плоскости соответственно, R – регулятор, $W(p)$ – передаточная функция проходческого щита, h – коэффициенты обратных связей, U_y , U_z – управляющие сигналы регулятора в плане и профиле, b_y , b_z – проекции

радиус-вектора точки приложения главного вектора $\bar{P}$ системы сил на оси OY и OZ , БФКГ – блок формирования комбинации гидроцилиндров.

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

$$M_y = \mu_y \cdot U_y; M_z = \mu_z \cdot U_z, \quad (3.9)$$

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:

$$M_y = b_z \cdot P_x; M_z = b_y \cdot P_x, \quad (3.10)$$

Проекции b_y, b_z могут определяться через проекции радиус-векторов точек приложения усилий отдельных гидроцилиндров (рисунок 3.7).

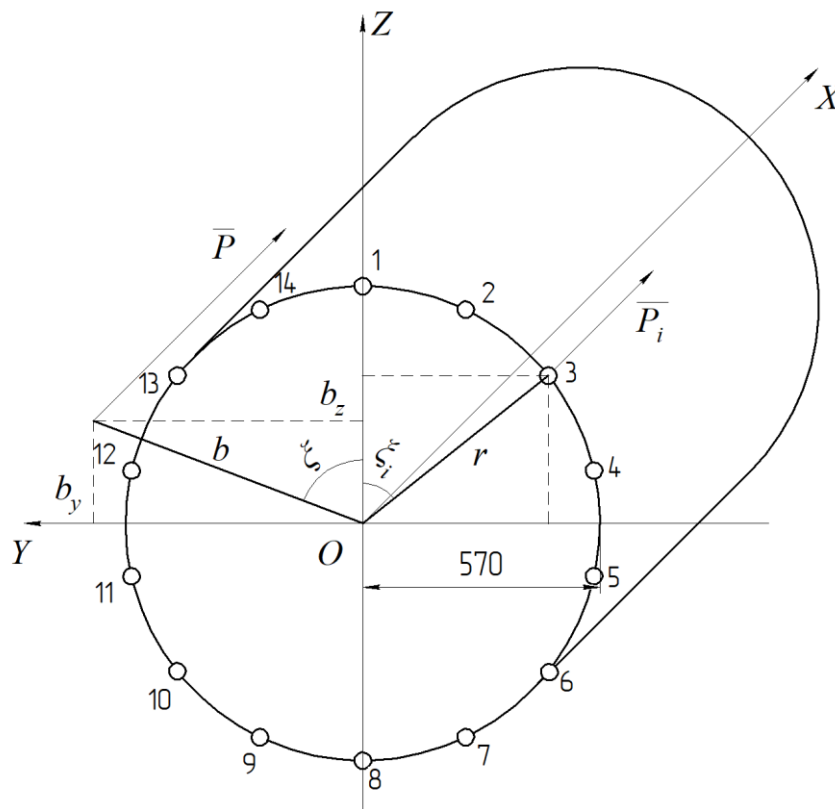


Рисунок 3.7. Расположение гидроцилиндров проходческого щита и направление главного вектора $\bar{P}$ системы сил

$$b_y^* = r \sum_{i=1}^n g_i \sin \xi_i; b_z^* = r \sum_{i=1}^n g_i \cos \xi_i \quad (3.11)$$

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. Подставляя (3.11) в (3.10), получим выражения для определения проекции главного момента:

$$M_y = P_X \cdot r \cdot \sum_{i=1}^n g_i \cos \xi_i; M_z = P_X \cdot r \cdot \sum_{i=1}^n g_i \sin \xi_i, \quad (3.12)$$

Из (3.4) 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. Подставим значения для M_y и M_z из (3.9) в (3.12):

$$U_y = \frac{P_X \cdot r}{\mu_y} \cdot \sum_{i=1}^n g_i \cos \xi_i; U_z = \frac{P_X \cdot r}{\mu_z} \cdot \sum_{i=1}^n g_i \sin \xi_i. \quad (3.13)$$

При известных значениях P_X , r , μ_y и μ_z , выражение (3.13) устанавливает взаимосвязь между управляющим сигналом и совокупностью гидроцилиндров перемещения проходческого щита. Значение проекции главного вектора P_X можно определить, измеряя давление в гидросистеме проходческого щита.

Определим проекции радиус-вектора b из уравнений (3.9) и (3.10):

$$b_z = \frac{\mu_y \cdot U_y}{P_X}; b_y = \frac{\mu_z \cdot U_z}{P_X}. \quad (3.14)$$

С другой стороны, каждому значению b_y и b_z соответствует определенная комбинация гидроцилиндров. Число всех возможных комбинаций можно определить по следующей формуле [31]:

$$\Phi = \sum_{k=m}^N \frac{N!}{(N-k)!k!},$$

где N – максимальное число гидроцилиндров, k – количество гидроцилиндров, включаемых одновременно в отдельной комбинации, m – минимальное число гидроцилиндров, образующих отдельную комбинацию.

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

3.2 Программная реализация метода формирования комбинации гидроцилиндров перемещения проходческого щита

Формирование комбинаций осуществлялось с помощью программного кода, реализованного на языке C++ в среде разработки Microsoft Visual Studio (приложение

А). Суть программы формирования комбинаций гидроцилиндров заключается в формировании бинарной последовательности 0 и 1, которая реализуется с использованием кода Грея [32, 33]. В результате расчета было получено 898 комбинаций. Рассчитаем b_y^* и b_z^* подставив комбинации включения гидроцилиндров в (3.11). В результате расчета получим следующую картину распределения b_y^* и b_z^* (рис.3.8).

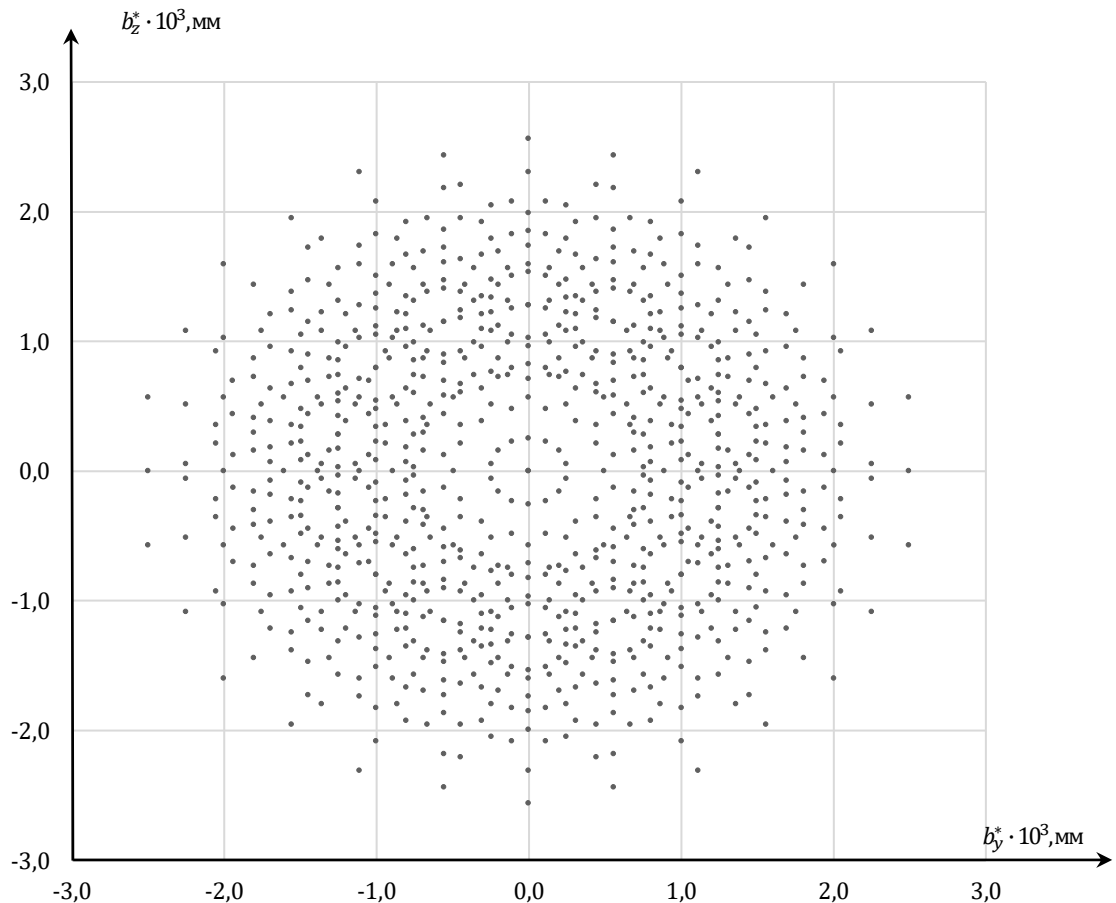


Рисунок 3.8 - Распределение b_y^* и b_z^* в соответствии с заданными комбинациями гидроцилиндров

Сравним рассчитанные по уравнению (3.11) значения b_y^* и b_z^* с определенными по уравнению (3.14):

$$\begin{aligned} b_y - b_y^* &= \min; \\ b_z - b_z^* &= \min. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Причем соотношения (3.7) должны выполняться одновременно:

$$|b_y - b_y^*| + |b_z - b_z^*| = \min. \quad (3.16)$$

Программа сравнения соотношений по формуле (3.8) 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 согласно уравнению (3.14). 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 согласно (3.16).

Таким образом, каждому значению управляющего сигнала U_y и U_z ставится в соответствие определенная комбинация гидроцилиндров перемещения проходческого щита МТПК, наилучшим образом преобразующая выходной сигнал регулятора в вектор главного момента сил.

Используя формулу (3.14) и полученные значения b_y и b_z получим значения отклонения Y и Z , после включения соответствующей комбинации гидроцилиндров (таблица 1):

Таблица 3.1 – Результаты моделирования процесса управления движением проходческого щита

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

Анализируя данные таблицы 3.1, 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.

3.3 Разработка алгоритмов вычисления координат проходческого щита модульной конструкции для устройства позиционирования

3.3.1 Расчет координат проходческого щита

Пусть стартовый блок установлен в точке с известными координатами x_0, y_0, z_0 в локальной системе координат лазерного приемо-передатчика. Тогда по известному углу поворота платформы и расстоянию от источника лазерного излучения до мишени координаты хвостовой части щита определяются в плоскости XOY (рисунок 3.9, б) 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 4.1, в), определяемый инклинометром, h – расстояние от мишени до центральной оси щита. В плоскости XOZ (рисунок 3.9, 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 .

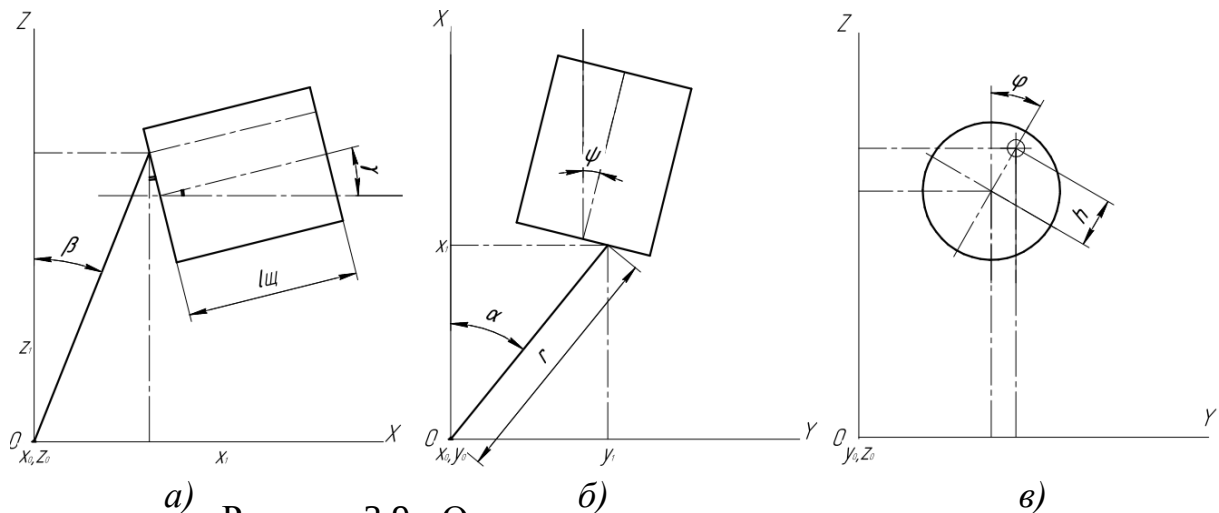


Рисунок 3.9 - Определение координат точек щита

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

$$x_2 = x_1 + \cos \psi \cdot l_{щ};$$

$$y_2 = y_1 + \sin \psi \cdot l_{щ};$$

$$z_2 = z_1 + \sin \gamma \cdot l_{щ};$$

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

3.3.2 Разработка методики преобразования координат

При сооружении коммуникационных тоннелей различного назначения щитовым способом с использованием тоннелепроходческих комплексов на территории строящегося объекта для задания проектных координат создается маркшейдерская опорная геодезическая сеть, в качестве опорных пунктов которой служат пункты государственной геодезической сети и сетей сгущения [34].

Ввиду того, что изначально координаты опорных точек проходческого щита 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, могут быть 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 метода 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 являются [35, 36]:

Вращение вокруг оси X:

$$M_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Вращение вокруг оси Y:

$$M_y = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

Вращение вокруг оси Z:

$$M_z = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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:

$$M_{11} = \cos \alpha \cdot \cos \beta,$$

$$M_{12} = -\cos \alpha \cdot \sin \beta,$$

$$M_{13} = \sin \alpha,$$

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

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

$$M_{23} = -\sin \varphi \cdot \cos \alpha,$$

$$M_{31} = -\cos \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta + \sin \varphi \cdot \sin \beta,$$

$$M_{32} = \cos \varphi \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta + \sin \varphi \cdot \cos \beta,$$

$$M_{33} = \cos \varphi \cdot \cos \alpha$$

Отсюда:

$$\begin{aligned}
X' &= \cos \beta \cdot (X \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \cdot (Z \cdot \cos \alpha - Y \cdot \sin \varphi)) + \sin \beta \cdot (Y \cdot \cos \varphi + Z \cdot \sin \varphi) \\
Y' &= -\sin \beta \cdot (X \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \cdot (Z \cdot \cos \alpha - Y \cdot \sin \varphi)) + \cos \beta \cdot (Y \cdot \cos \varphi + Z \cdot \sin \varphi) \\
Z' &= X \cdot \sin \alpha + \cos \alpha \cdot (Z \cdot \cos \varphi - Y \cdot \sin \varphi)
\end{aligned}$$

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

Полученные выражения позволяют преобразовать координаты ножевой и хвостовой точек проходческого щита, вычисленных в локальной системе координат по методике, описанной в п. 3.3.1 в местную систему координат, используемую на строительной площадке.

Методика определения координат хвостовой части щита основана на применении тахеометрического хода [37], позволяющего определять планово-высотное положение точки в пространстве (рисунок 3.10). Исходя из анализа метода тахеометрического хода, устройство позиционирования проходческого щита МТПК должно состоять из следующих элементов (рисунок 3.11):

- базового лазерного приемо-передатчика, устанавливаемого в стартовой шахте, с возможностью отклонения лазерного луча указателя направления на мишень в горизонтальной и в вертикальной плоскостях;

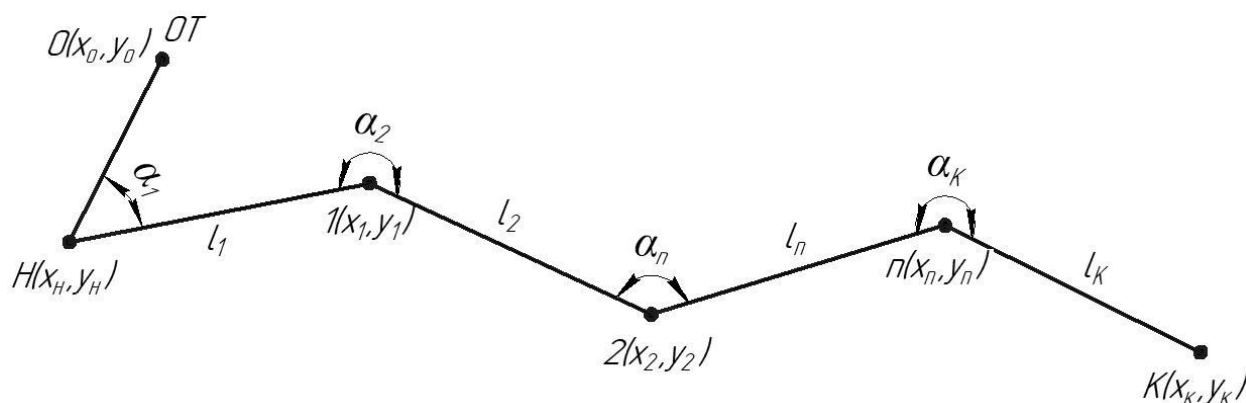
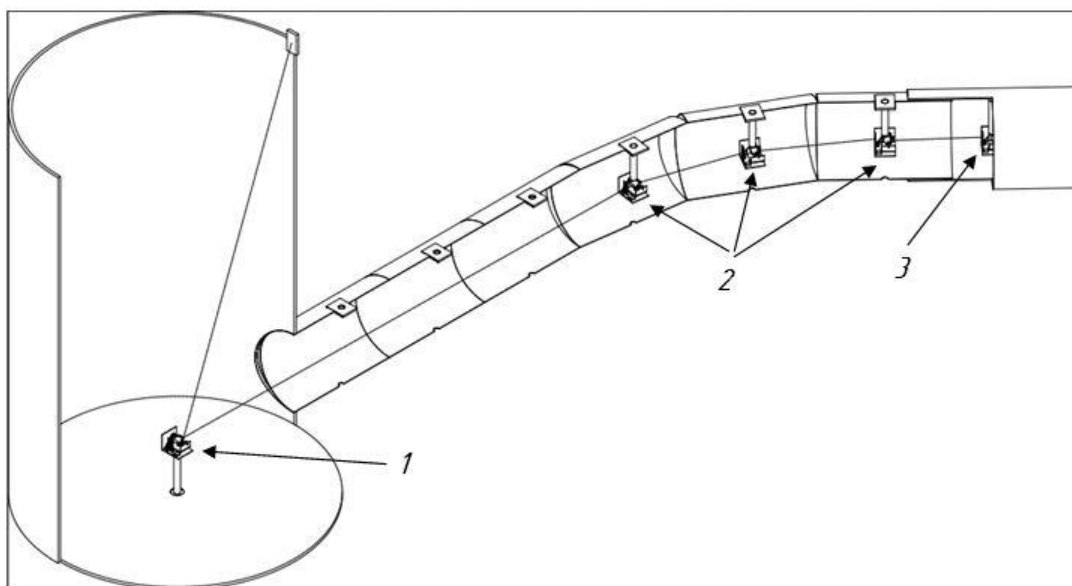


Рисунок 3.10 – Разомкнутый тахеометрический ход

- мишени, расположенной в хвостовой части проходческого щита МТПК;
- промежуточных лазерных приемо-передатчиков, устанавливаемых в верхней части тоннеля и в зоне прямой видимости предыдущего лазерного приемо-

передатчика и мишени последующего модулей, с возможностью отклонения лазерного луча в горизонтальной и в вертикальной плоскостях;

- системы связи, для передачи данных о координатах каждого модуля.



