

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки: 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ): Отделение автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

| Тема работы |
|---|
| Система управления наклонно-направленным бурением глубоких скважин |

УДК 681.51:622.242.2:622.243.23

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------|---------|------------|
| 8TM81 | Чернов Артем Сергеевич | | 03.06.2020 |

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------|---------------|------------------------|---------|------------|
| Профессор-консультант ОАР ИШИТР | Гончаров В.И. | д.т.н., профессор | | 03.06.2020 |

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|------------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент ШБИП ОСГН | Конотопский В.Ю. | к.э.н. | | 03.06.2020 |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------------|---------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент ШБИП ООД | Горбенко М.В. | к.т.н. | | 03.06.2020 |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Руководитель ООП | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|-------------|------------------------|---------|------------|
| Доцент ОАР ИШИТР | Ефимов С.В. | к.т.н. | | 03.06.2020 |

Томск – 2020 г.

Планируемые результаты обучения

| Код результата | Результат обучения (выпускник должен быть готов) |
|----------------|--|
| P1 | Применять глубокие естественно-научные математические знания в области анализа, синтеза и проектирования для решения научных и инженерных задач производства и эксплуатации автоматизированных систем, включая подсистемы управления и их программное обеспечение. |
| P2 | Воспринимать, обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой, отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации автоматизированных систем, принимать участие в командах по разработке и эксплуатации таких устройств и подсистем. |
| P3 | Применять и интегрировать полученные знания для решения инженерных задач при разработке, производстве и эксплуатации современных автоматизированных систем и подсистем (в том числе интеллектуальных) с использованием технологий машинного обучения, современных инструментальных и программных средств. |
| P4 | Определять, систематизировать и получать необходимую информацию в области проектирования, производства, исследований и эксплуатации автоматизированных систем, устройств и подсистем. |
| P5 | Планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования для целей проектирования, производства и эксплуатации систем управления технологическим процессом и подсистем (в том числе интеллектуальных) с использованием передового, отечественного и зарубежного опыта, уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы. |
| P6 | Понимать используемые современные методы, алгоритмы, модели и технические решения в автоматизированных системах и знать области их применения в том числе в составе безлюдного производства. |
| P7 | Эффективно работать в профессиональной деятельности индивидуально и в качестве члена команды. |
| P8 | Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий. |
| P9 | Проявлять широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, демонстрировать понимание вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду. |
| P10 | Следовать кодексу профессиональной этики и ответственности и международным нормам инженерной деятельности. |
| P11 | Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности. |

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки (специальность): 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Уровень образования: Магистратура
 Отделение школы (НОЦ): Отделение автоматизации и робототехники
 Период выполнения: весенний семестр 2019 /2020 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

| | |
|--|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 03.06.2020 |
|--|------------|

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования) | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|--|------------------------------------|
| 18.03.2020 | Раздел 1. Разработка функциональной схемы системы управления углом поворота буровой колонны | 15 |
| 27.03.2020 | Раздел 2. Создание математических моделей элементов системы управления | 20 |
| 07.04.2020 | Раздел 3. Разработка математической модели и структурной схемы системы управления объектами | 25 |
| 20.04.2020 | Раздел 4. Синтез регуляторов системы управления углом поворота буровой колонны | 15 |
| 01.05.2020 | Раздел 5. Исследование компьютерной модели системы управления углом поворота буровой колонны с учетом вязкого трения и реакции роторного забойного инструмента | 15 |
| 15.05.2020 | Раздел 6. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | 5 |
| 20.05.2020 | Раздел 7. Социальная ответственность | 5 |

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------|---------------|------------------------|---------|------------|
| Профессор-консультант ОАР ИШИТР | Гончаров В.И. | д.т.н., профессор | | 24.02.2020 |

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ООП

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|------------------|-------------|---------------------------|---------|------------|
| Доцент ОАР ИШИТР | Ефимов С.В. | к.т.н. | | 24.02.2020 |

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки (специальность): 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств
 Отделение школы (НОЦ): Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Ефимов С.В.
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

| |
|--------------------------|
| Магистерской диссертации |
|--------------------------|

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|---------------------------|
| 8ТМ81 | Чернову Артему Сергеевичу |

Тема работы:

| | |
|--|----------------------|
| Система управления наклонно-направленным бурением глубоких скважин | |
| Утверждена приказом директора (дата, номер) | 13.05.2020 №134-22/с |

| | |
|--|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 03.06.2020 |
|--|------------|

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| | |
|---------------------------------|---|
| Исходные данные к работе | Объект исследования - буровая установка для наклонно-направленных скважин с динамической нагрузкой. |
|---------------------------------|---|

| | |
|---|--|
| Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов | <ol style="list-style-type: none"> 1) Обзор возможных способов решения поставленной задачи; 2) Изучение компоновки буровой колонны; 3) Обзор существующих систем телеметрии буровой установки; 4) Проектирование упрощенной модели буровой установки; 5) Обсуждение результатов по спроектированной упрощенной модели; 6) Проектирование системы управления положения рабочего органа буровой установки; 7) Исследование полученной модели системы управления положения рабочего органа буровой установки; 8) Обсуждение полученных результатов и подведение итогов. |
| Перечень графического материала | |
| Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы | |
| Раздел | Консультант |
| Социальная ответственность | Горбенко М.В. |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение | Конотопский В.Ю. |
| Раздел на иностранном языке | Горбатова Т.Н. |
| Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: | |
| Literature review | |

| | |
|---|------------|
| Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику | 24.02.2020 |
|---|------------|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------|---------------|------------------------|---------|------------|
| Профессор-консультант ОАР ИШИТР | Гончаров В.И. | д.т.н., профессор | | 24.02.2020 |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|------------------------|---------|------------|
| 8ТМ81 | Чернов Артем Сергеевич | | 24.02.2020 |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| | |
|---------------|--------------------------|
| Группа | ФИО |
| 8ТМ81 | Чернов Артему Сергеевичу |

| | | | |
|---------------------|--------------|------------------------------|--|
| Школа | ИШИТР | Отделение школы (НОЦ) | ОАР |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств |

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

| | |
|---|---|
| 1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> | Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы, а также указанную в МУ величину тарифа на эл. энергию |
| 2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i> | — |
| 3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i> | Действующие ставки единого социального налога и НДС (см. МУ) |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|--|--|
| 1. <i>Планирование процесса управления НИИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i> | Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет величины НДС и цены результата ВКР |
|--|--|

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *График проведения и бюджет НИИ*
2. *Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ*

| | |
|---|------------|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | 24.02.2020 |
|---|------------|

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Доцент ШБИП ОСГН | Конотопский Владимир Юрьевич | К. Э. Н. | | 24.02.2020 |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|------------------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 8ТМ81 | Чернов Артем Сергеевич | | 24.02.2020 |

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| | |
|--------|---------------------------|
| Группа | ФИО |
| 8ТМ81 | Чернову Артему Сергеевичу |

| | | | |
|---------------------|--------------|---------------------------|--|
| Школа | ИШИТР | Отделение школы (НОЦ) | ОАР |
| Уровень образования | Магистратура | Направление/специальность | 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств |

Тема ВКР: Система управления наклонно-направленным бурением глубоких скважин

| | |
|--|---|
| Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»: | |
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения: | Рабочее место – рабочий стол с персональным компьютером в общем помещении офисного типа. В роли объекта исследования выступает буровая установка наклонно-направленных скважин. |
| Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке: | |
| 1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя. | Рациональная организация труда в течение рабочего времени предусмотрена Трудовым Кодексом РФ ФЗ-197; Рабочее место при выполнении работ сидя регулируются ГОСТом 12.2.032-78; Организация рабочих мест с ЭВМ регулируется СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03. |
| 2. Производственная безопасность: 2.1 анализ выявленных вредных и опасных факторов; 2.2 обоснования мероприятий по снижению воздействия. | Электробезопасность; Отклонение показателей микроклимата; Повышенный уровень электромагнитных излучений; Повышенный уровень шума; Недостаточная освещенность рабочей зоны; Монотонность труда; Эмоциональные перегрузки. |
| 3 Экологическая безопасность: | Анализ негативного воздействия на окружающую среду: утилизация люминесцентных ламп, бумажной продукции и орг. техники. |
| 4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях: | Возможные ЧС – пожар. |

| | |
|---|------------|
| Дата выдачи задания для раздела по линейному графику | 24.02.2020 |
|---|------------|

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|-----------------|------------------------------|------------------------|---------|------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Доцент ШБИП ООД | Горбенко Михаил Владимирович | к. т. н. | | 24.02.2020 |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|--------|------------------------|---------|------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 8ТМ81 | Чернов Артем Сергеевич | | 24.02.2020 |

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 126 с., 51 рис., 14 табл., 42 источника, 4 прил.

Ключевые слова: бурение наклонных нефтегазовых скважин, система управления угловым положением забойного инструмента, математическая модель бурильной колонны, двухмассовая система.

Объектом исследования является буровая установка для наклонно-направленных нефтегазовых скважин.

Цель работы – разработка системы управления поддержания заданного направления забойного инструмента при разработке наклонно-направленных нефтегазовых скважин.

В процессе исследования проведен анализ способов управления угловым положением забойного инструмента бурильной колонны, обоснован и выбран вариант системы автоматического управления (САУ), позволяющий в одном из режимов – от ручного до автоматического – использовать объективные данные инклинометра на принципе обратной связи.

В результате исследования были разработаны: функциональная и структурная схемы САУ управления положением забойного инструмента, а также компьютерная модель этой САУ.

Область применения: систему можно применять при бурении глубоких наклонно-направленных скважин.

Экономическая эффективность/значимость работы: предполагается, что затраты, связанные с бурением наклонно-направленных скважин, снизятся, в том числе и материальные, и временные. Однако дать точную оценку экономической эффективности проекта довольно трудно, так как требуются обширные исследования и наличие большого объема количество труднодоступной корпоративной информации.

В будущем планируется уточнить разработанную компьютерную модель системы управления положением рабочего органа бурильной колонны.

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение..... | 14 |
| 1 Разработка функциональной схемы системы управления положением рабочего органа бурильной колонны | 16 |
| 1.1 Постановка задачи разработки системы управления углом поворота бурильной колонны | 16 |
| 1.2 Состав буровой установки | 18 |
| 1.3 Упрощенная функциональная схема управления бурильной колонны | 24 |
| 1.4 Расширенная функциональная схема системы управления углом поворота бурильной колонны..... | 26 |
| 2 Создание математических моделей элементов системы управления..... | 28 |
| 2.1 Математическая модель колонны бурильных труб, включая забойную часть в виде турбобура | 28 |
| 2.2 Математическая модель электрического привода бурильной колонны | 41 |
| 3 Разработка математической модели и структурной схемы системы управления положением рабочего органа бурильной колонны..... | 44 |
| 3.1 Схема системы управления положением рабочего органа бурильной колонны с двигателем постоянного тока | 45 |
| 3.2 Схема управления положением рабочего органа бурильной колонны с асинхронным двигателем..... | 49 |
| 4 Синтез системы подчиненного регулирования при управлении положением рабочего инструмента бурильной колонны | 53 |
| 4.1 Синтез подчиненного регулирования системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны с двигателем постоянного тока | 54 |

| | |
|---|-----|
| 4.2 Синтез подчиненного регулирования системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны с асинхронным двигателем . | 64 |
| 5 Исследование компьютерной модели системы управления с учетом вязкого трения | 70 |
| 6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение... | 76 |
| 6.1 Организация и планирование работ..... | 77 |
| 6.2 Расчет общей себестоимости разработки..... | 87 |
| 6.3 Расчет прибыли | 88 |
| 6.4 Расчет НДС | 88 |
| 6.5 Цена разработки НИР | 88 |
| 6.6 Оценка экономической эффективности проекта..... | 89 |
| 7 Социальная ответственность | 90 |
| 7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ... | 91 |
| 7.2 Производственная безопасность | 91 |
| 7.3 Экологическая безопасность | 102 |
| 7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях | 104 |
| 7.5 Выводы..... | 106 |
| Заключение | 107 |
| Список использованной литературы..... | 108 |
| Приложение А (справочное) Расчет электромеханических показателей двигателя постоянного тока | 113 |
| Приложение Б (обязательное) Структурные схемы системы управления положением рабочего инструмента с двигателем постоянного тока и с асинхронным двигателем | 115 |
| Приложение В (справочное) Линейный график работ..... | 117 |

Приложение Г (справочное) Literature review 118

Обозначения и сокращения

В данной работе применены следующие сокращения:

СВП – Система верхнего привода

УТБ – Утяжеленные бурильные трубы

КНБК – компоновка низа бурильной колонны

ИПБ – Измерения при бурении

УУ – Устройство управления

ОУ – Объект управления

ЛАЧХ – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

ЛФЧХ – Логарифмическая амплитудно-фазовая характеристика

САУ – Система автоматического управления

ЭП – Электропривод

ПФ – Передаточная функция

КПД – Коэффициент полезного действия

ТП-Д – Тиристорный преобразователь - двигатель

ПЧ – Преобразователь частоты

ЛАХ – Логарифмическая амплитудная характеристика

ЛФХ – Логарифмическая фазовая характеристика

Введение

На сегодняшний день основной задачей в нефтегазовой отрасли является повышение эффективности и качества бурения. В эту задачу можно включить как увеличение скоростных показателей бурения, так и улучшения качества буровых работ. Приоритетным направлением для достижения этой цели в настоящее время является бурение наклонно-направленных скважин, которые позволяют достигать заданных горизонтов по заранее заданным планам траекторий. Наиболее показательным примером применения такой технологии является добыча сланцевых углеводородов множеством компаний в США. В России пока такие технологии отечественными компаниями не реализуются из-за их сложности, отсутствия специалистов и технических средств, которые пока остаются корпоративными секретами.

Отклонения от планового направления, связанные с увеличением глубин бурения и с другими причинами, влекут за собой серьезные нарушения сетки разведки и разработки месторождения. Стволы, имеющие смещения относительно заданного плана, зачастую обладают уступами и резкими перегибами, которые могут влиять на результаты проводки, крепления и эксплуатации. Искривление стволов может так значительно усложнить процесс бурения, что его придется прекратить, не достигнув заданных глубин.

В то же проведение скважин в заданном направлении с нужной точностью позволяет избежать нежелательных последствий, связанных с их искривлением скважин, а также увеличить скоростные показатели бурения и уменьшить экономические затраты.

В текущий момент времени управление траекторией осуществляется через косвенную систему измерения угла поворота бурильной колонны – по моменту, развиваемому приводным электрическим двигателем - асинхронным или двигателем постоянного тока. Взаимодействие заключается в повороте бурильной колонны по часовой стрелке или в обратном направлении на некоторый угол, а в случае глубокого бурения – на несколько оборотов, так как бурильная колонна при больших линейных размерах оказывается

нежесткой. При таком управлении углом поворота колонны точность во многом определяется опытом бурового мастера и его интуицией. Но такой подход всегда сопровождается опасностью появления субъективных ошибок мастера, которые могут приводить к нештатным ситуациям и авариям.

Основной целью выпускной квалификационной работы является разработка системы управления, способной поддерживать заданное угловое положение рабочего органа бурильной колонны - обычно роторного забойного инструмента - при бурении глубоких скважин.

Чтобы достичь поставленной цели, были определены следующие задачи:

1. Разработка функциональной схемы системы управления углом поворота бурильной колонны.
2. Создание математических моделей элементов системы управления:
 - 2.1. Математическая модель колонны бурильных труб, включая забойную часть в виде турбобура.
 - 2.2. Математическая модель электрического привода бурильной колонны.
3. Разработка математической модели и структурной схемы системы управления объектами.
4. Синтез регулятора системы управления углом поворота бурильной колонны.
5. Исследование компьютерной модели системы управления углом поворота бурильной колонны.

1 Разработка функциональной схемы системы управления положением рабочего органа бурильной колонны

1.1 Постановка задачи разработки системы управления углом поворота бурильной колонны

В процессе наклонно-направленного бурения вращается роторный двигатель забойного инструмента, приводимый в действие подающимся к забою под большим давлением буровым раствором. С позиций управления важно, что вращающаяся часть роторного забойного инструмента, контактирующая с разрушаемой породой, создает реактивный момент, действующий на бурильную колонну и направленный в обратную сторону. В этом смысле такой момент является возмущающим для системы управления. Также на колонну действуют силы тяжести, сухого и вязкого трения, зависящие от контакта труб колонны с окружающей ее породой, через которую проходит скважина. Эти силы также рассматриваются возмущающими [23]. Опыт показывает, что основной силой, влияющей на отклонение долота от заданного положения угла, является реактивный момент, возникающий при работе роторного забойного двигателя.

