

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

Кафедра «Системы автоматизации, автоматизированное управление и  
проектирование»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ С.В. Ченцов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
УПРАВЛЕНИЯ ПЛАТФОРМОЙ БУРОВОЙ МАШИНЫ**

Направление 27.04.04 Управление в технических системах

Магистерская программа 27.04.04.01 Интегрированные системы управления  
производством

Научный руководитель	_____ __.__.2021	канд. физ.-мат. наук, доц. А.Ш.Любанова
Выпускник	_____ __.__.2021	С.И.Савченко
Рецензент	_____ __.__.2021	канд. физ.-мат. наук А.В.Шмидт

Красноярск 2021

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа на тему «Математическое моделирование процесса управления платформой буровой машины» содержит 76 страниц текстового документа, 3 приложения, 27 иллюстрацию, 42 использованных источников.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ, SIMINTECH, АВТОМАТИЗАЦИЯ, БУРОВАЯ МАШИНА, ГИДРОЦИЛИНДР, ГОРИЗОНТИРОВАНИЕ ПЛАТФОРМОЙ.

Цель выпускной квалификационной работы состоит в разработке математической модели горизонтирования платформы буровой машины и компьютерного симулятора управления для моделирования процесса управления платформой буровой машины.

Автоматизация процесса управления платформой буровой машины актуальна поскольку позволяет соблюдать технические требования и регулировать технологические параметры системы горизонтирования, обеспечивая безопасность работы.

Результатом магистерской работы является, математическая модель управления платформой и разработанный на её основе в программе SimInTech симулятор для компьютерного моделирования процесса управления. Математическая модель управления платформой связывает логическую подмодель регулирования положения платформы с подмоделью работы исполнительного устройства (гидроцилиндра).



2.4 Компьютерное моделирование процесса	управления	
платформой.....		54
2.4.1 Исходные данные для компьютерного эксперимента .....		54
2.4.2 Результаты компьютерного моделирования	процесса	
управления .....		57
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....		62
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....		64
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....		69
ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....		71
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....		72

## ВВЕДЕНИЕ

Бурение – один из наиболее распространенных и затратных технологических процессов в горной промышленности. Также, оно считается сложным процессом, для выполнения которого требуется высокая квалификация рабочих и операторов, поскольку именно от них зависит качество и себестоимость получаемых скважин. Кроме этого, качество и себестоимость пробуренных скважин во многом зависит от соблюдения рациональных режимов бурения, которые в процессе работы приходится изменять, подстраиваясь под множество изменяющихся внешних факторов [1].

Современные требования к качеству бурения и скважин настолько возросли, что проведение этого процесса традиционным способом управления буровой машиной стало практически невозможным. Поэтому возникла необходимость использовать различные автоматические системы для контроля и регулирования главных параметров бурения.

В литературе и на практике широко представлены системы автоматического управления и регулирования с электрическим приводом [22]. Это обусловлено тем, что с появлением компактных преобразователей частоты тока и их активным распространением значительно упростился принцип построения автоматических систем управления скоростью асинхронных электродвигателей. Но если возникает задача автоматизации режимов работы гидравлических буровых машин, то принцип построения автоматических систем несколько усложняется ввиду отсутствия в массовом производстве автоматических регуляторов расхода жидкости. Поэтому современные гидравлические машины с автоматическими системами работают по принципу объемного регулирования расхода с применением регулируемых гидронасосов.

Целью настоящей магистерской диссертации является разработка математической модели горизонтирования платформы буровой машины и компьютерного симулятора для моделирования процесса управления платформой буровой машины.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- а) определить критерий управления, связывающий параметры положения платформы и работы исполнительных устройств;
- б) составить математическую модель управления платформы;
- в) разработать алгоритм управления и создать симулятор для компьютерного моделирования изменения параметров положения платформы и основных технологических параметров исполнительных устройств (гидроцилиндров).

Результатом выполнения работы является математическая модель управления платформы буровой машины разработанный на её основе в программе SimInTech симулятор для компьютерного моделирования процесса управления.

Магистерская диссертация состоит из введения, двух разделов, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Первый раздел включает три параграфа. В нём дается постановка задачи, а также анализ тенденций в использовании информационных технологий информационных технологий и существующих подходов к созданию автоматических систем управления буровыми машинами. Второй раздел посвящен разработке математической модели управления положением платформы и описанию симулятора для компьютерного моделирования. Здесь также представлены результаты моделирования основных параметров положения платформы и работы исполнительного устройства на примере самоходной буровой установки для подземных горных работ.

Диссертация оформлена в соответствии со стандартом СФУ по изложению и оформлению документов учебной деятельности [23].

Результаты диссертации представлены на межвузовском международном конгрессе «Высшая школа: научные исследования» и опубликованы в сборнике трудов конгресса [43].

# **1 Автоматизация управления буровыми машинами.**

## **Постановка задачи**

### **1.1 Постановка задачи**

#### **1.1.1 Цель работы**

Цель работы состоит в разработке математической модели горизонтирования платформы буровой машины и компьютерного симулятора для моделирования процесса управления платформой буровой машины.

#### **1.1.2 Основные задачи**

Для создания математической модели необходимо решить следующие задачи:

- а) локализовать набор основных параметров, описывающих работу гидроцилиндра как основного исполнительного устройства гидропривода, и параметров платформы;
- б) определить управляющие параметры и критерий управления, связанный с горизонтированием платформы;
- в) составить математическую модель управления положением платформы;
- г) разработать алгоритм управления на основе модели;
- д) создать симулятор в программном пакете SimInTech, предназначенном для компьютерного моделирования;
- е) провести компьютерные эксперименты по моделированию основных параметров управления горизонтированием платформы и работы исполнительного устройства.

### 1.1.3 Обоснование выбора программного инструментария

При разработке компьютерных математических моделей используют специальное программное обеспечение, которое позволяет упростить и автоматизировать разработку модели.

Это достигается использованием принципа визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю нет необходимости подробно изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и знаний той предметной области, в которой он работает.

Существует большое множество прикладного программного обеспечения, которое позволяет реализовать принцип визуального программирования при разработке компьютерных математических моделей:

- MATLAB Simulink;
- ПК MBTU;
- SimInTech.

Для моделирования выбрана программа SimInTech в связи с тем, что она обладает более мощными возможностями и является бесплатной.

SimInTech представляет собой универсальную систему автоматизации расчетов для моделирования явлений и процессов различной природы в сложных технических системах. Объектом моделирования в SimInTech может являться любая система, устройство или физический процесс, математическая модель динамика которых описывается системой дифференциальных и алгебраических уравнений и может быть реализована методами структурного моделирования.

SimInTech реализует принцип модельно-ориентированного проектирования, позволяющий совместить проектирование технологических систем с созданием их комплексных моделей динамики. Первоначально комплексная



модель динамики может быть упрощенной, что обеспечивает проверку базовых принципов работы моделируемого объекта и его системы управления. По мере проектирования отдельные части модели возможно уточнять и дополнять для максимально подробного соответствия реальному процессу [20, 25, 26].

## **1.2 Использование новых информационных технологий в проектировании и управлении горными машинами**

### **1.2.1 Основные задачи совершенствования электрооборудования и систем управления горных машин**

Перспективным направлением развития горной промышленности является организация интеллектуальных предприятий. «Интеллектуальный карьер» – технология будущего, реализующая роботизированную добычу полезных ископаемых. Ее применение особенно актуально в труднодоступных местах и в регионах с тяжелыми климатическими условиями. Прогнозируется, что применение роботизированной горной техники позволит не только повысить производительность труда за счет эффективного использования оборудования, но и приведет к сокращению нетехнологических простоев машин и снижению затрат на проведение внеплановых ремонтных работ карьерной техники.

К важнейшим задачам совершенствования систем управления горными машинами в соответствии с основными принципами теории управления [4] можно отнести следующие [5].

1) *Создание мехатронного комплекса машины с качественно новыми характеристиками на основе синергетического объединения различных подсистем с компьютерным управлением. Это возможно только при высоком уровне конструктивной, информационной и электромагнитной совмести-*

сти механических, электронных и информационно-управляющих элементов и совершенствования всех технических средств мехатронного комплекса.

2) *Повышение энергетической эффективности мехатронных комплексов горных машин.* Задача снижения энергозатрат актуальна для горных машин из-за высокого энергопотребления горно-добывающего оборудования.

3) *Совершенствование человеко-машинного интерфейса.* Современные экскаваторы и другие горные машины – эргатические мехатронные системы. Увеличение объемов горных работ приводит к возрастанию психологической нагрузки и ответственности за решения, принимаемые оператором в процессе работы. Снижение нагрузки на оператора достигается применением средств автоматизации обработки данных.

4) *Совершенствование систем контроля параметров.* Работа экскаватора, бурового станка, земснаряда как технологического агрегата оценивается различными показателями, учитывающими производительность, затраты, износ и ресурс оборудования и др. Создание мехатронной системы предусматривает разработку и использование новых систем контроля параметров технологических процессов, нагрузок и состояния электрооборудования.

5) *Организация информационного взаимодействия* всех подсистем с использованием средств телекоммуникаций с целью обеспечения качественно новых возможностей дистанционного контроля, управления и диагностики.

Реализация средств управления для горных машин, отвечающих сформулированным требованиям, основана на использовании следующих технических решений [6]:

- расширенный информационный ресурс системы управления за счет использования компьютерных средств обработки информации;
- новые технические средства управления, обеспечивающие эффективное использование потребляемой электроэнергии;
- алгоритмы управления, использующие технологии искусственного интеллекта.

- расширенная диагностика системы и ее компонентов на основе интеллектуальных средств измерения и обработки данных;
- специализированный человеко-машинный интерфейс, использующий эффективные средства представления информации о состоянии системы;
- удаленный мониторинг и дистанционное управление.

Горные машины нового поколения используют современные интеллектуальные управляющие системы. Они создаются с помощью перечисленных выше технических решений, и обеспечивают повышение эффективности горных работ на основе использования достижений информационных технологий.

### **1.2.2 Интеллектуализация управления для горных машин**

Интеллектуальная горная машина (экскаватор, буровая машина и др.) – это машина с высоким уровнем организации процессов управления, контроля и диагностики, эффективным человеко-машинным и телекоммуникационным интерфейсами, способная адаптироваться к изменяющимся условиям горных работ и гармонично взаимодействующая с системами энергоснабжения, транспорта и автоматизированного управления предприятием.

Первый признак «умной» машины – электроприводы главного движения с высоким уровнем организации процессов управления. Это подразумевает реализацию принципов управления, обеспечивающих наилучшее взаимодействие всех компонентов системы, применение адаптивных регуляторов и алгоритмов самонастройки в мехатронных системах; коррекцию и предупреждение ошибочных действий машиниста, защиту от ударов ковша и переподъема, эффективное электропотребление (минимальные потери энергии во всех компонентах, высокий уровень электромагнитной совместимости оборудования, контроль внешней электромагнитной среды).

Традиционные системы мониторинга электрооборудования горных машин обеспечивают сбор и обработку данных с датчиков, отображение на

операторской панели основных параметров технологического процесса и состояния электрического и механического оборудования и регистрацию всех отображаемых параметров в энергонезависимой памяти [5]. Анализ данных оператором или другими специалистами, в том числе с помощью удаленного мониторинга, не обеспечивает желаемой эффективности из-за большого объема информации. Интеллектуальная обработка данных и представление результатов в виде решений и заключений позволяет автоматизировать процессы контроля и диагностики и организовать эксплуатацию машины при минимальных затратах на поиск и обнаружение неисправностей, ремонты и восстановление.

Дальнейшее развитие интеллектуальных систем управления горной техникой с учетом достижений в смежных отраслях позволит дать новое решение задач управления горным промышленным оборудованием со значительной экономией времени и средств.

### **1.3 Анализ существующих подходов к созданию автоматических систем управления буровыми машинами**

В настоящее время большое внимание уделяется развитию автоматизации процессов управления буровыми машинами. Разрабатываются современные средства автоматизации, на базе которых проектируются новые, высокоскоростные автоматические системы управления исполнительными органами технологического оборудования, а также модернизируются существующие системы. На практике в качестве исполнительных механизмов оборудования нашли широкое применение, например, гидромоторы, приводящие в движения механизмы, для выполнения соответствующих технологических процессов различного назначения.

### **1.3.1 Проектирование автоматических систем управления гидравлическими исполнительными органами буровых машин**

Следует отметить, что проектирование автоматических систем управления гидравлическими исполнительными органами буровых машин с целью регулирования их режимов работы вызывает большой интерес. И сегодня существует большое разнообразие автоматических систем управления работой буровых машин [2, 7]. Усовершенствованию существующих и проектированию новых систем посвящено много работ. В частности, в [7] рассматривается принцип действия стенда, разработанного для исследования и настройки автоматического регулятора расхода жидкости, автоматической системы, а также для исследования гидронасосов и гидромоторов буровой машины.

Стенд способен работать в двух режимах: 1) исследование гидравлических узлов и механизмов, а также датчиков крутящего момента и осевой нагрузки на вращающемся валу; 2) исследование работоспособности автоматических систем в целом.

### **1.3.2 Автоматизированные системы управление процессом бурения**

Качество проведения буровых и открытых горных работ определяется точностью позиционирования платформ буровых станков, а также их исполнительных органов. Помимо этого, оно считается сложным процессом, выполнение которого требует высокой квалификации рабочих и операторов, поскольку именно от них зависит качество и себестоимость получаемых скважин. Режимы бурения (скорость подачи и вращения бурового инструмента, частота ударов гидроударника и др.) являются приоритетным элементом процесса бурения, так как от них зависит стойкость инструмента и коэффициент использования мощности буровой машины [9].

Режимы бурения рассчитываются и назначаются исходя из условий физико-механических свойств предполагаемой буримой породы, но они не всегда соответствуют им, поскольку при бурении особенно глубоких скважин буримая порода изменяется, а значит, изменяются ее физико-механические свойства. Мастерство оператора буровой машины заключается в том, чтобы своевременно обнаружить эти изменения и подстроить режимы бурения в правильном направлении. Это не всегда получается ввиду человеческого фактора, в лучшем случае нарушается стойкость инструмента, в худшем может привести к аварийной ситуации, но в обоих случаях себестоимость скважины увеличивается и нарушается ее качество.

В [10] рассмотрен принцип работы автоматической системы, посредством которой регулируются режимы бурения в зависимости от изменения буримой породы с целью увеличения стойкости режущего инструмента, снижения себестоимости и повышения качества скважины. Достичь этих целей при ручном управлении буровой машиной становится невозможным ввиду современных требований к бурильным процессам, поэтому необходима их автоматизация. Она заключается в применении автоматических систем с повышенными скоростными характеристиками, способными не только регулировать режимы бурения, но и автоматически переходить с одного вида бурения на другой.

Другая важная проблема управления – это позиционирование платформы и исполнительного органа, например, поддержание вертикальности шнека буровых машин на базе автокрана. Крупные буровые станки являются основной технологией современных горнодобывающих разрезов. Эффективность их работы во многом определяется точностью позиционирования платформ, а также их исполнительных органов. Актуальной проблемой для развития угольной индустрии является создание современных устройств для контроля положения рабочей платформы экскаватора и буровой машины. В работе [8] предлагается решение этой проблемы для установок вертикального бурения с помощью специального блока управления, который будет запо-

минать координату оголовка стрелы буровой машины и поддерживать его в таком положении, чтобы шнек оставался вертикальным.

Созданию системы автоматического управления для контроля положения в пространстве платформ буровых установок и их функциональных элементов посвящен ряд работ. В частности, в [3] система автоматического управления строится на основе микроэлектромеханических систем (MEMS) – акселерометров. Микроконтроллер, периодически опрашивая датчик ускорения, анализирует ориентацию платформы в пространстве и параметры вибраций для корректировки процесса бурения. Система автоматического управления разрабатывается для двух основных режимов работы: горизонтирования и стабилизации процесса бурения.

*Режим горизонтирования платформы.* Система автоматического управления, анализируя данные угла наклона, полученные из пересчитанных показаний акселерометра, регулирует подачу масла из гидросистемы к домкратам посредством дискретных гидроклапанов, управляемых магнитом. Регулируя подачу масла к домкратам, микроконтроллер устанавливает платформу в требуемое положение. Существующие дискретные гидроклапаны позволяют подстраивать положение лишь «рывками» ввиду строго определённого режима работы: накачка масла (клапан открыт), удержание (клапан закрыт), слив масла (реверс клапана) [3].

*Режим стабилизации процесса бурения.* Во время бурения скважины возникают различные явления, нарушающие горизонтальность платформы. К таким явлениям относятся: вибрация и просадка грунта вследствие большой массы станка. Система автоматического управления, анализируя амплитуду, фазу и направление вибрации, корректирует домкратами ориентацию платформы до установленного значения.