1 – базовый лазерный приемо-передатчик; 2 – промежуточные лазерные приемо-передатчики; 3 – мишень на проходческом щите МТПК

Рисунок 3.11 – Размещение элементов устройства позиционирования проходческого щита МТПК

Такая комбинированная система, содержащая промежуточные модули, позволит определять координаты проходческого не только при прямолинейной проходке на больших расстояниях, но и при строительстве криволинейных тоннелей методом продавливания.

3.4 Результаты и выводы по главе 3

В третьей главе показано, что при определении направления движения проходческого щита необходимо учитывать не только величину отклонения координаты ножевой точки проходческого щита от проектного значения, но также и пространственное положение проходческого щита относительно проектной оси. Для этого были рассмотрены возможные варианты пространственного положения проходческого щита в процессе проходки и определены основные условия выбора направления продавливания.

Предложен метод управления гидроцилиндрами перемещения проходческого щита, суть которого 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 проходческого щита с оптимальным регулятором, для ведения его в соответствии с проектным направлением.

На основе численной модели предложенного метода был разработан алгоритм выбора гидроцилиндров перемещения, основанный на поиске наиболее близкой комбинации гидроцилиндров передвижки, соответствующей необходимому вектору главного момента сил, учитывающий пространственное положение проходческого щита относительно проектной оси. На основе полученного алгоритма было разработано программное обеспечение, формирующее необходимую комбинацию гидроцилиндров.

Моделирование процесса управления движением проходческого щита подтверждает, что предложенный метод обеспечивает требуемую точность ведения проходческого щита в соответствии с проектным направлением. 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

В разделе предложена методика расчета координат хвостовой точки проходческого щита, на основе метода разомкнутого тахеометрического хода. Приведены основные математические соотношения, на базе которых производится расчет координат хвостовой и ножевой точки проходческого щита.

Также была предложена методика преобразования полученных координат в локальной системе координат в местную систему координат, используемую на строительной площадке, основанная на методе матриц направляющих косинусов.

4 Разработка экспериментального образца устройства позиционирования. Экспериментальные исследования

4.1 Структура экспериментального образца устройства позиционирования. Выбор и расчет компонентной базы

Функционально устройство позиционирования проходческого щита МТПК состоит из следующих модулей (Рисунок 4.1):

1) лазерный приемо-передатчик, включающий: лазерный дальномер HIREED hi50A; модуль лазерного излучения ЛМ-650-20АА; два мотор-редуктора 32WJXX-28H250E10-80(100); два абсолютных многооборотных энкодера; два драйвера управления шаговым двигателем DRV8825; приемную фотомишень; преобразователь интерфейса UART/RS-485 MAX485CSA; микроконтроллер STM32F103V8T6;

3) мишень, включающая: преобразователь интерфейса UART/RS-485 MAX485CSA; микроконтроллер STM32F103V8T6; микроэлектромеханическая миниатюрная система определения пространственного положения AR100B;

4) кронштейн крепления мишени.

Устройство позиционирования ПЩ МТПК представляет модульную лазерную систему позиционирования, состоящую из отдельных блоков, которые могут устанавливаться в промежуточных точках тоннеля для обеспечения криволинейной проходки. Лазерный приемо-передатчик размещается в стартовой шахте в заранее известных координатах и мишени, устанавливается в верхней хвостовой части проходческого щита МТПК с точно известными пространственными координатами и является базовой точкой для расчета координат полигонометрии при движении щита МТПК. Лазерный приемо-передатчик, при помощи лазерного целеуказателя, позиционируется в соответствии с заданной осью проходки на центр мишени. При этом, модули соединены проводным интерфейсом RS-485 ModBus RTU.

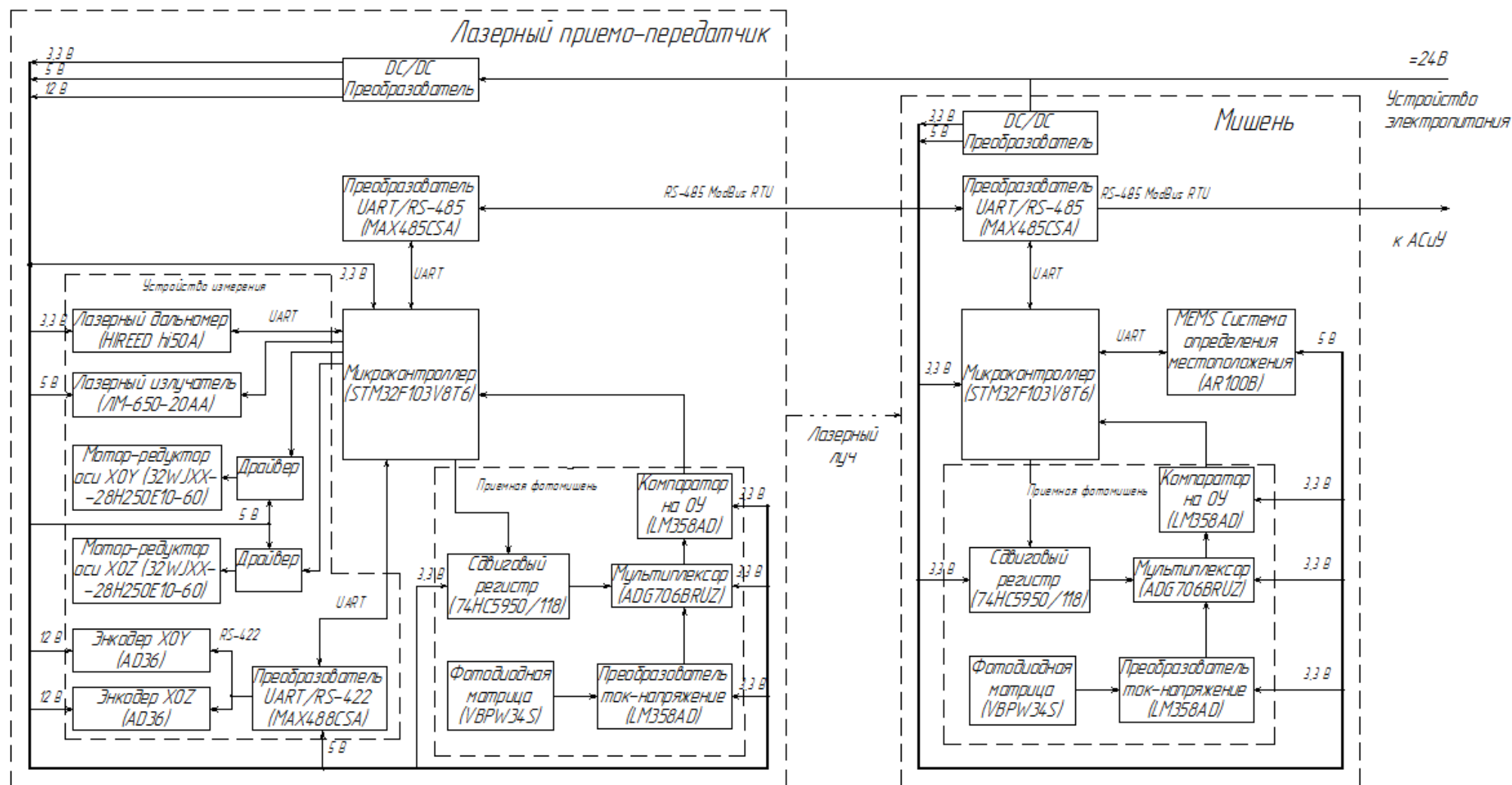


Рисунок 4.1 – Структурно-функциональная схема устройства позиционирования

В начальном положении луч лазера направлен на центральный фотодиод лазерной мишени, устройство мультиплексирования которой определяет засвеченный фотодиод мишени и передает информацию в микроконтроллер лазерного приемо-передатчика. Расстояние до мишени определяется с помощью лазерного дальномера, данные с которого передаются в микроконтроллер. В случае изменения положения МТПК, при котором лазерный луч не попадает на мишень, микроконтроллер, на основании данных о засвеченных фотодиодах в последний момент времени, подает сигнал на драйвер электропривода, что приводит в движение платформу с лазерного целеуказателя и дальномера. Платформа отклоняется до тех пор, пока лазерный луч не попадет обратно на центральный фотодиод мишени. Угол отклонения определяется с помощью оптического энкодера положения поворотной платформы и его значение передается в микроконтроллер. Расстояние до мишени определяется с помощью лазерного дальномера, расположенного на той же платформе, что и лазерный целеуказатель. Микроконтроллер, имея информацию о угле отклонения платформы от базового направления и расстоянии до мишени производит расчет координат хвостовой части проходческого щита МТПК.

Для определения координат ножевой части проходческого щита МТПК используется микроэлектромеханическая система определения пространственного положения (крен, тангаж, курсовой угол). Информация, получаемая с этого устройства, обрабатывается микроконтроллером и позволяет определить координаты ножевой части щита.

Лазерный приемопередатчик устанавливается в точке с заданными координатами на задней стенке стартовой шахты таким образом, чтобы мишень СП ПЩ МТПК находилась в зоне прямой видимости и ориентируется вдоль заданной оси проходки.

Внешний вид лазерного приемо-передатчика изображен на рисунке 4.2.

Мишень устанавливается в верхней хвостовой части проходческого щита МТПК как показано на рисунке 4.3.

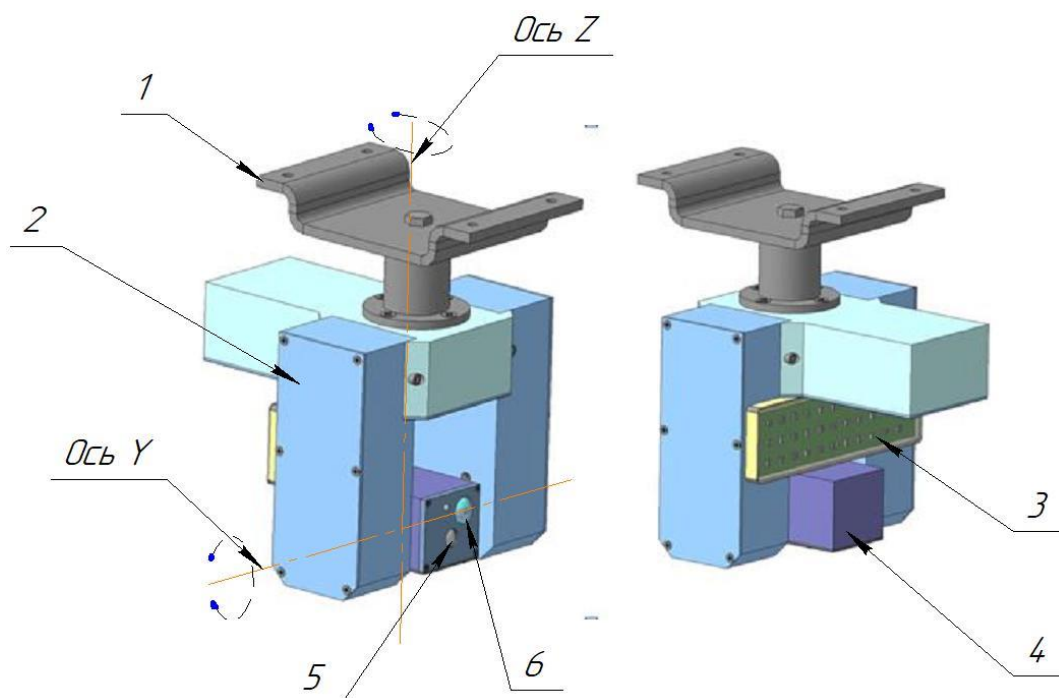


Рисунок 4.2 – Лазерный приемо-передатчик СП ПЩ МТПК 1 – кронштейн подвеса; 2 – поворотная платформа; 3 – фотомшень; 4 – лазерный модуль; 5 – лазер; 6 – лазерный дальномер

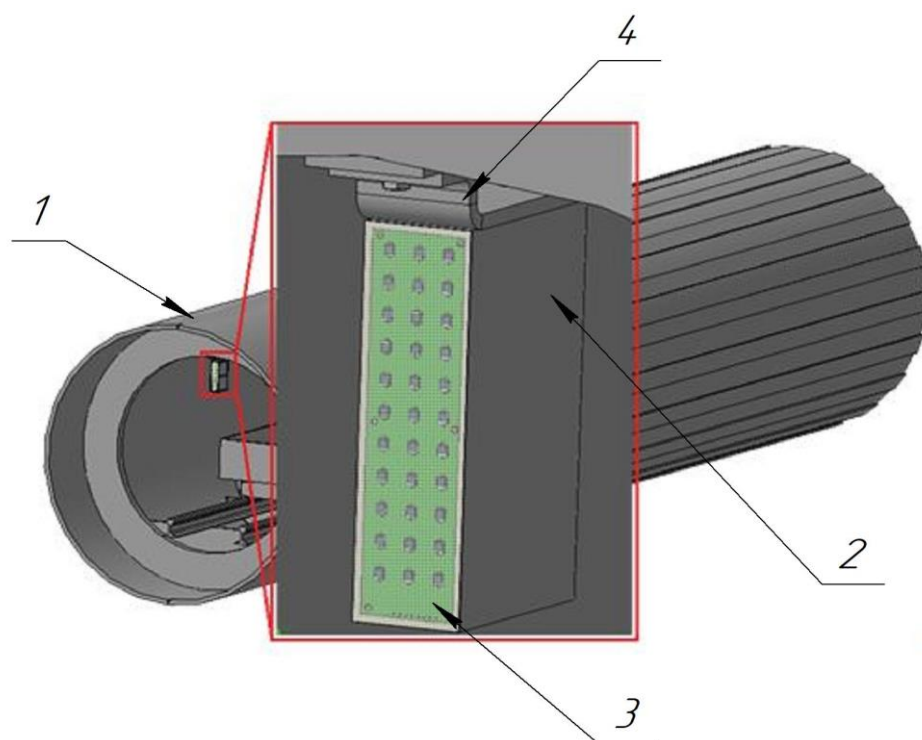


Рисунок 4.3 – Мишень СП ПЩ МТПК в хвостовой части проходческого щита 1 – проходческий щит МТПК; 2 – мишень СП ПЩ МТПК; 3 – матрица фотодиодов; 4 – кронштейн подвеса

Фотомишень засвечивается лазерным лучом, генерируемым модулем лазерного излучения ЛМ-650-200АА лазерного приемо-передатчика СП ПЩ МТПК, который расположен в лазерном модуле 4 поворотной платформы 2 (рисунок 4.2), причем лазерный модуль 4 имеет возможность изменения угла наклона в вертикальной плоскости вокруг оси Y (рисунок 4.2), при этом поворотная платформа 2 имеет возможность вращения в горизонтальной плоскости вокруг оси Z. Изменение положения координат мишени в пространстве определяется по отклонению углов наклона поворотной платформы 2 и лазерного модуля 4, а так же расстояния до мишени, измеряемого лазерным дальномером HIREED hi50A 6. Вращение поворотной платформы и лазерного модуля осуществляется с помощью мотор-редукторов 32WJXX-28H250E10-100 и 32WJXX-28H250E10-80. Определение углов поворота платформы осуществляется посредством абсолютных многооборотных датчиков угловых перемещений (энкодеров) AD36. Полученные данные обрабатываются микроконтроллером STM32F103V8T6 и передаются в ЭВМ с помощью интерфейса RS-485 ModBus. Координаты ножевой части определяются по известным координатам хвостовой части, габаритным размерам проходческого щита и его углам наклона. Углы наклона проходческого щита в пространстве определяются миниатюрной микроэлектромеханической системой определения местоположения AR100B, в составе которой имеется трехосевой гироскоп, акселерометр и магнитометр.

В случае криволинейной проходки тоннеля, когда приемная фотомишень выходит за пределы прямой видимости модуля лазерного излучения, к подвижной крепи тоннеля крепится промежуточный модуль устройства позиционирования, состоящий из вращающейся платформы и закрепленной на ней приемной фотомишени. Такое решение позволяет определять координаты по цепочке: стартовый модуль – промежуточный модуль – приемная фотомишень хвостовой части щита. Тогда определение координат хвостовой части щита МТПК производится следующим образом:

- 1) базовый модуль БМ определяет координаты промежуточного модуля ПМ и, по проводному каналу связи RS-485 протокол ModBus RTU, передает их в ПМ.

2) вычислительная система ПМ, с учетом своего пространственного положения, которое определяется углами крена $\varphi_{\text{ПМ}}$, тангажа $\alpha_{\text{ПМ}}$ и рысканья $\beta_{\text{ПМ}}$, рассчитывает координаты мишени щита МЩ (последующего модуля ПМ_n) по выражению:

$$x_{n+1} = x_n + l_{n+1} \cdot \cos(\alpha_{n1} + \alpha_{n2}),$$

$$y_{n+1} = y_n + l_{n+1} \cdot \sin(\alpha_{n1} + \alpha_{n2}),$$

где l_{n+1} - расстояние до модуля, координаты которого следует определить; x_n, y_n - координаты модуля который определяет координаты; α_{n1}, α_{n2} - угол визирования на предыдущий и последующий модули соответственно (рисунок 4.4).