На основе имеющихся представлений о процессе бурения и его технических средствах можно составить упрощенную модель буровой установки с действующими моментами и возмущениями (рисунок 1). На схеме используются следующие обозначения:

M – электромагнитный момент двигателя, вращающего бурильную колонну;

M_{c1} – электрические потери в двигателе и механические потери в передачах. Помимо этого, в этот момент закладываются силы сопротивления, которые распределены по всей буровой колонне;

M_{12} – упругий момент, возникающий при скручивании буровой колонны;

M_{c2} – реактивный момент, возникающий при вращении двигателя в забое.

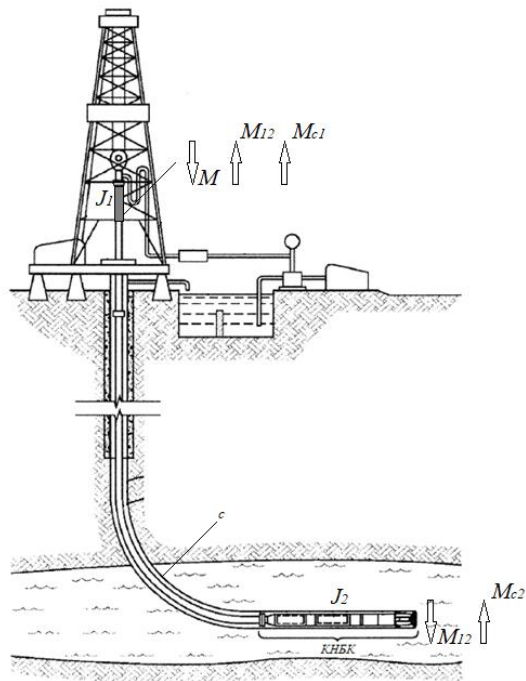


Рисунок 1 – Упрощенная модель буровой установки с действующими моментами и возмущениями

Во время вращения бурильной колонны двигатель, расположенный в устье скважины, обладает электромагнитным моментом M и ему противодействует момент ΔM , который включает в себя электрические и механические потери - M_{c1} . Также в этот момент ΔM входит упругий момент M_{12} . Приведенный момент к двигателю забойной части – это упругий момент M_{12} с учетом влияния реактивного момента M_{c2} . При этом данный приведенный момент будет меньше, чем момент M . Это объясняется воздействующими силами на систему, потерями внутри системы, а также характеристиками породы [17].

При вращении бурильной колонны двигатели, расположенные в забойной части и устье скважины, связаны между собой буровыми трубами. Упругая связь между этими массами характеризуется приведенной эквивалентной жесткостью c , что должно быть учтено при совершенствовании модели САУ.

Для более обоснованного и точного рассмотрения функциональной схемы САУ управления углом поворота бурильной колонны обратимся к рассмотрению состава САУ и назначению основных ее элементов.

1.2 Состав буровой установки

Для реализации системы управления положением бурильной колонны необходимо выделить и рассмотреть основные ее элементы. В качестве элементов можно выделить: систему верхнего привода, бурильную колонну и компоновку низа бурильной колонны.

1.2.1 Система верхнего привода

Система верхнего привода с точки зрения управления предназначена для изменения углового положения рабочего инструмента в забое.

В настоящее время на буровых установках набирает популярность система верхнего привода (СВП) для вращения бурильной колонны. Данная система позволяет сократить время вспомогательных операций, например, наращивание труб при бурении, повысить точность проводки скважин при направленном бурении, сократить вероятность прихвата рабочего инструмента, а также облегчить спуск обсадных труб в осложненных зонах. Помимо этого, сокращается срок бурения и строительства скважины.

Система верхнего привода (рисунок 2) крепится к талевому блоку и располагается над устьем скважины.



Рисунок 2 – Общий вид системы верхнего привода

Представленная система является приводным устройством, в состав которого входят устройства [21]:

- Преобразовательное – осуществляет преобразования тока, частоты, уровня напряжения или числа фаз.
- Электродвигательное – преобразует электрическую энергию в механическую и наоборот (электродвигатели переменного или постоянного тока).
- Передаточное – передает механическую энергию от электродвигательного устройства к исполнительному (редуктор, ременная передача и т.п.).
- Исполнительное – осуществляет технологические и производственные операции (шпиндель токарного станка, бурильная колонная, крыльчатка насосов и т.п.).
- Управляющее – управляет электродвигательным и передаточным устройствами (микропроцессоры, компьютеры, программируемые контроллеры и т.п.).

1.2.2 Бурильная колонна

Бурильная колонна является связующим элементом породоразрушающего инструмента с наземным оборудованием (системой верхнего привода). Основная задача колонны – обеспечение гидравлической и механической связи работающего на забое инструмента и ствола скважины. В процессе бурения с помощью бурильной колонны выполняются две значимые функции: ее вращение и очистка ствола скважины от выбуренной породы [1].

Операции по сборке и разборке бурильной колонны на одиночные трубы не производится, так как эта процедура занимает большое количество разбора. В связи с этим отдельные трубы компонуют в бурильную свечу, состоящую из двух, трех или четырех труб различной длины [24].

1.2.3 Компонировка низа бурильной колонны

Компировку низа бурильной колонны также допускается рассматривать как комплекс элементов, который состоит из системы телеметрии, отклоняющего устройства, породоразрушающего инструмента, утяжеленных бурильных труб (УТБ), предназначенных для увеличения жесткости и массы низа бурильной колонны, забойного двигателя, а также инструменты для центрирования и калибровки.

Вид компоновки низа бурильной колонны определяется на основании целей применения конструкции. Для наклонно-направленного бурения, в том числе и горизонтального, компоновка низа бурильной колонны общего вида выглядит как показано на рисунке 3.



Рисунок 3 – Общий вид КНБК

1.2.3.1 Системы телеметрии

Системы телеметрии используют для получения информации о траектории движения рабочего инструмента, о режимах бурения и техническом состоянии скважин и т.д. Основным элементом таких систем является канал связи устройств, находящихся на глубине, с устройствами на поверхности.

Телесистемы обладают тремя видами каналов связи передачи информации с датчиков, расположенных в КНБК, к аппаратуре на поверхности, а именно [10]:

- Электрические линии;
- Гидравлический канал;

- Электромагнитное поле.

Электрические линии имеют большое количество преимуществ: быстродействие, большая информативность, помехоустойчивость, надежность и ряд других. Однако данный вид канала не получил большую популярность, так как наличие кабеля в бурильной колонне создает трудности при бурении: необходимо предусмотреть защиту от механических повреждений, а также проложить его. Все эти операции занимают достаточное количество времени [17].

Передача информации с помощью электромагнитного поля лишена вышеописанных недостатков. Данный вид передачи информации является простым в управлении, имеет обратную связь, обладает стойкостью к абразивному буровому раствору. Недостатками этого способа являются ограниченная дальность действия, зависящая от материала бурильных труб, а также сложность исполнения управляющего блока [7].

Наиболее распространённым каналом связи является гидравлический канал. Информация передается по буровому раствору, что уменьшает затраты на организацию канала связи. Еще одним достоинством является дальность действия канала. В качестве недостатка можно выделить ограниченный объем передаваемой информации в реальном времени.

Для передачи информационных данных с помощью бурового раствора используют один из методов, реализованный на форме сигнала:

1. Положительный импульс давления.
2. Отрицательный импульс давления.
3. Незатухающие гармонические волны.

Первый метод основан на применении устройства, уменьшающего проходное сечение трубы в бурильной колонне, что позволяет создавать положительные импульсы давления. Передача информации осуществляется посредством срабатывания устройства определенного количества раз с конкретным интервалом времени. Таким образом создается набор импульсов давления, которые распознаются и декодируются на поверхности.

Метод отрицательного импульса давления имеет другое устройство системы: клапан в открытом состоянии соединяет пространство внутри трубы и за ее пределами. Этот клапан создает отрицательный импульс за счет перетока маленького количества бурового раствора за пределы буровой трубы. Аналогично первому методу формируется и передается информация. Заключительным этапом является ее декодирование.

Различия двух вышеперечисленных методов продемонстрированы на рисунке 4 [10].

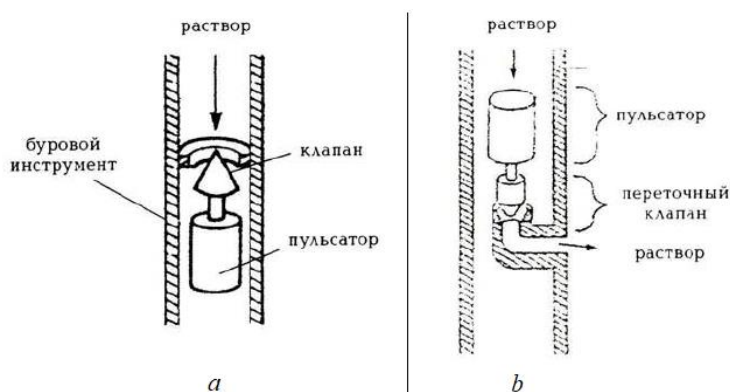


Рисунок 4 – Различия в исполнении метода положительного импульса (а) и метода отрицательного импульса (b)

Последний метод является менее распространенным, так как сложен в реализации, по сравнению с двумя вышеописанными. На двигатель, расположенный в забойной части устанавливается диск с прорезями. Напротив, этого диска ставится еще один диск. В процессе работы двигателя создаются постоянные незатухающие изменения давления, что в свою очередь приводит к появлению незатухающей гармонической волны. Чтобы сформировать блок информации, необходимо во время передачи информации снизить скорость двигателя. Оборудование, установленное на поверхности, распознает эти изменения и декодирует сообщение [10].

Одной из систем, использующих буровой раствор для передачи информации, является зарубежная система измерения при бурении (ИПБ) в реальном масштабе времени. В состав системы включен прибор инклинометр, позволяющий измерять зенитный и азимутальные углы, помимо этого

обеспечивающий ориентировку рабочего инструмента на забое [10]. Среднее время передачи информации о положении рабочего инструмента от инклинометра к приборам, находящимся на поверхности, составляет от 15 до 30 секунд.

Датчики, входящие в систему ИПБ, позволяют измерять зенитный и азимутальные углы, а также обеспечить ориентирование рабочего инструмента. В качестве таких датчиков используют акселерометры и магнитометры. Первые датчики производят замер параметров гравитационного поля Земли, вторые – магнитное поле. Информация об ориентации датчиков по отношению к направлению полей, и самих направлений, позволяет установить ориентацию рабочего органа, а также азимутальный и зенитные углы ствола скважины.

1.2.3.2 Отклоняющее устройство

Немаловажным элементом является отклоняющее устройство. Это устройство используется для управления зенитным углом и азимутом. Зачастую в роли такового устройства используют кривой переводник [29]. Его используют для создания искусственного изгиба в нижней части КНБК. На рисунке 5 представлена схема кривого переводника.

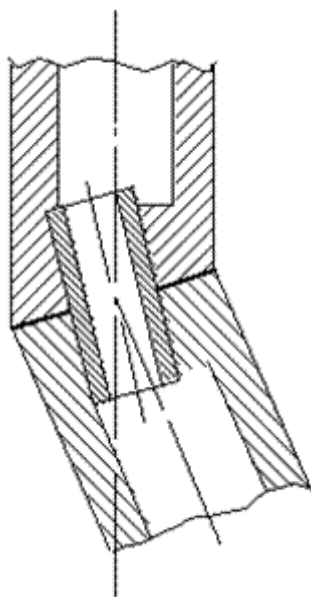


Рисунок 5 – Схема кривого переводника

Ориентирование отклоняющего устройства по заданному азимуту позволяет управлять пространственным искривлением скважины. Для этого на экране бурового мастера отображается магнитный круг (рисунок 6) с помощью которого определяется положение отклонителя от которого, в свою очередь, зависят показатели искривления скважины [29].

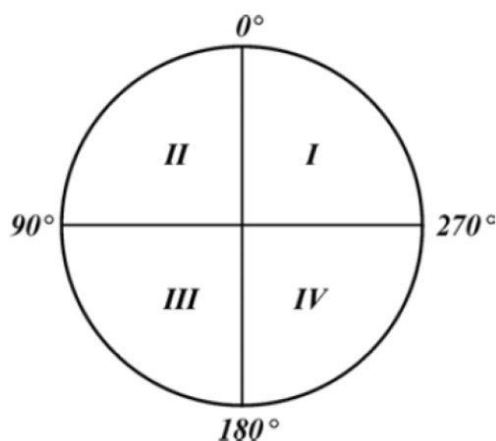


Рисунок 6 – Магнитный круг расположенный на экране мастера

На рисунке также присутствуют области, по которым определяется рост или спад зенитного угла и азимута.

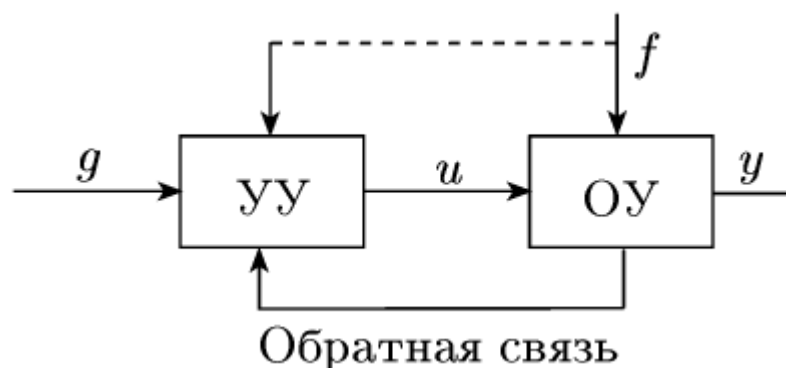
1.2.3.3 Забойный двигатель

Значимым элементом в составе компоновки низа бурильной колонны также является забойный двигатель. Этим двигателем осуществляется проходка и при его работе возникает реактивный момент, влияющий на положение рабочего инструмента.

1.3 Упрощенная функциональная схема управления бурильной колонны

Важным этапом при проектировании устройств управления, является разработка функциональной схемы. Она позволяет пояснить принципы работы системы управления, отразить на физическом уровне процессы в отдельных элементах, а также проводить качественный анализ элементов и системы в целом. В общем случае функциональная схема системы управления

угловым положением бурильной колонны и рабочим органом может быть представлена в упрощенном виде, показанном на рисунке 7 [20].



g – задающее воздействие (задание); u – управляющее воздействие (управление); y – выходная переменная (управляемый параметр); f – возмущающее воздействие (возмущение); $ОС$ – обратная связь; $УУ$ – управляющее устройство (регулятор); $ОУ$ – объект управления (бурильная колонна).

Рисунок 7 – Упрощенная функциональная схема системы управления бурильной колонны

В качестве задающего воздействия выступает входное управляющее воздействие g , определяющее требуемый закон изменения выходной переменной y .

На практике, объект управления подвержен влиянию возмущения f , приводящего к отклонению управляемой переменной y от требуемого значения g [20]. Возмущение f может также распространяться на устройство управления, и оно может быть не единственным. Тогда под сигналом f понимают векторную величину, содержащую несколько возмущений.

В управляющее устройство по каналу обратной связи поступает сигнал, определяющий текущее состояние объекта управления.

Объект управления – это устройство, которым необходимо управлять, в данном случае это бурильная колонна.

1.4 Расширенная функциональная схема системы управления углом поворота бурильной колонны

В процессе бурения скважины, на буровую колонну действуют возмущающие воздействия, которые приводят к отклонению положения рабочего инструмента φ от требуемого значения. Поэтому необходимо скомпенсировать влияния этих воздействий.

Информация выходной переменной φ передается через цепь обратной связи на вход системы – на устройство сравнения (сумматор), где сравнивается с требуемой или заданной величиной угла, что позволяет оценить различие между этими сигналами и сформировать сигнал рассогласования e . Затем данные сравниваются в устройстве сравнения (сумматоре) и на основании сравнения полученных данных вырабатывается сигнал рассогласования e . Полученный сигнал рассогласования поступает в регулятор, в котором вырабатывается типовой закон управления, определяющий величину управляющего сигнала u .

Типовая функциональная схема системы с обратной связью приведена на рисунке 8.