С позиции теории управления структуру системы управления буровым станком можно представить на рисунке 1.1

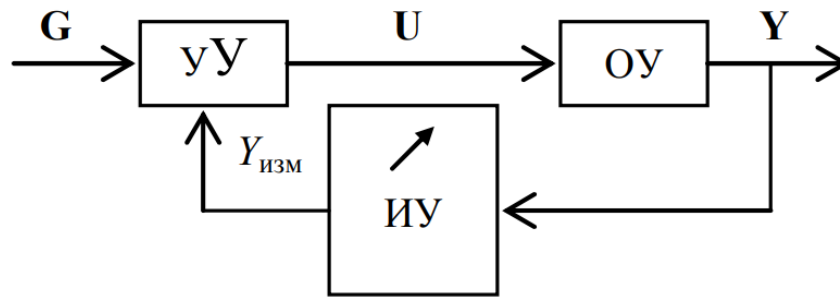


Рисунок 1.1 – Структура системы управления

На рисунке 1.1 через объект управления (ОУ) обозначен буровой станок. С точки зрения теории управления ОУ является заданной частью САУ, а проектируемой частью САУ являются датчики (измерительные устройства (ИУ)) и управляющие (в том числе вычислительные) устройства (УУ). На рисунке 2.1 через  $G$  обозначен вектор параметров, характеризующий заданное положение платформы бурового станка, через  $U$  обозначен вектор управляющих параметров – сигналов управления, обеспечивающих управление домкратами бурового станка, а через  $Y$  – вектор параметров, характеризующий действительное положение платформы бурового станка [3].

Задачей проектируемой САУ является поддержание следующего равенства:

$$Y = G. \quad (1.1)$$

Таким образом, благодаря использованию САУ можно осуществлять отображение угла наклона, контроль нахождения в заданном интервале, оценку основных параметров вибрации.

Проектирование САУ заключается в разработке проектируемой части САУ, включающей датчики и управляющие устройства, которая обеспечивает равенство (1.1) с точностью, необходимой буровому инструменту при бурении.



Использование автоматических систем управления бурильными машинами позволяет повысить качество и себестоимость бурения за счет устранения человеческого фактора и обеспечения широкого диапазона регулирования технологическими параметрами, благодаря чему исключается большинство возможных аварий и увеличивается стойкость буровых инструментов.

### **1.3.3 Анализ математических моделей гидропривода горизонтирования платформы буровой машины**

Одной из важнейших составляющих сложной динамической системы управления положением платформы является электрогидравлический привод аутригеров платформы, осуществляющий ее перемещение относительно поверхности, на которую установлена платформа и соответственно изменяющий углы наклона платформы относительно горизонта. Статические и динамические характеристики гидропривода влияют на процесс управления положением платформы и должны быть учтены при проектировании устройства автоматического управления горизонтирования платформы буровой машины.

В настоящее время все серийно выпускаемые буровые машины оснащены гидроприводом управления аутригерами. Несмотря на многообразие различных схем гидроприводов, количество гидроэлементов, входящих в них, не так велико: гидронасос, гидроцилиндр, гидродроссель, гидролиния, гидрораспределитель, гидроклапан и др.

Можно выделить два направления математического описания гидроприводов.

*Первое направление* заключается в представлении гидроэлементов в виде передаточных функций типовых динамических звеньев, известных из ТАУ. Представление элементов гидропривода в виде передаточных функций основывается на экспериментальных исследованиях, при этом реальный пе-

реходный процесс элементов гидропривода аппроксимируется с некоторой точностью передаточными функциями.

При описании электрогидропривода в качестве входного воздействия принята выходная координата порогового элемента, в качестве выходной величины – перемещение штока гидроцилиндра.

Например, в работе А.Ф. Бакалова отмечается, что для решения задач динамики гидрофицированной машины в целом, когда наибольший интерес представляет движение выходного звена исполнительного электрогидропривода при подаче на вход управляющего воздействия, то есть «макродинамика» гидропривода, его математическое описание может быть значительно упрощено.

В своей работе В.В. Беляев предложил общую передаточную функцию гидропривода. Так как объемный гидропривод обладает такими общими свойствами, как время запаздывания, постоянная скорость перемещения штоков исполнительных гидроцилиндров в установившемся режиме, переходные процессы разгона и торможения штока гидроцилиндра, то можно выделить следующие характерные стадии переходного процесса:

- чистое запаздывание  $\tau_{гп}$ , в течение которого шток находится в покое после включения распределителя;
- стадия разгона  $\tau_p$ , в течение которой шток разгоняется до номинальной скорости;
- стадия установившегося движения.

Выделенным стадиям можно поставить в соответствие три последовательно соединенных звена: звено чистого запаздывания, апериодическое звено первого порядка и интегрирующее звено. Тогда передаточная функция всего гидропривода выглядит следующим образом:

$$W_{гп} = e^{-\tau \cdot p} \cdot \frac{K}{p} \cdot \frac{1}{(T_{гп} \cdot p + 1)},$$

где  $\tau$  – общее время запаздывания гидропривода;  $K$  – коэффициент, определяющий скорость перемещения штока гидроцилиндра в установившемся режиме;  $T_{гп}$  – постоянная времени гидропривода, обуславливающая стадию разгона штока.

Таким образом, точность моделирования гидропривода при этом способе определяется точностью аппроксимации переходных процессов и точностью замеров, проводимых в ходе эксперимента. При этом способе достаточно сложно учесть большое количество параметров, влияющих на работу гидропривода, что ведет к упрощению математической модели гидропривода в целом.

Второе направление заключается в том, что для каждого из элементов, входящих в гидропривод, составляется своя математическая модель, представляющая собой дифференциальных уравнений.

В работе В.С. Щербакова [1] предлагается методика составления математических моделей гидроприводов, базирующаяся на представлении гидроэлементов в виде многомерных динамических объектов и использующая векторно-матричную форму записи уравнений.

Динамические свойства многомерных объектов полностью характеризуются их уравнениями движения, связывающими выходные и входные величины объектов. Уравнения составляются на основе законов физики при рассмотрении процессов преобразования и передачи информации.

В работе [18] математическое описание гидропривода представлено в виде дифференциальных уравнений, описывающих внутренние динамические процессы в гидросистеме.

Моделирование каждого элемента гидропривода с помощью дифференциальных уравнений обладает высокой точностью описания динамических процессов происходящих в гидроприводе, и при наличии мощных вычислительных систем легко реализуется на ЭВМ.

Таким образом, проведенный анализ математического описания гидропривода показал, что элементы гидропривода достаточно хорошо изучены и

представлены с теми или иными допущениями в виде передаточных функций или дифференциальных уравнений. Имеющийся математический аппарат может быть использован для достижения поставленной в работе цели.

## **2 Моделирование управления платформой буровой машины**

### **2.1 Принципы работы буровой машины**

#### **2.1.1 Основные модули буровой машины**

Буровая машины (рисунок 2.1) представляет собой разновидность оборудования, которое применяется для создания, углубления и прочистки скважин для добычи полезных ресурсов (нефть, газ). Применение устройства возможно в комплексе с дополнительным и вспомогательным оборудованием. Любая установка оснащается главным приводом; это может быть дизельный привод с трансмиссией механического типа либо электропривод с цифровой схемой регулировки. Некоторые модели комплектуются приводом на ротор независимой конструкции. Кинетическую основу устройства представляет механизм для бурения, а динамическую – механизм подъемника. Источник нагрузок и воздействий динамического типа проявляется в виде удара, который появляется при подхвате трубной колонны и переходе каната на новый слой.

Все буровые установки состоят из комплекса сооружений, предназначенных для совместной работы:

- Оборудование для спуска и поднятия: лебедки, краны, крюки.
- Оборудование для перегона и циркуляции жидкости: насосы, емкости, вертлюжные элементы.
- Сооружения для процесса бурения: вышки, мосты, стеллажные конструкции.
- Устройства, предохраняющие от выбросов жидкости и газа.
- Оборудование, предназначенное для создания бурового раствора: специальные насосы, воронки, мешалки с гидроприводом.
- Устройства силового типа (двигатели различной конструкции).



Рисунок 2.1 – Буровые машины

Все современные высокопроизводительные машины для горных работ содержат множество различных механизмов с электроприводами разных типов. Производительность и эффективность использования ресурса машины определяется главным образом техническими характеристиками приводных агрегатов. Поэтому основным направлением повышения производительности и эффективности работы горной техники является совершенствование систем приводов и технических средств управления.

Для управления современные буровые установки оснащены различными по назначению и мощности машинами и механизмами, действие которых обеспечивается соответствующим приводом, состоящим из двигателя, силовой передачи (трансмиссии) и аппаратуры управления. Приводом буровой установки называется совокупность двигателей и регулирующих их работу трансмиссий и устройств, преобразующих тепловую или электрическую энергию в механическую, управляющих механической энергией и передающих ее исполнительному оборудованию — насосам, ротору, лебедке и др.

Тип привода, его компоновка и конструкция значительно влияют на технико-экономические показатели буровой установки. Мощность привода

(на входе в трансмиссию) характеризует основные его потребительские и технические свойства и является классификационным (главным) параметром. Анализ современного состояния и основных направлений совершенствования систем электроприводов для горных машин показывает, что переход к технике управления нового поколения характеризуется функциональным и конструктивным объединением электромеханических преобразователей с энергетическими и информационными компонентами с высоким уровнем организации процессов управления. Это позволяет рассматривать технологические агрегаты машины как мехатронные модули, объединенные в сложный мехатронный комплекс [15]. Такой комплекс приобретает свойства робота или подвижной горной машины с гибко программируемыми средствами автоматизации, обеспечивающими выбор эффективного решения в изменяющейся обстановке. Использование для управления машиной технических средств с качественно повышенными характеристиками обуславливает актуальность новых теоретических и прикладных задач совершенствования систем управления [16].

Комплекс электрооборудования включает электроприводы основных и вспомогательных механизмов, пульт управления, приборы контроля параметров технологического процесса, состояния оборудования и управления вспомогательными операциями. Для основного технологического агрегата – вращателя, используется электропривод постоянного тока с реверсом по полю [8]. Тиристорный преобразователь электропитания обмотки якоря обеспечивает регулирование напряжения с отсечкой по току и отключение тиристоров в аварийных режимах. Мощность приводов – до 100 кВт.

В различных модификациях буровых станков используются электроприводы хода переменного и постоянного тока. Система управления электроприводами хода с асинхронными двигателями представляет собой комплектное устройство, обеспечивающее «мягкий» пуск и реверсирование трехфазных двигателей с помощью тиристорного коммутатора, а также формирование сигналов управления электрогидравлическими тормозами [16]. В

электроприводах хода с двигателями постоянного тока предусмотрены плавный пуск, 4 фиксированные скорости, отсечка по току и реверс по полю.

В механизме подачи используют электропривод постоянного тока с реверсом по полю. Агрегат управления компрессором обеспечивает управление двигателями переменного тока приводов компрессора (мощность 250 кВА), вентилятора и маслонасоса компрессорной установки [16]. Комплектный агрегат обеспечивает следующие функции: «мягкий» пуск асинхронного двигателя компрессора; управление (включение, отключение) асинхронных двигателей приводов вентилятора и маслонасоса; управление (включение и отключение) нагревательных элементов подогрева масла.

В состав пульта управления оператора бурового станка входит блок индикации, предназначенный для визуального контроля основных параметров режима бурения (частоты вращения и нагрузки вращателя, усилия привода подачи, давления масла и воды, скорость подачи бурового инструмента и глубины скважины) и состояния защит. Для измерения глубины скважины при бурении используется оригинальное устройство, обеспечивающее точность 0,1% [10].

### **2.1.2 Горизонтирование платформы**

Платформа представляет собой жесткую металлоконструкцию, которая также жестко соединена с гидравлическими аутригерами. При вывешивании платформы на выносных гидравлических опорах необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

- 1) отрыв всех ходовых элементов (пневмоколес) опорной платформы буровой машины от грунта;
- 2) горизонтирование платформы (обеспечение нулевых углов наклона осей платформы  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  относительно горизонтальной плоскости);





ней по углам четыре гидроцилиндра опор 2, 3, 4, 5 (рисунок 2.2). На платформе закреплены два датчика угла наклона платформы 6 и 7. Каждый из гидроцилиндров 2, 3, 4, 5 оборудован датчиком положения штока 8 и двумя датчиками измерения давления 9 и 10 – в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндра соответственно. Датчики угла наклона своими выходами соединены с информационными входами блока управления 11, входящего в состав устройства. Другими информационными входами блока управления 11 связан с датчиками положения штока 8 и датчиками давления 9 и 10. Управляющими выходами блока управления 11 связан с четырехсекционным электрогидрораспределителем 12, выходы которого, в свою очередь, подключены к входам гидроцилиндров 2, 3, 4, 5. Другой управляющий выход блока управления является входом блока аварийной остановки машины 13. Включение и отключение устройства производится блоком включения/выключения 14, выход которого является входом блока управления [21].

### **2.1.3 Исполнительные механизмы**

Для поддержания платформы в необходимом положении используют гидроприводы. Приводом называется устройство для приведения в движение механизмов и машин. В технике применяют различные виды приводов: механический, электрический, пневматический, комбинированный и др.

Привод, в котором носителем энергии является жидкость, называется гидравлическим (сокращенно гидропривод). Различают два типа гидравлических приводов: объемный гидропривод и гидродинамический привод.

Объемным гидроприводом называют совокупность устройств, предназначенных для приведения в движение исполнительных механизмов и машин с помощью рабочей жидкости под давлением. Объемным гидропривод называется потому, что передача движения от источника энергии (насоса) к исполнительному механизму (гидродвигателю) осуществляется за счет перемещающихся внутри системы объемов жидкости, т.е. рабочая жидкость

обеспечивает кинематические связи (перемещение, скорость) в системе путем вытеснения замкнутых объемов жидкости [27].

В гидродинамическом приводе, в отличие от объемного, жидкость обеспечивает силовые связи.

В состав объемного гидропривода (рисунок 2.3) входят следующие устройства:

- один или несколько насосов;
- один или несколько гидродвигателей (гидроцилиндров, гидромоторов, поворотных гидродвигателей);
- гидроаппаратура (клапаны, дроссели, гидрораспределители и др.);
- кондиционеры рабочей жидкости (фильтры, теплообменники и др.);
- гидроемкости (гидробаки, гидроаккумуляторы)
- гидрролинии.

Насосы преобразуют механическую энергию приводных двигателей (тепловых, электрических и других) в энергию потока жидкости.



Рисунок 2.3 – Функциональная схема гидропривода

Объемные гидродвигатели (гидроцилиндры, гидромоторы и поворотные гидродвигатели) преобразуют энергию потока рабочей жидкости в механическую энергию выходных звеньев (исполнительных механизмов) привода.

Гидроаппараты (клапаны, дроссели, распределители) предназначены для управления потоком рабочей жидкости. Под этим понимается изменение или поддержание заданных значений давления или расхода рабочей жидкости, либо изменение направления, пуск и остановка потока рабочей жидкости, а также открытие или перекрытие отдельных гидролиний. При помощи гидроаппаратуры осуществляется управление гидроприводом и его защита от перегрузок.

Кондиционеры рабочей жидкости обеспечивают поддержание ее необходимых качественных показателей и состояния. К ним относятся фильтры, теплообменники (охладители и нагреватели), влагоотделители и др.

Гидроемкости (гидробаки, гидроаккумуляторы) служат для хранения рабочей жидкости, которая используется в процессе работы гидропривода.

Гидролинии предназначены для движения рабочей жидкости или передачи давления от одного устройства гидропривода к другому или внутри устройства от одной полости (камеры) к другой. Различают гидролинии всасывающие, напорные, сливные, исполнительные, дренажные, управления и каналы. Конструктивно гидролинии представляют собой трубы, рукава, каналы и соединения [27].

Исполнительными устройствами являются гидроцилиндры. В данной работе в качестве исполнительного устройства рассматривается поршневой гидроцилиндр двустороннего действия с односторонним штоком.

### **Гидроцилиндры.**

Гидравлические цилиндры (силовые гидроцилиндры) предназначены для преобразования энергии движущейся жидкости в механическую энергию поступательного движения выходного звена.

Гидравлические цилиндры (гидроцилиндры) – это гидродвигатели с возвратно-поступательным движением выходного звена. Благодаря своей конструктивной простоте, возможности реализации значительных усилий,

малой стоимости, высоким удельным показателям и надежности гидроцилиндры являются самыми распространенными объемными гидродвигателями.

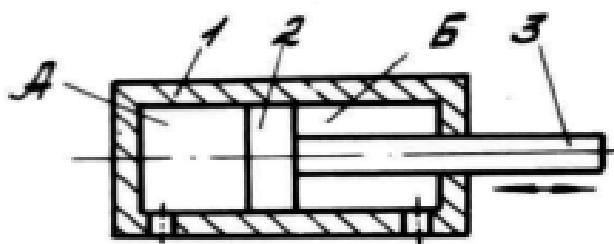


Рисунок 2.4 – Поршневой гидроцилиндр двустороннего действия с односторонним штоком

Поршневой гидроцилиндр (рисунок 2.4) имеет цилиндр (корпус) 1 и поршень 2, жестко соединенный со штоком 3. Шток выходит наружу корпуса. Гидроцилиндр имеет две полости: поршневую А – часть рабочей камеры, ограниченной рабочими поверхностями корпуса и поршня, и штоковую Б – часть рабочей камеры, ограниченной рабочими поверхностями корпуса, поршня и штока. Для герметизации подвижных соединений в гидроцилиндре установлены уплотнения.

Принцип действия поршневого гидроцилиндра (рисунок 2.4) заключается в следующем. При соединении поршневой полости А с напорной гидролинией поршень 2 вместе со штоком 3 под действием силы давления рабочей жидкости перемещается вправо (корпус 1 неподвижен). При этом одновременно происходит вытеснение рабочей жидкости из штоковой полости Б.