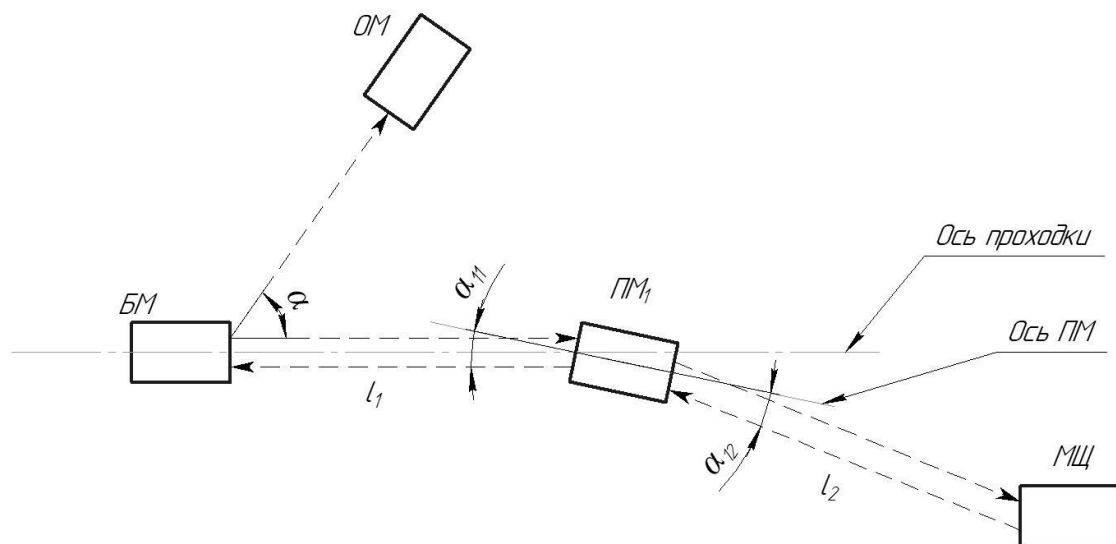


Рисунок 4.4 – К определению координат мишени проходческого щита МТПК

Углы визирования α_{n1}, α_{n2} определяются путем поворота промежуточного модуля в обратную сторону и поиска мишени, закрепленной на предыдущем модуле.

4.1.1 Расчеты, подтверждающие адекватность выбора компонентов устройства позиционирования

4.1.1.1 Лазерный излучатель

Выбранный модуль лазерного излучения ЛМ-650-20АА имеет расходимость пучка излучения $\theta = 0,5$ мрад, вследствие этого на больших расстояниях диаметр светового пятна будет увеличиваться согласно формуле:

$$D = 2 \cdot L \cdot \tan(\theta) + d,$$

где L – расстояние до мишени, θ – расхожимость пучка излучения, d – диаметр пучка излучения на выходе.

Подставив в данную формулу параметры модуля лазерного излучения ЛМ-650-20АА, получим диаметр пятна на расстоянии 100 метров:

$$D = 2 \cdot 100 \cdot \operatorname{tg}(0.028647^\circ) + 0.005 = 105 \text{ мм.}$$

Следовательно, для регистрации пятна лазерного целеуказателя, размер мишени должен быть не менее 105 мм.

4.1.1.2 Оптическая мишень

Оптическая мишень представляет собой пластину с закрепленными на определенном расстоянии фотоэлементами, которые регистрируют попадание лазерного излучения. В качестве регистрирующих компонентов могут быть использованы фотодиоды. Количество фотоэлементов и расстояние между ними определяется диаметром пятна лазерного целеуказателя на максимально возможном расстоянии 100 метров и требуемой точностью позиционирования. В соответствии с требованием ТЗ устройство позиционирования проходческого щита должна рассчитывать местоположение проходческого щита МТПК с точностью не более 0,1 м в плане и 0,03 м в профиле на всем протяжении возведения подземной горной выработки. Для надежной фиксации и удержания лазерного пятна диаметром 105 мм на расстоянии 100 метров, размеры фотодиодной мишени должны быть несколько больше диаметра лазерного пятна. Расстояние между фотоэлементами должно составлять не более диаметра пятна на минимальном расстоянии 5 метров от источника лазерного излучения до мишени, составляющем 10 мм. Для определения направления смещения в горизонтальной плоскости необходимо расположить фотодиоды в 3 ряда.

Принимая вышеуказанные требования, рассчитаем количество фотодиодов по вертикали для мишени:

$$N_{\phi} = \frac{L_m}{D_L + l_{\phi}} = \frac{150}{10 + 4} = 10,3,$$

где L_m – предварительная высота фотомишени, D_L – минимальный диаметр светового пятна, l_{ϕ} – ширина фотодиода.

Принимаем количество фотодиодов $N_{\phi} = 11$.

Следовательно, полное количество фотодиодов на фотоматрице будет составлять 33 шт.

В связи с тем, что при освещении выходным параметром фотодиода в функции освещенности является ток, то необходимо использовать преобразователь ток-напряжение. Данный преобразователь реализован на ОУ с коэффициентом усиления, обеспечивающим выходное напряжение 5В (рисунок 4.5).

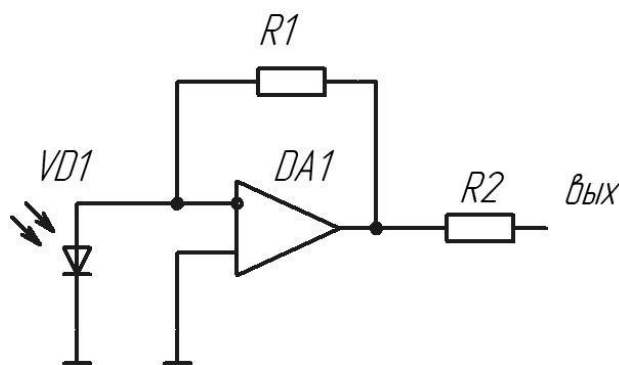


Рисунок 4.5 – Схема включения фотодиода матрицы

В качестве операционного усилителя D1 используется интегральный сдвоенный ОУ типа LM358 в корпусе soic8. Величина резистора $R1$ находится из выражения:

$$R1 = \frac{U_{вых}}{I_{\phi}} = \frac{5}{55 \cdot 10^{-6}} = 90,9 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

Принимаем $R1 = 91 \text{ кОм}$.

Для исключения дребезга при переходе уровня напряжения с логического нуля на единицу и наоборот необходимо использовать компаратор. Используем в качестве компаратора операционный усилитель с положительной обратной связью, т.к. в компараторе без ОС может возникать «дребезг» выходного сигнала, т.е. небольшая высокочастотная помеха (мВ) в момент срабатывания может привести к многократному изменению выходного сигнала в пределах $\pm U_{п}$.

Чтобы устранить влияние помехи необходимо обеспечить срабатывание и отпирание компаратора при разных напряжениях, т.е. получить характеристику с гистерезисом (рисунок 4.6).

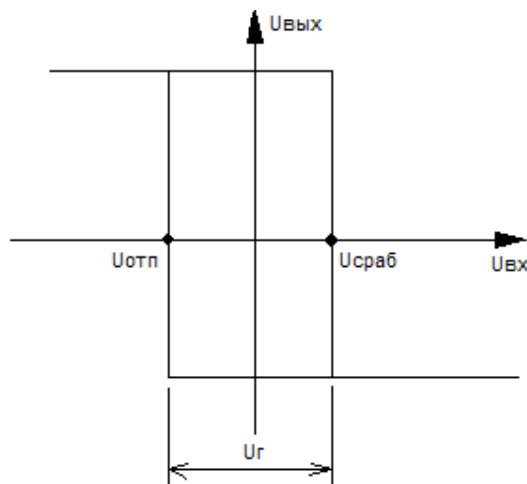


Рисунок 4.6 – Функция гистерезиса

Такая характеристика может быть получена с помощью ОУ, охваченного положительной обратной связью (ПОС). ПОС образуется, если часть выходного сигнала ОУ подать на неинвертирующий вход ОУ (рисунок 4.7). Часть выходного сигнала формируется с помощью резистивного делителя.

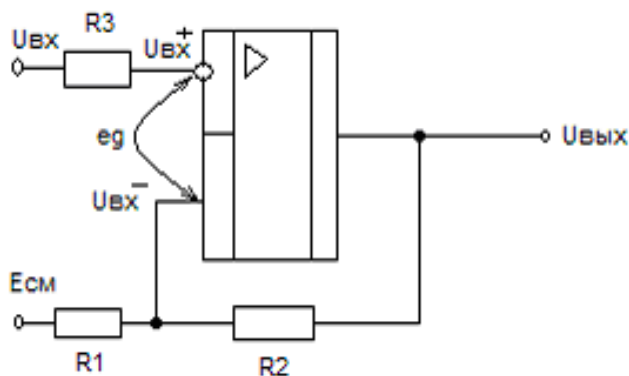


Рисунок 4.7 – Схема компаратора на ОУ

В такой схеме условием срабатывания или отпускания будет $e_o = U_{вх}^+ - U_{вх}^- = 0$. Определим входные напряжения, при которых происходит срабатывание и отпускание:

$$а) U_{вх}^- = U_{вх},$$

$$б) U_{вх}^+ = U_{вых} \cdot R_1 / (R_1 + R_2) + E_{см} \cdot R_2 / (R_1 + R_2).$$

Для момента срабатывания

$$U_{вых} = +E_n \text{ и } U_{вх_{сраб}} = E_n \cdot R_1 / (R_1 + R_2) + E_{см} \cdot R_2 / (R_1 + R_2),$$

Для момента отпускания

$$U_{\text{вых}} = -E_{\text{п}} \text{ и } U_{\text{exomn}} = -E_n \cdot R_1 / (R_1 + R_2) + E_{\text{см}} \cdot R_2 / (R_1 + R_2).$$

$E_{\text{см}}$ используется для перемещения характеристика вдоль оси входных напряжений без изменения её ширины.

Ширина петли гистерезиса может быть изменена за счет глубины ПОС, т.е. за счет выбора отношения резисторов R_1 и R_2 . При этом

$$U_z = U_{\text{excraб}} - U_{\text{exomn}} = 2 \cdot E_n \cdot R_1 / (R_1 + R_2).$$

На вход компаратора подаются импульсы прямоугольной формы. Напряжение питания стандартное $E_n = 5B$. Рассчитаем значения резисторов R_1 и R_2 :

$$U_z = 2 \cdot E_n \cdot R_1 / (R_1 + R_2) = 0.1B,$$

$$U_z = U_{\text{excraб}} - U_{\text{exomn}} = 2 \cdot E_n \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$$

$$U_z = 0.1B \Rightarrow U_{\text{excraб}} = 0.05B, U_{\text{exomn}} = -0.05B$$

$$2 \cdot E_n \cdot R_1 / (R_1 + R_2) = 0.1 \Rightarrow R_1 / (R_1 + R_2) = 0.01$$

Выберем $R_1 = 1\text{кОм}$, тогда $R_2 = 99\text{кОм}$

$$-1.55 + 0.05 = 5 \cdot 0.01 + E_{\text{см}} \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

$$-1.55 - 0.05 = -5 \cdot 0.01 + E_{\text{см}} \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

$$R_2 / (R_1 + R_2) = 0.99$$

$$E_{\text{см}} = -1.55 / 0.99 = -1.56B$$

В качестве компаратора используется второй в корпусе ОУ LM358.

4.1.1.3 Привод поворотной платформы

Для обеспечения вращения приводов поворотной платформы необходимо чтобы двигатели обеспечивали достаточный крутящий момент.

Рассчитаем необходимый крутящий момент двигателя для привода вращения по горизонтальной оси:

Крутящий момент двигателя должен быть больше силы трения покоя, возникающей в упорном подшипнике.

Сила трения покоя равна:

$$F_{mp} = k_0 \cdot m \cdot g = 0.15 \cdot 2.8 \cdot 9.81 = 4.12 \text{ Н},$$

где m – масса груза, k_0 – коэффициент трения покоя для упорного подшипника.

Следовательно, крутящий момент двигателя должен превышать значение 2,35 Н/м. Ось вращения платформы в вертикальной плоскости будет находиться в центре масс платформы, следовательно, моменты силы, действующие на платформу со стороны действия силы тяжести будут уравновешены. Таким образом, для определения требуемого крутящего момента двигателя необходимо определить только силу трения скольжения, возникающую при контакте «вал-посадочное место (подшипник)».

В этом случае сила трения скольжения равна:

$$F_{mp.ск} = k_1 \cdot m \cdot g = 0.15 \cdot 0.428 \cdot 9.81 = 0.73 \text{ Н},$$

где k_1 – коэффициент трения скольжения для пары вал-подшипник, m – масса платформы с лазером и дальномером.

Выбранные мотор-редукторы 32WJXX–28H250E10-80 и 32WJXX–28H250E10-100 имеют момент на выходном валу много выше, чем минимальный рассчитанный и, следовательно, могут быть использованы в конструкции устройства позиционирования.

4.1.1.4 Расчет угла поворота платформы

Для определения углов поворота платформы в плане и профиле зададимся минимальным расстоянием от лазерного приемо-передатчика до мишени $r = 6$ м. Выбор расстояния обусловлен габаритными размерами стартовой шахты, которые в свою очередь зависят от размера секции проходческого щита и силового гидроблока МТПК. Внутренний диаметр трубы составляет 1 м, следовательно, для охвата всей площади сечения внутреннего пространства трубы необходимо, чтобы платформа поворачивалась на угол:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{d/2}{r}\right) = \arctg\left(\frac{0.5}{6}\right) = 4.76^\circ.$$

Таким образом, величина отклонения модуля в профильной плоскости должна составлять не менее $\pm 4.76^\circ$. Примем угол отклонения поворотной платформы равный $\pm 6^\circ$.

4.1.1.5 Датчик положения

Исходя из требований к точности определения координат щита не менее 0,1м в плане и 0,03м в профиле, а также принятому максимальному расстоянию между промежуточными модулями 100 м, минимальная точность позиционирования угла наклона поворотной платформы в вертикальной плоскости составит:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{\Delta}{r} = \frac{0.03}{100} = 0.017188^\circ.$$

Минимальная точность позиционирования угла наклона поворотной платформы в горизонтальной плоскости:

$$\alpha_2 = \arctg \frac{\Delta}{r} = \frac{0.1}{100} = 0.0573^\circ.$$

При этом минимальное разрешение устройства, определяющего угол наклона, с учетом передаточного отношения должно быть не менее:

$$\varepsilon_1 = \frac{360}{0.017188 \cdot 100} = 210,$$

$$\varepsilon_2 = \frac{360}{0.0573 \cdot 80} = 78.53.$$

В связи с тем, что при повороте платформы в горизонтальной или вертикальной оси двигатель совершает некоторое количество оборотов, для определения угла поворота платформы необходимо использовать многооборотные энкодеры абсолютного типа.

Для поставленных задач соответствуют многооборотные абсолютные энкодеры AD36 с количеством импульсов на оборот – 1024, полностью удовлетворяющие заявленным требованиям.

4.2 Разработка программного обеспечения устройства позиционирования

4.2.1 Описание программного обеспечения устройства позиционирования

Для обеспечения требуемой функциональности контроллера обработки данных, в среде программирования Arduino IDE было разработано программное обеспечение микроконтроллера STM32F103C8T6 (приложение В).

Программа обеспечивает управление измерительными устройствами, обработку информации и передачу данных в систему управления МТПК. Основными задачами программы являются:

- передача команд по интерфейсу RS-485 ModBus RTU между ПЭВМ, лазерным приемо-передатчиком и мишенью;
- обмен массивами данных по интерфейсу RS-485 ModBus RTU между ПЭВМ, лазерным приемо-передатчиком и мишенью;
- опрос измерительных устройств;
- определение координат хвостовой части проходческого щита МТПК в системе координат МСК;
- определение координат ножевой части проходческого щита МТПК в системе координат МСК;
- самодиагностика работоспособности устройства позиционирования ПЩ МТПК.

Программное обеспечение устройства позиционирования разработано в среде Arduino IDE v.1.8.8. Программа построена по блочному принципу, что позволяет оперативно менять программную реализацию любого блока, наращивать функциональные характеристики изделия [52 - 57]. Так же в программе присутствуют интегрированные библиотеки - наборы элементов кода, которые устанавливаются отдельно от среды разработки и служат для организации программного взаимодействия с электронными модулями макета устройства позиционирования проходческого щита МТПК.

Программное обеспечение состоит из следующих блоков:

- setup – блок программы, осуществляющий инициализацию устройства при включении;
- loop – основной блок программы;
- matrix_survey - блок программы, выполняющий опрос фотодиодной матрицы;
- matrix_sum – блок программы, выполняющий анализ матрицы состояния фотоэлементов фотодиодной матрицы;

- motor_rotation – блок программы, выполняющий управление шаговыми двигателями;
- crc - блок программы, выполняющий проверку контрольной суммы принятых фреймов данных;
- laser_distance_meter - блок программы, выполняющий опрос лазерного дальномера;
- eEncoderState - блок программы, считывающий состояние датчиков угла поворота платформы в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- giroskop - блок программы, выполняющий обмен информацией с датчиком гироскопа;
- frame - блок программы, выполняющий обмен данных с ПЗУ контроллера
- diagnostics - блок программы, выполняющий самодиагностику устройства позиционирования.

4.2.2 Порядок работы программного обеспечения СП ПЩ МТПК.