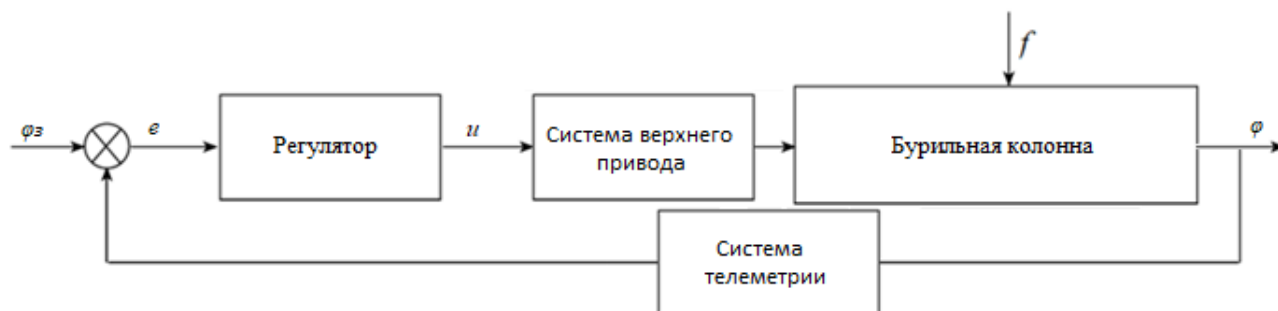


Рисунок 8 – Функциональная схема системы управления бурильной колонны

В качестве объекта управления выступает компоновка, включающая в себя систему верхнего привода, бурильную колонну с ее утяжеленной частью и забойным инструментом. В обратной связи системы присутствует система телеметрии, обладающий датчиком - инклинометром, который измеряет текущее отклонение рабочего инструмента. Эта информация передается с забоя скважины на компьютер бурового мастера, где происходит

декодирование и ее обработка. Дополнительным элементом, не входящим в штатное оборудование буровой установки, является регулятор объекта управления. Цель управления объектом управления – сокращение временных затрат вовремя бурения глубоких наклонно-направленных скважин. Это достигается за счет поддержания заданного положения бурильной колонны. Управляемой переменной является угол положения компоновки низа бурильной колонны.

2 Создание математических моделей элементов системы управления

Зачастую, горные машины и механизмы рассматривают в качестве многомассовых электромеханических систем, например, двух- или трехмассовых систем. К таким можно отнести большую часть двухконцевых подъемных установок, ведущие механизмы экскаваторов, струговые установки, механизмы подачи добычных комбайнов и другие механизмы, в которых допустимо рассмотрение системы в качестве сосредоточенных масс [40].

Однако, системы с распределенными массами, в частности ленточные и скребковые конвейеры или буровые колонны, вызывают трудности при математическом описании. Дело в том, что для описания динамических процессов используются дифференциальные уравнения в частных производных, поэтому, анализ процессов в таких системах затруднителен [18].

При известных допущениях систему с распределенными массами уместно представить в виде расчетной эквивалентной схемы, которая состоит из ряда сосредоточенных масс. Эти массы соединены между собой упругими элементами, имеющими определённую жесткость c . Количество таких сосредоточенных масс может быть большим, но, как показывают исследования, ограничиваются двумя или тремя сосредоточенными массами [21].

2.1 Математическая модель колонны бурильных труб, включая забойную часть в виде турбобура

Как было изложено ранее, описать бурильную колонну можно с помощью модели, содержащей две, три или даже более сосредоточенных в точках масс. Выбор описания зависит от точности требуемой модели. Для детального анализа условия движения масс механизма можно воспользоваться трехмассовой упругой системой. Двухмассовая система в свою очередь позволяет проводить анализ отдельных физических особенностей. Чтобы

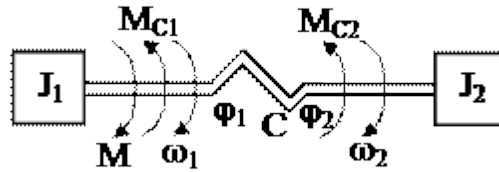
приведенная расчетная схема соответствовала реальной механической системе должен выполняться закон сохранения энергии в таких схемах.

2.1.1 Двухмассовая система без учета диссипативных сил

Для того, чтобы получить систему управления положения низа бурильной колонны необходимо иметь количественные характеристики элементов, прежде всего электромеханического привода, бурильной колонны и сил, действующих на эти элементы.

Бурильную колонну допустимо рассматривать в виде нагрузки электропривода, механическая часть которого состоит из движущейся массы двигателя, передачи и рабочей машины [21]. Особенность такой нагрузки состоит в распределенности параметров по всей длине бурильной колонны. К таким параметрам относят моменты инерции между рабочей машиной и двигателем, а также упругие связи. Представление бурильной колонны как многомассовой структуры с упругими связями позволяет понять, как передается воздействие крутящего момента от двигателя, расположенного в устье скважины, к забойной части. Такая структура допускает использование обратной компенсационной связи, учитывающей диссипативные силы сопротивления, которые возникают при вращении бурильной колонны. На практике достаточно сложно описать эту структуру, содержащую n элементов. По этой причине в роли реальной структуры с распределенными параметрами допускается взять двухмассовую аналогичную структуру, положив, что одна масса расположена в устье скважины, а вторая на забое.

Такая двухмассовая аналогичная структура с упругой механической частью и двумя вращающимися массами представлена на рисунке 9.



M – электромагнитный момент, создаваемый двигателем; M_{I2} – приведенный момент ко второй массе; M_{c1} – момент сопротивления, действующий на первую массу; M_{c2} – момент сопротивления, действующий на вторую массу; φ_1 – угол скручивания со стороны первой массы; φ_2 – угол скручивания со стороны второй массы; ω_1 – угловая скорость первой массы; ω_2 – угловая скорость второй массы; c – жесткость соединения масс.

Рисунок 9 – Представление двухмассовой аналогичной структуры с упругой механической частью

К первой массе относится момент инерции J_1 , вращающиеся части электродвигателя со скоростью ω_1 , расположенного в устье скважины, и часть буровой колонны, которая берет свое начало в устье скважины и заканчивается в забое. Во время работы двигателя создается вращающий электромагнитный момент M . Этому моменту M противодействуют силы сопротивления M_{c1} , в состав которых входят электрические и механические потери в двигателе.

Вторая часть колонны (утяжеленная часть) обозначена в виде второй массы, вращающейся со скоростью ω_2 . В роли этой массы выступает компоновка низа буровой колонны, в состав которой входят: забойный двигатель, утяжеленные буровые трубы и система телеметрии, с общим моментом инерции J_2 . Связь между массами моделируется пружиной и характеризуется жесткостью c . Вторая масса имеет одно направление вращения с двигателем и на нее действует момент сопротивления M_{c2} . Этот момент направлен против направления основного движения и включает в себя: активные и реактивные нагрузки. Под активными нагрузками понимаются силы тяжести, кручения упругих тел, действующие на распределенную буровую колонну. В таких видах нагрузки действие сил

остается постоянным независимо от направления движения бурильной колонны [21].

Реактивные силы и моменты напротив, меняют свое направление вместе со сменой направления движения бурильной колонны. К таким силам и моментам можно отнести силу сухого трения, кручения неупругих тел и силу внутреннего вязкого трения, действующую внутри бурильной колонны.

Углы φ_1 и φ_2 – это углы скручивания бурильной колонны со стороны устья скважины и со стороны забойной части соответственно.

Чтобы описать математически представленную модель, ее необходимо разделить на три отдельные части, заменив реальные связи между верхней, нижней массой и бурильной трубой воздействиями (рисунок 10).

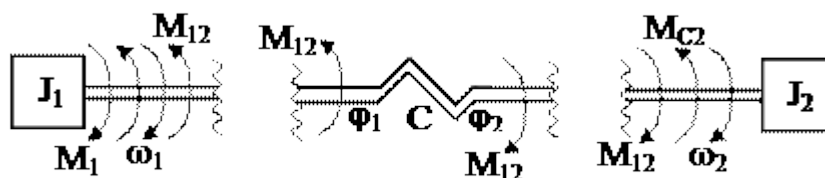


Рисунок 10 – Разделение двухмассовой аналогичной структуры с упругой механической частью на три части

Исходя из рисунка 10 определены уравнения, которые описывают эту модель:

$$M_1 - M_{c1} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt}. \quad (1)$$

$$M_{12} - M_{c2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt}. \quad (2)$$

$$M_{12} = c \cdot (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (3)$$

Уравнения (1) и (2) составлены по второму закону Ньютона и характеризуют равновесие моментов для вращательного движения. Принято называть эти уравнения основными уравнениями движения привода [21].

Уравнение (3), характеризующее упругую связь, составлено в соответствии с законом Гука [21]. Первые два равенства, которые описывают вращающиеся массы представляют собой дифференциальные уравнения

первого порядка. Чтобы уравнения стали единого вида, необходимо продифференцировать уравнение (3):

$$\frac{dM_{12}}{dt} = c \cdot \left(\frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{d\varphi_2}{dt} \right) = C \cdot (\omega_1 - \omega_2). \quad (4)$$

Теперь уравнения (1), (2) и (4) можно объединить в одну систему уравнений движения [10]:

$$\begin{cases} M_1 - M_{c1} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \\ M_{12} - M_{c2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c \cdot (\omega_1 - \omega_2) \end{cases} \quad (5)$$

Следует отметить, что вышеприведенные уравнения, описывающие поведение двухмассовой упругой системы, не учитывают диссипативные силы типа вязкого трения, зазоры, присутствующие в системе верхнего привода, а также люфты в шарнирных соединениях механизмов бурильной колонны. Это сделано для простоты начального этапа решения задачи. В дальнейшем эти особенности будут учтены.

2.1.1.1 Связь параметров двухмассовой системы и бурильной колонны

В процессе бурения жесткость одного участка бурильной колонны при кручении может быть найдена по формуле [11]:

$$C_{кр} = \frac{\pi \cdot G \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot l}, \quad (6)$$

где G – модуль упругости материала, из которого выполнена бурильная колонна, Па;

D – внешний диаметр трубы, м;

d – внутренний диаметр трубы, м;

l – длина участка трубы, м.

Податливость трубы определяется суммой крутильной и изгибной податливости. Так как податливость является обратной величиной жесткости, то:

$$C = \frac{1}{2} C_{кр} \quad (7)$$

Жесткость всей бурильной колонны без утяжеленной части тогда можно определить:

$$C_{бк} = \frac{C \cdot l}{L}, \quad (8)$$

где L – длина участка до утяжеленной части, м.

Вал электродвигателя, расположенного в устье скважины, связан с бурильной колонной с помощью механической передачи (редуктор) с передаточным отношением i . Тогда приведенная жесткость:

$$c = \frac{C_{бк}}{i^2}. \quad (9)$$

Моменты инерции первой и второй массы находятся:

$$J = \frac{L \cdot q \cdot (D^2 + d^2)}{8}, \quad (10)$$

где q – масса единицы длины трубы, кг/м.

С учетом приведения к валу двигателя:

$$J_{1,2} = \frac{J}{i^2}. \quad (11)$$

2.1.1.2 Структурная схема двухмассовой системы без учета влияния диссипативных сил

По системе дифференциальных уравнений (5), можно составить структурную схему двухмассовой системы без учета влияния сил, поглощающих ее энергию (диссипативных) (рисунок 11).

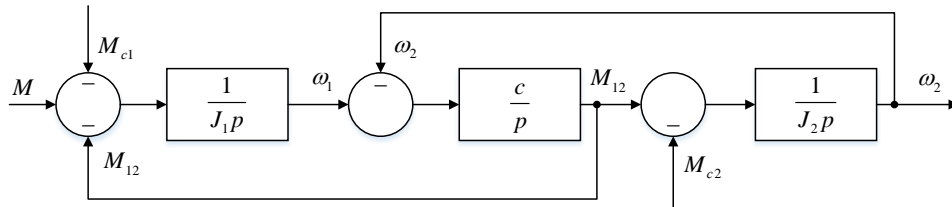


Рисунок 11 – Структурная схема упругой двухмассовой системы без учета влияния диссипативных сил

Полученная структурная схема является сложной для дальнейших исследований, а также имеет перекрестные связи, поэтому необходимо провести структурные преобразования, в ходе которых будут определены передаточные функции: по управляющему воздействию $W_{\omega 2 M}$, возмущающему воздействию $W_{\omega 2 M c 1}$ и возмущающему воздействию $W_{\omega 2 M c 2}$.

2.1.1.3 Передаточная функция по управляющему воздействию

Как говорилось ранее, описание переходных процессов в двухмассовой системе производится с помощью линейных дифференциальных уравнений. Поэтому допустимо использовать принцип суперпозиции. С помощью этого принципа можно проводить исследования систем с несколькими одновременно действующими входными воздействиями и опускать влияние этих воздействий, оставив только одно. При этом необходимо сложить все приложенные воздействия на систему.

Используя вышеописанный принцип, полагаем, что M_{c1} и M_{c2} принимают значение равное 0, тогда из структурной схемы можно убрать эти возмущающие воздействия и структурная схема принимает вид, представленный на рисунке 12.

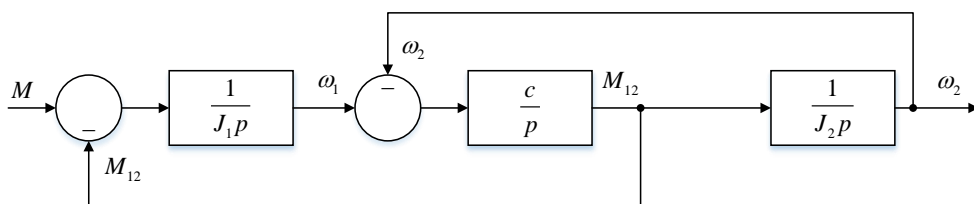


Рисунок 12 – Упрощение структурной схемы двухмассовой упругой системы: без учета возмущений

Следующим шагом можно перенести сумматор с разницей скоростей через линейной звено с элементом $J_1 p$, т.е. против хода сигнала. При этом требуется добавить в обратную связь передаточную функцию, которая равна обратной передаточной функции звена, переносимого через сумматор (рисунок 13).

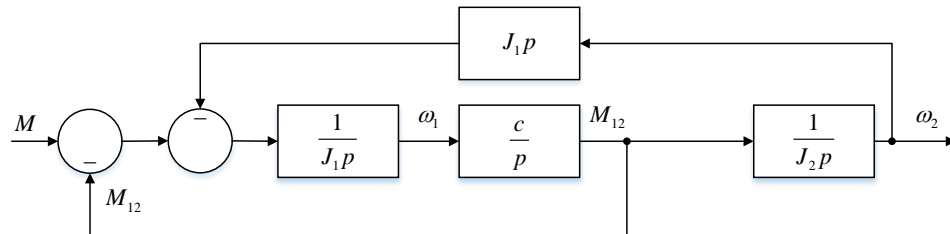


Рисунок 13 - Упрощение структурной схемы двухмассовой упругой системы:
перенос сумматора через линейное звено

Если перенести сумматор, в который входит момент M_{12} через второй сумматор, то звенья, выделенные пунктиром (рисунок 14), разрешается представить в виде соединения двух звеньев с единичной обратной связью, передаточная функция которых определяется выражением:

$$W_{oc}(p) = \frac{W_n(p)}{1 \pm W_n(p)}. \quad (12)$$

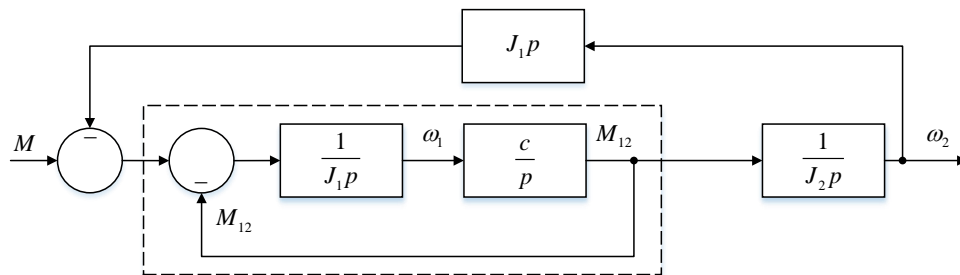


Рисунок 14 - Упрощение структурной схемы двухмассовой упругой системы:
перестановка сумматоров

Согласно формуле (12) передаточная функцию W_{oc} :

$$W_{oc}(p) = \frac{c}{J_1 p^2} \div \left(1 + \frac{c}{J_1 p^2}\right) = \frac{c}{J_1 p^2 + c}. \quad (13)$$

Так как обратная связь является отрицательной, знак в выражении (13) берется положительным.

Подставив звено с обратной отрицательной связью в структурную схему, последняя примет вид, показанный на рисунке 15.