При подводе рабочей жидкости в полость Б поршень со штоком перемещается в противоположном направлении. Скорость движения поршня со штоком зависит от диаметров поршня и штока. В отдельных случаях подвижным (выходным звеном) может быть корпус гидроцилиндра, а не шток с поршнем.

## 2.2 Математическая модель управления положением платформы

Проведение теоретических исследований в создаваемой технике невозможно без математического моделирования исследуемого объекта. В настоящее время часто используется представление математических моделей в виде системы уравнений (общих дифференциальных, частных дифференциальных, алгебраических и др.), которые с достаточной степенью точности отражают исследуемые свойства объекта [18].

### 2.2.1 Основные параметры системы

#### Входные параметры системы

Входными параметрами системы являются время  $t$ , и измеряемые параметры. К измеряемым характеристикам относятся следующие параметры:

$l_1, l_2, l_3, l_4$  – длины гидравлических опор от нижней поверхности подпятника гидроцилиндра до плоскости опорной платформы;

$\alpha_x$  и  $\alpha_y$  – углы наклона опорной платформы относительно горизонтальной поверхности;

$p_{п1}, p_{ш1}; p_{п2}, p_{ш2}; p_{п3}, p_{ш3}; p_{п4}, p_{ш4}$  – давления в поршневых и штоковых полостях гидроцилиндров 1-4.

Основные параметры, необходимые для работы системы управления положением платформы – углы наклона  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  опорной платформы относительно горизонтальной поверхности. В процессе установки платформы изменяется длина гидравлических опор, что приводит к изменению углов наклона платформы. На рисунке 2.5 схематично показана платформа буровой машины. При выдвигании штока гидроцилиндра аутригера 3 платформа меняет свое положение в пространстве (Позиция 1  $\rightarrow$  Позиция 2), это приводит к изменению угла наклона по оси  $X$ .

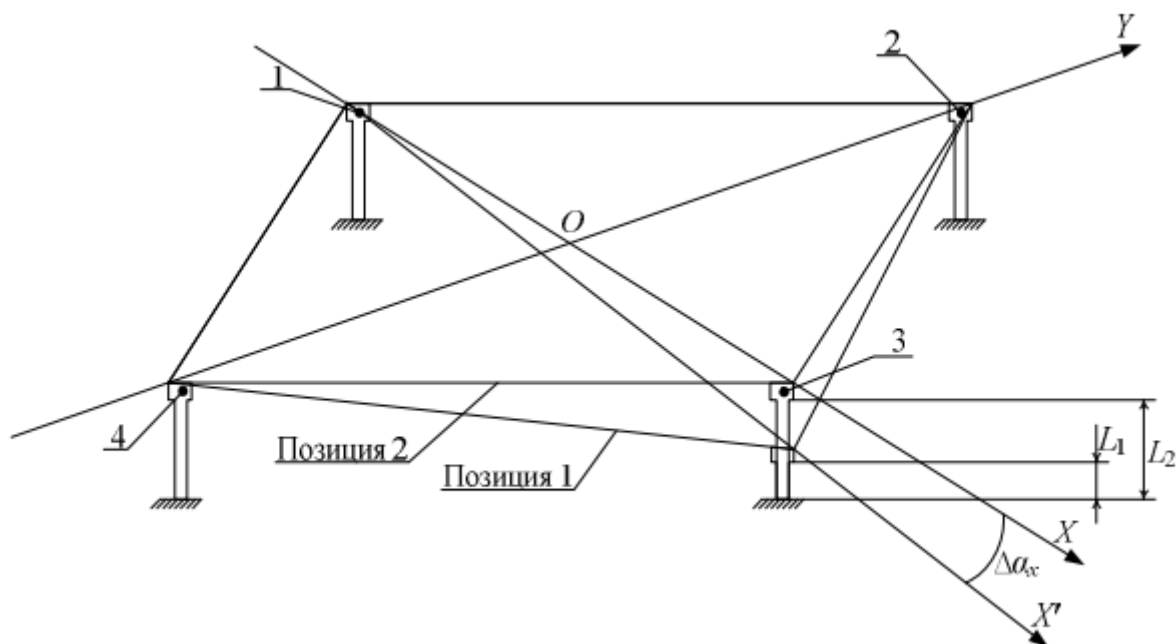


Рисунок 2.5 – Изменение информационного параметра при изменении длины аутригера

Оси  $X$  и  $Y$  расположены по диагоналям платформы. Датчики крена необходимо установить на платформе таким образом, чтобы оси вращения датчиков были параллельны диагоналям платформы. Такое расположение позволяет выравнивать платформу, управляя всеми четырьмя опорами [30, 31, 32].

### **Внутренние (постоянные) параметры системы**

Внутренними (постоянными) параметрами системы являются конструктивные параметры платформы и паспортные параметры гидроцилиндров. К ним относятся:

$l_{1 \text{ гор}}, l_{2 \text{ гор}}, l_{3 \text{ гор}}, l_{4 \text{ гор}}$  – длины опор при первоначальной установке платформы в горизонтальном положении;

$a, b$  – габариты платформы (расстояния между центрами опор по каждой стороне,  $a \leq b$ );

$\Delta_\alpha$  – оптимальный порог нечувствительности,  $\Delta_\alpha = 0,172^\circ \approx 0,2^\circ$  при запаздывание  $\Delta_\alpha = 0,1\text{с}$ ;

$d_{ц}, d_{ш}$  – диаметры внутренний и штока гидроцилиндра соответственно;  
 $\Delta\alpha$  – предельная погрешность измерения углов наклона,  $\Delta\alpha = 0,1^\circ$ ;  
 $\Delta R$  – предельная погрешность косвенного измерения силы реакции на любой из опор;

$R_{min}$  – минимальное предельное значение силы реакции опоры (10% расчетной доли силы веса платформы на один гидроцилиндр);

$l_{min}$  – минимальная длина опоры обеспечивающая отрыв ходовых элементов машины от грунта;

$L$  – рабочий ход штока гидроцилиндра;

$l_{max\ констр}$  – максимальная длина гидравлической опоры, при которой шток выдвинут на максимально допустимую конструкцией гидроцилиндра длину;

$l_{min\ пред}$  – минимальная предельно допустимая длина опоры в рабочем режиме;

$l_{max\ пред}$  – максимальная предельно допустимая длина опоры в рабочем режиме;

$E_{ж}, E_{ц}$  – модули упругости рабочей жидкости и материала стенки цилиндра.

На рисунке 2.6 схематично показаны положения штока гидроцилиндра опоры. Не зависимо от положения штока гидроцилиндра длина  $i$ -й опоры может изменяться в пределах  $l_{min\ пред} \leq l_i \leq l_{max\ пред}$ .



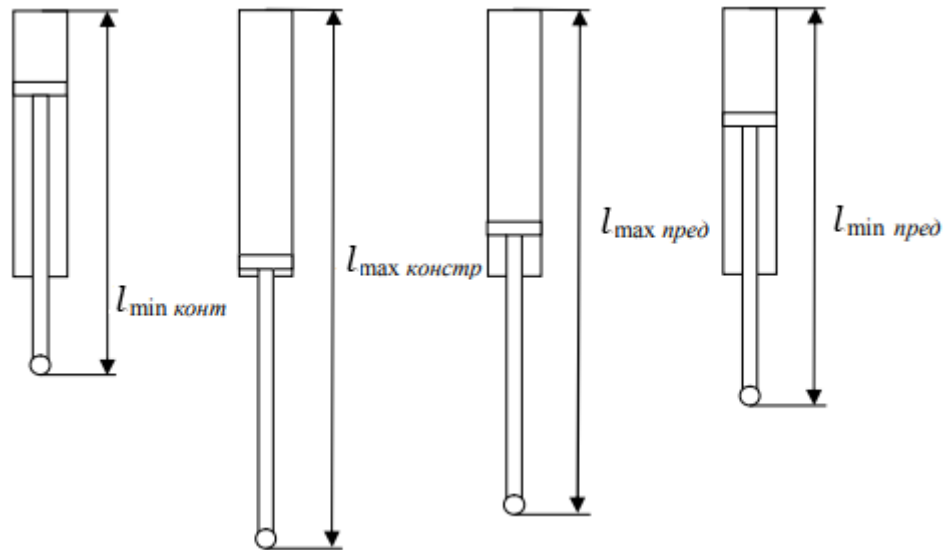


Рисунок 2.6 – Длины гидравлических опор

### Расчётные параметры

Расчетные параметры системы включают в себя расчетные параметры платформы и гидроцилиндров, как основных исполнительных устройств.

На основе значений давлений  $p_{пi}$  и  $p_{шi}$ ,  $i = 1,2,3,4$  и площадей поршневых и штоковых полостей рассчитываются силы нормальных реакций на опорах  $R_1, R_2, R_3, R_4$ :

$$\begin{cases} R_1 = p_{п1}S_{п} - p_{ш1}(S_{п} - S_{ш}); \\ R_2 = p_{п1}S_{п} - p_{ш1}(S_{п} - S_{ш}); \\ R_3 = p_{п1}S_{п} - p_{ш1}(S_{п} - S_{ш}); \\ R_4 = p_{п1}S_{п} - p_{ш1}(S_{п} - S_{ш}). \end{cases} \quad (2.1)$$

где  $S_{п}, S_{ш}$  – рабочие площади поршневой и штоковой полостей,

$$S_{п} = \pi d_{ц}^2/4, \quad S_{ш} = \pi(d_{ц}^2 - d_{ш}^2).$$

Затем определяются максимальная и минимальная длины  $l_{max 1234}$  и  $l_{min 1234}$ :

$$l_{max\ 1234} = \max\{l_1, l_2, l_3, l_4\}; \quad (2.2)$$

$$l_{min\ 1234} = \min\{l_1, l_2, l_3, l_4\}.$$

Результирующий угол наклона оси бурового инструмента  $\alpha_z$ , изображенного на рисунке 2.7, вычисляется с помощью углов наклона  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$ :

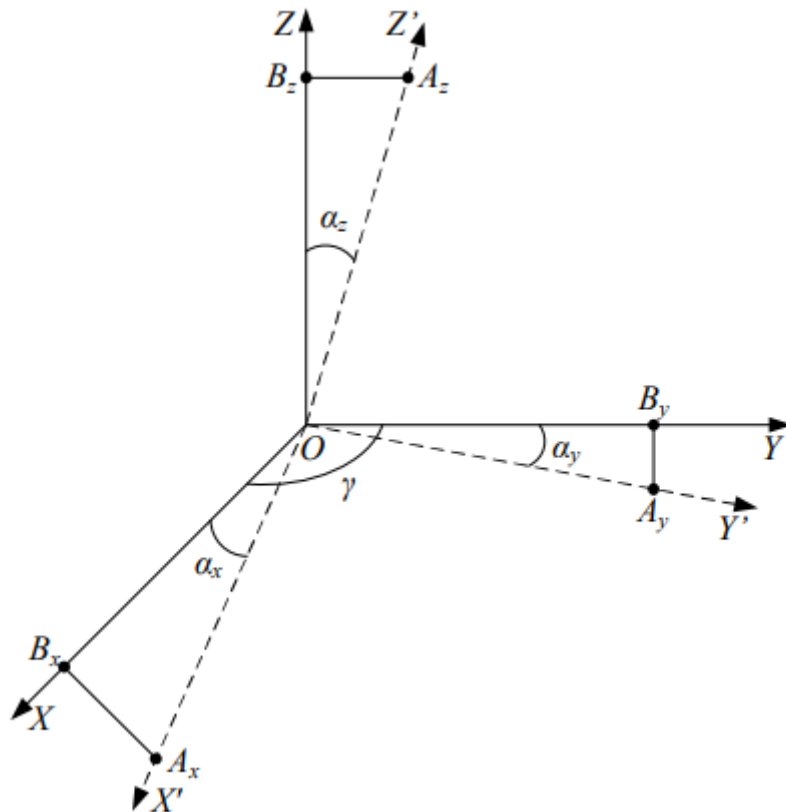


Рисунок 2.7 – Результирующий угол наклона

$$\alpha_z = \arctg\sqrt{\text{tg}^2\alpha_x + \text{tg}^2\alpha_y - 2\text{tg}\alpha_x\text{tg}\alpha_y \cos\gamma} \quad (2.3)$$

где  $\gamma$  – угол между диагоналями (меньший) платформы (рисунок 2.8),  $\gamma = 2 \arctg \frac{a}{b}$ . Согласно требованиям безопасности наклон платформы в горизонтальной плоскости для большинства строительных машины должен составлять  $\alpha_z \leq 3^\circ = \alpha_{z\ max}$  [28, 29].

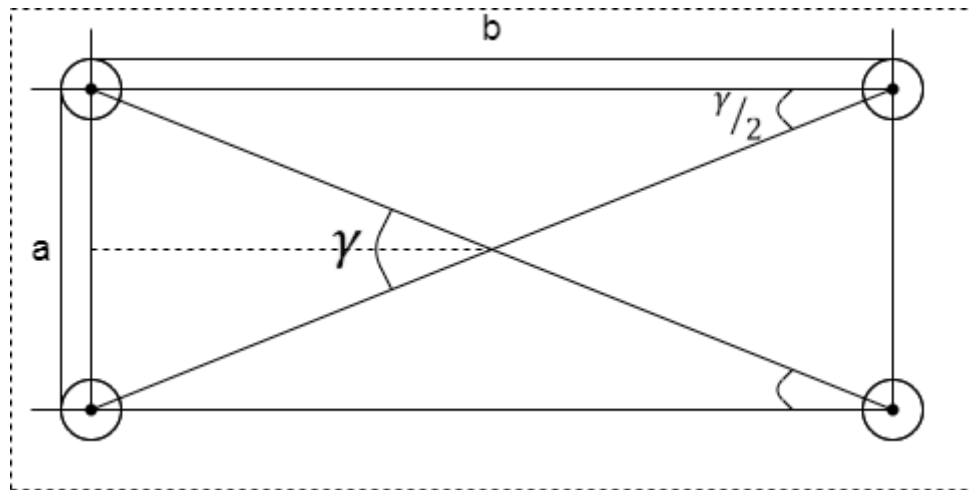


Рисунок 2.8 – Угол между диагоналями

Расчетными параметрами исполнительного механизма т.е. гидроцилиндра, являются изменение давления  $\Delta p_{i \text{ цилиндр}}$  в напорной линии гидроцилиндра, скорость движения штока цилиндра  $V_{\text{цилиндр } i}$  и расход рабочей жидкости на входе в гидроцилиндр  $Q_{\text{цилиндр } i}$ .

### 2.2.2 Математическая модель платформы

Для правильной и безопасной работы буровой машины необходимо выдерживать платформу в горизонтальном положении. Допустимые отклонения угла наклона платформы к горизонту определены в требованиях безопасности при работе буровой машины.

$$\alpha_x \leq \alpha_{x\text{доп}} \quad (2.4)$$

$$\alpha_y \leq \alpha_{y\text{доп}} \quad (2.5)$$

где  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  – фактические углы наклона платформы к горизонту по осям  $X$  и  $Y$ ;  $\alpha_{x\text{доп}}$  и  $\alpha_{y\text{доп}}$  – максимально допустимые углы наклона платформы к горизонту по осям  $X$  и  $Y$

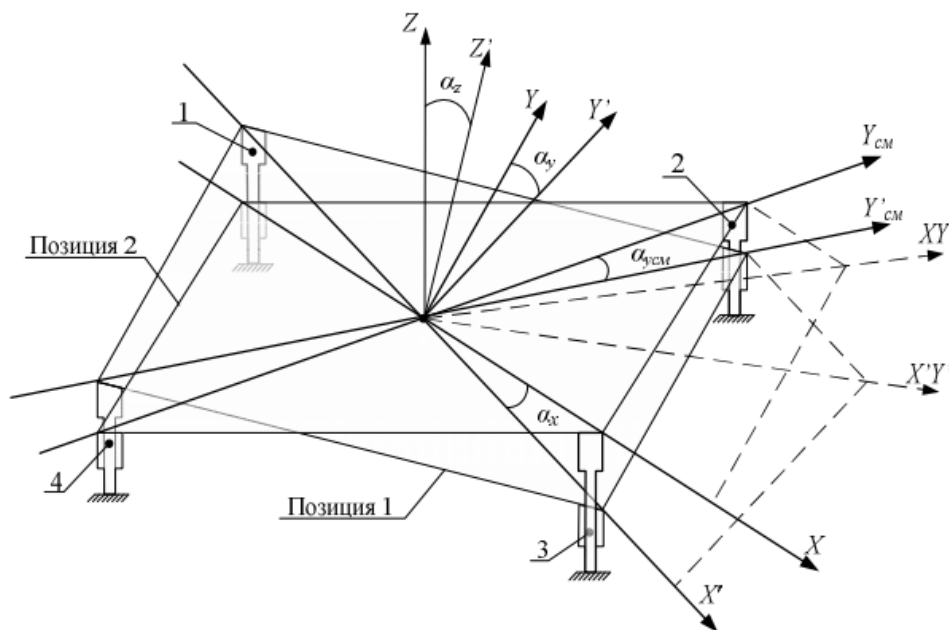


Рисунок 2.9 – Определение результирующего угла отклонения оси бурового инструмента

На рисунке 2.9 схематично показана платформа буровой машины, имеющей наклон по осям  $X$  и  $Y$ . Векторная сумма углов наклона  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  образует результирующий угол наклона  $\alpha_z$  (рисунок 2.7). Согласно требованиям безопасности наклон платформы в горизонтальной плоскости для большинства буровых машины должен составлять  $\alpha_z \leq 3^\circ$  [28, 29].