Перед началом проходки, оператор проходческого щита посредством панели управления вводит координаты базового лазерного приемо-передатчика (установлен в стартовой шахте) и координат мишени. После чего, данные координаты установленных модулей СП ПЩ МТПК, контроллером системы управления МТПК по интерфейсу RS-485 ModBus RTU передаются в контроллер устройства позиционирования (команда 01 таблица 4.6). Принятые данные о координатах заносятся в память контроллера и иницируется режим поиска мишени подачей команды 03 по интерфейсу RS-485 ModBus RTU. Поиск мишени осуществляется путем поворота платформы с лазерным целеуказателем слева направо и сверху вниз до тех пор, пока хотя-бы один из фотоэлементов матрицы мишени не будет засвечен лазерным указателем. В этом случае, мишень формирует фрейм ответа на команду лазерного приемо-передатчика с кодом 03 и передает пакет данных 33 байта (команда 03 таблица 4.6) о состоянии засветки матрицы фотоэлементов. Контроллер приемо-передатчика, получив фрейм ответа с данными о засветке фотоэлементов мишени, определяет дальнейшее направление перемещения целеуказателя в горизонтальной плоскости для его вывода в центр мишени и посылает команду 03. Далее цикл

повторяется до тех пор, пока луч лазера не окажется в центральной части мишени. Затем по аналогии начинается поиск середины мишени в вертикальной плоскости. При установке лазерного целеуказателя в центр мишени опрашиваются показания датчиков угла поворота платформы по горизонтальной и вертикальной осям, и производится опрос лазерного дальномера. Текущие углы поворота платформы и расстояние до мишени заносятся в память контроллера как базовое направление, относительно которого далее будут вычисляться координаты мишени.

В случае необходимости проведения измерения координат ножевой и хвостовой частей проходческого щита МТПК по интерфейсу RS-485 ModBus RTU подается команда 02 (таблица 4.1). По данной команде инициируется процесс поиска центра мишени аналогичный описанному ранее, после чего опрашиваются датчики угла поворота и производится измерение расстояния до мишени. Вычисляются величины углов отклонения мишени от базового направления и вычисляются координаты хвостовой части щита МТПК в соответствии с методикой, приведенной в главе 3 настоящей работы. Далее с микроэлектромеханической системы AR100B по интерфейсу UART считываются данные о текущем положении мишени (вектор движения, углы крена и тангажа) и на основе геометрических параметров проходческого щита вычисляются координаты ножевой части ПЩ МТПК.

Измеренные координаты ножевой и хвостовой частей ПЩ МТПК передаются в контроллер системы управления МТПК в ответном фрейме данных на команду 02 (см. таблицу 4.1).

Если, при поиске центра мишени, углы отклонения поворотной платформы от базового направления превышают 6 градусов в плане и профиле соответственно, то в ответном фрейме данных на команду 02 передается код ошибки pp=9 информирующий о необходимости установки промежуточного модуля СП ПЩ МТПК.

Для установки промежуточного лазерного приемо-передатчика необходимо по интерфейсу RS-485 ModBus RTU передать фрейм команды 05 (см. таблицу 4.1). По этой команде базовый лазерный приемо-передатчик формирует широковещательную команду 06 всем модулям устройства позиционирования ПЩ для инкремента адресов устройств

на шине, а вновь установленному модулю присваивается адрес равный «1» и иницируется процесс поиска центра мишени установленного промежуточного лазерного приемо-передатчика аналогичный описанному ранее. После этого опрашиваются датчики угла поворота и производится измерение расстояния до мишени, вычисляются величины углов отклонения мишени промежуточного модуля от базового направления и координаты хвостовой части щита МТПК. Текущие углы поворота платформы и расстояние до мишени заносятся в память контроллера как базовое направление, относительно которого далее будут вычисляться координаты мишени. Вычисленные координаты промежуточного модуля передаются по интерфейсу RS-485 ModBus RTU в теле команды 04 тому промежуточному модулю, координаты которого были определены. Данные координаты необходимы для определения координат последующего модуля (мишени ПЩ МТПК) методом тахеометрического хода. Затем подается команда «Измерение координат мишени с адресом ВВ» и каждый модуль по цепочке определяет центр мишени и расстояние до нее. Каждый предыдущий модуль по команде «Передача измеренных координат (x,y,z) модуля с адресом ВВ в модуль с адресом ВВ» передает информацию о местоположении последующему модулю.

Самодиагностика работоспособности устройства позиционирования МТПК осуществляется перед каждым циклом измерения координат проходческого щита путем формирования команды 10 по интерфейсу RS-485 ModBus RTU (см. таблицу 4.1) по очереди каждому модулю устройства позиционирования. По этой команде, производится тестовое перемещение поворотной платформы и опрос энкодеров, опрос канала измерения расстояния. В случае отсутствия данных о повороте платформы или ответа от лазерного дальномера, формируется фрейм ответа с соответствующим кодом ошибки, в случае исправности модулей приемо-передатчика возвращается код ошибки pp=0.

Таблица 4.1 – Формат команд СП ПЩ МТПК

Код программы	Формат запроса	Формат ответа	Описание
01	01 01 XX _Б YY _Б ZZ _Б XX _М YY _М ZZ _М aa aa	01 01 00	Команда от АСУ МТПК установка координат мишени и стартового модуля

02	01 02 00	01 02 XX _н YY _н ZZ _н XX _х YY _х ZZ _х nn aa aa	Команда от АСиУ Измерение координат ножевой и хвостовой части щита МТПК
03	BB 03 00 aa aa	(BB-1) 03 CC _{i,k} , CC _{i,k+1,...} , CC _{i,11} , CC _{i+1,k} , CC _{i+1,k+1,...} , CC _{i+1,11} , CC _{i+2,k} , CC _{i+2,k+1,...} , CC _{i+2,11} aa aa	Поиск центра мишени с адресом BB
04	BB 04 xx yy zz aa aa	01 04 nn aa aa	Передача измеренных координат (x,y,z) модуля с адресом BB в модуль с адресом BB
05	01 05 00	01 05 nn aa aa	Команда от АСиУ Установка промежуточного модуля
06	FF 05 00		Установка промежуточного модуля
10	BB 10 00 aa aa	01 10 BB nn aa aa	Самодиагностика

Примечание:

aa aa – два байта контрольной суммы фрейма данных ModBus RTU;

CC – байт состояния фотоэлемента оптической матрицы (0 – не засвечен; 1 – засвечен);

i – строка матрицы фотоэлементов оптической мишени;

k – столбец матрицы фотоэлементов оптической мишени;

XX_н, YY_н, ZZ_н – координаты ножевой части щита МТПК, тип данных Real двойной точности;

XX_х, YY_х, ZZ_х – координаты хвостовой части щита МТПК, тип данных Real двойной точности;

XX_б, YY_б, ZZ_б – координаты установки базового лазерного приемо-передатчика в стартовой шахте;

XX_м, YY_м, ZZ_м – координаты установки мишени ПЩ МТПК;

BB – адрес лазерного приемо-передатчика к которому посылается команда;

nn – код ошибки (nn=0 – данные приняты, nn=1 – не отвечает мотор-редуктор ZX, nn=2 – не отвечает мотор-редуктор YX, nn=3 – нет ответа от датчика поворота ZX, nn=4 – нет ответа от датчика поворота YX, nn=5 – не отвечает плата гироскопического контроля, nn=6 – не отвечает устройство измерения расстояния, nn=7 – приняты поврежденные данные, nn=8 – нет ответа от фотодиодной мишени, nn = 9 – необходимо установить промежуточный модуль).

Полный текст программы управления приведен в приложении В.

4.3 Порядок работы устройства позиционирования в составе системы управления микротоннелепроходческим комплексом

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 [58 - 61]. Мишень, располагаемая в первой секции тоннелепроходческого щита, выступает ведомым устройством в сети протокола ModBus RTU (рисунок 4.26). Аппаратная часть системы определения местоположения выполнена на базе 32 разрядного ARM микроконтроллера фирмы STMicroelectronics.

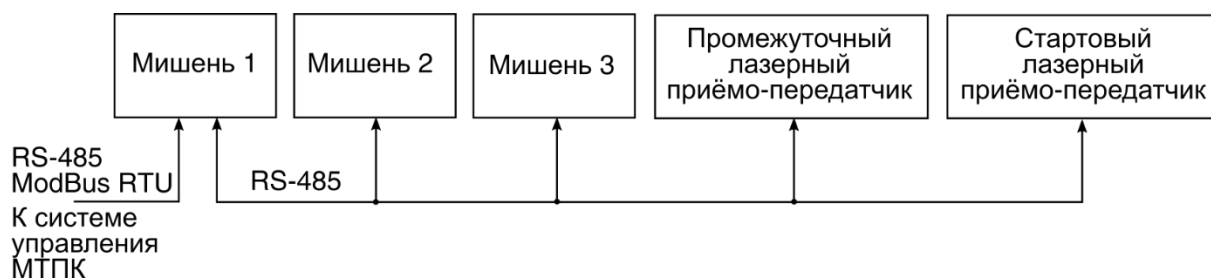


Рисунок 4.8 - Структурная схема устройства позиционирования

Основная задача ведущего устройства устройства позиционирования – ожидание наличия команд от автоматизированной системы управления МТПК. При отсутствии неисправностей в устройстве позиционирования оператор проходческого щита посредством панели управления вводит координаты базового лазерного приёмо-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 приёмо-передатчик целеуказателем позиционируется на центр мишени, установленной в хвостовой части проходческого щита. Измеренные значения являются базовыми для расчета координат при движении щита МТПК.

Алгоритм определения координат опорных точек модулей проходческого щита содержит следующие шаги:

- 1) стартовый приёмо-передатчик устанавливается в стартовой шахте и направляется на приемную фотомишень, установленную в хвосте модуля проходческого щита;

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 проходческого щита и его углам наклона в пространстве рассчитываются координаты хвостовой и ножевой точек модуля проходческого щита;

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

6) после завершения цикла перемещения 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.

Работу устройства позиционирования как части системы управления микротоннелепроходческим комплексом можно представить следующим образом (рис. 4.27):

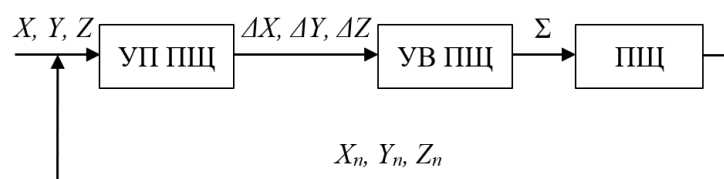


Рисунок 4.9 - Функциональная схема управления проходческим щитом МТПК

Здесь: X, Y, Z – проектные координаты тоннеля, УП ПЩ – устройство позиционирования проходческого щита, $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – отклонение ножевой точки щита от проектных координат, УВ ПЩ – устройство вывода проходческого щита на проектную ось, Σ – комбинация гидроцилиндров перемещения, ПЩ – проходческий щит, X_n, Y_n, Z_n – координаты ножевой точки ПЩ после цикла перемещения. В систему управления МТПК вносятся проектные координаты тоннеля в местной системе координат, после измерения координат опорных точек модулей проходческого щита

определяется отклонение координат ножевой точки от проектных, на основании которого устройством вывода проходческого щита на проектную ось формируется комбинация гидроцилиндров перемещения щита [62], благодаря чему проходка осуществляется в соответствии с проектным направлением. Текущее пространственное положение и траектория движения проходческого щита отображается на панели оператора МТПК (рис. 4.28).

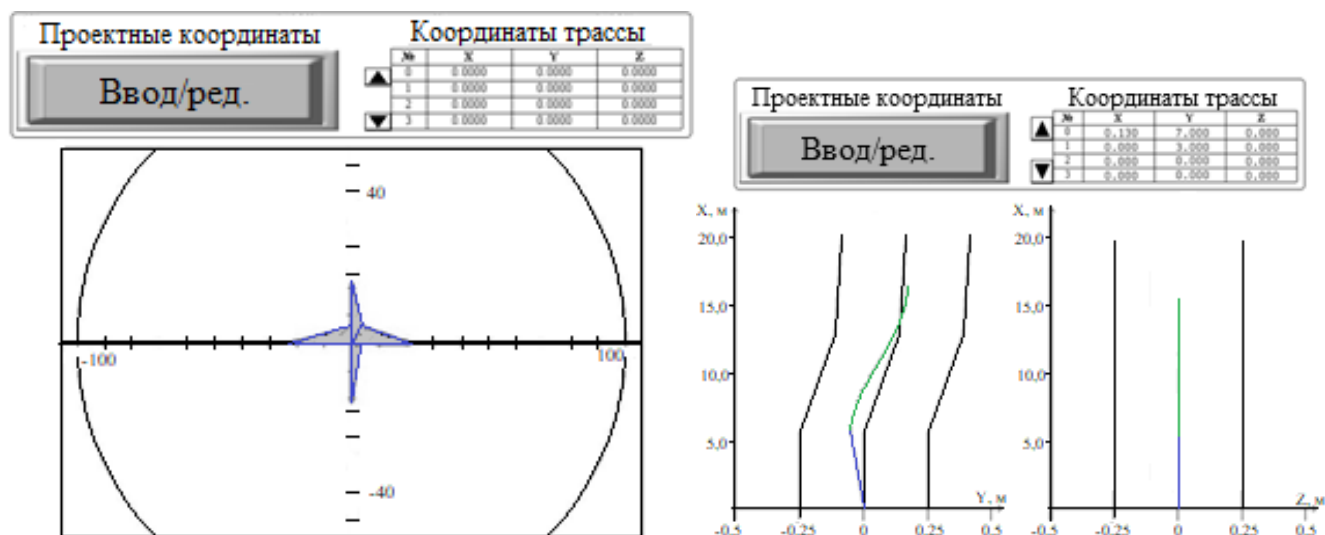


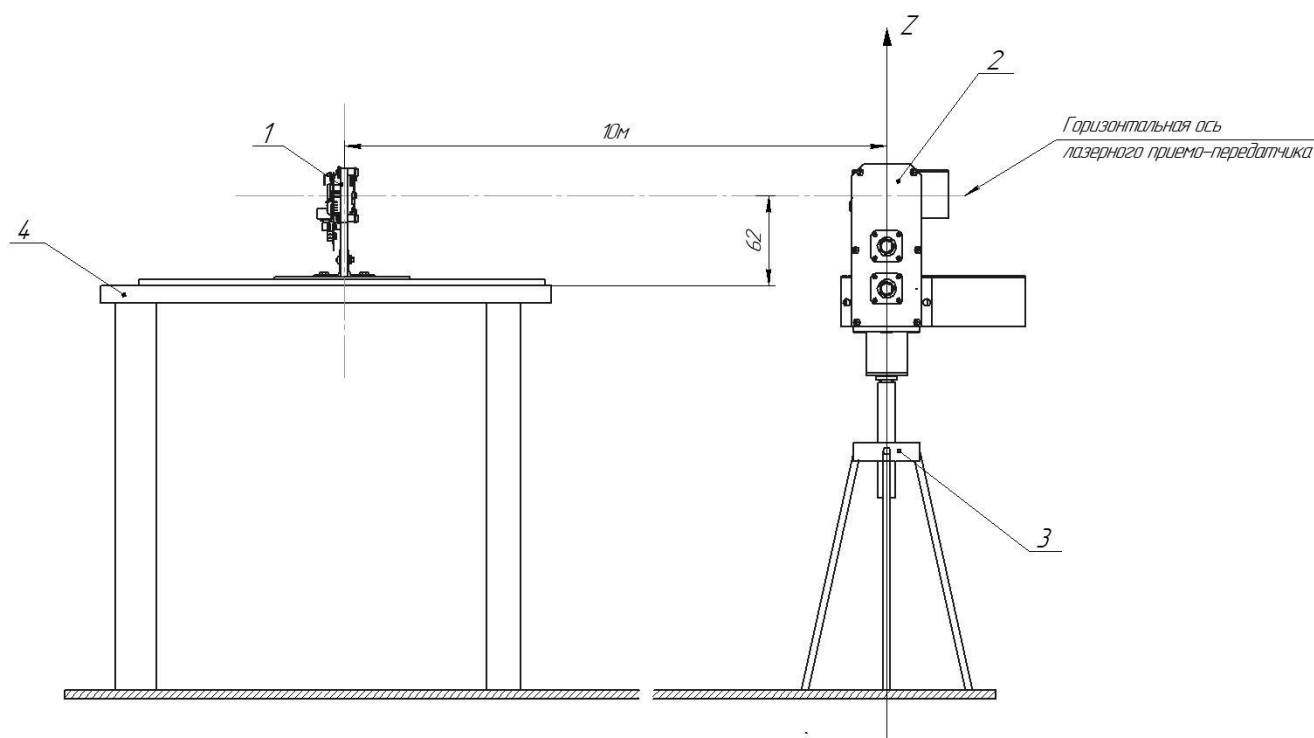
Рисунок 4.10. Отображение пространственного положения и траектории движения проходческого щита на панели оператора

4.4 Экспериментальное исследование устройства позиционирования

4.4.1 Лабораторные исследования устройства позиционирования

Для проведения экспериментальных исследований в лабораторных условиях, на горизонтальную поверхность (стол или аналогичную поверхность), устанавливается платформа с градуированной шкалой, на которую устанавливается мишень. Мишень на платформе позиционируется путем совмещения продольных и поперечных меток с продольной (ось X) и поперечной (ось Y) линиями координатной сетки платформы. Лазерный приемо-передатчик устанавливается на штатив. Штатив позволяет изменять положение лазерного приемо-передатчика относительно мишени в профильной плоскости (ось Z (рисунок 4.29)). Измерение величины смещения в профильной плоскости производится рулеткой. Расстояние между центральной

вертикальной осью мишени и вертикальной осью лазерного приемо-передатчика устанавливается равное 10 м.



1 – мишень; 2 – лазерный приемо-передатчик;

3 – штатив; 4 – стол

Рисунок 4.11 – Установка лазерного приемо-передатчика

Исследование параметров устройства выполняется следующим образом:

1. Лазерный приемо-передатчик располагается на расстоянии 10 м от центральной вертикальной оси мишени.

2. Выполняется серия исследовательских испытаний, состоящая из 16 измерений координат (X_i , Y_i) мишени при варьировании ее координат на платформе.

При этом:

- координаты мишени изменяются в соответствии с таблицей 4.2. Изменение координат мишени производится путем совмещения продольных и поперечных меток с соответствующими требуемым координатам продольными (ось X) и поперечными (ось Y) линиями координатной сетки платформы.