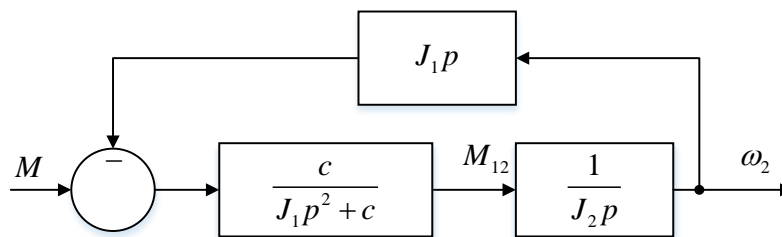


Рисунок 15 - Упрощение структурной схемы двухмассовой упругой системы:
представление соединения звена как W_{oc}

Полученную структурную схему на рисунке 15 можно также представить в виде соединения звеньев, охваченных обратной связью. Однако в данном случае необходимо учесть звено, расположенное в обратной связи. Передаточная функция тогда найдется следующим образом:

$$W_{oc}(p) = \frac{W_n(p)}{1 + W_n(p) \cdot W_o(p)}. \quad (14)$$

Подставляя звенья, изображенные на рисунке 15, в выражение (14), получится переходная функция двухмассовой упругой системы по управлению, на входе которой электродвижущий момент, а на выходе – угловая скорость вращения бурильной колонны.

$$W_{\omega_2 M}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = \frac{c}{J_1 J_2 p^3 + (J_1 + J_2) c p}. \quad (15)$$

2.1.1.4 Передаточная функция по возмущению M_{c1}

Согласно принципу суперпозиции, принимаем M и M_{c2} равными 0, тогда структурная схема будет выглядеть, как показано на рисунке 16.

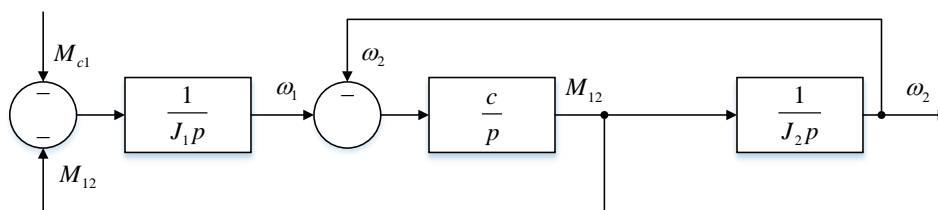


Рисунок 16 - Упрощение структурной схемы двухмассовой упругой системы:
без учета управления M и возмущения M_{c2}

Преобразования осуществляются точно также, как было описано ранее. Тогда передаточная функция двухмассовой системы по возмущению M_{c1} и угловой скоростью вращения бурильной колонны будет выглядеть:

$$W_{\omega_2 M_{c1}}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M_{c1}(p)} = -\frac{c}{J_1 J_2 p^3 + (J_1 + J_2) c p}. \quad (16)$$

Передаточная функция (15), и вновь полученная передаточная функция (16) совпадают, за одним исключением: передаточная функция по возмущению имеет отрицательный знак.

2.1.1.5 Передаточная функция по возмущению M_{c2}

Для получения последней передаточной функции принимаем M и M_{c1} равными 0, и структурная схема принимает вид как показано на рисунке 17.

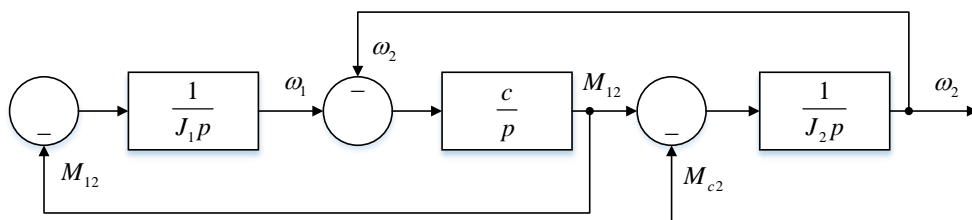


Рисунок 17 – Упрощение структурной схемы двухмассовой упругой системы: без учета управления M и возмущения M_{c1}

Первым действием по упрощению структурной схемы двухмассовой упругой системы будет перенос сумматора, в котором вычитаются скорости против хода сигнала через линейное звено с элементом $J_1 p$ (рисунок 18). При этом требуется в обратную связь включить обратную передаточную функцию звена, через которое переносится сумматор.

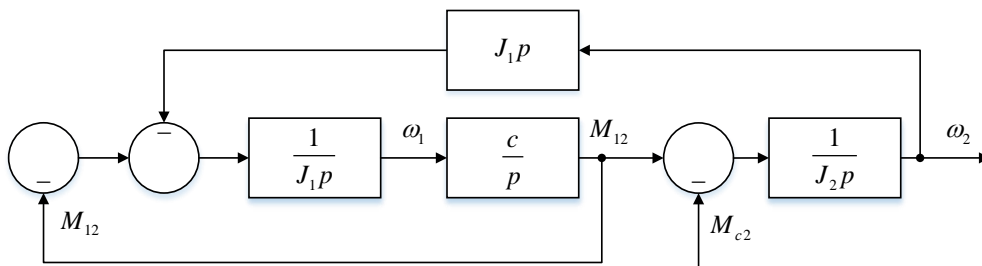


Рисунок 18 – Упрощение структурной схемы двухмассовой упругой системы: перенос сумматора через линейное звено

Поменяв местами два левых сумматора, можно получить два звена, которые охвачены обратной связью (рисунок 19).

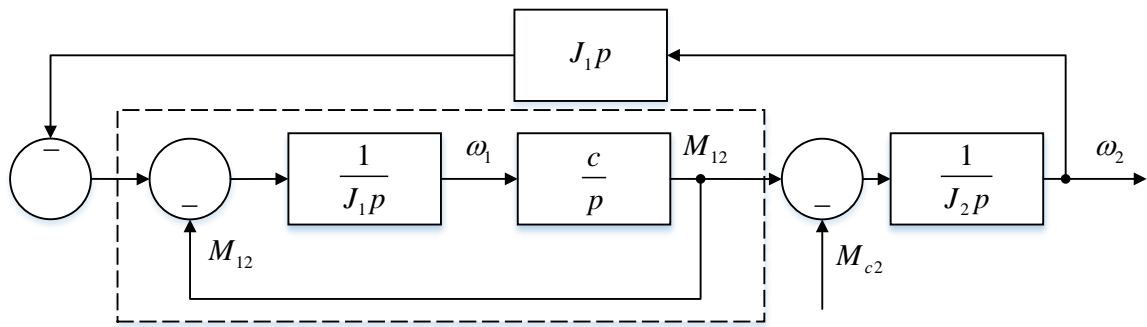


Рисунок 19 – Упрощение структурной схемы двухмассовой упругой системы: перестановка сумматоров

Воспользовавшись уравнением (14), структурная схема, представленная на рисунке 19, сворачивается и ее допустимо представить в более привычном виде (рисунок 20).

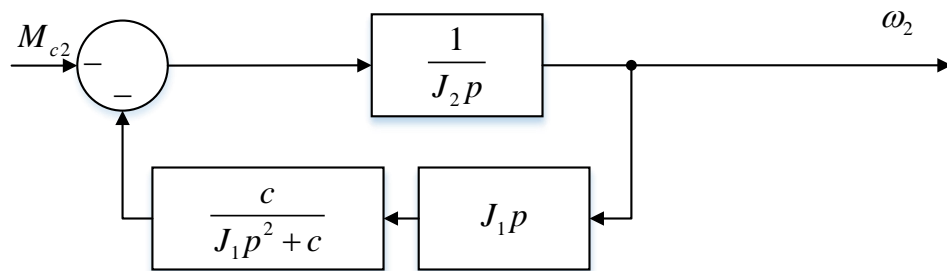


Рисунок 20 – Упрощение структурной схемы двухмассовой упругой системы

Повторив вышеописанную процедуру с представленной структурной схемой, была получена передаточная функция двухмассовой системы по возмущающему воздействию M_{c2} и угловой скоростью вращения бурильной колонны:

$$W_{\omega_2 M_{c2}}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M_{c2}(p)} = -\frac{J_1 p^2 + c}{J_1 J_2 p^3 + (J_1 + J_2) c p} \quad (17)$$

Стоит отметить, что такое представление системы является идеализированным, так оно не учитывает дополнительных факторов. В реальной механической системе присутствуют внутренние силы и моменты, которые являются пропорциональными скорости деформации валов и других

элементов. То есть эти силы и моменты при воздействии поглощают энергию колебаний системы. Примером такой силы служит внутреннее вязкое трение:

$$M_{\epsilon} = \beta \cdot (\omega_1 - \omega_2). \quad (18)$$

В зависимости от знака скорости меняется и знак момента, при этом знак механической мощности остается положительным, следовательно, происходит поглощение энергии колебаний [21].

При бурении неглубоких скважин влиянием сил и моментов вязкого трения можно пренебречь, так как они не оказывают существенного влияния на процесс бурения. В процессе бурения глубоких скважин необходимо учитывать диссипативные силы, оказывающие влияние на систему.

2.1.2 Двухмассовая система с учетом диссипативных сил

Так как система управления ориентирована на работу с глубокими скважинами, необходимо в системе уравнений (5) учесть вязкое трение. Это достигается добавлением в систему уравнения (18). Тогда двухмассовая система с учетом диссипативных сил описывается нижеприведенными уравнениями:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 - M_{\epsilon} - M_{12} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \\ M_{12} + M_{\epsilon} - M_{c2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c \cdot (\omega_1 - \omega_2) \\ \frac{dM_{\epsilon}}{dt} = \beta \cdot (\omega_1 - \omega_2) \end{array} \right. \quad (19)$$

Аналогично двухмассовой упругой системе без учета диссипативных сил с помощью дифференциальных уравнений составляется структурная схема двухмассовой системы с учетом диссипативных сил (рисунок 21).

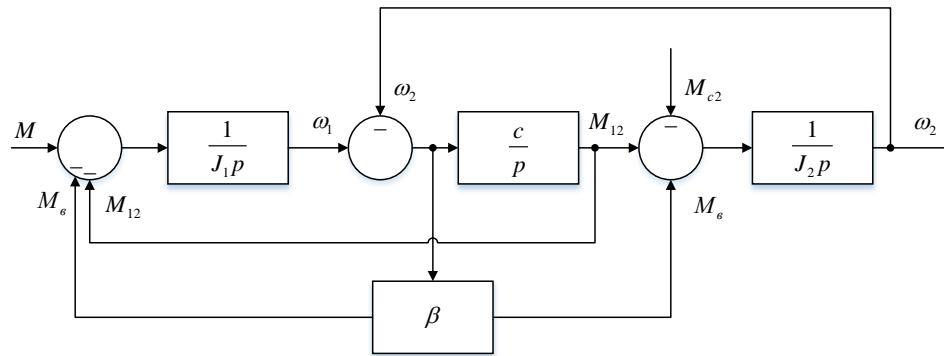


Рисунок 21 – Структурная схема упругой двухмассовой системы с учетом диссипативных сил

Проведение исследований представленной схемы оказывается затруднительным, как и в предыдущем случае, поэтому можно применить известные правила преобразования структурных схем и получить передаточную функцию по управляющему воздействию $W_{\omega_2 M}$.

2.1.2.1 Передаточная функция по управляющему воздействию

Приняв, что M_{c2} равно 0, в структурной схеме, изображенной на рисунке 21, можно перейти к преобразованиям структурной схемы упругой двухмассовой системы с учетом диссипативных сил. По окончании преобразований, упрощенная схема по управлению двухмассовой упругой системы с учетом диссипативных сил по управляющему воздействию примет вид:

$$W_{\omega_2 M}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = \frac{c + \beta p}{J_1 J_2 p^3 + (J_1 + J_2) \beta p^2 + (J_1 + J_2) c p}. \quad (20)$$

Сравнив формулы (15) и (20), можно сделать вывод, что полученная схема упругой двухмассовой системы по управляющему воздействию с учетом диссипативных сил верна, так как при разложении ПФ (20) на простейшие множители, образуется интегрирующее и колебательные звенья. Колебательное звено характеризуется степенью затухания, который в свою очередь зависит от коэффициента вязкого трения. Подставив в формулу (20)

коэффициент вязкого трения β равен 0, получится передаточная функция двухмассовой системы без учета вязкого трения.

2.2 Математическая модель электрического привода буровой колонны

Как говорилось ранее, для вращения буровой колонны используют ротор или систему верхнего привода. В обоих этих случаях необходимы регулируемые приводы для значительного повышения надежности главных технологических механизмов. Так, например, упрощение кинематической системы передач или обеспечение плавности пуска способствует повышению производительности буровой установки, что несомненно сказывается на экономическом значении.

Поставленные требования хорошо выполняет регулируемый электропривод постоянного тока. Вследствие чего все главные механизмы буровой установки выполняются по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока. Регулирование скорости приводов достижимо за счет изменения напряжения, которое приложено к якорю двигателя, и изменения тока в обмотке возбуждения двигателя.

2.2.1 Математическое описание двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

В качестве недостатков двигателей постоянного тока можно выделить: невысокая надежность, сложность в обслуживании и эксплуатации, необходимы дополнительные преобразовательные устройства. Их достоинствами выступают: высокая перегрузочная способность и пусковой момент [25]. Стоит также отметить, что при возможности, двигатель постоянного тока заменяют асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором.

Для построения структурной схемы двигателя постоянного тока рассмотрим уравнения Кирхгофа, которые позволяют получить математическое выражение механической характеристики двигателя:

$$U = E + I \cdot r, \quad (21)$$

где U – напряжение, подаваемое на якорь двигателя, В;

E – противоЭДС, В;

I – ток в якорной цепи, А;

r – сопротивление якорной цепи, Ом;

В процессе вращения якоря, в его обмотке индуцируется ЭДС E , которое определяется:

$$E = \frac{p_n \cdot N}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \Phi \cdot \omega = c_\phi \cdot \omega, \quad (22)$$

где p_n – число пар полюсов;

N – число активных проводников в обмотке якоря;

a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря;

Φ – магнитный поток возбуждения, Вб;

ω – угловая скорость вращения якоря, рад/с;

c_ϕ – потокосцепление обмотки якоря, равное произведению магнитного потока Φ и конструктивного коэффициента c , Вб.

Ток якоря при этом можно определить с помощью момента:

$$I = \frac{M}{c_\phi}, \quad (23)$$

где M – электродвижущий момент, Нм.

Угловая скорость вращения якоря может быть определена, подставляя выражение (20) и (19) в выражение (18). Тогда:

$$\omega = \frac{U}{c_\phi} - \frac{r}{c_\phi^2} \cdot M. \quad (24)$$

В большинстве случаев, электрический двигатель постоянного тока с независимым возбуждением работает при неизменном магнитном потоке Φ ,

следовательно, электромеханические и механические характеристики двигателя являются линейными.

С учетом вышесказанного, структурная схема двигателя постоянного тока с независимым возбуждением примет вид, представленный на рисунке 22.

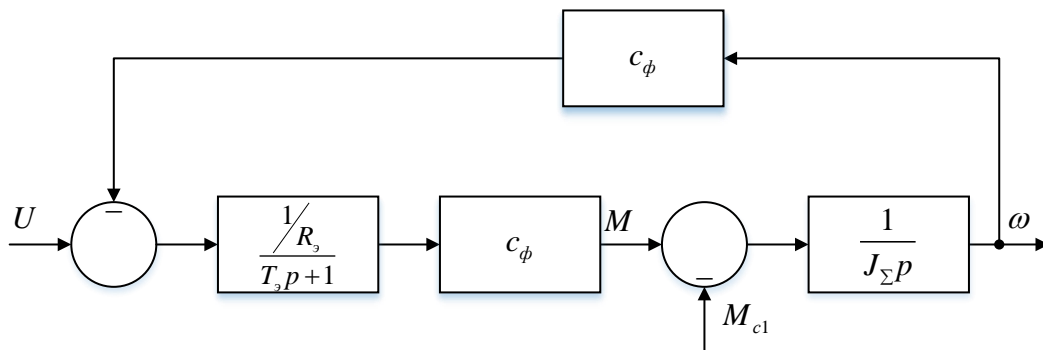


Рисунок 22 – Структурная схема двигателя постоянного тока

В приложении А представлены выражения, с помощью которых можно определить постоянную времени якорной цепи T_s и полное сопротивление R_s .

2.2.2 Математическое описание асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Асинхронный двигатель широко применяется в различных сферах, в том числе и в нефтегазовой отрасли. Это связано с простотой конструкции двигателя, высокой надежностью и низкой стоимостью двигателя. В качестве недостатков можно выделить большой пусковой ток, чувствительность к параметрам сети, для регулирования скорости необходим преобразователь, также сюда можно отнести малый пусковой момент [21].

Механическая характеристика асинхронного двигателя является нелинейной и процессы, протекающие в двигателе, являются сложными. Поэтому допустимо использовать линейное описание двигателя, полагая, что электромагнитные процессы не оказывают существенного влияния на процессы, протекающие в двигателе [21].

Учитывая вышесказанное, структурная схема асинхронного двигателя принимает вид, представленный на рисунке 23.