Рассмотрим расчетную схему  $OB$ , представленную на рисунке 2.7:

$$OB_x = OB_y = OB_z = a; \quad (2.6)$$

$$A_x B_x = \operatorname{tg} \alpha_x \cdot a; \quad (2.7)$$

$$A_y B_y = \operatorname{tg} \alpha_y \cdot a; \quad (2.8)$$

$$\alpha_z = \operatorname{arctg} \frac{A_z B_z}{a}; \quad (2.9)$$

$$A_z B_z^2 = A_x B_x^2 + A_y B_y^2 - 2 \cdot A_x B_x \cdot A_y B_y \cdot \cos \gamma. \quad (2.10)$$

Подставим в формулу (2.9) формулы (2.7), (2.8) и (2.10):

$$\alpha_z = \arctg \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha_x + \operatorname{tg}^2 \alpha_y - 2 \cdot \operatorname{tg} \alpha_x \cdot \operatorname{tg} \alpha_y \cdot \cos \gamma}; \quad (2.11)$$

$$\alpha_z = \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 - 2 \cdot \alpha_x \cdot \alpha_y \cdot \cos \gamma}. \quad (2.12)$$

### 2.2.3 Математическая модель работы гидроцилиндра

Исполнительным устройством в системе управление положением платформы является гидропривод, который состоит из гидроцилиндров, распределителя, гидрочиний и гидронасоса (рисунок 2.10). Гидроцилиндры непосредственно приводят платформу в движение и регулируют её положение за счет изменения длины аутригеров (опор).

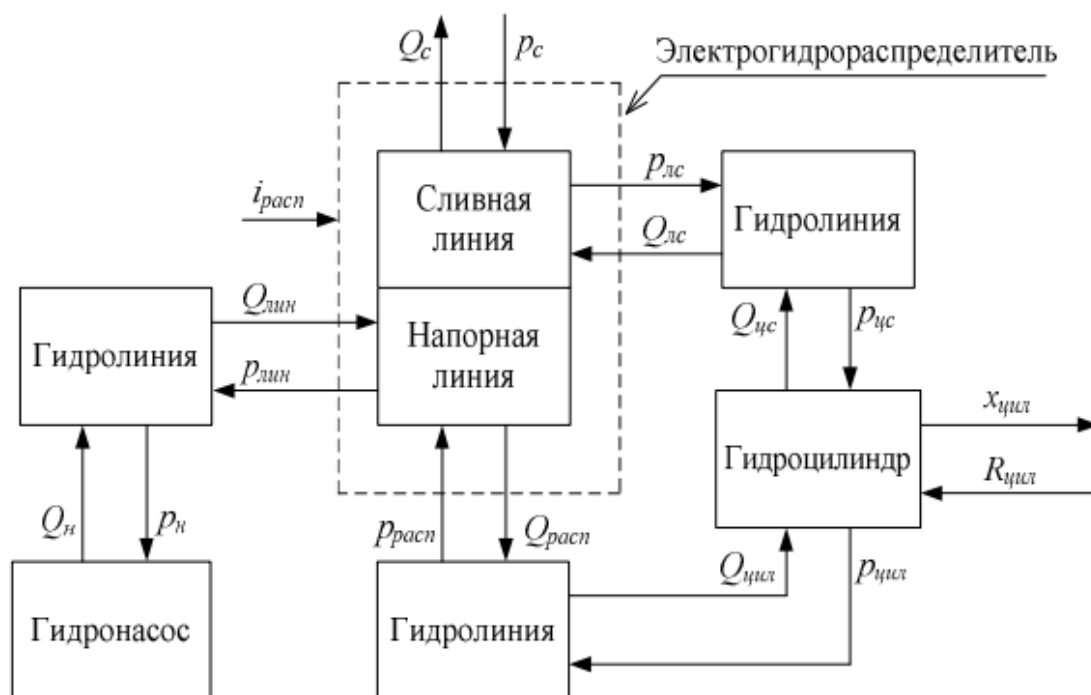


Рисунок 2.10 – Блок-схема гидропривода устройства управления положением платформы буровой машины

Для построения математической модели гидроцилиндров приняты следующие допущения [17, 18, 19]:

- объемный модуль упругости рабочей жидкости в период исследуемого процесса постоянен;
- инерционные свойства потока рабочей жидкости в связи с их малостью не учитываются;
- волновые процессы в элементах гидропривода в связи с их незначительной длиной не учитываются;
- неравномерность подачи гидронасоса не учитывается;
- сжимаемость жидкости в рабочих полостях гидроцилиндра не учитывается;
- утечки жидкости в гидроэлементах не учитываются;
- силы сухого трения в гидроцилиндрах в связи с их малостью не учитываются.

Кроме того, расход жидкости на входе и выходе из гидроцилиндра в течение времени горизонтирования платформы считается постоянным.

Следует отметить, что в данной работе математические модели гидронасоса, распределителя и гидролиний не рассматриваются, поскольку эти элементы гидросистемы обеспечивают требуемую подачу рабочей жидкости в гидроцилиндры и не участвуют непосредственно в контуре управления положением платформы.

Основными параметрами для гидроцилиндров являются давление напорной линии  $P_{цил i}(t)$ , расход рабочей жидкости на входе  $Q_{цил i}$ , скорость перемещения штока цилиндра  $V_{цил i}(t)$ , значения давления в поршневой полости  $p_{п i}$  и в штоковой полости  $p_{ш i}$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ,  $d_{ц}$  – диаметр поршня,  $d_{ш}$  – диаметр штока.

При динамическом расчете гидроцилиндра сила, действующая на опору, приведенная к штоку гидроцилиндра, вызывает изменение давления  $P_{цил i}(t)$  в напорной линии гидроцилиндра. Из уравнения движения поршня вытекает, что [17, 19, 33, 34]

$$P_{\text{цил } i}(t) = \frac{R_i + 0,25\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)p_{\text{ш } i} + m_{\text{ц}} \frac{dV_{\text{цил}}}{dt} + k_{\text{ц}}V_{\text{цил}}}{0,25\pi d_{\text{ц}}^2} \quad (2.13)$$

при выдвигании штока и

$$P_{\text{цил } i}(t) = \frac{-R_i + 0,25\pi d_{\text{ц}}^2 p_{\text{п } i} + m_{\text{ц}} \frac{dV_{\text{цил}}}{dt} + k_{\text{ц}}V_{\text{цил}}}{0,25\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)} \quad (2.14)$$

при втягивании штока, где  $k_{\text{ц}}$  – коэффициент вязкого трения в гидроцилиндре,  $m_{\text{ц}}$  – подвижная масса приведенная к штоку.

Подставим в правые части (3) и (4) выражения (1) для усилий  $R_i$  тогда

$$\begin{aligned} & \frac{R_i + 0,25\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)p_{\text{ш } i} + m_{\text{ц}} \frac{dV_{\text{цил}}}{dt} + k_{\text{ц}}V_{\text{цил}}}{0,25\pi d_{\text{ц}}^2} \\ &= \frac{p_{\text{п } i} + 0,25\pi d_{\text{ц}}^2 - p_{\text{ш } i}(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2) + 0,25\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}{0,25\pi d_{\text{ц}}^2} = p_{\text{п } i}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{-R_i + 0,25\pi d_{\text{ц}}^2 p_{\text{п } i} + m_{\text{ц}} \frac{dV_{\text{цил}}}{dt} + k_{\text{ц}}V_{\text{цил}}}{0,25\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)} \\ &= \frac{-p_{\text{п } i}0,25\pi d_{\text{ц}}^2 + p_{\text{ш } i}(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2) + 0,25\pi d_{\text{ц}}^2 p_{\text{п } i}}{0,25\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)} = p_{\text{ш } i}, \end{aligned}$$

$i = 1, 2, 3, 4$ . Обозначим через  $\Delta p_{\text{цил } i}(t)$  изменение давления в момент  $t$ ,

$$\Delta P_{\text{цил } i} = P_{\text{цил } i}(t) - p_{\text{п } i}$$

при выдвигание штока и

$$\Delta P_{\text{цил } i} = P_{\text{цил } i}(t) - p_{\text{ш } i}$$

при втягивании штока.

Из (2.13) и (2.14) следует, что  $\Delta P_{\text{цил } i}$  удовлетворяет уравнению

$$\Delta P_{\text{цил } i} = \frac{m_{\text{ц}} \frac{dV_{\text{цил } i}}{dt} + k_{\text{ц}} V_{\text{цил } i}}{0,25\pi d_{\text{ц}}^2} \quad (2.15)$$

при выдвигании штока и

$$\Delta P_{\text{цил } i} = \frac{m_{\text{ц}} \frac{dV_{\text{цил}}}{dt} + k_{\text{ц}} V_{\text{цил}}}{0,25\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)} \quad (2.16)$$

при втягивании штока.

Скорость движения штока гидроцилиндра зависит от расхода  $Q_{\text{цил}}$  и коэффициентов  $k_{\text{п}}$  и  $k_{\text{ш}}$  характеризующих упругие свойства поршневой и штоковой полостей цилиндра соответственно, а также от  $\frac{dp_{\text{цил } i}}{dt}$  [17, 19, 33, 34].

$$V_{\text{цил } i} = \begin{cases} \frac{4 \left( Q_{\text{цил}} - k_{\text{п}} \frac{d\Delta P_{\text{цил } i}}{dt} \right)}{\pi d_{\text{ц}}^2} & \text{при выдвигании штока,} \\ \frac{-4 \left( Q_{\text{цил}} - k_{\text{ц}} \frac{d\Delta P_{\text{цил } i}}{dt} \right)}{\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)} & \text{при втягивании штока.} \end{cases} \quad (2.17)$$

Здесь  $k_{\text{п}}$ ,  $k_{\text{ш}}$  – коэффициенты, характеризующие упругие свойства поршневой и штоковой полостей:

$$k_{\text{п}} = (\Delta V_{\text{п}} + 0,25\pi L_{\text{ш}} d_{\text{ц}}^2) \left( \frac{1}{E_{\text{ж}}} + \frac{d_{\text{ц}}}{\delta_{\text{ц}} E_{\text{ц}}} \right),$$

$$k_{\text{ш}} = \left( (\Delta V_{\text{ш}} + 0,25\pi L_{\text{ш}} \max - L_{\text{ш}}) (d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2) \right) \left( \frac{1}{E_{\text{ж}}} + \frac{d_{\text{ц}}}{\delta_{\text{ц}} E_{\text{ц}}} \right),$$



где  $\Delta V_{\Pi}$  – «мертвый» объем поршневой полости,  $\Delta V_{\text{ш}}$  – «мертвый» объем штоковой полости,  $L_{\text{ш}}$  – ход штока гидроцилиндра,  $L_{\text{ш max}}$  – длина штока,  $\delta_{\text{ц}}$  – толщина стенки гидроцилиндра.

Подставляя соответствующие выражения для  $V_{\text{цил } i}$  в (2.15) и (2.16), получаем уравнения для изменения давления  $\Delta P_{\text{цил } i}$  при выдвигании штока

$$4k_{\Pi}m_{\text{ц}} \frac{d^2 \Delta P_{\text{цил } i}}{dt^2} + 4k_{\Pi}m_{\text{ц}} \frac{d \Delta P_{\text{цил } i}}{dt} + 0,25\pi d_{\text{ц}}^2 \Delta P_{\text{цил } i} = 4k_{\text{ц}}Q_{\text{цил}} \quad (2.18)$$

и при втягивании штока

$$-4k_{\text{ш}}m_{\text{ц}} \frac{d^2 \Delta P_{\text{цил } i}}{dt^2} + 4k_{\text{ш}}m_{\text{ц}} \frac{d \Delta P_{\text{цил } i}}{dt} + 0,25\pi d_{\text{ц}}^2 \Delta P_{\text{цил } i} = -4k_{\text{ц}}Q_{\text{цил}}. \quad (2.19)$$

В начальный момент

$$\Delta P_{\text{цил } i}|_{t=0} = 0 \quad (2.20)$$

и

$$V_{\text{цил } i}|_{t=0} = 0.$$

Из уравнений (7) следует, что при выдвигании штока

$$\frac{d \Delta P_{\text{цил } i}}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{Q_{\text{цил}}}{k_{\Pi}}, \quad (2.21)$$

а при втягивании штока

$$\frac{d \Delta P_{\text{цил } i}}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{Q_{\text{цил}}}{k_{\text{ш}}}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2.22)$$

Уравнение (2.18) является линейным обыкновенным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами. Его общее решение имеет вид

$$\Delta P_{\text{цил } i} = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + \frac{4k_{\text{ц}} Q_{\text{цил } i}}{0,25\pi d_{\text{ц}}^2}, \quad (2.23)$$

где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – корни характеристического уравнения [42]

$$4k_{\text{п}} m_{\text{ц}} \lambda^2 + 4k_{\text{ц}} k_{\text{п}} \lambda + 0,25\pi d_{\text{ц}}^2 = 0,$$

т. е.

$$\lambda_1 = \frac{-2k_{\text{ц}} k_{\text{п}} + \sqrt{4k_{\text{ц}}^2 k_{\text{п}}^2 - \pi k_{\text{п}} m_{\text{ц}} d_{\text{ц}}^2}}{2k_{\text{п}} m_{\text{ц}}},$$

$$\lambda_2 = \frac{-2k_{\text{ц}} k_{\text{п}} - \sqrt{4k_{\text{ц}}^2 k_{\text{п}}^2 - \pi k_{\text{п}} m_{\text{ц}} d_{\text{ц}}^2}}{2k_{\text{п}} m_{\text{ц}}}.$$

Из начальных данных (2.20), (2.21) вытекает, что постоянные  $C_1$  и  $C_2$  должны удовлетворять системе линейных алгебраических уравнений.

$$\begin{cases} C_1 + C_2 + \frac{16k_{\text{ц}} Q_{\text{цил } i}}{\pi d_{\text{ц}}^2} = 0, \\ C_1 \lambda_1 + C_2 \lambda_2 = \frac{Q_{\text{цил } i}}{k_{\text{п}}}. \end{cases}$$

Отсюда получаем, что

$$C_1 = Q_{\text{цил } i} \left[ -\frac{16k_{\text{ц}}}{\pi d_{\text{ц}}^2} + \frac{4k_{\text{ц}} m_{\text{ц}}}{\sqrt{4k_{\text{ц}}^2 k_{\text{п}}^2 - \pi k_{\text{п}} m_{\text{ц}} d_{\text{ц}}^2}} \times \left( \frac{1}{k_{\text{п}}} + \frac{16k_{\text{ц}}}{\pi d_{\text{ц}}^2} \lambda_1 \right) \right] \equiv Q_{\text{цил } i} C'_1,$$

$$C_2 = -\frac{Q_{\text{цил } i} 4k_{\text{ц}} m_{\text{ц}}}{\sqrt{4k_{\text{ц}}^2 k_{\text{п}}^2 - \pi k_{\text{п}} m_{\text{ц}} d_{\text{ц}}^2}} \times \left( \frac{1}{k_{\text{п}}} + \frac{16k_{\text{ц}}}{\pi d_{\text{ц}}^2} \lambda_1 \right) \equiv Q_{\text{цил } i} C'_2.$$

Уравнение (2.19) для  $\Delta P_{\text{цил } i}$  при втягивании штока является также линейным обыкновенным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами. Его общее решение имеет вид

$$\Delta P_{\text{цил } i} = C_3 e^{\lambda_3 t} + C_4 e^{\lambda_4 t} + \frac{4k_{\text{ц}} Q_{\text{цил } i}}{(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}, \quad (2.24)$$

где  $\lambda_3$  и  $\lambda_4$  – корни характеристического уравнения

$$4k_{\text{ш}} m_{\text{ц}} \lambda^2 + 4k_{\text{ц}} k_{\text{ш}} \lambda + 0,25\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2) = 0,$$

т. е.

$$\lambda_3 = \frac{-2k_{\text{ц}} k_{\text{ш}} + \sqrt{4k_{\text{ц}}^2 k_{\text{ш}}^2 - \pi k_{\text{ш}} m_{\text{ц}} (d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}}{2k_{\text{ш}} m_{\text{ц}}},$$

$$\lambda_4 = \frac{-2k_{\text{ц}} k_{\text{ш}} - \sqrt{4k_{\text{ц}}^2 k_{\text{ш}}^2 - \pi k_{\text{ш}} m_{\text{ц}} (d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}}{2k_{\text{ш}} m_{\text{ц}}}.$$

Из начальных данных (2.20), (2.22) следует, что постоянные  $C_3$  и  $C_4$  должны удовлетворять системе линейных алгебраических уравнений

$$\begin{cases} C_3 + C_4 - \frac{16k_{\text{ц}} Q_{\text{цил } i}}{\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)} = 0, \\ C_3 \lambda_3 + C_4 \lambda_4 = \frac{Q_{\text{цил } i}}{k_{\text{ш}}}. \end{cases}$$

Отсюда получаем, что

$$C_3 = Q_{\text{цил } i} \left[ \frac{16k_{\text{ц}}}{\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)} + \frac{4k_{\text{ш}}m_{\text{ц}}}{\sqrt{4k_{\text{ц}}^2k_{\text{ш}}^2 - \pi k_{\text{ш}}m_{\text{ц}}(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}} \right. \\ \left. \times \left( \frac{1}{k_{\text{ш}}} - \frac{16k_{\text{ц}}}{\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)} \lambda_3 \right) \right] \equiv Q_{\text{цил } i} C'_3,$$

$$C_4 = - \frac{Q_{\text{цил } i} 4k_{\text{ш}}m_{\text{ц}}}{\sqrt{4k_{\text{ц}}^2k_{\text{ш}}^2 - \pi k_{\text{ш}}m_{\text{ц}}(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}} \times \left( \frac{1}{k_{\text{ш}}} - \frac{16k_{\text{ц}}}{\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)} \lambda_3 \right) \equiv Q_{\text{цил } i} C'_4.$$

Подставляя теперь решения (2.23) и (2.24) в соотношения (2.17), находим скорость  $V_{\text{цил } i}$ .

$$V_{\text{цил } i} = \begin{cases} \frac{4(Q_{\text{цил } i} - k_{\text{п}}(C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}))}{\pi d_{\text{ц}}^2} & \text{при выдвигании штока,} \\ \frac{-4(Q_{\text{цил } i} - k_{\text{ш}}(C_3 e^{\lambda_3 t} + C_4 e^{\lambda_4 t}))}{\pi(d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)} & \text{при втягивании штока.} \end{cases} \quad (2.25)$$

#### 2.2.4 Математическая модель управления

Гидроцилиндр – это исполнительное устройство, реализующее управляющее воздействие, в системе управления платформой буровой машины. В данном случае в качестве управляющего параметра выступает расход рабочей жидкости  $Q_{\text{цил } i}$  в напорной линии. Состояние платформы в момент времени  $t$  определяется углами наклона платформы  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$ .