- изменение координаты Z осуществляется путем изменения высоты штатива, на котором установлен лазерный приемо-передатчик.

- после каждого изменения координат мишени производится измерение координат мишени.

7. Полученные значения координат X_i , Y_i мишени для каждой из 16 точек измерения вносятся в таблицу 4.7.

По результатам испытаний определяется погрешность измерения координат положения мишени по следующей формуле:

$$\delta = |x - x_i|,$$

где x – действительное значение координаты (X , Y), мм;

x_i – измеренное значение координаты (X_i , Y_i), мм.

Испытательный стенд приведен на рисунке 4.30. Результаты экспериментальных измерений координат мишени сведены в таблицу 4.2. Графики измерения заданных и измеренных координат X , Y , Z приемной фотомишени, с указанными границами допустимого отклонения координат ± 10 мм представлены на рисунках 4.31 – 4.33.



Рисунок 4.12 – Стенд для проведения лабораторных экспериментальных исследований устройства позиционирования

Таблица 4.2– Результаты измерения координат

№ п/п	X, мм	Y, мм	Z, мм	X_i , мм	Y_i , мм	Z_i , мм	δ_x , мм	δ_y , мм	δ_z , мм
1	10	0	80	12,2	9,6	79,3	2,2	9,6	0,7
2	20	0	70	18,6	9,4	68,4	1,4	9,4	1,6
3	50	0	60	54,4	6,4	55,6	4,4	6,4	4,4
4	100	0	50	95,9	4,8	44,3	4,1	4,8	5,7
5	-10	0	40	-9,4	8,4	38,1	0,6	8,4	1,9
6	-20	0	30	-15,8	4,5	31,6	4,2	4,5	1,6

7	-50	0	20	-46,6	8,3	24,4	3,4	8,3	4,4
8	-100	0	10	-107,4	5,1	14,9	7,4	5,1	4,9
9	0	10	0	3,9	13,9	-2,3	3,9	3,9	2,3
10	0	20	-10	7,4	19,4	-11,4	7,4	0,6	1,4
11	0	50	-20	7,8	43,9	-18,9	7,8	6,1	1,1
12	0	100	-30	5,9	102,1	-27,4	5,9	2,1	2,6
13	0	-10	-40	9,4	-18,6	-37,6	9,4	8,6	2,4
14	0	-20	-50	1,3	-21,9	-48,8	1,3	1,9	1,2
15	0	-50	-60	2,4	-53,4	-58,4	2,4	3,4	1,6
16	0	-100	-70	2,3	-98,6	-71,3	2,3	1,4	1,3

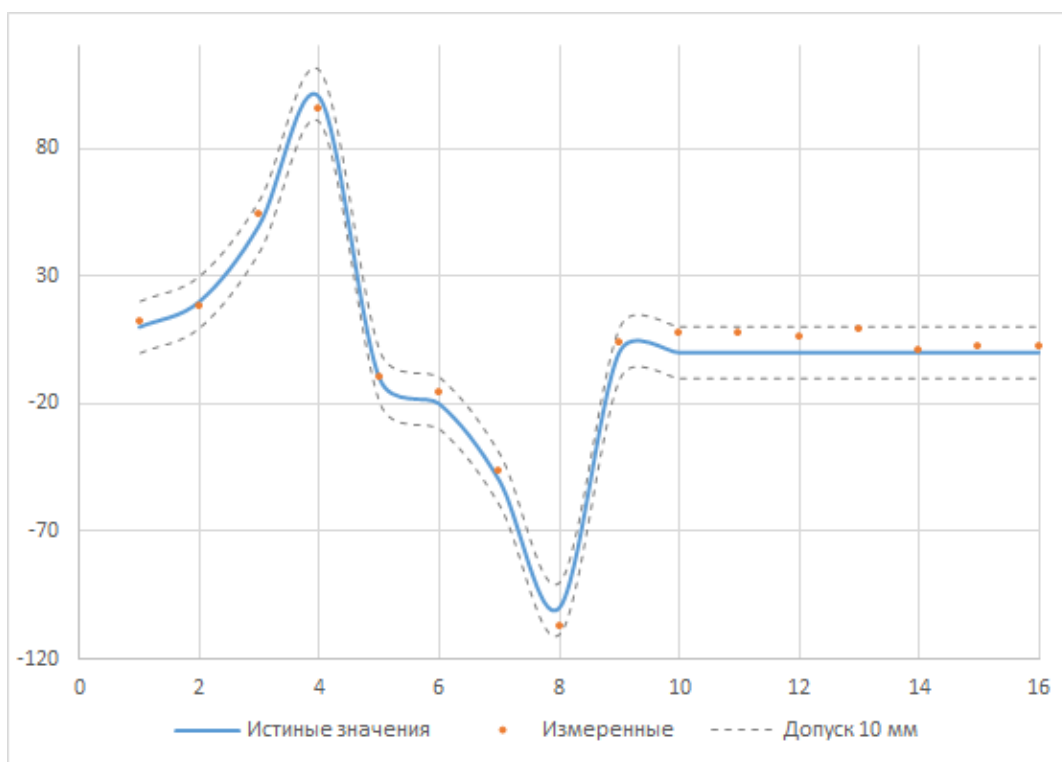


Рисунок 4.13 – График изменения заданного и измеренного значения координаты X

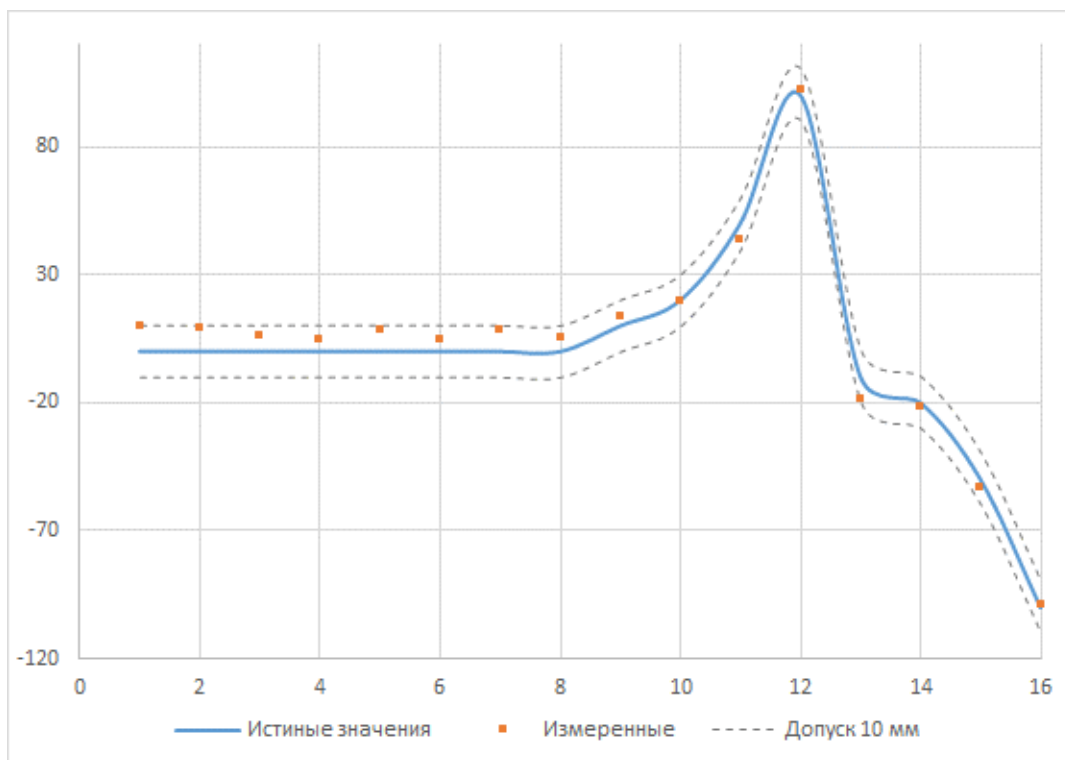


Рисунок 4.14 - График изменения заданного и измеренного значения координаты Y

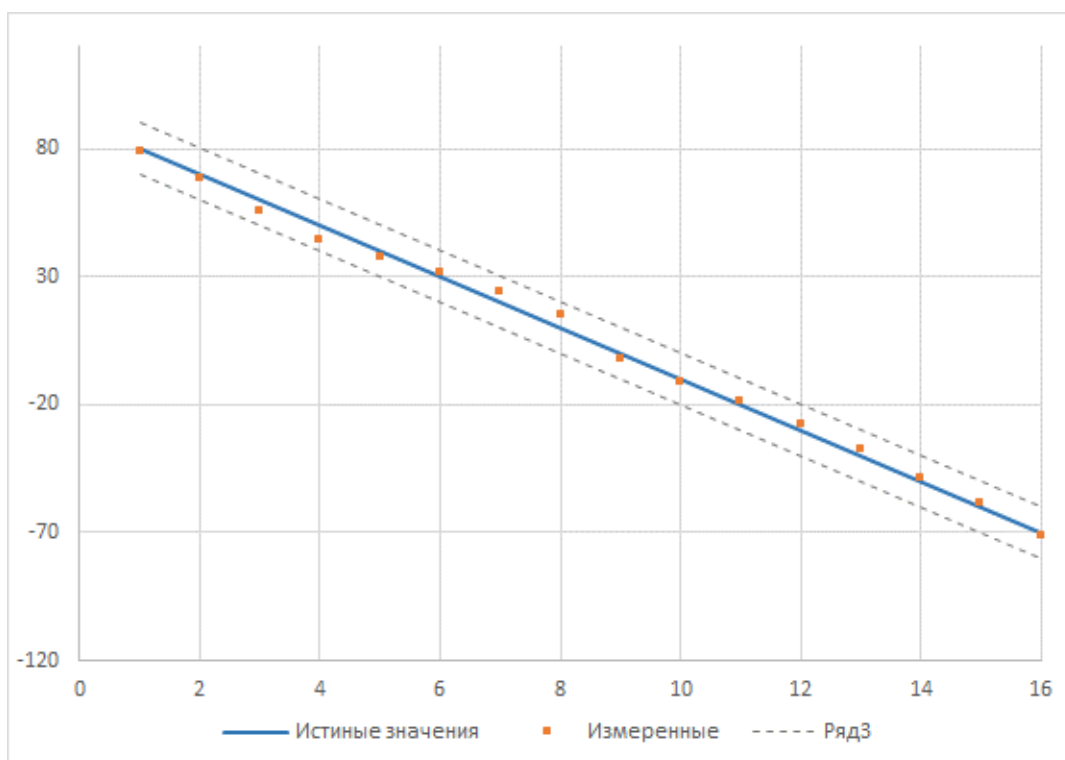


Рисунок 4.15 - График изменения заданного и измеренного значения координаты Z

Из графических и аналитически полученных результатов видно, что с помощью устройства позиционирования координаты определяются с заданной точностью. Погрешность измерения координат не превышает допустимых ± 10 мм.

4.4.2 Экспериментальные полевые исследования устройства позиционирования

Для исследования возможности применения системы подземной навигации в проходческих щитах малого диаметра были проведены экспериментальные исследования системы подземной навигации на существующем проходческом щите диаметром 1420 мм (рисунок 4.34).

Исследования проводились следующим образом:

- в стартовой шахте устанавливался лазерный приемо-передатчик, ориентированный на приемную фотомишень, расположенную внутри корпуса модуля проходческого щита,
- истинные координаты ножевой и хвостовой точки модуля проходческого щита определялись с помощью тахеометра,
- лазерным приемо-передатчиком определялись стартовые координаты ножевой и хвостовой точки проходческого щита,
- с помощью гидроцилиндров производилось продавливание модуля проходческого щита на заданное расстояние,
- тахеометром определялись новые истинные значения координат ножевой и хвостовой точек щита,
- определялись координаты с помощью системы подземной навигации.

После чего цикл повторялся необходимое количество раз.





Рисунок 4.16 – Экспериментальное исследование возможности применения системы подземной навигации на проходческом щите малого диаметра

4.5 Результаты и выводы по главе 4

Основные результаты главы заключаются в следующем:

- разработана функциональная схема и конструкция устройства позиционирования, состоящего из лазерного приемо-передатчика и приемной фотомишени;
- выполнены расчеты, необходимые для выбора конструктивных и схемотехнических элементов устройства позиционирования;
- разработаны электрические принципиальные схемы модулей управления лазерным приемо-передатчиком и приемной фотомишеней, а также топология печатных плат;
- разработано программное обеспечение устройства позиционирования, описан порядок работы устройства в составе системы управления микротоннелепроходческим комплексом;
- проведены экспериментальные лабораторные и полевые исследования образца устройства позиционирования. В процессе экспериментальных исследований разработанное устройство показало стабильную работу. На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что разработанное устройство отвечает предъявляемым требованиям в отношении точности определения координат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Исследование разработанной численной модели с регулятором, показало, что изменение внешних условий проходки влияет на характер движения проходческого щита, но при этом регулятор обеспечивает необходимую точность ведения щита.

3. Разработан метод определения 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. Разработанная методика определения координат ножевой точки проходческого щита модульной конструкции, основанная на вычислении координат хвостовой точки проходческого щита модульной конструкции, 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 на основе метода матриц направляющих косинусов.

6. Разработаны алгоритмы функционирования устройства в целом и его 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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Применение спутниковых навигационных систем в глубоких карьерах, подземных горных выработках / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/primenenie-sputnikovyh-navigatsionnyh-sistem-v-glubokih-karierah-podzemnyh-gornyh-vyrabotkah> (дата обращения 25.08.21)
2. Загретдинов Р.В. Спутниковые устройства позиционирования. Конспект лекций / Р.В. Загретдинов, Каз. федер. ун-т. – Казань, 2014. – 148 с.
3. SLS Microtunnelling L / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://vmt-gmbh.de/en/products/navigate-tunnelling/microtunnelling/sls-microtunnelling-l/> (дата обращения: 25.08.21)
4. Зум В. Инновации третьего поколения в бестраншейной технологии строительства тоннелей [Электронный ресурс] // Союздонстрой [сайт].- Режим доступа: <http://soyuzdonstroy.ru/ru/presscentr/nauchnye-publikacii/innovacii-tretego-pokoleniya-v-bestranshejnoy-tehnologii-stroitelstvatonnelej.html>
5. Perforator РВА-155 – шедевр горизонтального бурения / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gorbur.ru/oborudovanie/perforator-pba-155-shedevr-gorizontalnogo-bureniya.html> (дата обращения 25.08.21)
6. Пат. 2197616 РФ МПК E21D9/093
7. Пат. 2385418 РФ МПК E21D9/00
8. Пат. 2405937 РФ МПК E21D9/093
9. Тоннельная навигация / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geoprogram.ru/tunnel> (дата обращения: 26.08.21)
10. Curved microtunnel success in the USA / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tunneltalk.com/USA-Jul2010-First-planned-curved-microtunnel-in-USA.php> (дата обращения 26.08.21)
11. Селиванова Л.М., Шевцова Е.В. Инерциальные навигационные системы: учеб. пособие. – Ч.1: Одноканальные инерциальные навигационные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 46 с.

12. КомпаНав-2МТ Малогабаритная интегрированная инерциально-спутниковая навигационная система для наземного применения – описание системы / [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.teknol.ru/pdf/rus/2015/CN_2MT_land_description_rus_2015.pdf (дата обращения 25.01.19)
13. Providing an ultimate solution to tunnel navigation. // Inżynieria Bezwykopowa, special edition NO-DIG 2005 p.30-33
14. Глебов Н.А. Автоматизация горного оборудования: учебное пособие / Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ). 2010. - 110 с.
15. Sterling, R. L. Developments and Research Directions in Pipe Jacking and Microtunneling. Underground Space V.5 (2018) p. 1-19. doi:10.1016/j.undsp.2018.09.001
16. Ваколюк А.Я. Лазерная система управления движением мехатронного комплекса для строительства минитоннелей. дисс. канд. технн. наук. Новочеркасск, 2011. 198 с.
17. Бестраншейная прокладка коммуникаций с применением микрощитов // [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.sibdom.ru/article.php?id=122> (дата обращения 01.10.19)
18. Бренер В.А. Щитовые проходческие комплексы: Учебное пособие. М. 2009. 447 с.
19. Клавдиев А.А. Теория автоматического управления в примерах и задачах. Ч.1: Учебное пособие. СПб. 2005. 74 с.
20. Рыбаков А.П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика): Технический учебник-справочник. М. 2005. 304 с.
21. Глебов Н.А. Управление движением мехатронных комплексов в подземном строительстве // Материалы 5-й научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление», г. Санкт-Петербург, 14-16 октября 2008 г. – Спб, 2008.- с. 170-173
22. Глебов Н.А. Управление движением мехатронных комплексов в неформализованной внешней среде // Изв. вузов. Сев. - Кавк. Регион. Техн. науки.- 2008.-Спец.выпуск; Проблемы мехатроники. –С.58-63.

23. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1969.-384 с.
24. Воронцов Г.В. Введение в математическую теорию оптимального оценивания и управления состоянием технических систем: Учебное пособие // Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ).-Новочеркасск: ЮРГТУ(НПИ), 2006.–308 с
25. Черных, И. В. Simulink: Инструмент моделирования динамических систем / И. В. Черных. – Москва : Техноперспектива, 2003. – 252 с.
26. Simulink – моделирование и симуляция динамических систем для Simulink // Электронный ресурс. URL: <https://matlab.ru/products/simulink> (Дата обращения 06.11.18)
27. Воронин А.В. Моделирование мехатронных систем: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 127 с.
28. Fritzson P. Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 3.3: A Cyber-Physical Approach 2nd Edition. – Wiley_IEEE Press, 2014. – 1265 p.
29. Загороднюк В.Т. Пелих А.С. Логическая схема системы автоматической стабилизации проходческого щита // Автоматизация горных машин. - Новочеркасск, 1971. - с. 29 - 32.
30. Батюков А.В., Глебов Н.А., Павленко А.В., Земляной М.А., Живодерников А.В. Численное моделирование процесса движения щита микротоннелепроходческого комплекса // Изв. вузов. Сев. Кавк. регион. Техн. Науки. 2019. № 4. С. 44-50.
31. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 569с.
32. Рыжиков Ю.И. Решения научно-технических задач на персональном компьютере. – Спб.: КОРОНА принт, 2000.-272 с
33. Кнут, Дональд Э. Искусство программирования / выпуск 3: Пер. с англ.–М.: ООО «И.Д.Вильямс», 2007.-Т.4. 208с.
34. Руководящий документ РД 07-226-98 Инструкция по производству геодезическо-маркшейдерских работ при строительстве коммунальных тоннелей и инженерных коммуникаций подземным способом

35. Фу К. Робототехника: Пер. с англ. / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. – М.: Мир, 1989. – 624 с.,
36. Роджерс Д. Математические основы машинной графики: Пер. с англ. / Д. Роджерс, Дж. Адамс. – М.: Мир, 2001. – 604 с.
37. Ю.К. Неумывакин, Е.И. Халугин, П.Н. Кузнецов, А.В Бойко Под Редакцией В.П. Савинных и В.Р. Ященко. 2. Топографические съемки // Геодезия топографические съемки. — Москва: "Недра", 1991. — С. 157. — 317
38. Лазерный дальномер 100 м / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://goo-gl.ru/PpG> (дата обращения 20.02.22).
39. М. Гук Аппаратные интерфейсы ПК. Энциклопедия. Спб.: «Питер», 2002. - 528 с.
40. Лазерные модули с коллимированным излучением / [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://kantegir.com/laser_module/ (дата обращения 20.02.22).
41. Миленина, С. А. Электротехника, электроника и схемотехника : учебник и практикум для вузов — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 406 с.
42. Кравченко, В.Б. Электроника и схемотехника: Учебное пособие / В.Б. Кравченко, Е.А. Бородкин. - М.: Academia, 2017. - 640 с
43. Новожилов, О.П. Электроника и схемотехника в 2 ч. часть 1: Учебник для академического бакалавриата / О.П. Новожилов. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 382 с.
44. Волонович, Г.И. Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств / Г.И. Волонович. - М.: ДМК, 2015. - 528 с.
45. МОТОР-РЕДУКТОР 32WJXX-28H250E10-60 60:1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://darxton.ru/catalog_item/motor-reduktor-32wjxx-28h250e10-60-20-1/ (дата обращения 20.02.22).
46. DRV8833 Dual H-Bridge Motor Driver Datasheet / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iarduino.ru/lib/101d5a72d2f39d9deca77d203cf5bedb.pdf>159 (дата обращения 21.02.22).

47. Абсолютный угловой фотоэлектрический датчик положения AD36 / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://old.skbis.ru/index.php?p=3&c=5&d=159> (дата обращения 20.02.22).

48. Low-Power, Slew-Rate-Limited RS-485/RS-422 Transceivers / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://static.chipdip.ru/lib /564/DOC012564899.pdf> (дата обращения 22.02.22).

49. AR100B миниатюрная система определения пространственного положения / [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.sensor-systems.ru/product_245.html (дата обращения 20.02.22).

50. Medium-density performance line Arm®-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. Interfaces / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en /datasheet/cd00161566.pdf> (дата обращения 20.02.22).

51. Борисов А.П. KiCad. Краткое руководство. 2021. - 80 с.

52. Б. Джереми. Изучаем Arduino: инструменты и методы технического волшебства? Пер. с англ. - СПб.: БХВ-Петербург, 2015. - 336 с.

53. Петин В.А. Проекты с использованием контроллера Arduino. - СПб.: БХВ-Петербург, 2014. - 400 с.

54. Стивен Прата. Язык программирования C++ (C++11). Лекции и упражнения, 6-е издание — М.: Вильямс, 2012. — 1248 с.

55. Б. Страуструп Язык программирования C++. Специальное издание. Пер. с англ. — М.: Издательство Бином, 2011 г. — 1136 с.

56. Мейерс С. Эффективное использование C++. 35 новых рекомендаций по улучшению ваших программ и проектов. — М.: ДМК Пресс, 2014. — 294с.

57. Андрей Александреску. Современное проектирование на C++. Обобщенное программирование и прикладные шаблоны проектирования. Перевод с английского — Издательский дом «Вильямс», 2002 г. 336 с.

58. Приходько А. Настройка обмена по протоколу Modbus в Codesys v3.5 // Автоматизация и производство. -2013.-№2. - С. 32-37.

59. Буч Г., Максимчук Р.А., Энгл М.У., Янг Б.Дж., Коналлен Дж., Хьюстон К.А. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений (UML 2). – М. : Вильямс, 2010
60. Петров, И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования; ред. В. П. Дьяконова / И. В. Петров - М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.
61. Гофман, П. М. Инструменты программирования промышленных контроллеров. CoDeSys : учебное пособие / П. М. Гофман, П. А. Кузнецов. — Красноярск : СибГУ им. академика М. Ф. Решетнёва, 2019. — 94 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/147515> (дата обращения: 27.02.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
62. Батюков А.В., Глебов Н.А., Павленко А.В., Гуммель А.А., Гониволк А.Ю. Моделирование процесса управления движением проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса // Изв. Вузов. Электромеханика – 2020. Т.63. №5. С. 55-60.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Текст программы расчета комбинации гидроцилиндров

```
//#include "stdafx.h"//Visual Studio может попросить

#include <iostream>
#include <fstream>
#include <string>
#include <sstream>
#include <cstring>
//#include <stdlib.h>
using namespace std;

void Hidroclinders(double DeltaY, double DeltaZ)
{
    //Создаем файловый поток и связываем его с файлом
    ifstream file("input.txt");

    if (file.is_open())//Если открытие файла прошло успешно
    {
        const int N = 898; // число комбинаций
        double mass_By[N];
        double mass_Bz[N];
        string mass_comb[N];
        double mass_deltaY[N];
        double mass_deltaZ[N];

        int j = 0;
        int i = 0;
        double B_y, B_z;
        // double DeltaY, DeltaZ; //переменные для расчета координат ножа относительно хвостовой точки
        //расчет By и Bz, которые нужны
            // 18,984 - коэффициент мю;
            // 1.979 - сила давления гидроцилиндров;
        B_y = (18.984 * DeltaY) / 1.979;
        B_z = (18.984 * DeltaZ) / 1.979;
        cout << "Заданное значение By = " << B_y << endl;
        cout << "Заданное значение Bz = " << B_z << endl;

        string line;//Строчка текста
```

```

комбинаций

//Будем считывать информацию построчно до тех пор, пока не закончится файл со значениями

// соответствующим им By Bz

while (getline(file, line))
{
    //cout << line << endl; //Можно посмотреть, что в строчке считалось

    string comb;

    double By, Bz;

    //Создадим поток для считывания данных из строчки
    istringstream iss(line);
    iss >> comb >> By >> Bz;
    //Создание массивов:
    {
        mass_comb[j] = comb;
        mass_By[j] = By;
        mass_Bz[j++] = Bz;
    }

}

//создание массивов с отклонениями рассчитанных By Bz от полученных из файла

for (i = 0; i < N; ++i)
{
    mass_deltaY[i] = fabs(mass_By[i] - B_y);
    mass_deltaZ[i] = fabs(mass_Bz[i] - B_z);
}
double min_deltaY = mass_deltaY[0];
double min_deltaZ = mass_deltaZ[0];
int index = 0;

//поиск минимальной пары отклонений

for (int k = 0; k < N; ++k)
{
    if (mass_deltaY[k] < min_deltaY && mass_deltaZ[k] < min_deltaZ)
    {
        min_deltaY = mass_deltaY[k];
        min_deltaZ = mass_deltaZ[k];
    }
}

```

```

        index = k;
    }
}

cout << "отклонение By = " << min_deltaY << endl;
cout << "отклонение Bz = " << min_deltaZ << endl;
cout << "Комбинация ГЦ: " << mass_comb[index] << endl;
cout << "Значение By = " << mass_By[index] << endl;
cout << "Значение Bz = " << mass_Bz[index] << endl;
}
else
{
    cout << "Не удалось открыть файл." << endl;
}
}

int main()
{
    double X1, Y1, Z1; // координаты ножевой точки
    double X2, Y2, Z2; // координаты хвостовой точки
    double tanY, tanZ; // для вычисления тангенса угла наклона оси щита
    double Ys, Zs; // координаты средней точки
    double Ymax, Zmax; // координаты коридора
    double DeltaY, DeltaZ; // переменные для расчета координат ножа относительно хвостовой точки
    double Len_TBM; // переменная длины щита для сравнения
    int Vector, VectorY, VectorZ; // флаги направления оси щита
    Ymax = 100;
    Zmax = 30;
    Len_TBM = 4000;

    setlocale(LC_ALL, "RUSSIAN");//Чтобы русский текст поддерживался

    //cout << "Файл открыт." << endl;
    // ввод отклонения координат ножевой и хвостовой точек
    cout << "Введите координаты ножевой точки X, Y, Z, мм" << endl;
    cin >> X1;
    cin >> Y1;
    cin >> Z1;
    cout << "Введите координаты хвостовой точки X, Y, Z, мм" << endl;
    cin >> X2;
    cin >> Y2;
    cin >> Z2;

    // Вычисляем тангенс угла наклона оси щита

```

```

tanY = (Y2 - Y1) / (X2 - X1);
tanZ = (Z2 - Z1) / (X2 - X1);

// Проверяем, куда направлена ось щита
Vector = 1;
if (!(Y1 < 0 && Y2 < 0 && tanY > 0)|(Y1 > 0 && Y2 > 0 && tanY < 0)))
{
    Vector = 0;
}

if (!(Z1 < 0 && Z2 < 0 && tanZ > 0)|(Z1 > 0 && Z2 > 0 && tanZ < 0)))
{
    Vector = 0;
}

if (Vector == 0) // Проверяем, куда направлен вектор движения щита
{
    cout << "Щит направлен от проектной оси" << endl;
    if (fabs(Y2) < Ymax && fabs(Z2) < Zmax) // Проверяем, попадает ли хвостовая точка в коридор
    {
        cout << "Координаты хвостовой точки попадают в коридор" << endl;
        Ys = Y2 + (Y1 - Y2) / 2; // Вычисляем координаты середины вектора щита
        Zs = Z2 + (Z1 - Z2) / 2;
        if (fabs(Ys) < Ymax && fabs(Zs) < Zmax) // проверяем, попадает ли средняя точка в коридор
        {
            cout << "Координаты средней точки попадают в коридор" << endl;
            DeltaY = Y1 - Y2;
            DeltaZ = Z1 - Z2;
            cout << "считаем отклонение от хвостовой точки" << endl;
            Gidroclinders(DeltaY, DeltaZ);
        }
        else
        {
            // Если средняя точка не попадает в коридор, то поворот осуществляется
            // относительно координат проектной оси
            DeltaY = Y1;
            DeltaZ = Z1;
            cout << "считаем отклонение от проектной оси" << endl;
            Gidroclinders(DeltaY, DeltaZ);
        }
    }
    else
    {
        // если хвостовая точка не попадает в коридор, то поворачиваем относительно проектной

```

оси

```

        cout << "Координаты хвостовой точки не попадают в коридор" << endl;
        DeltaY = Y1;
        DeltaZ = Z1;
        cout << "считаем отклонение от проектной оси" << endl;
        Gidroclinders(DeltaY, DeltaZ);
    }
}
else
    cout << "Щит направлен к проектной оси" << endl;
    if (Y1<Ymax && Z1<Zmax)        // если ножевая точка в границе допуска, то выравниваем щит
    {
        cout << "Щит направлен к оси и координаты ножа попадают в коридор" << endl;
        DeltaY = Y1 - Y2;
        DeltaZ = Z1 - Z2;
        cout << "задаемся отклонением от ножевой точки от хвостовой" << endl;
        Gidroclinders(DeltaY, DeltaZ);
    }
    else    // проверка как быстро щит выйдет на ось, при условии прямого движения
    {
        Ys = Y2 + (Y1 - Y2) / 2; // Вычисляем координаты середины вектора щита
        Zs = Z2 + (Z1 - Z2) / 2;
        Ys /= tanY;
        Zs /= tanZ;
        if (fabs(Ys)>Len_TBM || fabs(Zs)>Len_TBM)    // если при текущем угле центр щита
войдет в коридор через более чем длина щита
        {
            cout << "Щит направлен к оси и центр щита выйдет в коридор через расстояние более
чем длина щита" << endl;
            DeltaY = Y1;
            DeltaZ = Z1;
            cout << "считаем отклонение от проектной оси" << endl;
            Gidroclinders(DeltaY, DeltaZ);
        }
        else
            cout << "включить все ГЦ" << endl;
    }
}

system("pause");
return 0;
}

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

1. Разработка электрических принципиальных схем устройства позиционирования

1.1. Обоснование выбора функциональных элементов устройства позиционирования

1.1.1. Устройство измерения расстояния

Для измерения расстояния от лазерного приемо-передатчика до мишени используется лазерный дальномер hi50A производства фирмы HIREED с последовательным интерфейсом UART с диапазоном измерений до 100 метров. Технические характеристики лазерного дальномера HIREED hi50A приведены в таблице 4.1 [38].

Таблица 0.1 - Технические характеристики дальномера HIREED hi50A

Наименование параметра	Значение
Точность	± 2 мм
Единицы измерения	Метр/дюйм/фут
Диапазон измерения без отражателя	0,02 – 100 м
Время измерения	0,3 – 3 с
Класс лазера	II
Тип лазера	635 нм, 1 мВт
Габаритные размеры	72×18×40 мм
Вес	~ 70 г
Напряжение питания	2,5 – 3 В DC
Рабочая температура	-10 – 40 °C

Лазерный дальномер подключается к микроконтроллеру с помощью последовательного интерфейса UART [39]. Для засветки фотодиодной матрицы используется лазерный модуль с коллимированным излучением ЛМ-650-20АА производства компании Kantegir.

Технические характеристики модуля приведены в таблице 4.2 [40].

Таблица 0.2 - Технические характеристики лазерного излучателя ЛМ-650-20АА

Параметр	Значение
Длина волны	658 нм
Выходная оптическая мощность	20 мВт
Класс лазера	III
Расходимость пучка излучения	0,5 мрад
Диаметр пучка излучения	6 мм
Режим работы	Непрерывный
Рабочий диапазон температур	-10..+55°C
Напряжение питания	5 В
Ток накачки излучателя	130 мА
Габаритные размеры	11x50 мм
Материал корпуса	Алюминий

1.1.2. Оптическая мишень

Оптическая мишень представляет собой пластину с размещенными на определенном расстоянии фотодиодами, которые регистрируют попадание лазерного луча. В качестве фотодатчика использована матрица фотодиодов [41] типа VBPW34S $\lambda=430\div1100$ нм. При облучении фотодиода потоком света мощностью 0.075 мВт ток фотодиода составляет 55мкА. Так как выходной величиной датчика является ток, необходимо преобразовать его в напряжение. Для реализации преобразования ток-напряжение используется двухканальный операционный усилитель LM358ADR. Матрица фотодиодов опрашивается связкой мультиплексоров и сдвигового регистра. Полученный с мультиплексора сигнал поступает на компаратор, предназначенный для формирования гистерезиса [42, 43, 44].

1.1.3. Привод поворотной платформы

Для поворота платформы в горизонтальной и вертикальной плоскости применяется шаговый двигатель с червячным редуктором 32WJXX-28H250E10. Для обеспечения требуемой точности позиционирования поворотной платформы в профильной плоскости не более 0,03 м шаг угла поворота платформы должен составлять не более 0.017188° . Такой шаг угла поворота может быть обеспечен мотор-редуктором 32WJXX-28H250E10 с коэффициентом редукции 100 и применением метода управления с дроблением шага на два, тогда шаг дискретизации угла поворота составит: $\alpha = \frac{1,8}{2 \cdot 100} = 0,009$ град. Для обеспечения требуемой точности позиционирования поворотной платформы в плоскости плана

не более 0,1 м шаг угла поворота платформы должен составлять не более 0.057°. Данный шаг угла поворота может быть обеспечен мотор-редуктором 32WJXX-28H250E10 с коэффициентом редукции 80 и применением метода управления с дроблением шага на два, тогда шаг дискретизации угла поворота составит: $\alpha = \frac{1,8}{2 \cdot 80} = 0,01125$ град.

Технические характеристики мотор-редуктора 32WJXX-28H250E10 приведены в таблице 4.3 [45].

Таблица 0.3 – Технические характеристики мотор-редуктора 32WJXX–28H250E10-XX

Параметр	Значение
Угловой шаг, град	1,8
Крутящий момент, кг×см	1
Рабочая температура	-20°C ~ +50°C
Число обмоток	2
Сопротивление обмоток, Ом	3,1
Индуктивность, мГн	1,9
Ток, А	1
Напряжение, В	3,6
Степень редукции	80 - 100
Момент на выходном валу, кг×см	32,8 - 41
Скорость вращения, об/мин	1,2 - 4,5
Вес, кг	0,32

С целью увеличения точности позиционирования с помощью драйвера шагового двигателя реализуется дробление шага на заданную величину.

1.1.4. Драйвер управления приводом поворотной платформы

Для управления шаговыми двигателями (мотор-редукторами 32WJXX-28H250E10-XX) поворотной платформой в плоскости плана и профиля с дроблением шага необходимо использовать специальный драйвер, обеспечивающий питание обмоток двухобмоточного шагового двигателя. В качестве драйвера используется модуль DRV8852, который позволяет управлять шаговым двигателем с потребляемым током до 2.2 А [46].

Технические характеристики драйвера DRV8852:

- напряжение питания управляемой части (постоянный ток): 8,2-45В;

- питание внешней логики (V_{ss}): 3,3-5В;
- входное напряжение логической части (V_d): 6-12В;
- рабочий ток на канал двигателя: 2,5 А при напряжении 24 В;
- защита от перегрузки;
- защита от перегрева;
- защита от перенапряжения.

1.1.5. Датчик положения

Для организации обратной связи по положению поворотной платформы в устройстве позиционирования применяются оптические датчики угловых перемещений (энкодеры). В зависимости от угла поворота и направления выдается цифровой сигнал, который информирует, в каком положении находится вал энкодера, либо в какую сторону его повернули.

Угол поворота платформы определяется с помощью абсолютного многооборотного энкодера AD36 фирмы СКБИС, технические характеристики которого приведены в таблице 4.4 [47].

Таблица 0.4 - Технические характеристики энкодера AD36

Параметр	Значение
Многооборотный	Да
Разрешение, бит (кол. позиций)	12 (4096)
Макс. разрешение кол-ва оборотов, бит	12(4096)
Выходной код	двоичный код
Способ выдачи данных	SSI последовательный
	BiSS последовательный
Особенность конструкции	Полый глухой вал
Напряжение питания	от +7 до +30 В
Выходной сигнал	RS-422
Интервал рабочих температур	от -40 до +120 °С
Масса (без кабеля)	0,4 кг
Степень защиты от внешних воздействий	IP50
Максимальная скорость вращения вала	10000 об./мин.
Вибрационное ускорение в диапазоне частот (55...2000) Гц	$\leq 100 \text{ м/с}^2$
Ударное ускорение	$\leq 50G$
Момент инерции ротора	$2,5 \times 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Ток потребления	$\leq 100 \text{ мА}$

Так как энкодер имеет интерфейс передачи данных RS – 422, для передачи данных в микроконтроллер необходимо использовать преобразователь интерфейса RS – 422/UART. В качестве преобразователя интерфейса используется приемопередатчик RS-485/RS-422 MAX488CSA+ [48].

Система определения положения в пространстве

Для определения пространственного положения МТПК может быть использована микроэлектромеханическая система определения пространственного положения AR100B [49]. Система включает трехосевой гироскоп, трехосевой акселерометр, трехосевой магнитометр. Используются алгоритмы динамической компенсации, принципы коррекции начального положения, определение горизонтали, расчет азимутального вектора движения, вычисление углов крена и тангажа. Технические характеристики системы приведены в таблице 4.5. Интерфейс передачи данных UART позволяет напрямую передавать сигналы в микроконтроллер.

Таблица 0.5 - Технические характеристики микроэлектромеханической системы AR100B

Параметр	Значение
1	2
<i>Курс</i>	
Измерительный диапазон	$\pm 180^\circ$
Погрешность измерений (среднеквадр.) при 25°C	$< 2^\circ$
Разрешение	$< 0,1^\circ$
<i>Углы наклона</i>	
Измерительный диапазон	$\pm 180^\circ$ крен, $\pm 90^\circ$ тангаж
Погрешность измерений (среднеквадр.) при 25°C	$< \pm 1,5^\circ$ (динамика), $< \pm 0,2^\circ$ (статика)
Разрешение	$< \pm 0,1^\circ$
<i>Гироскоп</i>	
Измерительный диапазон	2000°/с
Дрейф нуля при 25°C	$< 200^\circ/\text{час}$
Разрешение	$< 0,1^\circ/\text{с}$
Полоса пропускания	40 Гц
<i>Акселерометр</i>	
Измерительный диапазон	$\pm 2g$
Разрешение	$< 10g$
Полоса пропускания	37 Гц

<i>Магнитометр</i>	
Измерительный диапазон	± 4 Гаусс
Разрешение	$< 2,5$ мГаусс
Полоса пропускания	50 Гц
<i>Подключение</i>	
Питание	3,3-5 В
Потребляемый ток	26 мА
Выходной интерфейс	UART (3,3 В LVTTTL), USB (EVM)
Рабочая температура	$-25^{\circ}\text{C} \dots 85^{\circ}\text{C}$
Средняя наработка на отказ	≥ 50000 часов/применений
Ударостойкость	100g при 11 мс, 3 раза/ось
Вибростойкость	10g ср.кв., 10...1000 Гц
Степень защиты	IP65
Вес	80 г

1.1.6. Контроллер обработки данных

На основании информации о выбранных выше устройствах, для обработки данных и управления компонентами устройства позиционирования МТПК был выбран микроконтроллер STM32F103C8T6. Контроллер содержит 37 цифровых входа/выходов, 10 из которых могут использоваться как выходы ШИМ, 10 аналоговых входов, 3 последовательных порта UART, два SPI, два I2C, один USB, один CAN, кварцевый генератор 72 МГц. Напряжение питания 3,3 В. Так же стоит отметить, что порты ввода/вывода толерантны к 5В [50].

Передача данных по протоколу RS485 между контроллерами реализована с помощью преобразователя интерфейсов на чипе MAX485. Данный модуль преобразует сигналы шины UART в стандарт RS485 и обратно.

1.2. Разработка электрических принципиальных схем устройства позиционирования

С учетом выбранных элементов устройства позиционирования, с использованием специализированного программного комплекса для разработки электрических схем и печатных плат KiCad [51], были разработаны: принципиальная электрическая схема платы управления лазерным приемопередатчиком устройства позиционирования, принципиальная электрическая схема платы управления мишени и их печатные соответственно.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Текст программы модуля управления лазерным приемо-передатчиком ПДБК.421453.001

В данном программном документе приведен текст программы микроконтроллера STM32F103V8T6 приемо-передатчика для системы управления микротоннелепроходческого комплекса. Программа обеспечивает управление измерительными устройствами, обработку информации и передачу данных в систему управления МТПК. Основными задачами программы являются:

- передача команд по шине RS-485 между модулями,
- обмен массивами данных по шине RS-485 между модулями,
- опрос измерительных устройств,
- расчет изменения местоположения мишени,
- расчет ножевой и хвостовой части щита МТПК,
- самодиагностика.

Программа построена в среде Arduino IDE версия 1.8.8 по блочному принципу, что позволяет оперативно менять программную реализацию любого блока, наращивать функции. Так же в программе присутствуют интегрированные библиотеки - наборы элементов кода, которые устанавливаются отдельно от среды разработки и служат для взаимодействия с каким-либо модулем или датчиком.

- setup – блок программы, осуществляющий инициализацию устройства при включении,
- loop – основной блок программы,
- matrix_survey - блок программы, выполняющий опрос фотодиодной матрицы,
- matrix_sum – блок программы, выполняющий анализ матрицы,
- motor_rotation – блок программы, выполняющий управление шаговыми двигателями,
- Uint8_t crc - блок программы, выполняющий проверку контрольной суммы,

- laser_distance_meter - блок программы, выполняющий обмен информацией с лазерным дальномером,
- eEncoderState - блок программы, считывающий состояние датчиков поворота,
- giroskop - блок программы, выполняющий обмен информацией с датчиком гироскопа,
- frame - блок программы, выполняющий обмен данных с ПЗУ контроллера,
- diagnostics - блок программы, выполняющий самодиагностики системы.

1. Исходный текст основного блока программы «Void loop»