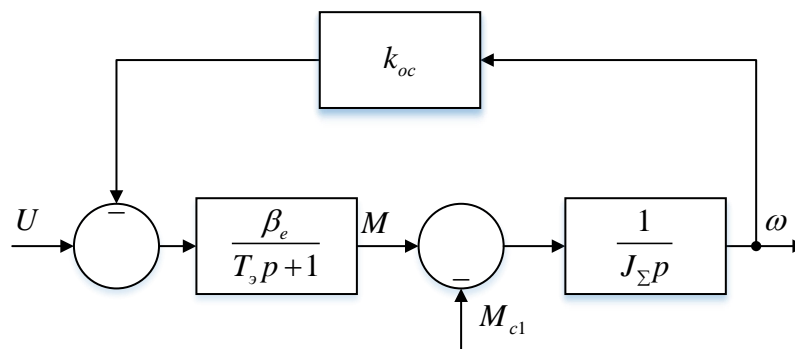


Рисунок 23 – Структурная схема асинхронного двигателя

Модуль жесткости линеаризованной механической характеристики асинхронного двигателя [21]:

$$\beta_e = \frac{2 \cdot M_{\kappa}}{\omega_0 \cdot s_{\kappa}}, \quad (25)$$

где M_{κ} - максимальный момент вращения вала двигателя, Нм;

ω_0 - синхронная угловая частота двигателя, рад/с;

s_{κ} - критическое скольжение.

Синхронная угловая частота двигателя:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_n}{p_n}, \quad (26)$$

где f_n – частота напряжения статора, Гц.

Электромагнитная постоянная времени двигателя:

$$T_s = \frac{1}{\omega_0 \cdot s_{\kappa}}. \quad (27)$$

3 Разработка математической модели и структурной схемы системы управления положением рабочего органа бурильной колонны

Основной целью данной выпускной квалификационной работы является разработка системы управления, способной изменять азимутальный или зенитный угол рабочего органа бурильной колонны при наклонно-направленном бурении глубоких скважин. На траекторию в процессе наклонно-направленного бурения оказывает большое влияние реактивный

момент, пытающийся развернуть колонну. Тем самым смещая положение рабочего инструмента.

Как описывалось ранее, функциональная схема системы управления будет иметь вид, показанный на рисунке 8. Система верхнего привода описывается математической моделью электродвигателя, установленного в ней. Математические модели двигателей изображены на рисунках 22 и 23. Бурильная колонна, представляет собой распределенную двухмассовую нагрузку для электродвигателя. А информация о текущем положении рабочего инструмента передается с помощью инклинометра с задержкой (15 – 30) секунд.

Однако, представленные ранее модели на рисунках 11 и 21, описывающие поведение механической части бурильной колонны как двухмассовую упругую систему, регулируют угловую скорость вращения рабочего инструмента. Для того, чтобы получить систему управления положением, необходимо добавить в схему, изображенную на рисунке 9 интегрирующее звено. Тогда функциональная схема системы управления положением рабочего органа будет выглядеть, как показано на рисунке 24.



Рисунок 24 – Функциональная схема системы управления положением рабочего органа бурильной колонны

3.1 Схема системы управления положением рабочего органа бурильной колонны с двигателем постоянного тока

В приложении Б представлена схема системы управления с двигателем постоянного тока независимого возбуждения. В системе присутствует большое количество перекрестных связей, что затрудняет дальнейшие

исследование. Поэтому требуется воспользоваться ранее описанными методами для преобразования структурной схемы. На рисунке 25 представлена структурная схема системы управления положением рабочего инструмента с двигателем постоянного тока независимого возбуждения. Элементы, используемые в нижеприведенной схеме, используются в виде звеньев, представляющих математическое уравнение. Эта процедура выполнена для упрощения сворачивания уравнения и получения передаточной функции системы управления положением рабочего органа бурильной колонны.

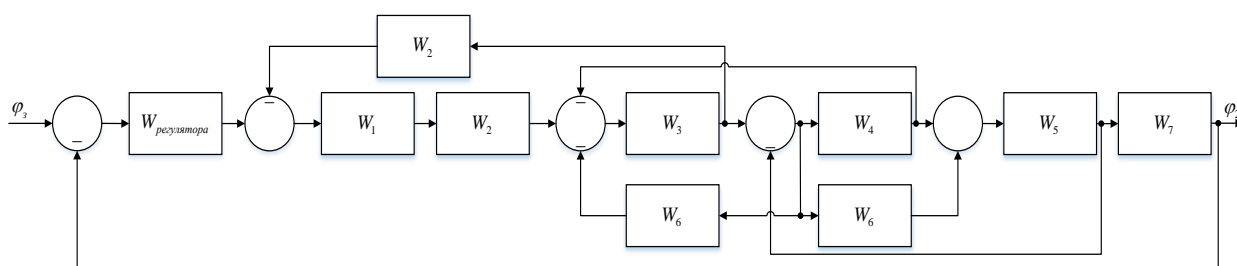


Рисунок 25 – Структурная схема управления положением рабочего инструмента бурильной колонны

Преобразование структурной схемы осуществлялось для разомкнутой структурной схемы, изображенной на рисунке 25, а также без передаточной функции регулятора.

В представленной схеме используются структурные звенья, математическое описание которых описывалось ранее как для двухмассовой упругой системы, так и для двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Найдем передаточные функции элементов САУ. Передаточные функции, определяющие динамические свойства двигателя постоянного тока независимого возбуждения имеют вид:

$$W_1(p) = \frac{k_{яц}}{T_{яц}p + 1}. \quad (28)$$

$$W_2(p) = c_\phi. \quad (29)$$

Передаточная функция, описывающая динамические свойства первой распределенной массы в устье скважины:

$$W_3(p) = \frac{1}{J_1 p}. \quad (30)$$

Передаточная функция, представляющая жесткость бурильной колонны:

$$W_4(p) = \frac{c}{p}. \quad (31)$$

Передаточная функция, описывающая динамические свойства второй распределенной массы в забое скважины:

$$W_5(p) = \frac{1}{J_2 p}. \quad (32)$$

Передаточная функция, представляющая коэффициент вязкого трения:

$$W_6(p) = \beta. \quad (33)$$

Передаточная функция интегрирующего звена, необходимая для перехода от угловой скорости вращения бурильной колонны к углу поворота:

$$W_7(p) = \frac{1}{p}. \quad (34)$$

В качестве передаточных функций, используемых в упрощенной структурной схеме управления положением рабочего инструмента, используются следующие передаточные функции, которые были получены при преобразовании структурной схемы:

$$W_8(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}{1 + W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p)}. \quad (35)$$

$$W_9(p) = \frac{W_5(p) \cdot (W_4(p) + W_6(p))}{1 + W_5(p) \cdot (W_4(p) + W_6(p))}. \quad (36)$$

$$W_{10}(p) = \frac{W_7(p) \cdot W_8(p)}{1 + \frac{W_7(p) \cdot W_8(p) \cdot W_4(p)}{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_5(p) \cdot (W_4(p) + W_6(p))}}. \quad (37)$$

$$W_{11}(p) = \frac{W_9(p)}{1 + \frac{W_9(p) \cdot W_6(p)}{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_5(p) \cdot (W_4(p) + W_6(p))}}. \quad (38)$$

С учетом преобразований упрощенная структурная схема с двигателем постоянного тока и независимым возбуждением будет выглядеть как показано на рисунке 26.

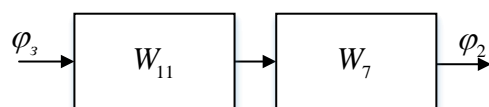


Рисунок 26 – Упрощенная структурная схема управления положением рабочего инструмента с двигателем постоянного тока

Дальнейшая работа предполагает подстановку значений параметров двигателя в модель системы управления положением рабочего инструмента и двухмассовой системы.

В таблице 1 представлены значения параметров двухмассовой системы, рассчитанных для разведочной скважины №123 Западно-Тиманского месторождения [11].

Таблица 1 – Значения параметров, рассчитанных для разведочной скважины №123 Западно-Тиманского месторождения

| $J_1, кгм^2$ | $J_2, кгм^2$ | $c, Нм$ | β |
|--------------|--------------|---------|---------|
| 5,07 | 1,34 | 4,92 | 0,426 |

В качестве двигателя для системы привода был выбран ДПВ-52. Это объясняется тем, что на указанный приведены все требуемые параметры для системы [4]. Параметры двигателя ДПВ-52 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры двигателя ДПВ-52

| Наименование | Ед. измерения | Обозначение | Величина |
|---------------------------------|---------------|-------------|----------|
| Сопротивление якорной цепи | Ом | $R_{яц}$ | 0,16 |
| Постоянная времени якорной цепи | Сек | $T_{яц}$ | 0,08 |
| Конструктивный коэф. двигателя | - | c_ϕ | 4,67 |

Для двухмассовой системы параметры приведены в таблице 1. Тогда, математическая модель двигателя постоянного тока независимого возбуждения с нагрузкой в виде двухмассовой системы с диссипативными силами примет вид, представленный на рисунке 27.

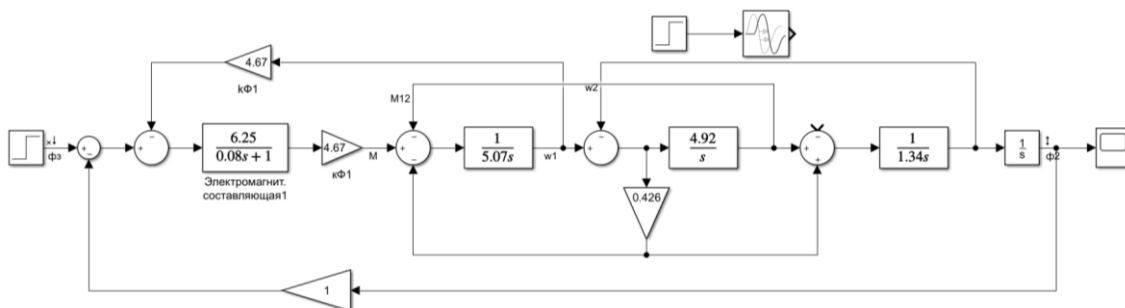


Рисунок 27 – Модель двигателя постоянного тока с нагрузкой в виде двухмассовой системы с диссипативными силами

Передаточная функция модели двигателя постоянного тока с нагрузкой в виде двухмассовой системы определяется:

$$W_{\varphi_2, \varphi_3}(p) = \frac{k_{\text{эл}} c_{\phi} (c + \beta p)}{J_1 J_2 T_{\text{эл}} p^5 + (J_1 J_2 + J_1 \beta T_{\text{эл}} + J_2 \beta T_{\text{эл}}) p^4 + (J_1 T_{\text{эл}} c + J_2 T_{\text{эл}} c + J_1 \beta + J_2 \beta + J_2 c_{\phi}^2 k_{\text{эл}}) p^3 + (J_1 c + J_2 c + \beta c_{\phi}^2 k_{\text{эл}}) p^2 + c k_{\text{эл}} c_{\phi}^2 p} \quad (39)$$

Подставив данные из таблиц 1 и 2 получим значения коэффициентов модели двигателя постоянного тока с нагрузкой в виде двухмассовой системы:

$$W_{\varphi_2, \varphi_3}(p) = \frac{29,19(4,92 + 0,43p)}{0,54p^5 + 7p^4 + 187,9p^3 + 89,6p^2 + 670,6p}$$

3.2 Схема управления положением рабочего органа буровой колонны с асинхронным двигателем

В зарубежных системах верхнего привода от компании Varco используют двигатели мощностью от 400 л.с. Опираясь на имеющуюся информацию был подобран асинхронный двигатель Baldor ECP44402T-4, который используют в системе верхнего привода. Параметры этого двигателя представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры асинхронного двигателя ЕСР44402Г-4

| Наименование | Ед. измерения | Обозначение | Величина |
|---------------------------------------|---------------|-------------|----------|
| Номинальный момент | Нм | $M_{ном}$ | 780,22 |
| Критический момент | Нм | $M_{кр}$ | 1995,74 |
| Число пар полюсов | - | p_n | 1 |
| Мощность двигателя | Л.с. | $P_{дв}$ | 400 |
| Частота питающего напряжения | Гц | f_n | 60 |
| Максимальная скорость вращения ротора | Об/мин | $n_{макс}$ | 3600 |
| Номинальная скорость вращения ротора | Об/мин | $n_{ном}$ | 3570 |

Модуль жесткости линеаризованной механической характеристики асинхронного двигателя можно определить по формуле (25), а электромагнитная постоянная времени двигателя по формуле (27). Однако, чтобы определить эти показатели необходимо рассчитать коэффициент перегрузочной способности и критическое скольжение.

Сначала определим угловую скорость вращения поля статора по формуле (26) [3]:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 60}{1} = 376,8 \text{ рад/с.}$$

Приведенную в таблице 3 номинальную скорость вращения ротора требуется перевести к одним величинам по формуле:

$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{ном}}{60}. \quad (40)$$

Подставив выражения получим:

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3570}{60} = 373,66 \text{ рад/с.}$$

Теперь можно определить скольжение асинхронного двигателя по формуле [21]:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega_{ном}}{\omega_0}. \quad (41)$$

Подставляя данные из ранее найденных значений, скольжение принимает значение:

$$s = \frac{376,8 - 373,66}{376,8} = 8,3 \cdot 10^{-3}.$$

Для того, чтобы определить критическое скольжение двигателя, требуется вычислить коэффициент перегрузочной способности [3]:

$$k_m = \frac{M_{кр}}{M_{ном}}. \quad (42)$$

Подставив значения моментом, получим:

$$k_m = \frac{1995,74}{780,22} \approx 2,56.$$

Тогда критическое скольжение [3]:

$$s_k = s \cdot (k_m + \sqrt{k_m^2 + 1}). \quad (43)$$

Подставим найденные значения скольжения и коэффициента перегрузочной способности и получим [4]:

$$s_k = 0,0083 \cdot (2,56 + \sqrt{6,55 + 1}) \approx 44,01 \cdot 10^{-3}.$$

Теперь по формуле (25) определим модуль жесткости линеаризованной механической характеристики асинхронного двигателя:

$$\beta_e = \frac{2 \cdot 1995,74}{376,8 \cdot 0,04401} \approx 240,69 \text{ (Н/м)}.$$

А затем электромагнитную постоянную времени двигателя:

$$T_s = \frac{1}{376,8 \cdot 0,04401} \approx 0,06 \text{ с}.$$

Подставим рассчитанные значения в модель асинхронного двигателя с нагрузкой в виде двухмассовой системы с диссипативными силами, тогда она примет вид, показанный на рисунке 28. Параметры для двухмассовой системы взяты из таблицы 1.

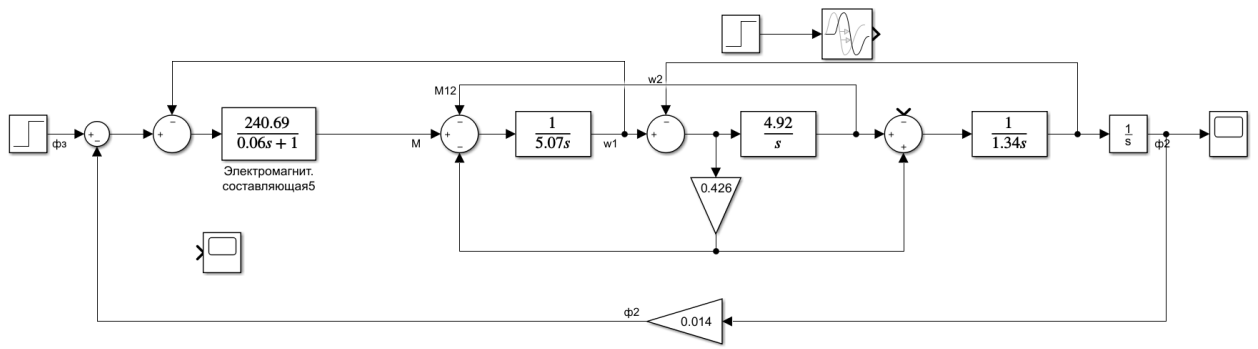


Рисунок 28 – Модель асинхронного двигателя с нагрузкой в виде двухмассовой системы с диссипативными силами

Передаточная функция модели асинхронного двигателя с нагрузкой в виде двухмассовой системы определяется:

$$W_{\varphi_2, \varphi_3}(p) = \frac{\beta_e(c + \beta p)}{J_1 J_2 T_3 p^5 + (J_1 J_2 + J_1 \beta T_3 + J_2 \beta T_3) p^4 + (J_1 T_3 c + J_2 T_3 c + J_1 \beta + J_2 \beta + J_2 \beta_e) p^3 + (J_1 c + J_2 c + \beta \beta_e) p^2 + (\beta \beta_e + \beta_e c) p + \beta_e c}. \quad (44)$$

Подставив данные из таблиц 1 и 3 получим значения коэффициентов модели асинхронного двигателя с нагрузкой в виде двухмассовой системы:

$$W_{\varphi_2, \varphi_3}(p) = \frac{240,69(4,92 + 0,43p)}{0,41p^5 + 6,96p^4 + 327,14p^3 + 134,1p^2 + 1286,72p + 1184,19}.$$

4 Синтез системы подчиненного регулирования при управлении положением рабочего инструмента бурильной колонны

На практике регулятор САУ строят на основе трехконтурной структуры и подчиненного управления, когда выделяют контуры управления углом поворота вала двигателя, скоростью вращения вала двигателя и электродвижущим моментом – моментом, развиваемым двигателем. Такая трёхконтурная система имеет три регулятора, что позволяет использовать три различных средства коррекции динамических свойств САУ.