Критерием управления при выдвигании штока является условие

$$\frac{1}{T_{\Pi}} \int_0^{T_{\Pi}} V_{\text{цил } i}(t) dt = V_{\text{втяг}}^* \frac{d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2}{d_{\text{ц}}^2}. \quad (2.26)$$

где  $V_{\text{втяг}}^*$  – номинальная скорость втягивания.

Равенства средней скорости движения штока за время переходного процесса номинальной скорости выдвигения штока. В случае втягивания штока условия управления заключается в равенстве средней скорости движения штока за время горизонтирования платформы номинальной скорости втягивания  $V_{\text{втяг}}^*$ :

$$-\frac{1}{T_{\text{ш}}} \int_0^{T_{\text{ш}}} V_{\text{цил } i}(t) dt = V_{\text{втяг}}^*. \quad (2.27)$$

Время  $T_{\text{ш}}$  можно найти, используя номинальную скорость втягивания  $V_{\text{втяг}}^*$ . Если угол платформы отклонился на  $\Delta h$  (рисунок 2.11), то время  $T_{\text{ш}}$  находится как

$$\frac{\Delta h}{V_{\text{втяг}}^*}.$$

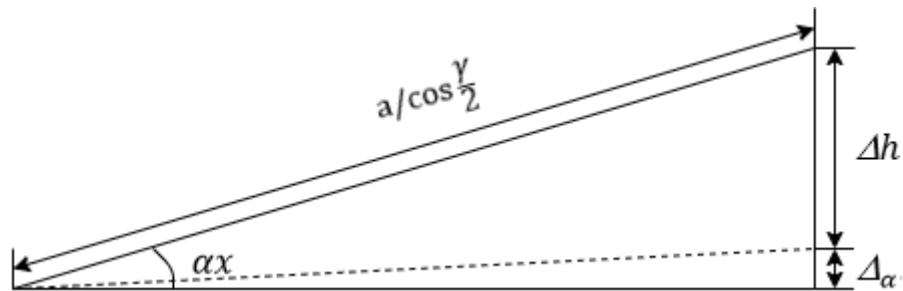


Рисунок 2.11 – Отклонение угла платформы по оси X

При этом  $\Delta h$  выражается через  $\sin \alpha_x$ :

$$\Delta h = \frac{a \sin \alpha_x}{\cos \frac{\gamma}{2}} - \Delta \alpha.$$

Тогда если требуется поднять угол платформы, т.е. выдвинуть шток гидроцилиндра, то время выдвижения

$$T_{\Pi} = \frac{\Delta h d_{\text{ц}}^2}{V_{\text{ВТЯГ}}^* (d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}. \quad (2.28)$$

Если необходимо опустить угол платформы, т.е. втянуть шток, то

$$T_{\text{ш}} = \frac{\Delta h}{V_{\text{ВТЯГ}}^*}. \quad (2.29)$$

Подставляя  $V_{\text{цил } i}$  из (2.25) при выдвижении штока в (2.26), находим  $Q_{\text{цил } i}$ :

$$Q_{\text{цил } i} = \frac{\pi V_{\text{ВТЯГ}}^* (d_{\text{ц}}^2 - d_{\text{ш}}^2) T_{\Pi}}{4 \left( T_{\Pi} - k_{\Pi} (C_1' (e^{\lambda_1 T_{\Pi}} - 1) + C_2' (e^{\lambda_2 T_{\Pi}} - 1)) \right)}. \quad (2.30)$$

При втягивании штока  $Q_{\text{цил } i}$  находится с помощью подстановки  $V_{\text{цил } i}$  из (2.25) в условие (2.27).

$$Q_{\text{цил } i} = \frac{\pi d_{\text{ц}}^2 T_{\text{ш}}}{4 \left( T_{\text{ш}} - k_{\text{ш}} (C_3' (e^{\lambda_3 T_{\text{ш}}} - 1) + C_4' (e^{\lambda_4 T_{\text{ш}}} - 1)) \right)}. \quad (2.31)$$

В случае отклонения по оси Y,

$$\Delta h = \frac{a \sin \alpha y}{\cos \frac{\gamma}{2}} - \Delta \alpha.$$

Остальные формулы остаются без изменений.

Необходимо также учитывать ограничения, налагаемые на систему управления: сила нормальной реакции на  $i$ -й опоре  $R_i \geq R_{min}$ , где  $R_{min}$  – минимальное предельное значение силы реакции на любой из опор (порядка 10 % от расчетной доли веса платформы, приходящейся на один гидроцилиндр) [17].

Для моделирования управления платформой используется функциональная схема, разработанная в [38].

Реализация алгоритма при помощи бортовой системы автоматического управления буровой машины на базе промышленного микроконтроллера позволяет выполнять полностью в автоматическом режиме вывешивание платформы на выносных, выдвижных или откидных гидравлических опорах, ее горизонтирование, поддержание на заданной высоте в горизонтальном положении во время работы машины.

При этом не допускаются ситуации отрыва опор от поверхности земли, выдвижения штоков гидроцилиндров опор на максимальную длину, а также касания колесами машины опорной поверхности, что повышает запас управляемости углами наклона платформы [35, 36].

Выходные переменные функциональной схемы с логическими элементами  $x_1, x_3, x_5, x_7$  принимают значение 1, что соответствует выдвижению штока гидроцилиндра опор 1, 2, 3, 4 соответственно, значение 0 означает, что выдвижения не происходит;  $x_2, x_4, x_6, x_8$  принимают значение 1, что соответствует втягиванию штока гидроцилиндра опор 1, 2, 3, 4 соответственно, значение 0 означает, что выдвижения не происходит;  $x_9$  при возникновении аварийной ситуации принимает значение 1, и при нормальной работе системы принимает значение 0.

По разработанной функциональной схеме устройства управления с логическими элементами (приложение Б) были составлены булевы функции для выходных переменных  $x_1 \dots x_9$ , имеющие вид [35, 39]:

$$\begin{aligned}
x_1 &= (a_{13} \vee a_5 \vee a_4) \wedge \left( \neg \left( (a_3 \vee (\neg a_5 \wedge a_{14})) \wedge (a_{13} \vee a_5 \vee a_4) \right) \right); \\
x_2 &= (a_3 \vee (a_{14} \wedge \neg a_5)) \wedge \left( \neg \left( (a_3 \vee (a_{14} \wedge \neg a_5)) \wedge (a_{13} \vee a_5 \vee a_4) \right) \right); \\
x_3 &= (a_{15} \vee a_7 \vee a_4) \wedge \left( \neg \left( (a_3 \vee (\neg a_7 \wedge a_{16})) \wedge (a_{15} \vee a_7 \vee a_4) \right) \right); \\
x_4 &= (a_3 \vee (a_{16} \wedge \neg a_7)) \wedge \left( \neg \left( (a_3 \vee (a_{16} \wedge \neg a_7)) \wedge (a_{15} \vee a_7 \vee a_4) \right) \right); \\
x_5 &= (a_{14} \vee a_9 \vee a_4) \wedge \left( \neg \left( (a_3 \vee (\neg a_9 \wedge a_{13})) \wedge (a_{14} \vee a_9 \vee a_4) \right) \right); \\
x_6 &= (a_3 \vee (a_{13} \wedge \neg a_9)) \wedge \left( \neg \left( (a_3 \vee (a_{13} \wedge \neg a_9)) \wedge (a_{14} \vee a_9 \vee a_4) \right) \right); \\
x_7 &= (a_{16} \vee a_{11} \vee a_4) \wedge \left( \neg \left( (a_3 \vee (\neg a_{11} \wedge a_{15})) \wedge (a_{16} \vee a_{11} \vee a_4) \right) \right); \\
x_8 &= (a_3 \vee (a_{15} \wedge \neg a_{11})) \wedge \left( \neg \left( (a_3 \vee (a_{15} \wedge \neg a_{11})) \wedge (a_{16} \vee a_{11} \vee a_4) \right) \right); \\
x_9 &= a_1 \vee a_2 \vee a_6 \vee a_8 \vee a_{10} \vee a_{12};
\end{aligned}$$

где  $a_i$  – значения соответствующих логических функций,  $\neg$  – аналог логического отрицания (инверсии);  $\wedge$  – аналог логического умножения (конъюнкции);  $\vee$  – аналог логического сложения (дизъюнкции). Операции перечислены в порядке убывания приоритета.

В приложение В приведена блок-схема алгоритма функционирования устройства управления положением платформы буровой машины. Алгоритм является одноктактным без необходимости хранения данных предыдущих тактов в памяти и работает следующим образом. На основе текущих значений первичных информационных параметров рассчитываются силы нормальных реакций на опорах  $R_1, R_2, R_3, R_4$ , определяются максимальные и минимальные длины  $l_{\max 1234}$  и  $l_{\min 1234}$  по формулам (2.1) и (2.2).

Затем полученные значения параметров сравниваются с константами, получаются промежуточные логические переменные со значениями 0 и 1, которые обрабатываются при помощи блоков логических операций. В резуль-



тате получают выходные переменные  $x_1 \dots x_9$ , также принимающие значения 0 и 1.

Блоки логических операций построены таким образом, чтобы предотвратить возможность одновременного выдвижения и втягивания любой из опор (перекрестные связи), то есть выходные переменные  $x_1$  и  $x_2$ ,  $x_3$  и  $x_4$ ,  $x_5$  и  $x_6$ ,  $x_7$  и  $x_8$  соответственно не могут одновременно принимать значение, равное 1.

На следующем этапе передается значение логических переменных  $x_1, x_2, \dots, x_9$  передаются в блок управления гидроцилиндрами, где в зависимости от текущего состояния системы рассчитываются управляющие воздействия  $Q_{\text{цил } i}$  и время переходного процесса по формулам (2.28) – (2.31). После этого находятся законы изменения давления  $\Delta P_{\text{цил } i}$  в напорной полости гидроцилиндров как решения задач (2.18), (2.20), (2.21) или (2.19), (2.20), (2.22), а затем законы изменения скорости движения штока  $V_{\text{цил } i}(t)$  по формулам (2.25).

Алгоритм выполняет все поставленные задачи. Так же он сохраняет работоспособность, в том числе и при различных значениях скоростей движения штоков гидроцилиндров выносных опор буровой машины, что может иметь место в реальных условиях эксплуатации.

## **2.3 Симулятор управления**

### **2.3.1 Принципиальная схема управления**

Система управления положением платформы буровой машины включает в себя шесть блоков (рисунок 2.11). Основным элементом системы является устройство управления. Для включения системы человек-оператор подает управляющий сигнал  $U_1$  на устройство управления. Устройство управления получает также сигналы с датчиков угла наклона (креномера), которые

пропорциональны углам наклона платформы  $\alpha_x, \alpha_y$  по двум плоскостям. Кроме того, на устройство управления поступают сигналы  $L_1 \dots L_4$  с датчиков расположения штоков, эти сигналы пропорциональны положению штоков  $L_1 \dots L_4$  гидроцилиндров аутригеров. Устройство управления формирует управляющие сигналы  $x_1 \dots x_9$  для управления положением штоков гидроцилиндров аутригеров. В зависимости от положения штоков гидроцилиндров изменяются углы наклона платформы в горизонтальной плоскости.

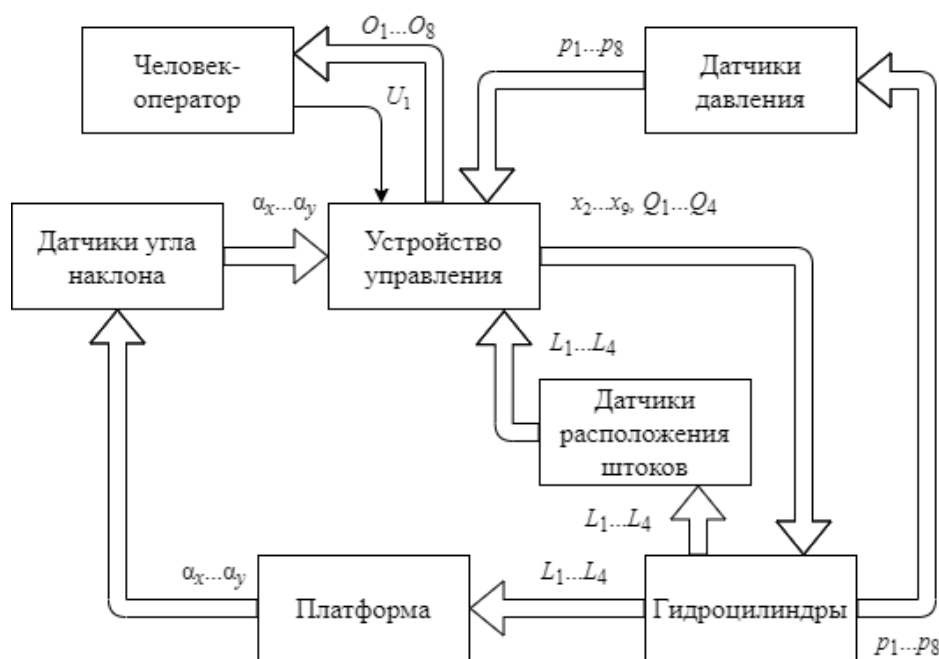


Рисунок 2.12 – Схема системы управления положением платформы буровой машины

В системе также присутствуют датчики давления, они отправляют сигналы  $p_1 \dots p_8$  для устройства управления, эти сигналы пропорциональны разности давлений в поршневой и штоковой полостях гидроцилиндров аутригеров. Эти данные позволяют определить степени нагружения каждого из четырех аутригеров и при превышении допустимой нормы, устройство управления объявит о возникновении аварийной ситуации и остановит работу буровой машины.

В кабине оператора установлен дисплей-индикатор, на котором отображаются данные о текущем состоянии платформы буровой машины (рисунок 2.13).

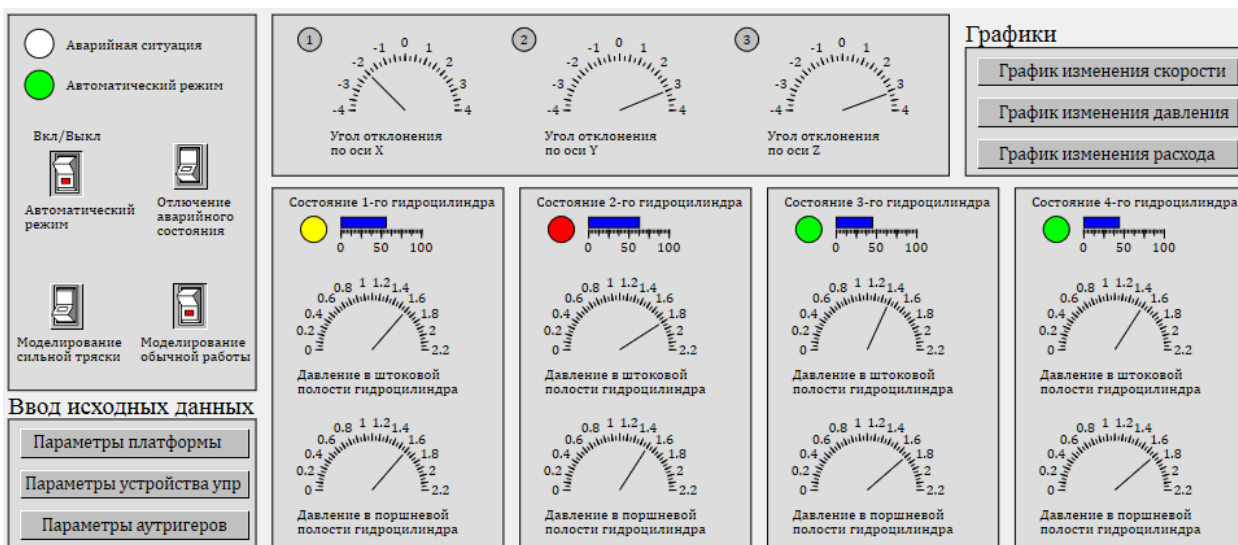


Рисунок 2.13 – Визуализация дисплея-индикатора

Дисплей-индикатор позволяет отслеживать изменение углов наклона платформы, давление в штоковой и поршневой полостях гидроцилиндров, а также положение штока. Индикатор рядом со шкалой положения штока демонстрирует состояние гидроцилиндра. Зеленый цвет означает, что происходит выдвижение штока, красный – втягивание, а желтый то, что он не движется. На панели управления можно получить информацию о состоянии системы благодаря индикаторам «Аварийная ситуация» и «Автоматический режим», кроме того, с помощью переключателей выбрать режим работы и моделирования процесса горизонтирования платформы буровой машины. В области дисплея «Ввод исходных данных» можно задать параметры платформы, управляющих элементов и устройства управления (рисунок 2.14).