```
#include <Stepper.h>
#include <Wire.h>
#include <I2Cdev.h>
#include <MPU9250.h>
//работа с мишенью
int pinmul1 = 20; //вход с гистерезиса 1
int pinmul2 = 23; //вход с гистерезиса 2
int pinmul3 = 24; // вход с гистерезиса 3
int valmul = 0; // переменная для значений в области оператора matrix_survey
char Str1[ ] = "0";
//работа с гироскопом
uint8_t buffer_m[6];
int16_t ax, ay, az;
int16_t gx, gy, gz;
int16_t  mx, my, mz;
float heading;
float tilthead;
float Axyz[3];
float Gxyz[3];
float Mxyz[3];
//сдиговый регистр
int latchPin = 8;
int clockPin = 12;
int dataPin = 11;
int tabmatrix[3][11]={0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
{0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
{0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
if (Serial.available() > 1 ) // Опрашиваем порт RS485
{
incomingByte = Serial.read();
if (incomingByte != 01 )    // инструкции при приходе команды 01
```

```

{
  Serial.println(4951_4952_4950); //отправка команды для активации опроса мишени
  crc8;
  motor_rotation_ZY;
  matrix_sum;
  motor_rotation_XY;
  matrix_sum;
  laser_distance_meter;
  giroskop;
  Serial.println(frame_data);

  if (incomingByte != 02 )    // инструкции при приходе команды 02
  {
    crc8;
    Serial.println(4951_4952_4950); //отправка команды для активации опроса мишени
    motor_rotation_ZY;
    matrix_sum;
    motor_rotation_XY;
    matrix_sum;
    laser_distance_meter;
    giroskop;
    frame;
    Serial.println(frame_data); //отправка данных об изменении

    if (incomingByte != 03 )    // инструкции при приходе команды 03
    {
      matrix_survey;
      Serial.println(matrix_survey_data); //отправка информации о состоянии фотодиодов
    }
  }
  if (incomingByte != 04 )    // инструкции при приходе команды 04
  {
    matrix_survey;
    Serial.println(BB+1,matrix_survey_data); //отправка информации о модуле
  }
  if (incomingByte != 05 )    // инструкции при приходе команды 05
  {

    Serial.println(4973_4992_7564,BB+1); //отправка команды о назначении адреса последующим модулям
  }
}

```

2. Исходный текст блока инициализации программы «Void setup»

```

Serial.begin(115200); // инициализация серийного порта для RS485
Serial2.begin(19200); // инициализация серийного порта для Hired 8011
Wire.begin(); // подключаемся к шине I2C как мастер
Stepper(steps1, 36, 37, 38, 39); //инициализация порта управления шаговым двигателем ZY
Stepper(steps2, 40, 41, 42, 43); //инициализация порта управления шаговым двигателем XY

//сдиговый регистр
pinMode(latchPin, OUTPUT);
pinMode(clockPin, OUTPUT);
pinMode(dataPin, OUTPUT);

eEncoderState1(18, blink, CHANGE);
eEncoderState2(11, blink, CHANGE);
#define sample_num_mdate 5000
volatile float mx_sample[3];

```

```

volatile float my_sample[3];
volatile float mz_sample[3];
static float mx_centre = 0;
static float my_centre = 0;
static float mz_centre = 0;
volatile int mx_max = 0;
volatile int my_max = 0;
volatile int mz_max = 0;
volatile int mx_min = 0;
volatile int my_min = 0;
volatile int mz_min = 0;
}

```

3. Исходный текст блока программы «Void matrix_survey»

```

for (int i = 0; i < 4; i++) {
    for (int j = 0; j < 12; j++) {
        for (int j = 0; j < 8; j++) {
            digitalWrite(latchPin, LOW); //устанавливаем LOW на latchPin пока не окончена передача байта
            shiftOut(dataPin, clockPin, LSBFIRST, j);
            digitalWrite(latchPin, HIGH); //устанавливаем HIGH на latchPin, чтобы проинформировать регистр, что
передача окончена.
            valmul = digitalRead(pinmul1);
            if (valmul == HIGH)
            {
                Str1 = Str1+valmul;          // сбор информации с фотомишени
            }
        }
        for (int j = 8; j < 16; j++) {
            digitalWrite(latchPin, LOW); //устанавливаем LOW на latchPin пока не окончена передача байта
            shiftOut(dataPin, clockPin, LSBFIRST, j);
            digitalWrite(latchPin, HIGH); //устанавливаем HIGH на latchPin, чтобы проинформировать регистр, что
передача окончена.
            valmul = digitalRead(pinmul2);
            Str1 = Str1+valmul          // сбор информации с фотомишени
        }
        valmul = digitalRead(pinmul3);
        Str1 = Str1+valmul;
    }
}

```

4. Исходный текст блока программы «matrix_sum»

```

for (i = 0; i < matrix.height(); i++) {
    di = (float)imax;
    for (j = 0; j < matrix.height(); j++) {
        dj = (float)jmax;
        d = (di + dj)/2 ;
    }
}

```

```

    if (d = 1)) {
        hue = (int)((acos2(-dy, dx) + PI) * 33 / (PI * 2.0));
    }
    hue = matrix.(hue, sat, val, true);
}
motor_rotation_ZY(false);
motor_rotation_XY(false);
/
}
}
}

```

5. Исходный текст блока программы «uint8_t crc8»

```

(const uint8_t *addr, uint8_t len) // контроль суммы CRC
{
    uint8_t crc = 0;
    while (len--) {
        uint8_t inbyte = *addr++;
        for (uint8_t i = 8; i; i--) {
            uint8_t mix = (crc ^ inbyte) & 0x01;
            crc >>= 1;
            if (mix) crc ^= 0x8C;
            inbyte >>= 1;
        }
    }
    return crc;
}

```

6. Исходный текст блока программы «motor_rotation»

```

void motor_rotation_ZY() //Вращение шагового двигателя ZY
{
    if (steppermotor == UP){

        myStepper.setSpeed(rpm); //установка скорости вращения двигателя
        myStepper.step(steps1); //установка шага вращения двигателя и направления
    }
    if (steppermotor == DOWN){

        myStepper.setSpeed(rpm); //установка скорости вращения двигателя
        myStepper.step(-steps1); //установка шага вращения двигателя и направления
    }
}

void motor_rotation_XY() //Вращение шагового двигателя XY
{

```

```

if (steppermotor == UP){
    myStepper.setSpeed(rpm); //Установка скорости вращения двигателя
myStepper.step(steps2); //Установка шага вращения двигателя и направления
}
if (steppermotor == DOWN){
    myStepper.setSpeed(rpm); //Установка скорости вращения двигателя
myStepper.step(steps2); //Установка шага вращения двигателя и направления
}
}
}
}

```

7. Исходный текст блока программы «laser_distance_meter»

```

Serial.print(byte(78));
L= Serial.available();

```

8. Исходный текст блока программы «eEncoderState»

```

void eEncoderState1 GetEncoderState() // Считываем состояние энкодера ZY
{
    eEncoderState Result = eNone;
    CurrentTime = millis();
    if (CurrentTime >= (LastTime + 5)) {
        // Считываем не чаще 1 раза в 5 мс для уменьшения ложных срабатываний
        LastTime = CurrentTime;
        if (digitalRead(pin_Btn) == LOW ) {
            if (ButtonPrev) {
                Result = eButton; // Нажата кнопка
                ButtonPrev = 0;
            }
        }
        else {
            ButtonPrev = 1;
            EncoderA = digitalRead(pin_DT);
            EncoderB = digitalRead(pin_CLK);
            if ((!EncoderA) && (EncoderAPrev)) { // Сигнал А изменился с 1 на 0
                if (EncoderB) Result = eRight;    // B=1 => энкодер вращается по часовой
                else      Result = eLeft;    // B=0 => энкодер вращается против часовой
            }
            EncoderAPrev = EncoderA; // запомним текущее состояние сигнала А
        }
    }
    return Result;
}

```

```

void eEncoderState2 GetEncoderState() // Считываем состояние энкодера XY
{
    eEncoderState Result = eNone;
    CurrentTime = millis();
    if (CurrentTime >= (LastTime + 1)) {
        LastTime = CurrentTime;
        if (digitalRead(pin_Btn) == LOW ) {
            if (ButtonPrev) {
            }
        }
    }
    else {
        ButtonPrev = 1;
        EncoderA = digitalRead(pin_DT);
        EncoderB = digitalRead(pin_CLK);
        if ((!EncoderA) && (EncoderAPrev)) {
            if (EncoderB) Result = eRight;    // B=1 => энкодер вращается по часовой
            else      Result = eLeft;    // B=0 => энкодер вращается против часовой
        }
        EncoderAPrev = EncoderA; // запомним текущее состояние сигнала A
    }
}

return Result;

```

9. Исходный текст блока программы «giroskop»

```

getAccel_Data();      // Получение значений Акселерометра
getGyro_Data();       // Получение значений Гироскопа
getCompassData_calibrated(); // Калибровка магнитометра
getHeading();         // получение откалиброванных значения углов поворота
getTiltHeading();     // получение откалиброванных значения углов наклона
}

void getHeading(void)
{
    heading = 180 * atan2(Mxyz[1], Mxyz[0]) / PI;
    if (heading < 0) heading += 360;
}

void getTiltHeading(void)
{
    float pitch = asin(-Axyz[0]);
    float roll = asin(Axyz[1] / cos(pitch));
    float xh = Mxyz[0] * cos(pitch) + Mxyz[2] * sin(pitch);
    float yh = Mxyz[0] * sin(roll) * sin(pitch) + Mxyz[1] * cos(roll) - Mxyz[2] * sin(roll) * cos(pitch);
    float zh = -Mxyz[0] * cos(roll) * sin(pitch) + Mxyz[1] * sin(roll) + Mxyz[2] * cos(roll) * cos(pitch);
    tiltheading = 180 * atan2(yh, xh) / PI;
}

```

```

    if (yh < 0)    tiltheadng += 360;
}

void get_calibration_Data () //калибровка положения датчика
{
    for (int i = 0; i < sample_num_mdate; i++)
    {
        get_one_sample_date_mxyz();
        if (mx_sample[2] >= mx_sample[1])mx_sample[1] = mx_sample[2];
        if (my_sample[2] >= my_sample[1])my_sample[1] = my_sample[2]; // Поиск максимального значения
        if (mz_sample[2] >= mz_sample[1])mz_sample[1] = mz_sample[2];
        if (mx_sample[2] <= mx_sample[0])mx_sample[0] = mx_sample[2];
        if (my_sample[2] <= my_sample[0])my_sample[0] = my_sample[2]; // Поиск минимального значения
        if (mz_sample[2] <= mz_sample[0])mz_sample[0] = mz_sample[2];
    }
    mx_max = mx_sample[1];
    my_max = my_sample[1];
    mz_max = mz_sample[1];
    mx_min = mx_sample[0];
    my_min = my_sample[0];
    mz_min = mz_sample[0];
    mx_centre = (mx_max + mx_min) / 2;
    my_centre = (my_max + my_min) / 2;
    mz_centre = (mz_max + mz_min) / 2;
}

void get_one_sample_date_mxyz()
{
    getCompass_Data();
    mx_sample[2] = Mxyz[0];
    my_sample[2] = Mxyz[1];
    mz_sample[2] = Mxyz[2];
}

void getAccel_Data(void)
{
    accelgyro.getMotion9(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz, &mx, &my, &mz);
    Axyz[0] = (double) ax / 16384;
    Axyz[1] = (double) ay / 16384;
    Axyz[2] = (double) az / 16384;
}

void getGyro_Data(void)
{
    accelgyro.getMotion9(&ax, &ay, &az, &gx, &gy, &gz, &mx, &my, &mz);
    Gxyz[0] = (double) gx * 250 / 32768;

```