Модели регуляторов определяют на основе какого-либо метода их синтеза. Существует большое количество различных методов решения этой задачи. Наиболее распространенным инженерным методом является последовательный синтез регуляторов по контурам, начиная с внутреннего – контура тока (момента). В случае двигателя постоянного тока структурная схема САУ является трехконтурной, она представлена на рисунке 29 [6].

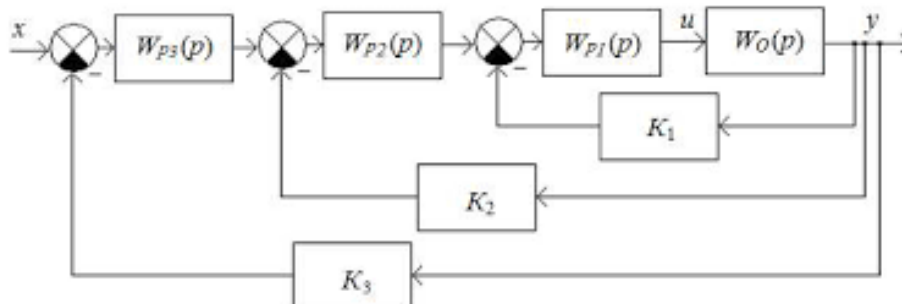


Рисунок 29 – Структурная схема трехконтурной системы автоматического управления электропривода

Модель системы управления является многоконтурной, поэтому используется синтез регуляторов на основе подчиненного регулирования. Первым этапом разбивается модель на звенья таким образом, чтобы выходные величины звеньев являлись физическими величинами, которые представляют интерес для управления и контроля. В данном случае такими величинами являются угловая скорость перемещения и угол перемещения рабочего инструмента.

Каждая из регулируемых величин обладает замкнутым контуром с регулированием по отклонению. В состав контура входит также регулятор.

Регуляторы соединены между собой последовательно, поэтому предыдущий регулятор вырабатывает задание для последующего, что и отражается в термине - подчиненное управление.

При настройке системы возможно выбрать вариант настройки системы: настройка на технический (модульный) или симметричный оптимум [5].

В зависимости от типа настройки меняются и динамические показатели переходного процесса. Если настройку производить на технический (модульный) оптимум, можно добиться времени переходного процесса не превышающим значение произведения малой некомпенсируемой времени T_{μ} и 4,7 секунд, и перерегулирования не превышающим 4.3 %. Эта настройка применима для систем, в которых не требуется высокая точность. Для повышения точности можно использовать настройку на симметричный оптимум.

В рассматриваемой задаче управления углом положения рабочего органа бурильной колонны использовалась настройка регулятора на технический (модульный оптимум).

4.1 Синтез подчиненного регулирования системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны с двигателем постоянного тока

Для регулирования потока электрической энергии двигателя постоянного тока применяют тиристорный преобразователь. Его применение объясняется тем, что он имеет высокое быстродействие и высокий КПД, энергетические потери при этом составляют от 1 до 2 % от номинальной мощности электропривода.

Так как тиристорный преобразователь широко применим с двигателем постоянного тока, необходимо привести его математическую модель, а также

учесть в модели двигателя постоянного тока с нагрузкой в виде двухмассовой системой, изображенной на рисунке 30.

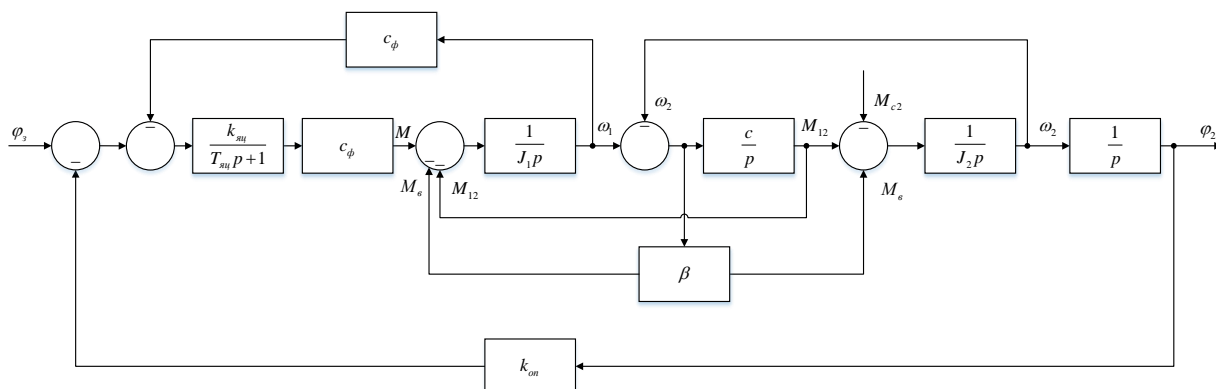


Рисунок 30 – Модель двигателя постоянного тока с нагрузкой в виде двухмассовой системы

Из модели, представленной на рисунке 30, выделим для удобства контур, в котором присутствует математическое описание двигателя постоянного тока и нагрузка в виде первой распределенной массы – часть бурильной колонны, которая берет начало в устье скважины и заканчивается в месте соединения с компоновкой низа бурильной колонны (рисунок 31). Также в этот контур добавим математическую модель тиристорного преобразователя.

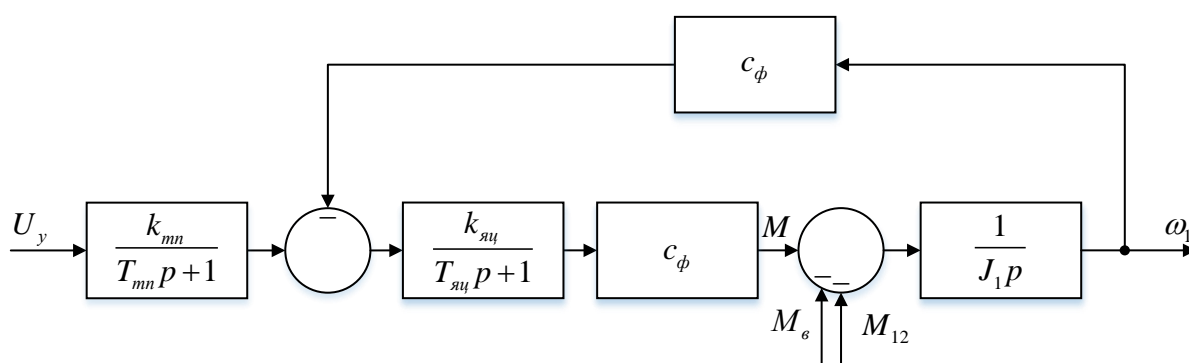


Рисунок 31 – Выделенный контур модели двигателя постоянного тока с тиристорным преобразователем и нагрузкой в виде первой распределенной массы

Тиристорный преобразователь описывается аperiodическим звеном первого порядка. В состав звена входит статический коэффициент усиления k_{mn} и постоянная времени T_{mn} .

Статический коэффициент усиления преобразователя рассчитывается следующим образом:

$$k_{mn} = \frac{U_n}{U_y}, \quad (45)$$

где U_y – унифицированный сигнал управления, В.

Подставив данные [3] получим статический коэффициент усиления преобразователя:

$$k_{mn} = \frac{305}{10} = 30,5.$$

Постоянная времени T_{mn} преобразователя [6]:

$$T_{mn} = T_\mu = \frac{J_1 \cdot R_{яц}}{c_\phi^2}. \quad (46)$$

Постоянная времени после подстановки [3] примет значение:

$$T_{mn} = T_\mu = \frac{5,07 \cdot 0,16}{21,81} \approx 37,2 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

4.1.1 Синтез регулятора движущего момента (тока)

Регулирование момента и тока двигателя позволяют достичь нормального функционирования электропривода. Так, например, для механизмов, которые испытывают во время работы значительные перегрузки, появляется необходимость непрерывного регулирования момента, чтобы ограничить динамические ударные нагрузки оборудования.

Контур тока или момента, образован следующими звеньями: регулятором тока (РТ), тиристорным преобразователем (ТП), якорной цепью (ЯЦ) двигателя постоянного тока и датчиком тока (ДТ). Также контур охвачен обратной отрицательной связью по току с коэффициентом передачи k_{om} (рисунок 32). Однако в этом контуре не учитывается ЭДС двигателя. Это объясняется тем, что скорость изменения тока превосходит скорость изменения ЭДС, поэтому ей можно пренебречь.

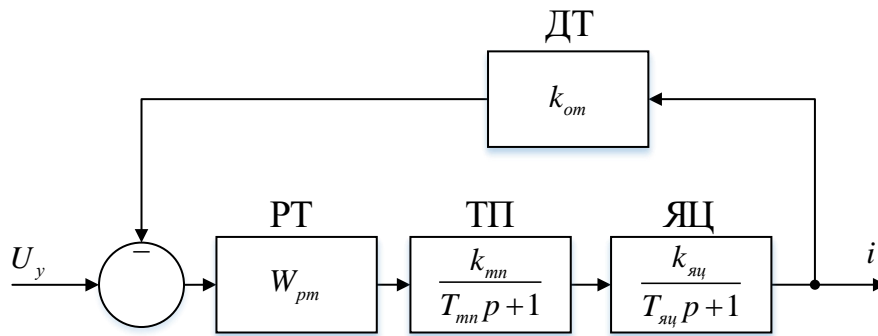


Рисунок 32 – Структурная схема замкнутого контура тока двигателя постоянного тока

В данном контуре регулирования присутствует «большая» постоянная времени T_i , которую необходимо скомпенсировать регулятором тока. Эта компенсация позволит повысить быстродействие контура регулирования тока. Реальные инерционные звенья при этом остаются в контуре. Также в контуре остаются малые постоянные времени T_μ звеньев. Их компенсация является трудно реализуемой, а влияние на быстродействие убывает [21].

Оптимизированный контур является составной частью объекта управления в контуре регулирования скорости. Динамические качества системы управления приводом в значительной степени зависят от его быстродействия.

На практике для настройки контура регулирования координат электропривода используют инженерный метод синтеза. Желаемая передаточная функция разомкнутого контура с учетом неединичной обратной связи инженерного метода представлена ниже [21]:

$$W_{\text{с раз}}(p) = \frac{1/k_{om}}{a_m \cdot T_\mu p \cdot (T_\mu p + 1)}. \quad (47)$$

В соответствии с рисунком 32, передаточная функция объекта регулирования:

$$W_{op}(p) = \frac{k_{mn} \cdot k_{yd}}{(T_{mn} p + 1) \cdot (T_{yd} p + 1)}. \quad (48)$$

Поделив передаточную функцию (47) на ПФ (48), получается передаточная функция регулятора тока:

$$W_{pm}(p) = \frac{W_{ж\ раз}(p)}{W_{op}(p)} = \frac{(T_{яц}p+1)}{a_m \cdot k_{om} \cdot k_{mn} \cdot k_{яц} \cdot T_\mu p} = \frac{T_{яц}}{T_m} + \frac{1}{T_m p}. \quad (49)$$

Исходя из этого, регулятор является пропорционально-интегральным (ПИ-регулятор) с постоянной интегрирования:

$$T_m = a_m \cdot k_{om} \cdot k_{mn} \cdot k_{яц} \cdot T_\mu. \quad (50)$$

Коэффициент пропорциональной части:

$$k_m = \frac{T_{яц}}{T_m}. \quad (51)$$

Коэффициент обратной связи по току находится из выражения:

$$k_{om} = \frac{U_y}{I_{\max}}, \quad (52)$$

где $I_{\max} = 2 \cdot I_n$, А.

Настройка контура определяет его динамические свойства, и она определяется соотношением постоянных времени контура:

$$a_m = \frac{T_{ог}}{T_\mu}. \quad (53)$$

Обычно контур тока настраивается на технический (модульный) оптимум, значение коэффициента a_m равный 2, при этом присутствует минимальное перерегулирование около 5 % и обеспечивается минимальное время регулирования:

$$t = 4,7 \cdot T_\mu. \quad (54)$$

Если от привода требуется высокое поддержание точности, то используют настройку на симметричный оптимум, при этом желаемая передаточная функция (47) изменится.

С учетом вышесказанного определим коэффициенты регулятора тока:

$$W_{pm}(p) = \frac{(0,08p+1)}{2 \cdot \frac{10}{2 \cdot 220} \cdot 30,5 \cdot \frac{1}{0,16} \cdot 0,0372p} = 0,25 + \frac{1}{0,32p}.$$

4.1.2 Синтез регулятора скорости

Для обеспечения исполнительного механизма требуемой скоростью, применяют два способа: механический и электрический. Первый способ включает в себя введение в кинематическую цепь привода устройств, которые позволяют плавно или ступенчато изменить передаточное число системы. В качестве примера таких устройств можно выделить: коробки передач, механические вариаторы и другие устройства. Все они усложняют механическую часть привода, что в свою очередь влияет на надежность и на автоматизацию технологического процесса.

Второй же способ является более простым и таких недостатков, как у механического способа, не имеет. Поэтому данный способ вызывает наибольший интерес.

Контур регулирования скорости вращения двигателя включает в себя оптимизированный контур тока (ОКТ), регулятор скорости (РС), механическую часть электропривода (МЧ), включающую первую распределенную массу и конструктивную составляющую двигателя, и датчик скорости (ДС) (рисунок 33).

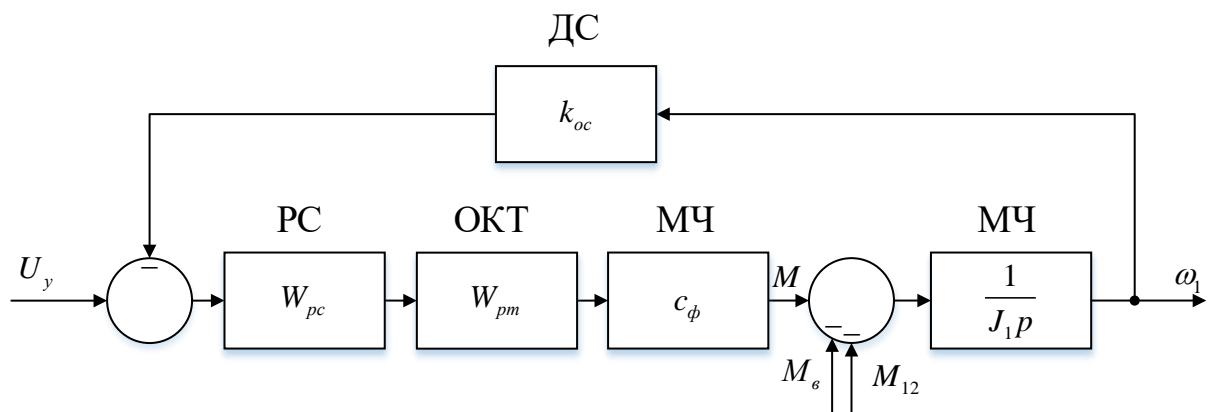


Рисунок 33 – Структурная схема замкнутого контура скорости двигателя постоянного тока

В схему входит оптимизированный контур тока, при этом он является свернутым и имеет упрощенную передаточную функцию:

$$W_{pm}(p) = \frac{1/k_{om}}{a_m \cdot T_\mu p + 1}. \quad (55)$$

Передаточная функция объекта регулирования при этом:

$$W_{op}(p) = \frac{1/k_{om}}{a_m \cdot T_\mu p + 1} \cdot \frac{c_\phi}{J_1 p}. \quad (56)$$

Это соотношение показывает, что некомпенсируемая постоянная времени T_μ для контура скорости, в a_m раз больше, чем для контура регулирования тока. Для контура положения некомпенсируемая постоянная будет в a_m^2 раз больше, чем для контура регулирования скорости.