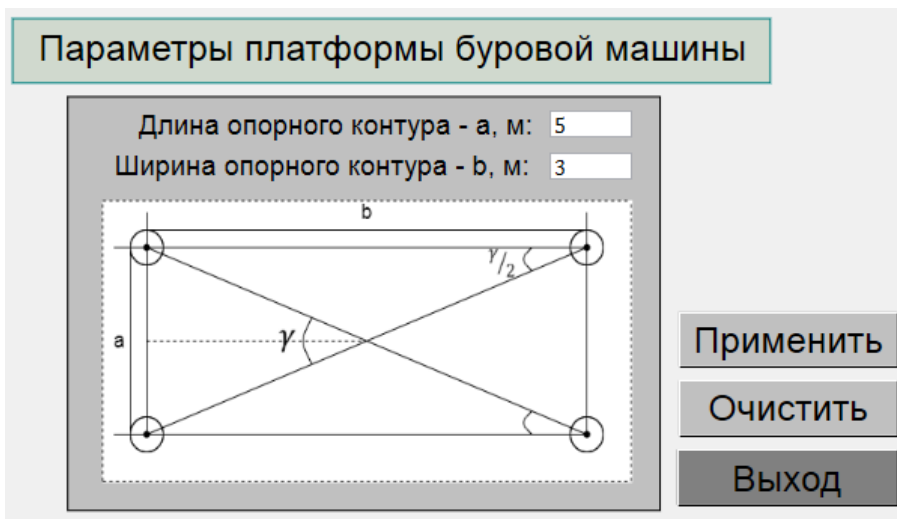


Рисунок 2.14 – Окно параметров платформы буровой машины

Опорная поверхность характеризуется высотой неровностей под выносными опорами. Предложенная блок-схема процесса управления положением платформы буровой машины необходима для решения задач анализа и синтеза автоматизированных систем горизонтирования платформ буровых машин.

### 2.3.2 Основные модули симулятора

На основе блок-схемы управления был построен компьютерный симулятор для моделирования процесса управления в среде моделирования SimInTech. Общий вид компьютерной модели представлен на рисунке 2.15. Модель системы управления положением платформы, выполненная в виде последовательно соединенных подсистем с множеством входных и выходных параметров.

Вся модель состоит из десяти субмоделей, а именно 4-х подсистем управления гидроцилиндрами, субмоделей блока управления, положения платформы, генерации данных с датчиков углов и давления, а также субмодели аварийной остановки.

### Рисунок 2.15 – Общий вид модели

На основе построенного алгоритма (приложение В) была разработана субмодель «блок управления» (рисунок 2.16), в которой моделируется логическая схема управления платформой буровой машины. На выход блока подаются сигналы о выдвигании или втягивании штоков гидроцилиндров  $x_i$ .

### Рисунок 2.16 – Субмодель «блок управления»

Четыре субмодели «Управление опорой» (рисунок 2.17) моделируют управляющие воздействия и движение гидроцилиндров. Реализация субмодели для каждого гидроцилиндра состоит из двух частей: верхняя соответствует выдвиганию штока, а нижняя часть – втягиванию штока гидроцилиндра. Переключение ветвей структурной схемы осуществляется сигналом управления  $x_i$ . При  $x_i = 1$  с четным номером  $i$  дается сигнал на выдвигание штока, при нечетном  $i$  – сигнал на втягивание штока.

### Рисунок 2.17 – Субмодель «Управление опорой»

На рисунке 2.18 представлена субмодель «платформа», которая моделирует положение платформы в пространстве исходя из положений штоков гидроцилиндров.

### Рисунок 2.18 – Субмодель «Платформа»

Субмодели датчиков углов и давления отображают текущие показания углов отклонения осей X и Y, а также давление в штоковой и поршневой областях гидроцилиндров. С заданной периодичностью случайным образом генерируются новые значения датчиков, что позволяет имитировать работу буровой машины.

## **2.4 Компьютерное моделирование процесса управления платформой**

### **2.4.1 Исходные данные для компьютерного эксперимента**

С помощью данного симулятора были проведены эксперименты по компьютерному моделированию процесса управления платформой. Для проведения компьютерного эксперимента была выбрана самоходная буровая установка HУАТАІ СУТС70 для обуривания туннелей в небольших шахтах и рудниках. Габариты платформы буровой установки составляют 5 × 2.2 м.



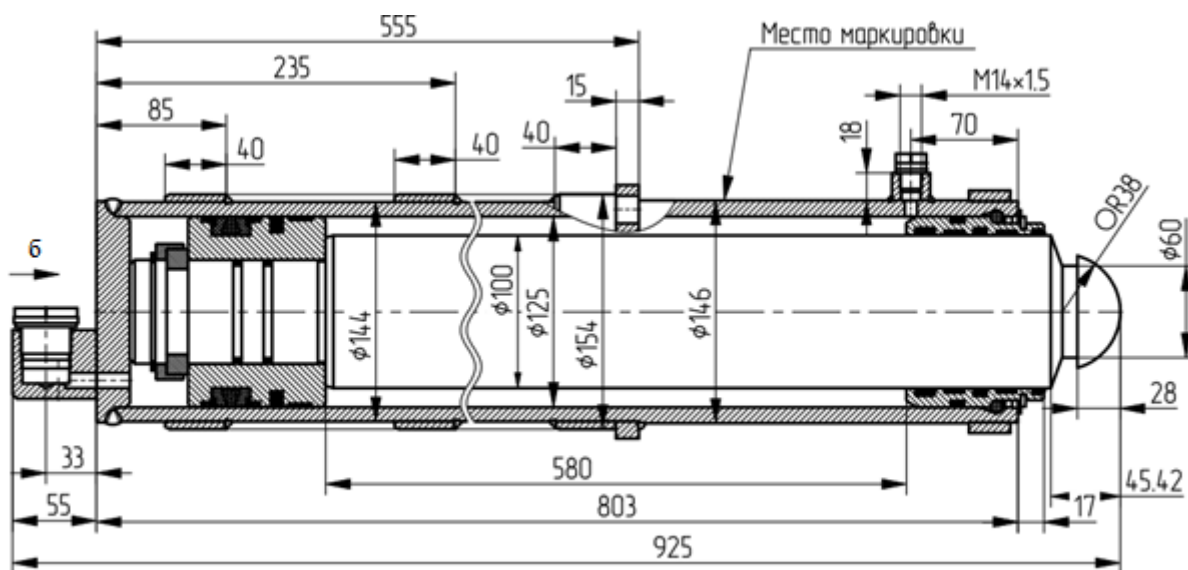
Рисунок 2.16 – Буровая машина 1БА15К

Данная гидравлическая шахтная бурильная каретка соответствует требованиям к специальному позиционированию для добывающих работ за счет высокой механизации и производительности работы. Эта модель оснащена перфоратором EPIROC 18/22U, обеспечивающим непрерывное бурение в течение долгого времени без перегрева и повреждения компонентов. Подобное оборудование идеально для подземных разработок подэтажного обрушения. Технические данные буровой машины приведены в таблице 2.2 [1].

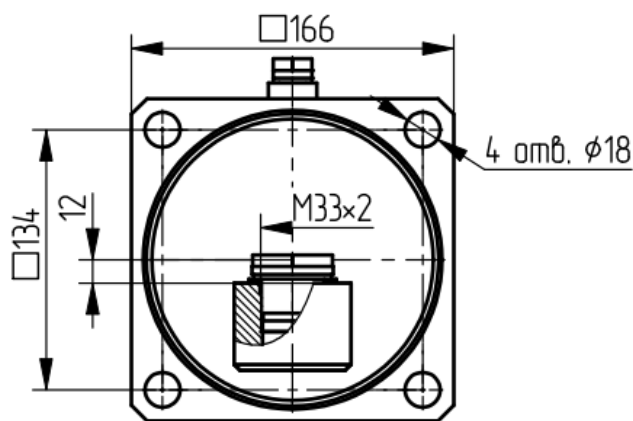
Таблица 2.2 – технические данные буровой установки HUATAI CYTC70

Параметр	Значение
Габариты транспортные Д x В x Ш	7 000 × 1 450 × 2 200
Общая масса	9 800 кг
Глубина бурения	35 м
Длина податчика в сложенной положении, мм	2 765
Длина податчика в раздвину- том положении, мм	4 025
Блок гидравлических насосов	SAUER DANFOSS U.S.A.
Максимальное давление систе- мы	230 bar
Минимальное впускное давле- ние	6 bar
Мощность сборного агрегата	62 KW
Мощность главного двигателя	55 KW
Напряжение	380 V
Частота	50 HZ
Передний гидравлический домкрат	2 шт
Задний Гидравлический домкрат	2 шт
Скорость хода	7 км/ч

В качестве исполнительного устройства в компьютерной модели используется гидроцилиндр КГЦ627.125-100-580 (ЦГ-125.100x580.55-03), реализующий управляющее воздействие, в системе управления платформой буровой машины. Принципиальная схема гидроцилиндра приведена на рисунке 2.17. Технические данные гидроцилиндра приведены в таблице 2.3 [гидроцилиндр, калькулятор].



а



б

а – разрез по оси гидроцилиндра, б – поперечный разрез

Рисунок 2.17 – Принципиальная схема гидроцилиндра опоры КГЦ627.125-100-580: а) разрез по оси гидроцилиндра, б) поперечный разрез



Таблица 2.3 – технические данные гидроцилиндра КГЦ627.125-100-580

Параметр	Значение
Давление, МПа: номинальное максимальное	16 20
Усилие на штоке, кН: толкающее тянущее	186.5 67.1
Масса подвижной части цилиндра, кг	58.35
Номинальная скорость втягивания, м/с	0.25
Диаметр штока, м	100
Диаметр цилиндра, м	125

В условиях эксплуатации буровой установки HУАТАI СУТС70 для гидроцилиндра КГЦ627.125-100-580 должно использоваться минеральное гидравлическое масло. Для компьютерного моделирования было выбрано минеральное масло марки ВЗГМ с модулем упругости  $1.67 \cdot 10^9$  Па [40].

Оболочка, шток и поршень гидроцилиндра КГЦ627.125-100-580 выполняются из конструктивной стали различных марок. Для компьютерного моделирования была выбрана сталь марки 40х с модулем упругости 21.4 Па [ГОСТ по стали].

#### 2.4.2 Результаты компьютерного моделирования процесса управления

Для изучения работы модели была смоделирована ситуация изменения углов наклона платформы путем генерирования случайных значений отклонения углов в пределах от  $-3^\circ$  до  $3^\circ$  для каждого гидроцилиндра. В результате разыгрывания случайных величин были получены следующие данные об отклонение углов отклонений: по оси Х на  $\alpha_x = -2^\circ$  и по оси Y на  $\alpha_y = -3^\circ$ ,

что означает о необходимости выдвигания штоков гидроцилиндров. При поступлении такого сигнала от датчиков наклона система управления платформой буровой машины подаст сигнал на гидроцилиндры для изменения уровня расхода рабочей жидкости, что в свою очередь приведет к изменению давления в штоковой и поршневой областях гидроцилиндра.

На рисунке 2.18 проиллюстрирован дисплей-индикатор модели после поступления в устройство управления сигнала об изменении углов наклона платформы.

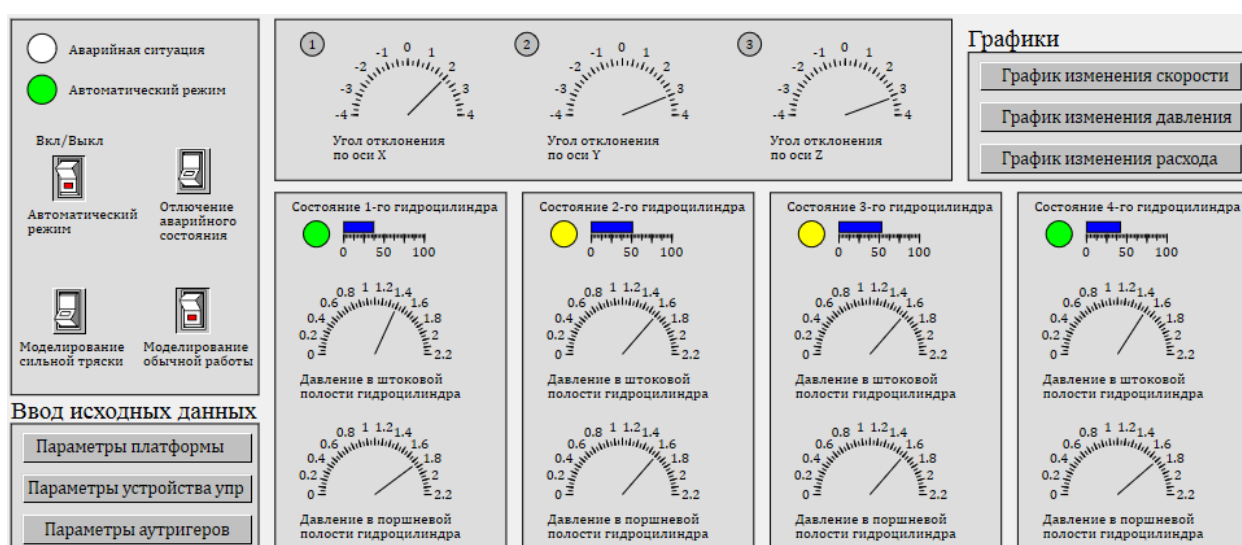


Рисунок 2.18 – Вид модели при изменении угла наклона платформы

После регулирования платформа возвращается в горизонтальное положение.

На рисунке 2.20 представлен график изменения углов  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  наклона платформы от времени.