```

    Gxyz[1] = (double) gy * 250 / 32768;
    Gxyz[2] = (double) gz * 250 / 32768;
}
void getCompass_Data(void)
{
    I2C_M.writeByte(MPU9150_RA_MAG_ADDRESS, 0x0A, 0x01); // активируем магнетометр
    delay(10);
    I2C_M.readBytes(MPU9150_RA_MAG_ADDRESS, MPU9150_RA_MAG_XOUT_L, 6, buffer_m);
    mx = ((int16_t)(buffer_m[1]) << 8) | buffer_m[0];
    my = ((int16_t)(buffer_m[3]) << 8) | buffer_m[2];
    mz = ((int16_t)(buffer_m[5]) << 8) | buffer_m[4];
    Mxyz[0] = (double) mx * 1200 / 4096;
    Mxyz[1] = (double) my * 1200 / 4096;
    Mxyz[2] = (double) mz * 1200 / 4096;
}
void getCompassDate_calibrated ()
{
    getCompass_Data();
    Mxyz[0] = Mxyz[0] - mx_centre;
    Mxyz[1] = Mxyz[1] - my_centre;
    Mxyz[2] = Mxyz[2] - mz_centre;
}
}

```

10. Исходный текст блока программы «frame»

```

for (int addr=0; addr<1024; addr++) { // для всех ячеек памяти (для Arduino UNO 1024)
    byte val = EEPROM.read(addr); // считываем 1 байт по адресу ячейки
    Serial.print(addr); // выводим адрес в послед. порт
    Serial.print("\t"); // табуляция
    Serial.println(val); // выводим значение в послед. порт
}

```

11. Исходный текст блока программы «diagnostics»

```

{
    If (motor_rotation_ZY == false )
    {nn=1; else nn=0;}
    If (motor_rotation_XY == false )
    {nn=2; else nn=0;}
    If (eEncoderState1 GetEncoderState == false )
    {nn=3; else nn=0;}
    If (eEncoderState2 GetEncoderState == false )
    {nn=4; else nn=0;}
    If (giroskop == false )
    {nn=5; else nn=0;}
}

```

```
If (laser_distance_meter == false )  
{nn=6; else nn=0;}  
If (uint8_t crc8 == false )  
{nn=7; else nn=0;}  
  
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2733256

Система позиционирования проходческого комплекса в пространстве

Патентообладатель: **Общество с ограниченной ответственностью проектно-строительная компания "Гидрострой" (RU)**

Авторы: **Батюков Александр Владимирович (RU), Павленко Александр Валентинович (RU), Гуммель Андрей Артурович (RU), Живодерников Андрей Вячеславович (RU), Земляной Михаил Александрович (RU)**

Заявка № 2019140622

Приоритет изобретения 10 декабря 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 30 сентября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 10 декабря 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Изrael



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU (11)

2 733 256⁽¹³⁾ C1

(51) МПК
E21D 9/02 (2006.01)
E21C 35/08 (2006.01)

(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(52) СПК
E21D 9/004 (2020.02); E21C 35/08 (2020.02)

(21)(22) Заявка: 2019140622, 10.12.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.12.2019

Дата регистрации:
30.09.2020

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 10.12.2019

(45) Опубликовано: 30.09.2020 Бюл. № 28

Адрес для переписки:
353920, Краснодарский край, г. Новороссийск,
ул. Куникова, 34, а/я 109, ООО ПСК
"Гидрострой"

(72) Автор(ы):

Батюков Александр Владимирович (RU),
Павленко Александр Валентинович (RU),
Гуммель Андрей Артурович (RU),
Живодерников Андрей Вячеславович (RU),
Земляной Михаил Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью
проектно-строительная компания
"Гидрострой" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2385418 C1, 27.03.2010. RU
2405937 C1, 10.12.2010. RU 2089708 C1,
10.09.1997. RU 2385419 C1, 27.03.2010. RU
2008128927 A, 27.01.2010. RU 2360111 C2,
27.06.2009. DE 4017833 C1, 06.02.1992.

(54) Система позиционирования проходческого комплекса в пространстве

(57) Формула изобретения

Система позиционирования проходческого комплекса в пространстве, состоящая из лазерного приемопередатчика, закрепленного в стартовой шахте, одного или более промежуточных лазерных приемопередатчиков, установленных на расстоянии друг от друга в пределах обеспечения прямой видимости в возведенной части тоннеля, и приемной фотомишени, установленной на проходческом комплексе соединенных между собой проводным интерфейсом связи через интерфейсные модули, при этом лазерный приемопередатчик и промежуточные лазерные приемопередатчики выполнены идентично и содержат платформу, отличающаяся тем, что на платформе размещены лазерный излучатель и лазерный дальномер, при этом платформа выполнена с возможностью вращения вокруг горизонтальной и вертикальной осей за счет электроприводов с обратной связью, а приемная фотомишень устанавливается в каждом модуле проходческого комплекса и выполнена с возможностью определения пространственного положения модулей проходческого комплекса.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023616826

**Программа микроконтроллера системы
позиционирования проходческого щита
микротоннелепроходческого комплекса**

Правообладатель: **Батюков Александр Владимирович (RU)**

Автор(ы): **Батюков Александр Владимирович (RU)**



Заявка № 2023615478

Дата поступления **22 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **03 апреля 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 68b80077e14e4010a94edbd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.12.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

0067288: Батюков Александр Владимирович
Ростовская область - 2020

ДОГОВОР (СОГЛАШЕНИЕ) № 16222ГУ/2021
о предоставлении гранта
на выполнение научно-исследовательских работ и оценку перспектив
коммерческого использования результатов в рамках реализации инновационного
проекта

г. Москва

11 мая 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям), далее именуемое «Фонд», в лице заместителя генерального директора Микитаса Андрея Владимировича, действующего на основании доверенности от 01.03.2021 г. с одной стороны, и гражданин Российской Федерации Батюков Александр Владимирович, далее именуемый «Грантополучатель», с другой стороны, совместно именуемые в дальнейшем «Стороны», заключили настоящий Договор (Соглашение), именуемый в дальнейшем «Соглашение», о нижеследующем:

1. Предмет Соглашения

1.1. Фонд выделяет денежные средства (далее – «Грант») на условиях, указанных в настоящем Соглашении, для финансирования выполнения научно-исследовательских работ (НИР) и оценки перспектив коммерческого использования результатов НИР (далее – «Работы») по теме «Разработка системы позиционирования микротоннелепроходческих щитов модульной конструкции» победителя конкурса «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («УМНИК»).

1.2. Грантополучатель принимает Грант от Фонда на реализацию Соглашения и выполняет Работы.

1.3. Основанием для заключения Соглашения на выполнение данной работы является: Протокол заседания дирекции Фонда №2 от 05.04.2021 г.

1.4. Исполнение Соглашения осуществляется за счет бюджетных ассигнований в виде субсидий, предоставляемых из средств Федерального бюджета, на основании Федерального закона Российской Федерации о федеральном бюджете на соответствующий финансовый год.

1.5. Итогом сотрудничества Сторон по Соглашению должны стать научно-технические результаты, заявленные Грантополучателем в Заявке при подаче документов на участие в Конкурсе, проводимом Фондом.

1.6. Предусмотренные Соглашением Работы выполняются Грантополучателем в соответствии с техническим заданием (Приложение №1) и календарным планом (Приложение №2), являющимися неотъемлемой частью Соглашения.

2. Сроки исполнения Работ

2.1. Грантополучатель обязуется в течение 24 месяцев со дня подписания Соглашения выполнить Работы и представить в Фонд документы, подтверждающие выполнение вышеуказанных Работ.

2.2. Содержание и сроки выполнения основных этапов Работ определяются календарным планом (Приложение №2), являющимся неотъемлемой частью Соглашения.

2.3. В случае выполнения Грантополучателем Работ ранее срока, предусмотренного календарным планом (Приложение №2), Грантополучатель вправе





**Договор № 20-38-90123\20
о предоставлении гранта победителю конкурса
и реализации научного проекта**



Москва

18.08.2020

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Российский фонд фундаментальных исследований» (РФФИ), далее именуемое **РФФИ** и федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова", далее именуемое **Грантополучатель**, совместно именуемые Стороны, на основании решения бюро совета РФФИ об утверждении итогов конкурса (Протокол №10(237) от 07.08.2020 года), проведенного в соответствии с Условиями Конкурса на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты»), утвержденными решением бюро совета РФФИ (протокол заседания бюро совета РФФИ № 4(231) от 27 марта 2020 года, протокол № 7 (234) от 19 мая 2020 года) (далее - Условия конкурса), заключили настоящий Договор о следующем:

1. Предмет Договора

- 1.1. РФФИ, являясь грантодателем, определяющим условия предоставления грантов, обязуется предоставить Грантополучателю грант на реализацию научного проекта № 20-38-90123 "Исследование возможности применения комбинированной системы подземной навигации для системы управления проходческим щитом микротоннелепроходческого комплекса.", получившего поддержку РФФИ по результатам конкурсного отбора научных проектов в качестве победителя конкурса на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты») (далее - Проект), путем перечисления на счет Грантополучателя по реквизитам, указанным в Договоре.
- 1.2. Грантополучатель обязуется принять грант, расходовать его в соответствии с целями, условиями и в порядке, предусмотренными настоящим Договором и Условиями конкурса, реализовать Проект в срок 01.09.2020 - 01.09.2022 и представить результаты реализации Проекта в отчете.
- 1.3. Размер гранта составляет 1 200 000 (**Один миллион двести тысяч**) рублей.
- 1.4. Грант предоставляется за счет средств целевой субсидии, предоставленной РФФИ, из федерального бюджета.
- 1.5. РФФИ вправе перечислить грант Грантополучателю в два этапа:
1 этап – не менее 600000 рублей в срок не позднее 30 дней с даты заключения Договора;
2 этап – оставшуюся часть гранта в срок не позднее 30 дней с даты предоставления субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение научных, научно-технических программ и проектов, предоставленной РФФИ на 2021 год.

2. Права и обязанности Сторон

2.1. РФФИ обязан:

- 2.1.1. передать Грантополучателю грант, перечислив средства гранта на счет Грантополучателя, указанный в настоящем Договоре;
- 2.1.2. рассматривать обращения и уведомления Грантополучателя, в том числе об обстоятельствах, препятствующих реализации Проекта, и/или о фактах, свидетельствующих о нецелесообразности его продолжения;
- 2.1.3. принять и рассмотреть предоставленную Грантополучателем отчетность;
- 2.1.4. опубликовать информацию о результатах реализации Проекта с учетом требований законодательства Российской Федерации о государственной тайне и об иной охраняемой законом тайне.

2.2. РФФИ имеет право:

- 2.2.1. осуществлять контроль использования финансовых средств, выделенных РФФИ, требовать от Грантополучателя предоставления финансовых и иных документов, необходимых для осуществления контроля;



Страница 2 из 6

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Батюков А.В., Гуммель А.А., Пузин В.С., Живодерников А.В., Земляной М.А. Анализ систем позиционирования микротоннелепроходческих комплексов // Изв. вузов. Сев. - Кавк. Регион. Техн. науки. - 2019.-№2. – С. 26-36;
2. Батюков А.В., Гуммель А.А., Глебов Н.А., Земляной М.А. Математическая модель пространственного движения проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса // Изв. вузов. Сев. - Кавк. Регион. Техн. науки.-2018.-№4. – С. 72-78;
3. Батюков А.В., Глебов Н.А., Павленко А.В., Живодерников А.В., Земляной М.А. Численное моделирование процесса движения щита микротоннелепроходческого комплекса // Изв. вузов. Сев. - Кавк. Регион. Техн. Науки -2019. -№4. – С. 44-50.
4. Хорошко М.Б., Гуммель А.А., Батюков А.В., Пузин В.С., Косарев А.С., Земляной М.А. Программное обеспечение верхнего уровня вычислительной системы мобильного диспетчерского пункта микротоннелепроходческого комплекса // Изв. вузов. Сев. - Кавк. Регион. Техн. Науки -2020. -№2. – С. 41-47.
5. Батюков А.В., Глебов Н.А., Павленко А.В., Гуммель А.А., Гониволк А.Ю. Моделирование процесса управления движением проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса // Изв. Вузов. Электромеханика – 2020. Т.63. №5. С. 55-60.
6. Батюков А.В. Комбинированное устройство позиционирования для системы управления микротоннелепроходческим комплексом // Изв. Вузов. Электромеханика – 2021. Т.64. №2. С. 65-70.
7. Разработка и экспериментальное исследование комбинированного устройства позиционирования для системы управления микротоннелепроходческим комплексом // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. - 2022. - № 3. - С. 57-63

8. Патент на изобретение №2733256 РФ МПК E21 9/02, E21C 35/08. Система позиционирования проходческого комплекса в пространстве / Батюков А.В., Павленко А.В., Гуммель А.А., Живодерников А.В., Земляной М.А. - №2733256; заявл. 10.12.2019; опубл. 30.09.2020 Бюл. №28.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020619901. Программа сенсорных панелей СП310-Р, СП315-Р аппаратуры сигнализации и управления микротоннелепроходческого комплекса / Батюков А.В., Павленко А.В., Гуммель А.А., Живодерников А.В., Земляной М.А. – Зарег. 24.07.2020. Дата выдачи 25.08.2020.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023616826. Программа микроконтроллера системы позиционирования проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса / Батюков. А.В. - Зарег. 22.03.2023. Дата выдачи 03.04.2023.

Научные результаты диссертации отражены также в следующих научных изданиях:

11. Батюков А.В., Гуммель А.А., Косарев А.С., Земляной М.А. Система позиционирования микротоннелепроходческого комплекса. Кибернетика энергетических систем: Сборник материалов ХLI международной научно-технической конференции, г. Новочеркасск, 15-17 октября 2019 г. / 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. // Студенческая научная весна – 2019: сборник научных трудов аспирантов и студентов ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова. – Новочеркасск, -2019. – С.

13. Батюков А.В., Гуммель А.А., Пузин В.С. Способ автоматизированного управления проходческим щитом микротоннелепроходческого комплекса и прогнозирование траектории движения. Кибернетика энергетических систем: Сборник материалов международной научно-технической конференции г. Новочеркасск, 24-26 ноября 2020г г. / Южно-Российский государственный

политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ).

14. Живодерников А.В., Батюков А.В., Щучкин Д.А., Большенко И.А. Алгоритм работы системы позиционирования проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса. Кибернетика энергетических систем: Сборник материалов международной научно-технической конференции г. Новочеркасск, 24-26 ноября 2020г г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ).

15. Живодерников А.В., Батюков А.В., Гуммель А.А., Косарев А.С., Система управления микротоннелепроходческим комплексом Кибернетика энергетических систем: Сборник материалов международной научно-технической конференции г. Новочеркасск, 19-22 октября 2021 г. / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ).

16. Батюков А.В., Батищев Д.В., Авакян А.А. Система позиционирования проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса / Студенческая научная весна - 2020 : материалы региональной науч.-техн. конф. (кон-курса науч.-техн. работ)студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Рост. обл., г. Новочеркасск, 13-14 мая 2020 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. - Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2020. - С. 59-60

17. Батюков А.В. Способ определения пространственного положения проходческого щита микротоннелепроходческого комплекса / Студенческая научная весна - 2021 : материалы региональной науч.-техн. конф. (кон-курса науч.-техн. работ)студентов, аспирантов и молодых ученых вузов Рост. обл., г. Новочеркасск, 13-14 мая 2021 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) им. М.И. Платова. - Новочеркасск : ЮРГПУ (НПИ), 2021. - С. 77-78

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж



Общество с ограниченной ответственностью
научно-производственное предприятие
“МагнетикДон”

346400, Ростовская область, г. Новочеркасск, ул. Михайловская, д. 150 А, помещ. 6.

Р/с 40702810801000002549

Филиал Южный ПАО Банка "ФК Открытие" Г.РОСТОВ-НА-ДОНУ

кор/сч № 30101810560150000061, БИК 046015061

ИНН 6150102877 КПП 615001001

Тел. 8(951) 50-53-600, e-mail: shch.denis85@gmail.com, сайт: www.magneticdon.ru

АКТ

о внедрении научных и практических результатов диссертационной работы
на тему «Методы, алгоритмы и устройство позиционирования мехатронного
тоннелепроходческого комплекса для прокладки подземных коммуникаций»

Батюкова Александра Владимировича

В ходе выполнения работ по разработке систем управления
микротоннелепроходческих комплексов были использованы результаты
диссертации Батюкова Александра Владимировича:

- математические и численные компьютерные модели, алгоритмы
управления движением проходческого щита микротоннелепроходческого
комплекса, алгоритмы вычисления и преобразования координат.

Директор

 Д.А. Щучкин
04.10.23г.



ЮЖНО-РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (НПИ)
ИМЕНИ М.И. ПЛАТОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

Тел./факс: (8635)25-54-73
E-mail: niieem@npi-tu.ru

№ 13.04-07/62 от 04.10. 2023 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Комиссия в составе старшего научного сотрудника Гуммель А.А. и научного сотрудника Косарева А.С., составили настоящий акт о том, что в НИИ Электромеханики в ходе выполнения работ по созданию автоматизированной системы управления микротоннелепроходческим комплексом использованы научные и практические результаты диссертационной работы Батюкова Александра Владимировича на тему «Методы, алгоритмы и устройство позиционирования мехатронного тоннелепроходческого комплекса для прокладки подземных коммуникаций».

Объектами внедрения являются:

1. Математические и численные компьютерные модели движения проходческого щита.
2. Алгоритмы управления движением проходческого щита и определения его координат.
3. Программное обеспечение управления комбинированного устройства позиционирования.

Председатель комиссии:

Старший научный сотрудник
НИИ Электромеханики

Д.В. Батищев

Члены комиссии:

Старший научный сотрудник
НИИ Электромеханики

А.А. Гуммель

Научный сотрудник

НИИ Электромеханики

А.С. Косарев