Желаемая передаточная функция для разомкнутого контура регулирования скорости:

$$W_{ж\ раз}(p) = \frac{1/k_{oc}}{a_c \cdot a_m \cdot T_\mu p \cdot (a_m \cdot T_\mu p + 1)}. \quad (57)$$

Поделив передаточную функцию (57) на ПФ (56), получается передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{pc}(p) = \frac{W_{ж\ раз}(p)}{W_{op}(p)} = \frac{J_1 \cdot k_{om}}{a_c \cdot a_m \cdot k_{oc} \cdot c_\phi \cdot T_\mu} = k_{pc}. \quad (58)$$

Следовательно, требуется П-регулятор скорости, коэффициент которого определяется значением k_{pc} .

Коэффициент обратной связи по скорости находится из выражения:

$$k_{oc} = \frac{U_y}{\omega_{\max}}, \quad (59)$$

где ω_{\max} - максимальная угловая скорость, рад/с.

Подставим значения переменных из таблицы 1 и определим значение коэффициентов регулятора скорости

$$W_{pc}(p) = \frac{5,07 \cdot \frac{10}{2 \cdot 220}}{2 \cdot 2 \cdot \frac{10}{128,1} \cdot 4,67 \cdot 0,0372} \approx 2,13.$$

4.1.3 Синтез регулятора положения

Еще одной регулируемой величиной электропривода является позиция рабочего органа. Машины, у которых основная задача состоит в поддержание заданной позиции рабочего органа, называются позиционными. К таким позиционным машинам можно отнести экскаваторы, металлорежущие и деревообрабатывающие станки, манипуляторы, подъемно-транспортные машины и другие машины, с таким же принципом управления.

Перемещение в пространстве рабочих органов таких машин, обычно достигается за счет работы нескольких взаимодействующих механизмов (индивидуальных приводов), которые обеспечивают перемещение по отдельным координатам.

Регулирование положения рабочего инструмента бурильной колонны будет осуществляться по отклонению. Оптимизация контура положения будет осуществляться, как и ранее. Контур положения включает в себя: оптимизированный контур тока (ОКТ), скорости (ОКС), блок интегрирования скорости (БИ), датчик обратной связи по положению с коэффициентом k_{on} (ДП) и сам регулятор положения (РП) (рисунок 34).

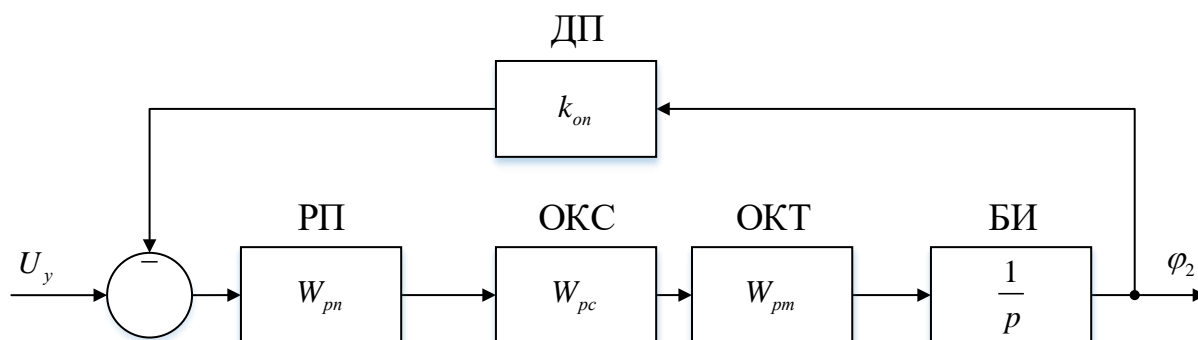


Рисунок 34 – Структурная схема контура положения ДПТ-НВ

Желаемая передаточная функция для разомкнутого контура регулирования положения:

$$W_{ж\ раз}(p) = \frac{1/k_{on}}{a_n \cdot a_c \cdot a_m \cdot T_\mu p \cdot (a_c \cdot a_m \cdot T_\mu p + 1)} \quad (60)$$

Передаточная функция объекта регулирования при этом:

$$W_{op}(p) = \frac{1/k_{oc}}{a_c \cdot a_m \cdot T_\mu p + 1} \cdot \frac{1}{p}. \quad (61)$$

Поделив передаточную функцию (60) на ПФ (61), получится передаточная функция регулятора положения:

$$W_{pn}(p) = \frac{W_{ж\text{ раз}}(p)}{W_{op}(p)} = \frac{k_{oc}}{a_c \cdot a_m \cdot k_{on} \cdot a_n \cdot T_\mu} = k_{pn}. \quad (62)$$

Коэффициент обратной связи по координате перемещения находится с помощью следующего выражения:

$$k_{on} = \frac{U_y}{\varphi_{\max}}, \quad (63)$$

где φ_{\max} - максимальный угол отклонения, радиан.

Подставив ранее рассчитанные величины в передаточную функцию регулятора положения, получим коэффициент регулятора:

$$W_{pn}(p) = \frac{10}{128,1} = 0,16.$$

$$2 \cdot 2 \cdot \frac{10}{6,28} \cdot 2 \cdot 0,0372$$

С учетом сказанного, модель системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны с двигателем постоянного тока примет вид, показанный на рисунке 35.

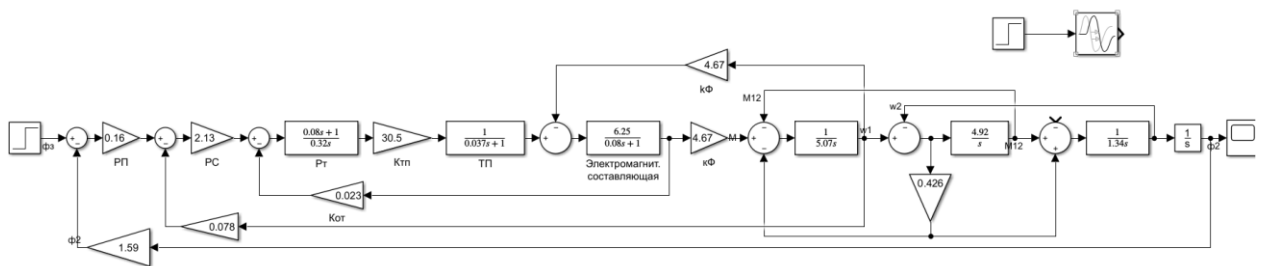


Рисунок 35 – Модель системы управления положением бурильной колонны с двигателем постоянного тока

Переходный процесс системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны с двигателем постоянного тока без учета влияния забойного двигателя изображен на рисунке 36.

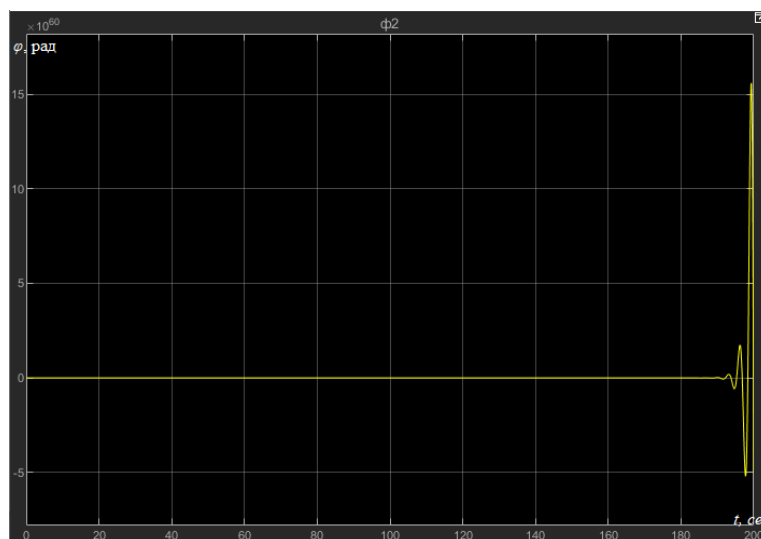


Рисунок 36 – Переходный процесс системы управления положением рабочего органа буровой колонны с двигателем постоянного тока без учета влияния забойного двигателя

Из рисунка 36 видно, что система является не устойчивой. Это связано с тем, что в прямой цепи оказывается большой коэффициент передачи. Уменьшим коэффициент в обратной цепи контура положения до значения 0,05 для того, чтобы система стала устойчивой, и подадим сигнал задания равный 40 радиан без учета влияния забойного двигателя (рисунок 37).

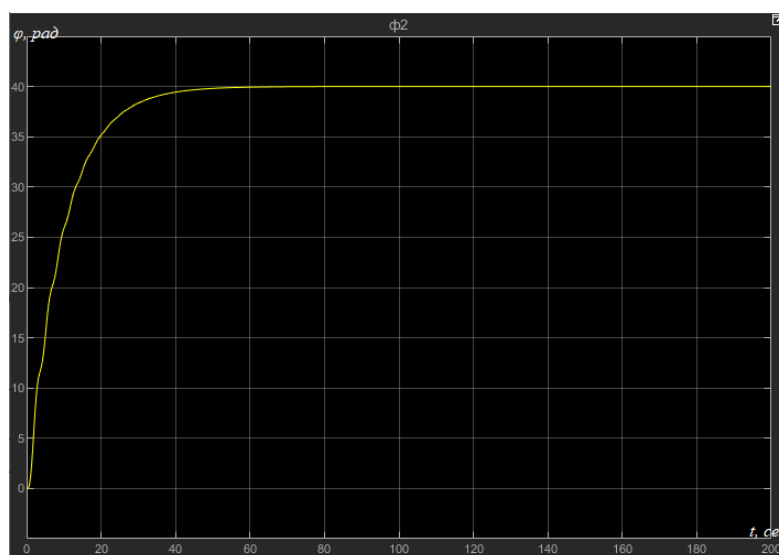


Рисунок 37 – Переходный процесс системы управления положением рабочего органа буровой колонны с двигателем постоянного тока с уменьшенным коэффициентом передачи без учета влияния забойного двигателя

В полученном переходном процессе отсутствуют колебания, а время достижения заданного значения составляет 40 секунд. Однако в системе на данном этапе не учтена задержка инклинометра.

4.2 Синтез подчиненного регулирования системы управления положением рабочего инструмента буровой колонны с асинхронным двигателем

Применение электромашинного преобразователя для системы с асинхронным двигателем экономически невыгодно: преобразователь в таком случае будет иметь крупные габариты, большую массу, высокую стоимость и низкий КПД. Схема непосредственного регулирования скорости ТП-Д проста в реализации и обладает меньшими экономическими затратами, однако ее использование возможно, когда используется двигатель постоянного тока. В качестве регулятора потока электрической энергии был выбран преобразователь частоты, так как данный преобразователь наилучшим образом подходит к асинхронному двигателю, используемому в модели. Поэтому необходимо привести его математическую модель, а также учесть в модели асинхронного двигателя постоянного тока с нагрузкой в виде двухмассовой системой, изображенной на рисунке 38.

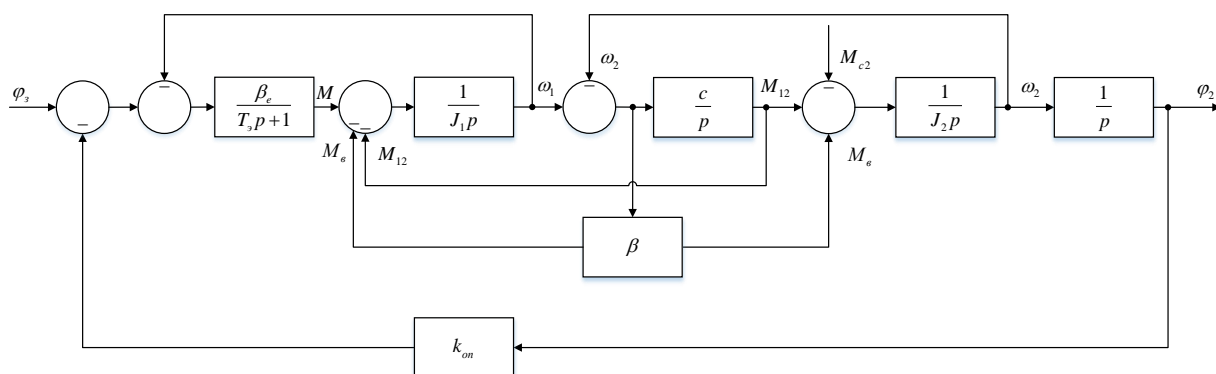


Рисунок 38 – Модель асинхронного двигателя с нагрузкой в виде двухмассовой системы

Из модели, представленной на рисунке 38, выделим для удобства контур, в котором присутствует математическое описание асинхронного двигателя и нагрузка в виде первой распределенной массы – часть буровой колонны, которая берет начало в устье скважины и заканчивается в месте соединения с компоновкой низа буровой колонны (рисунок 39). Также в этот контур добавим математическую модель преобразователя частоты.

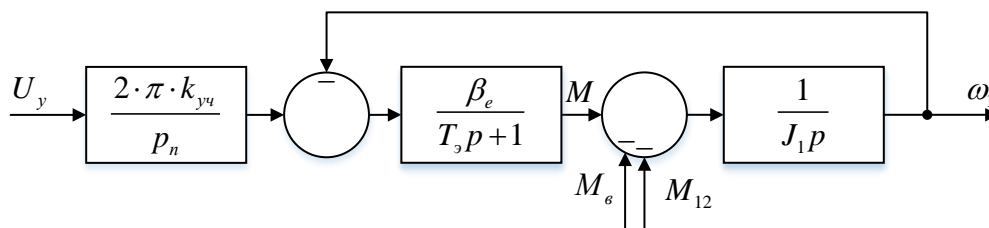


Рисунок 39 – Упрощенная структурная схема управления АД

Статический коэффициент усиления преобразователя рассчитывается следующим образом:

$$k_{yч} = \frac{f_n}{U_y}, \quad (64)$$

где f_n – частота напряжения статора, Гц;

U_y – унифицированный сигнал управления, В.

Подставив данные из таблицы 3, определим коэффициент передачи преобразователя частоты:

$$k_{нч} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot \frac{60}{10}}{1} = 37,68.$$

4.2.1 Частотное регулирование момента (тока)

На практике данный способ регулирования тока является трудно достижимым, так как простых способов измерения электромагнитного момента не существует. Реализация обратной связи по моменту благодаря связи по току не осуществима, потому что зависимость момента от тока статора является нелинейной. Поэтому в данном приходится пренебрегать автоматическим регулированием момента.

4.2.2 Синтез регулятора скорости

Контур регулирования скорости вращения двигателя, в отличие от двигателя постоянного тока, включает в себя регулятор скорости (РС), механическую часть электропривода (МЧ), включающую первую распределенную массу и линеаризованную модель асинхронного двигателя, датчик скорости (ДС) и преобразователь частоты (ПЧ).

Контур регулирования скорости вращения асинхронного двигателя изображен на рисунке 40.

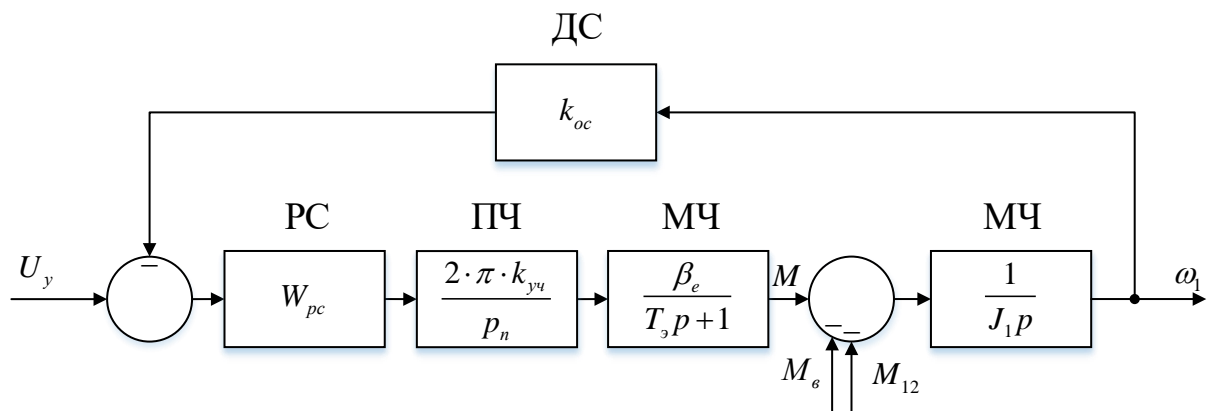


Рисунок 40 – Структурная схема замкнутого контура скорости асинхронного двигателя

Передаточная функция разомкнутой системы регулирования при этом:

$$W_{op}(p) = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{yu} \cdot \beta_e}{p_n \cdot J_1 p \cdot (T_s p + 1)}. \quad (65)$$

Желаемая передаточная функция для разомкнутого контура регулирования скорости:

$$W_{жс раз}(p) = \frac{1/k_{oc}}{a_c \cdot T_\mu p \cdot (T_\mu p + 1)}. \quad (66)$$

Некомпенсируемая малая постоянная T_μ равна постоянной T_s .