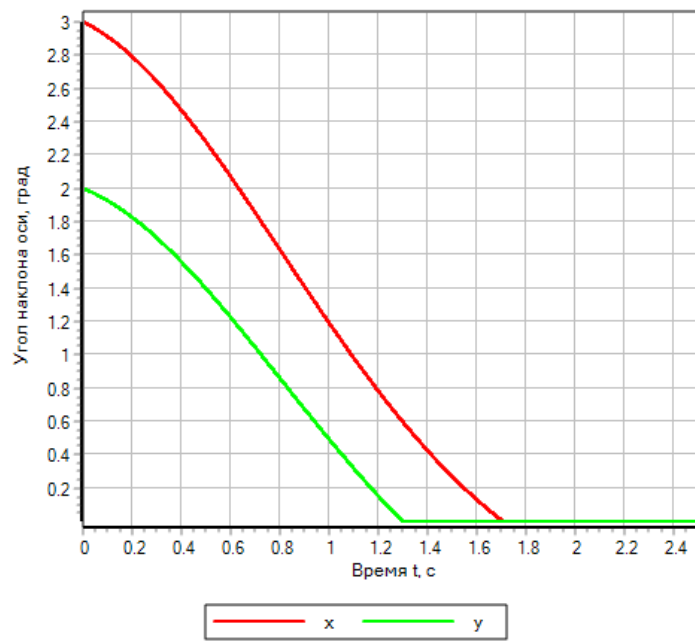


Рисунок 2.20 – График зависимости  $\alpha_x$  и  $\alpha_y$  от времени

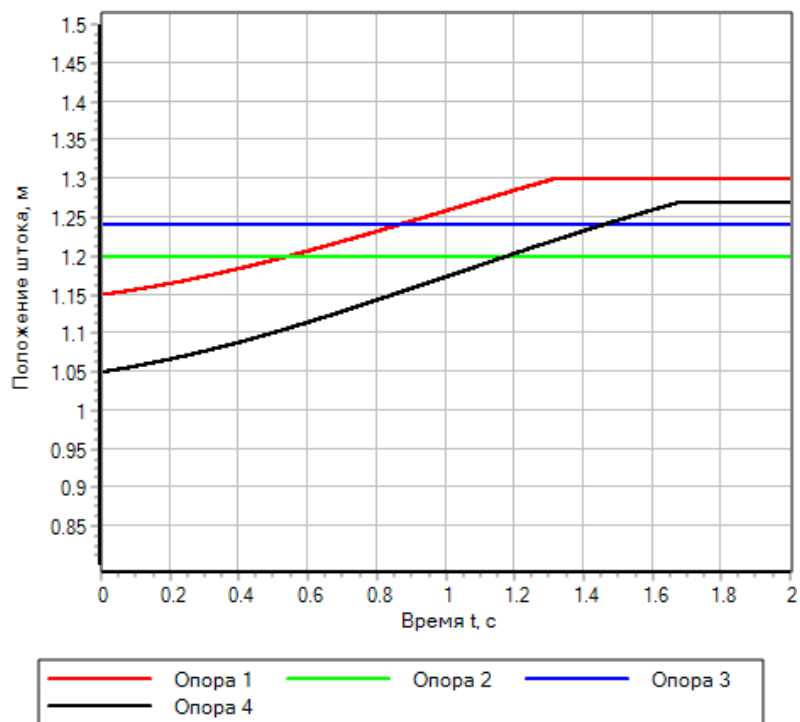


Рисунок 2.21 – График зависимости положения штока от времени

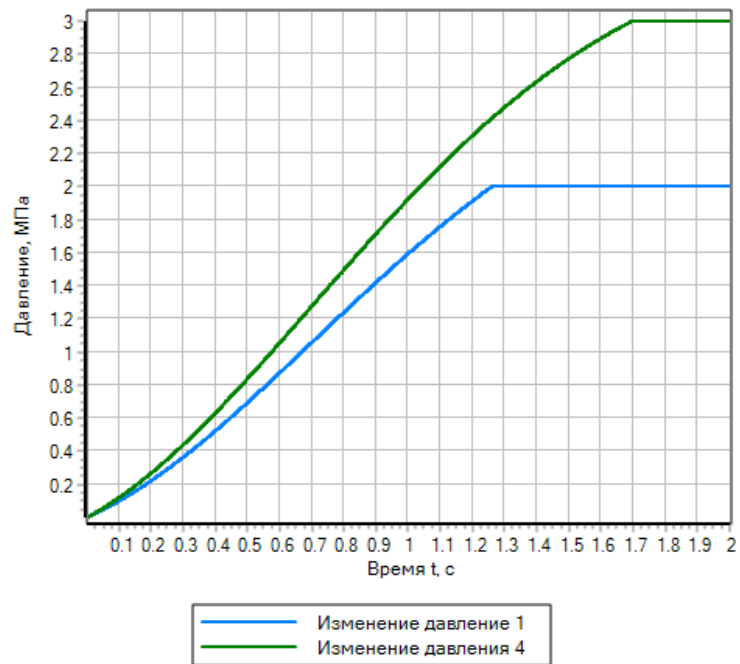


Рисунок 2.22 – График зависимости изменения давления от времени

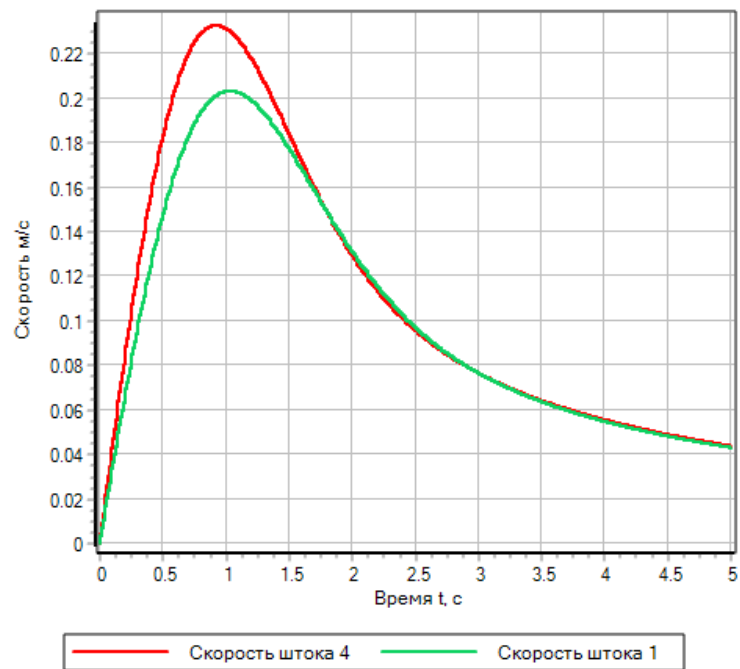


Рисунок 2.23 – График зависимости скорости от времени

Из графиков видно, что изменение параметров соответствует реальному процессу горизонтирования. Логические параметры принимают значения  $x_1 = 1$ ,  $x_2 = 0$ ,  $x_3 = 0$ ,  $x_4 = 0$ ,  $x_5 = 0$ ,  $x_6 = 0$ ,  $x_7 = 1$ ,  $x_8 = 0$  что соот-

ветствуют необходимости поднятия платформы т.е. выдвигению первого и четвертого штоков гидроцилиндров.

В результате компьютерного моделирования расход рабочей жидкости  $Q_{\text{цил } 1} =$  и  $Q_{\text{цил } 4} =$ , а время переходного процесса для первого гидроцилиндра 1.3 сек., а для четвертого – 1.8 сек.

При моделировании аварийной ситуации рассматривается повышение угла наклона по оси Y на  $\alpha_y = 3.5^\circ$ , в такой ситуации возникает ситуации опрокидывания буровой машины. На рисунке 2.23 представлен вид модели при аварийном режиме.

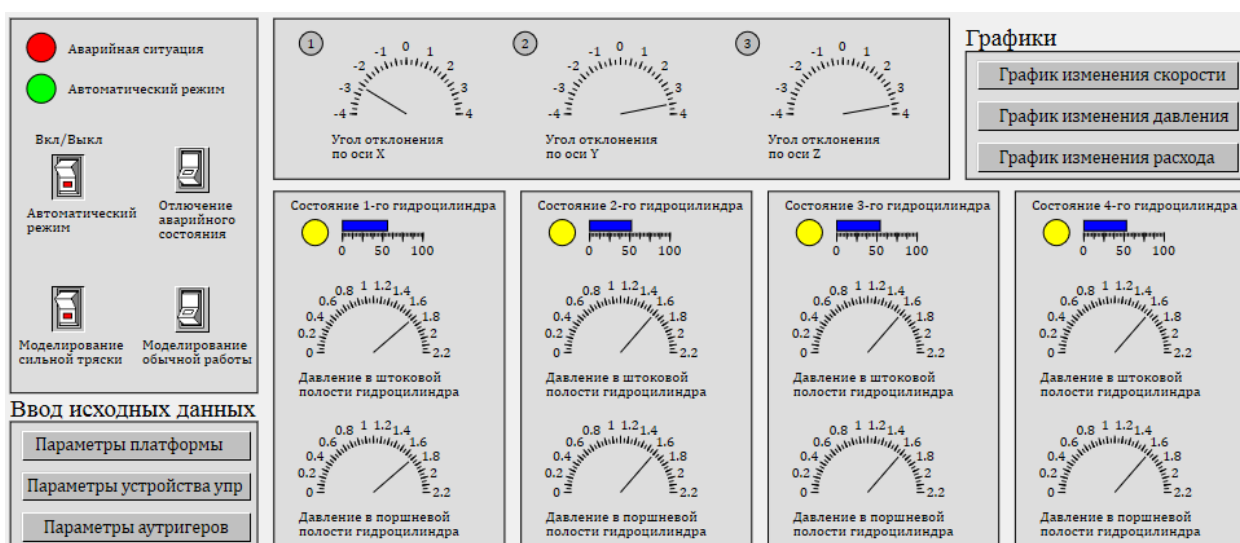


Рисунок 2.23 – Вид модели при возникновении аварийной ситуации

При возникновении аварийной ситуации с устройства управления поступает сигнал  $x_9 = 1$ , после чего перемещение штоков прекратиться, буровая установка прекратит свою работу, и система перейдет в ручной режим управления, до тех пор, пока аварийная ситуация не будет устранена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании сделанного анализа состояния автоматизации управления буровыми машинами можно сделать вывод о том, что повышение технического уровня и эффективности функционирования буровых машин достигается при соответствующих технических средствах управления. Они обеспечивают реализацию требуемых алгоритмов управления, как с точки зрения выполняемых функций, так и обеспечения необходимого быстродействия; ускоренную адаптацию к конкретным условиям использования, включая конструктивные, технологические, эргономические и психофизиологические факторы применения новой техники.

Возможность применения новейших средств автоматики и электроники с одной стороны и преимущество классических технических решений с другой стороны позволяет поддерживать электромагнитную совместимость оборудования и удовлетворительную работу средств управления при ухудшении электромагнитной среды; высокую надежность при тяжелых условиях эксплуатации и малое электропотребление.

В результате выполнения работы были решены следующие задачи:

- а) определен критерий управления, связывающий параметры положения платформы и работы исполнительных устройств;
- б) составлена математическая модель управления платформы;
- в) разработан алгоритм управления и создан симулятор для компьютерного моделирования изменения параметров положения платформы и основных технологических параметров исполнительных устройств (гидроцилиндров);
- г) проведены эксперименты по компьютерному моделированию управления положением платформы реальной буровой установки.

Построенная модель позволяет изучать поведение системы в целом, давать рекомендации о допустимых диапазонах технологических параметров и режимах работы. Численные эксперименты в компьютерной модели под-

тверждают, что значения технологических параметров находятся в допустимых диапазонах.

Автоматизация позволяет контролировать и регулировать основные параметры процесса, тем самым обеспечивая безопасность работ и предотвращение ошибок оперативного персонала. Разработанная в SimInTech модель может быть рекомендована для обучения практикантов и работы персонала насосных станций.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Корилов, А.М. Основы теории управления: учеб. пособие. 2-е изд. / А. М. Корилов – Томск: НТЛ, 2002. – 392 с.
- 2 Васильев, В.Б. Анализ автоматических систем управления гидравлическими исполнительными механизмами буровых машин для оптимизации режимов бурения / В. Б. Васильев. // Машиноведение – 2017. № 2 (6). – С. 50-56
- 3 Корилов, А.М., Мещеряков Я.Е. Автоматизированное управление карьерным буровым станком вертикального бурения / А.М. Корилов, Я.Е. Мещеряков // В сборнике: Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири Доклады (материалы конференции) 22-й Международной научно-практической конференции. – Кемерово: КузГТУ, 2016. – 122. с.
- 4 Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; Пер. с англ. Б. И. Копылова. – Москва: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
- 5 Малафеев, С.И. Повышение технического уровня горных машин на основе использования новых информационных технологий / С.И.Малафеев // В сборнике: Научные труды IV международной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – Москва: Издательский дом «Спектр», 2015. – С. 155 – 158.
- 6 Малафеев, С.И. Создание электрооборудования и систем управления для экскаваторов на основе мехатронной технологии / С.И. Малафеев, Н.А. Серебренников // Горное оборудование и электромеханика. 2007. – № 12. С. 29 – 34.
- 7 Анохин, А.В. Разработка универсального стенда для исследования автоматических систем управления режимами работы гидравлической буровой машины и гидроаппаратуры / А.В. Анохин, В.Б. Васильев // Машиноведение. – 2016. № 3. С. 103 – 107.



- 8 Медведко, Л.Л. Блок управления буровой машиной / Л.Л. Медведко, Д.В. Ласкин, А.В. Шестопалов // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований, 2015. – № 21. – С. 172-173.
- 9 Медведев, И. Ф. Режимы бурения и выбор буровых машин: научное издание / И.Ф. Медведев. – Москва: Недра, 1986. – 220 с.
- 10 Васильев, В.Б. Автоматическая система регулирования режимами работы гидравлической буровой машины / Васильев В.Б., Муслимов А.П. // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук, 2018. Т. 5. № 2. С. 217-210.
- 11 Ключев, В. И. Теория электропривода: учебник / В. И. Ключев. – изд. 2-е перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
- 12 Терехов, В. М. Системы управления электроприводов : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов ; под ред. В. М. Терехова. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 304 с.
- 13 Гришина, Л. И. Имитация прямого и косвенного управления асинхронным двигателем / Л. И. Гришина, О. Н. Толстых, А. Ш. Любанова // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «AS'2007»: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве / Сиб.ГИУ. Новокузнецк, 2007.
- 14 Ковтонюк, Д.Н. Имитационная система косвенного векторного управления асинхронным двигателем в динамическом режиме / Д. Н. Ковтонюк // Научная сессия ТУСУР-2009: Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: В-Спектр, 2009. – Часть 4. – с 215-218.
- 15 Малафеев, С.И. Перспективное электротехническое оборудование и системы управления для горных машин: опыт компании "объединенная энергия" / С.И. Малафеев, Н.А. Серебренников // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2009. – № S8. – С. 77-92.

- 16 Малафеев, С.И. Мехатронные комплексы станков шарошечного бурения / С.И. Малафеев, Н.А. Серебренников, А.В. Карклин // Проектирование и технология электронных средств. 2005. – № 3. – С. 67 – 72.
- 17 Жданов, А. В. Математическая модель гидрораспределителя объемного гидропривода рулевого управления / А. В. Жданов, Ш. К. Мукушев // Строительные и дорожные машины, 2007. – №10. – С. 34 – 36.
- 18 Малиновский, Е. Ю. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / ред. Е.Ю. Малиновский. // М.: Машиностроение, 1980. – 216 с.
- 19 Щербаков, В. С. Научные основы повышения точности работ, выполняемых землеройно-транспортными машинами: дис. д-ра техн. наук / В.С. Щербаков. – Омск: СибАДИ, 2000. – 416 с
- 20 Справочная система SimInTech [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://simintech.ru/webhelp/#o\\_simintech/o\\_simintech.html](http://simintech.ru/webhelp/#o_simintech/o_simintech.html)
- 21 Пат. 94220 РФ: МПК В 66 С 23/80, В 66 С 5/00: Устройство автоматического выравнивания опорной платформы в горизонтальной плоскости / Щербаков В.С., Корытов М.С., Григорьев М.Г.; ГОУ СибАДИ. – № 2009147434/22; заявл. 21.12.09; опубли. 20.05.10, Бюл. № 14. – 3 с.
- 22 Ключев, А.С. Автоматическое регулирование / А.С. Ключев. – Москва : Высшая школа, 2008. – 351с.
- 23 СТО 4.2-07-2014 Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. – Взамен СТО 4.2-07-2012; Дата введения 9.01.2014. – Красноярск: ИПК СФУ, 2014. – 60 с.
- 24 ГОСТ 2.701-84. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – Москва: – 21 с.
- 25 Карташов, Б.А. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech / Б.А. Карташов, О.С. Козлов, Е.А. Шабаев, А.Д.
- 26 Хабаров, С.П. Построение распределенных моделей в системе SimInTech: методические указания / С.П. Хабаров, М.Л. Шилкина. – Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2018. – 122 с.

- 27 Галдин, Н.С. Гидравлические машины, объемный гидропривод: учебное пособие. – Омск: СибАДИ, 2009. – 272 с
- 28 ВСН 274-88. Правила техники безопасности при эксплуатации стреловых самоходных кранов. – М.: СтройИнфо, 2007. – 22 с.
- 29 ПБ 10-382-00, ПБ 10-257-98. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов и кранов-манипуляторов. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2007. – 335 с.
- 30 Григорьев, М. Г. Разработка системы автоматического управления поворотной платформы автокрана / М.Г. Григорьев // Сборник научных трудов №6. Машины и процессы в строительстве. – Омск: СибАДИ, 2007. – №6. – С. 138 – 144.
- 31 Григорьев, М. Г. Система автоматического регулирования крена платформы автокрана / М.Г. Григорьев // Межвузовский сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. – Омск: СибАДИ, 2007. – Вып.4. – Ч.1. – С. 70 – 74.
- 32 Пат. 94220 РФ: МПК В 66 С 23/80, В 66 С 5/00: Устройство автоматического выравнивания опорной платформы в горизонтальной плоскости / Щербаков В.С., Корытов М.С., Григорьев М.Г.; ГОУ СибАДИ. – № 2009147434/22; заявл. 21.12.09; опубл. 20.05.10, Бюл. № 14. – 3 с.
- 33 Алексеева, Т. В. Гидравлические машины, гидропривод мобильных машин: учеб. пособие / Т. В. Алексеева, Б. П. Воловиков, Н. С. Галдин, Э. Б. Шерман. – Омск: ОмПИ, 1987. – 88 с.
- 34 Алексеева, Т. В. Отдельные разделы гидропривода мобильных машин: учеб. пособие / Т. В. Алексеева, Б. П. Воловиков, Н. С. Галдин. – Омск: ОмПИ, 1989. – 69 с.
- 35 Щербаков, В. С. Алгоритм работы системы автоматического горизонтирования опорной платформы строительной машины / В. С. Щербаков, М. С. Корытов, М. Г. Григорьев // Вестник ВГТУ. – Воронеж: ВГТУ, 2010. – Т.6. – №3. – С. 88 – 91.

36 Щербаков, В. С. Информационный ресурс «Алгоритм автоматического выравнивания опорной платформы строительной машины в горизонтальной плоскости и контроля отрыва выносных опор от грунта»: свидетельство о регистрации электронного ресурса № 15275 / В. С. Щербаков, М. С. Кобытов, М. Г. Григорьев. № 50201000260; заявл. 27.01.2010; опублик. 24.02.2010. Алгоритмы и программы. – № 1. – 1 с.

37 Кобытов, М. С. Использование нормальных реакций в опорных элементах автокрана для оценки его устойчивости / М. С. Кобытов, С. А. Зырянова // Межвузовский сборник трудов студентов, аспирантов и молодых ученых. – Омск: СибАДИ, 2005. – Вып.2. – Ч.1. – С. 22 – 25.

38 Щербаков, В. С. Автоматизация проектирования устройств управления положением платформы строительной машины : монография / В.С. Щербаков, М.С. Кобытов, М.Г. Григорьев. – Омск: СибАДИ, 2011. – 119 с.

39 Щербаков, В. С. Синтез алгоритма автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы строительной машины / В. С. Щербаков, М. С. Кобытов, М. Г. Григорьев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2010. – №7. – С. 56 – 63.

40 ГОСТ 26191-84 Масла, смазки и специальные жидкости. Ограничительный перечень и порядок назначений. – Введ. 01.01.1985. – Москва : ИПК Издательство стандартов. – 31 с.

41 ГОСТ 8731 – 74 Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Технические требования. – Введ. 01.01.1976. – Москва : ИПК Издательство стандартов. – 8 с.

42 Романко, В.К. Курс дифференциальных уравнений и вариационного исчисления : учебное издание / В.К. Романко – 2-е изд. – Москва : Лаборатория Базовых Знаний, 2001 – 344 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Перечень параметров системы

$l_1, l_2, l_3, l_4$  – длины гидравлических опор от нижней поверхности подпятника гидроцилиндра до плоскости опорной платформы, м;

$\alpha_x$  и  $\alpha_y$  – углы наклона опорной платформы относительно горизонтальной поверхности, град;

$p_{п1}, p_{ш1}; p_{п2}, p_{ш2}; p_{п3}, p_{ш3}; p_{п4}, p_{ш4}$  – давления в поршневых и штоковых полостях гидроцилиндров 1-4, МПа;

$l_{1\text{ гор}}, l_{2\text{ гор}}, l_{3\text{ гор}}, l_{4\text{ гор}}$  – длины опор при первоначальной установке платформы в горизонтальном положении, м;

$a, b$  – габариты платформы (расстояния между центрами опор по каждой стороне, м,  $a \leq b$ ;

$\Delta\alpha$  – оптимальный порог нечувствительности, град;

$d_{ц}, d_{ш}$  – диаметры внутренней и штока гидроцилиндра соответственно, м;

$\Delta\alpha$  – предельная погрешность измерения углов наклона, град;

$\Delta R$  – предельная погрешность косвенного измерения силы реакции на любой из опор, Н;

$R_{min}$  – минимальное предельное значение силы реакции опоры, Н;

$l_{min}$  – минимальная длина опоры, обеспечивающая отрыв ходовых элементов машины от грунта, м;

$L$  – рабочий ход штока гидроцилиндра, м;

$l_{\text{мах констр}}$  – максимальная длина гидравлической опоры, при которой шток выдвинут на максимально допустимую конструкцией гидроцилиндра длину, м;

$l_{min\text{ пред}}$  – минимальная предельно допустимая длина опоры в рабочем режиме, м;

$l_{max \text{ пред}}$  – максимальная предельно допустимая длина опоры в рабочем режиме, м;

$E_{ж}, E_{ц}$  – модули упругости рабочей жидкости и материала стенки цилиндра, Па;

$S_{п}, S_{ш}$  – рабочие площади поршневой и штоковой полостей, м<sup>2</sup>;

$\Delta P_{i \text{ цил}}$  – изменение давления в напорной линии гидроцилиндра, МПа;

$V_{\text{цил } i}$  – скорость движения штока цилиндра, м/с;

$Q_{\text{цил } i}$  – расход рабочей жидкости на входе в гидроцилиндр, м<sup>3</sup>/с;

$\alpha_x$  и  $\alpha_y$  – фактические углы наклона платформы к горизонту по осям  $X$  и  $Y$ , град;

$\alpha_{x\text{доп}}$  и  $\alpha_{y\text{доп}}$  – максимально допустимые углы наклона платформы к горизонту по осям  $X$  и  $Y$ , град;

$k_{п}, k_{ш}$  – коэффициенты, характеризующие упругие свойства поршневой и штоковой полостей;

$k_{ц}$  – коэффициент вязкого трения в гидроцилиндре;

$\delta_{ц}$  – толщина стенки гидроцилиндра, м;

$m_{ц}$  – подвижная масса, приведенная к штоку, кг;

$\Delta V_{п}$  – «мертвый» объем поршневой полости, м<sup>3</sup>;

$\Delta V_{ш}$  – «мертвый» объем штоковой полости, м<sup>3</sup>;

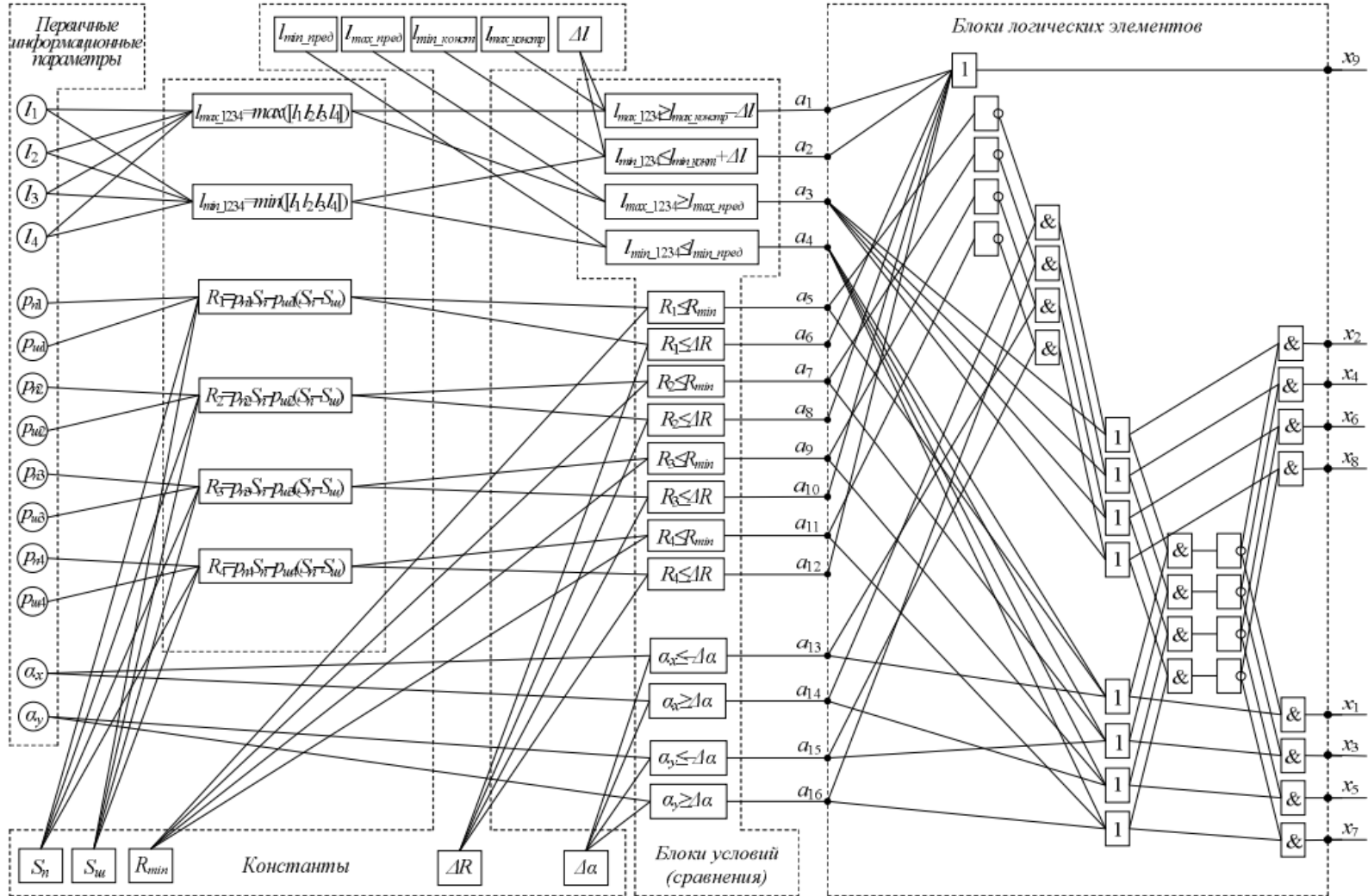
$L_{ш}$  – ход штока гидроцилиндра, м;

$L_{ш \text{ max}}$  – длина штока, м;

$V_{\text{втяг}}^*$  – номинальная скорость втягивания, м/с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Функциональная схема алгоритма процесса управления



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Блок-схема алгоритма функционирования устройства управления

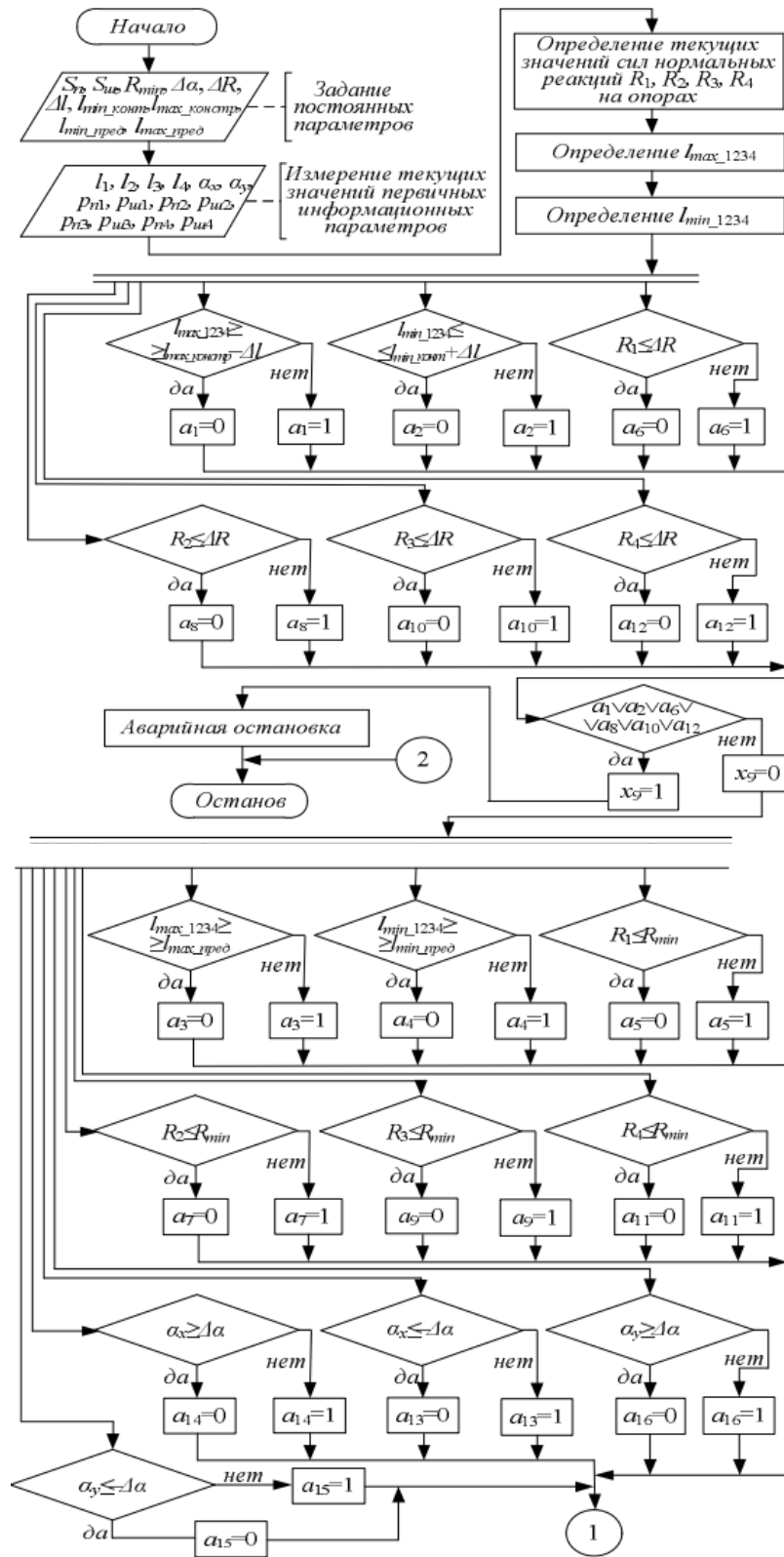


Рисунок В.1 – Блок-схема алгоритма функционирования устройства управления (начало)



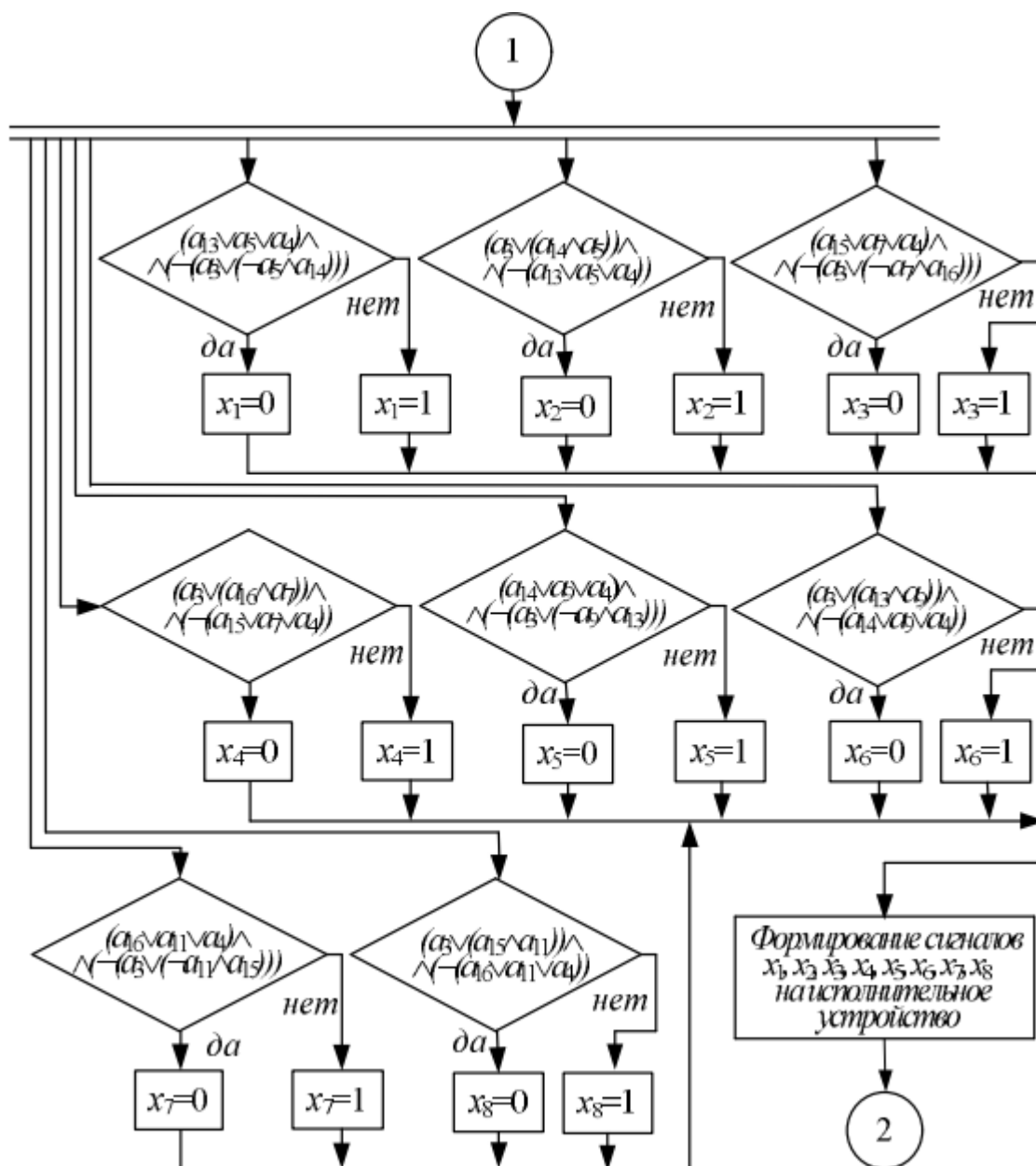


Рисунок В.2 – Блок-схема алгоритма функционирования устройства управления (окончание)

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт космических и информационных технологий

Кафедра «Системы автоматизации, автоматизированное управление и проектирование»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

С.В. Ченцов


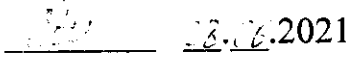
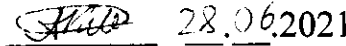
«29» 06 2021 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА  
УПРАВЛЕНИЯ ПЛАТФОРМОЙ БУРОВОЙ МАШИНЫ**

Направление 27.04.04 Управление в технических системах

Магистерская программа 27.04.04.01 Интегрированные системы управления  
производством

Научный руководитель	 28.06.2021	канд. физ.-мат. наук, доц. А.Ш.Любанова
Выпускник	 28.06.2021	С.И.Савченко
Рецензент	 28.06.2021	канд. физ.-мат. наук А.В.Шмидт

Красноярск 2021