Контур скорости, как и для двигателя постоянного тока настраивается на технический оптимум.

Поделив передаточную функцию (66) на ПФ (65), получится передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{pc}(p) = \frac{W_{ж\ раз}(p)}{W_{op}(p)} = \frac{J_1 \cdot p_n}{\beta_e \cdot a_c \cdot k_{oc} \cdot k_{yч} \cdot T_\mu \cdot 2 \cdot \pi} = k_{pc}. \quad (67)$$

Следовательно, требуется П-регулятор скорости, коэффициент которого определяется значением k_{pc} .

Коэффициент обратной связи по скорости находится из выражения:

$$k_{oc} = \frac{U_y}{\omega_{max}}, \quad (68)$$

где ω_{max} - максимальная угловая скорость, рад/с.

Подставив известные величины, получим значение регулятора скорости:

$$W_{pc}(p) = \frac{5,07 \cdot 1}{240,69 \cdot 2 \cdot 0,027 \cdot 6 \cdot 0,06 \cdot 2 \cdot 3,14} \approx 0,17.$$

4.2.3 Синтез регулятора положения

Регулирование положением рабочего инструмента бурильной колонны будет осуществляться по отклонению. Оптимизация контура положения будет осуществляться, как и ранее. Контур положения включает в себя: оптимизированный контур скорости (ОКС), блок интегрирования (БИ), датчик обратной связи по положению с коэффициентом k_{on} (ДП) и сам регулятор положения (РП) (рисунок 41).

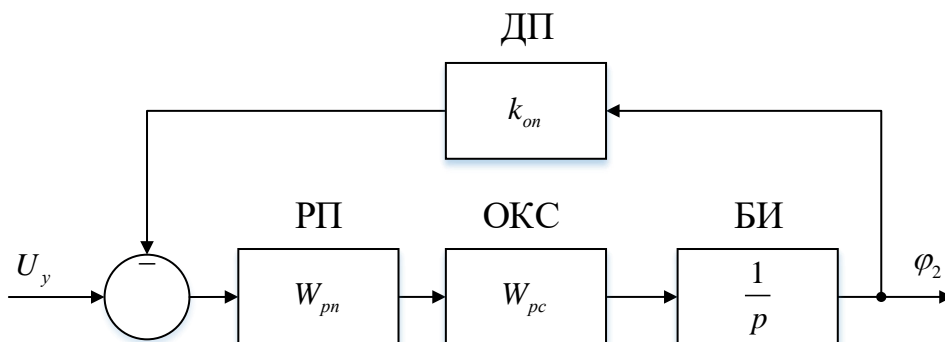


Рисунок 41 – Структурная схема контура положения

Желаемая передаточная функция для разомкнутого контура регулирования положения:

$$W_{ж\ раз}(p) = \frac{1/k_{он}}{a_n \cdot a_c \cdot T_\mu p \cdot (a_c \cdot T_\mu p + 1)}. \quad (69)$$

Передаточная функция объекта регулирования при этом:

$$W_{оп}(p) = \frac{1/k_{ос}}{a_c \cdot T_\mu p + 1} \cdot \frac{1}{p}. \quad (70)$$

Поделив передаточную функцию (69) на ПФ (70), получится передаточная функция регулятора положения:

$$W_{рн}(p) = \frac{W_{ж\ раз}(p)}{W_{оп}(p)} = \frac{k_{ос}}{a_c \cdot a_n \cdot k_{он} \cdot T_\mu} = k_{рн}. \quad (71)$$

Коэффициент обратной связи по координате перемещения находится с помощью следующего выражения:

$$k_{он} = \frac{U_y}{\varphi_{\max}}, \quad (72)$$

где φ_{\max} - максимальный угол отклонения, радианы.

Определим по рассчитанным значениям коэффициент регулятора положения:

$$W_{рн}(p) = \frac{W_{ж\ раз}(p)}{W_{оп}(p)} = \frac{0,027}{2 \cdot 2 \cdot 1,59 \cdot 0,06} = 0,071.$$

С учетом сказанного, модель системы управления положением рабочего органа бурильной колонны с асинхронным двигателем примет вид, показанный на рисунке 42. В этой модели, как и в модели с двигателем постоянного тока уменьшен коэффициент передачи.

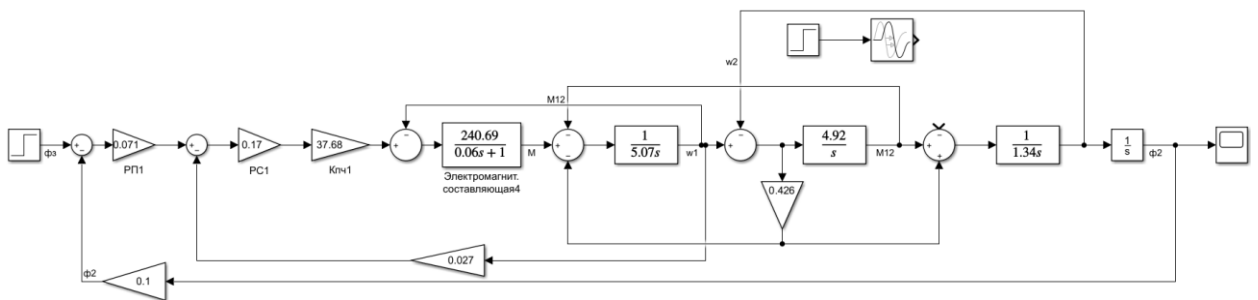


Рисунок 42 – Модель системы управления положением рабочего органа бурильной колонны с асинхронным двигателем

Переходный процесс системы управления положением рабочего органа бурильной колонны с асинхронным двигателем представлен на рисунке 43. Сигнал задания составляет 10 радиан, влияние забойного двигателя не учитывается.

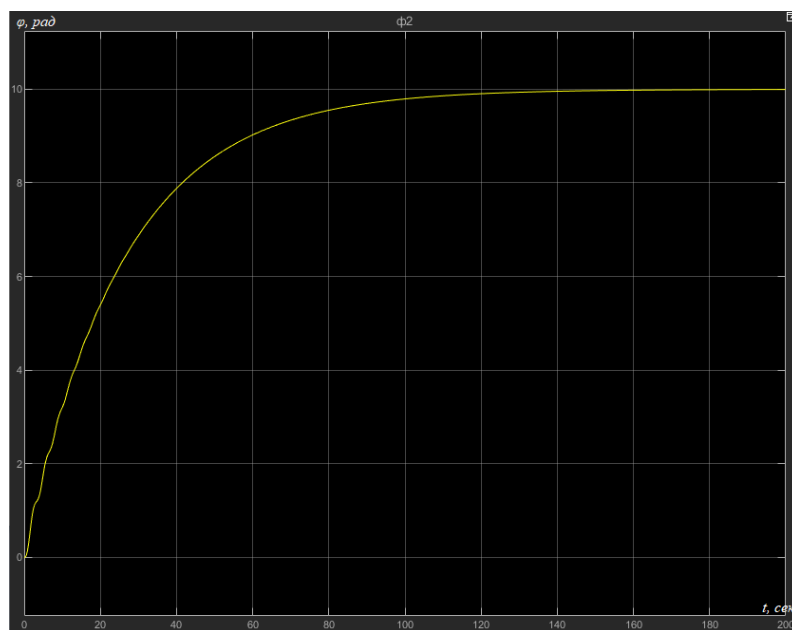


Рисунок 43 – Переходный процесс системы управления положением рабочего органа бурильной колонны без учета влияния забойного двигателя

В полученном переходном процессе отсутствуют колебания, а время достижения заданного значения составляет около 120 секунд. Однако в системе управления положением рабочего инструмента бурильной колонны на данном этапе не учтена задержка инклинометра, как и в системе управления положением рабочего органа бурильной колонны с двигателем постоянного тока.

5 Исследование компьютерной модели системы управления с учетом вязкого трения

В современных системах верхнего привода, которые используют на буровых установках для вращения бурильной колонны, устанавливают асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. По этой причине исследование будет проводиться на модели с асинхронным двигателем.

Модель системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны представлена на рисунке 44. Модель представляет собой последовательно соединенные регуляторы положения, скорости, математическую модель асинхронного двигателя и нагрузку в виде упругой двухмассовой системы с диссипативными силами.

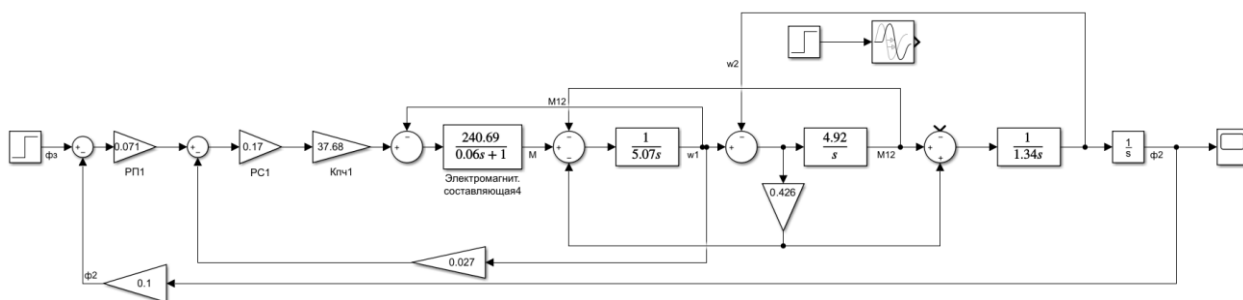


Рисунок 44 – Модель системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны

Настройка регуляторов положения и скорости на модульный оптимум, позволила сократить время достижения заданного положения в 3,72 раза (рисунок 45) в системе управления положением рабочего инструмента бурильной колонны без учета влияния забойного двигателя. При этом в системе отсутствуют незатухающие колебания.

Для представленной модели управления положением рабочего инструмента бурильной колонны, изображенной на рисунке 44, запас по фазе составляет $88,6^\circ$, а запас по амплитуде – $10,8 \text{ dB}$ (рисунок 46). Это означает, что коэффициент передачи можно увеличить в 3 раза и система будет оставаться устойчивой.

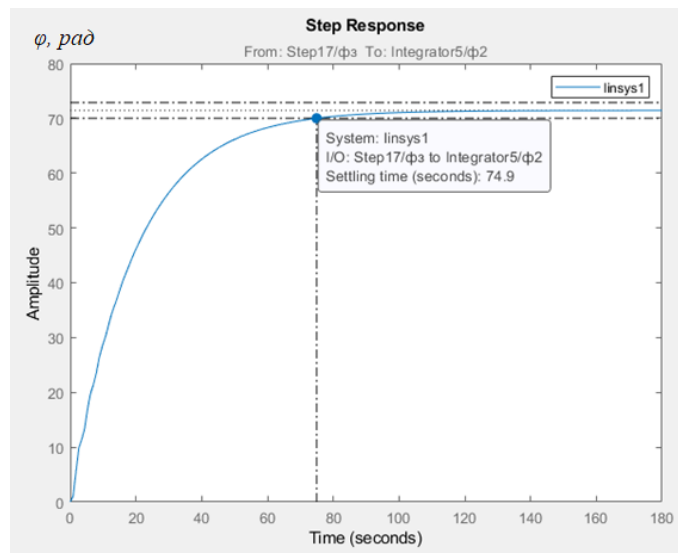


Рисунок 45 – Переходный процесс системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны без учета влияния реакции забойного двигателя

Однако в системе могут появиться автоколебания и перерегулирование, что демонстрирует рисунок 56. Это связано с тем, что при изменении коэффициента передачи ЛАХ системы перемещается по оси абсцисс, а ЛФХ системы остается на прежней позиции. На рисунке 47 изображен переходный процесс системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны при увеличении коэффициента передачи в 3 раза без учета влияния забойного двигателя.

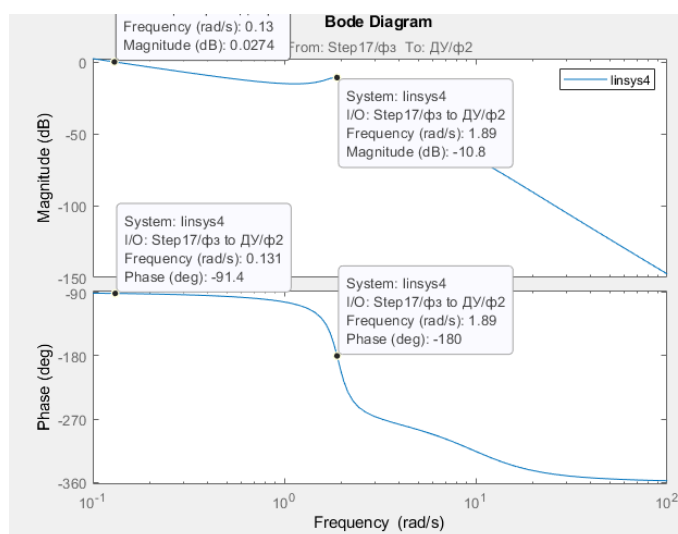


Рисунок 46 – ЛАЧХ системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны

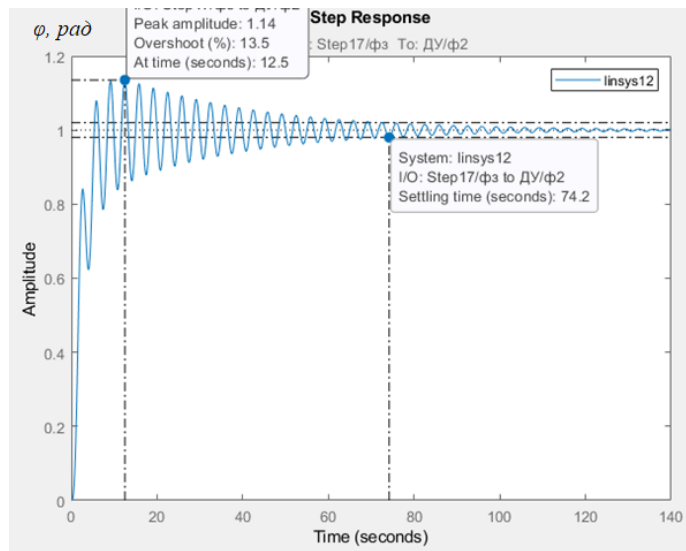


Рисунок 47 - Переходный процесс системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны при увеличении коэффициента передачи в 3 раза без учета влияния забойного двигателя

В реальной системе, как упоминалось выше, информация о текущем положении рабочего инструмента передается с некоторым запаздыванием. Величина этого запаздывания составляет от 15 до 30 секунд. Оно влияет на систему следующим образом: в системе появляется сдвиг по фазе, что приводит ее к потере устойчивости. На рисунке 48 изображен переходный процесс системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны с запаздыванием 30 секунд без учета влияния забойного двигателя.

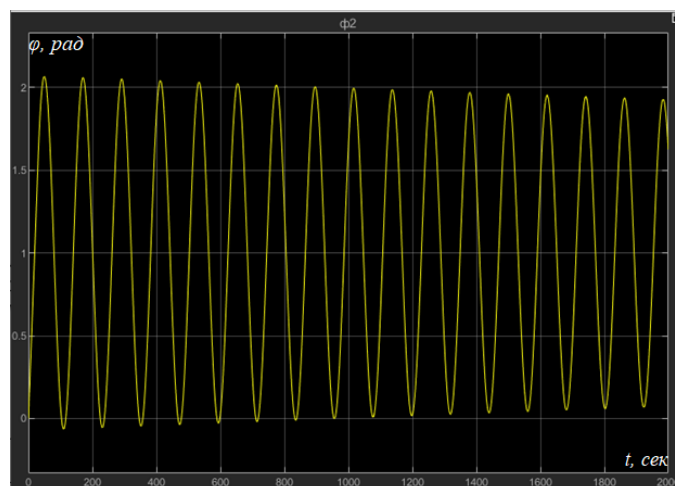


Рисунок 48 - Переходный процесс системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны с запаздыванием 30 секунд без учета влияния забойного двигателя

Из представленного рисунка видно, что система управления положением рабочего инструмента потеряла устойчивой. Простой способ вернуть устойчивость системы – уменьшить коэффициент передачи. Уменьшив коэффициент передачи, время переходного процесса также уменьшиться. На рисунке 49 представлен переходный процесс системы управления положением рабочего инструмента с уменьшенным коэффициентом передачи в 2,5 раза без учета влияния забойного двигателя.

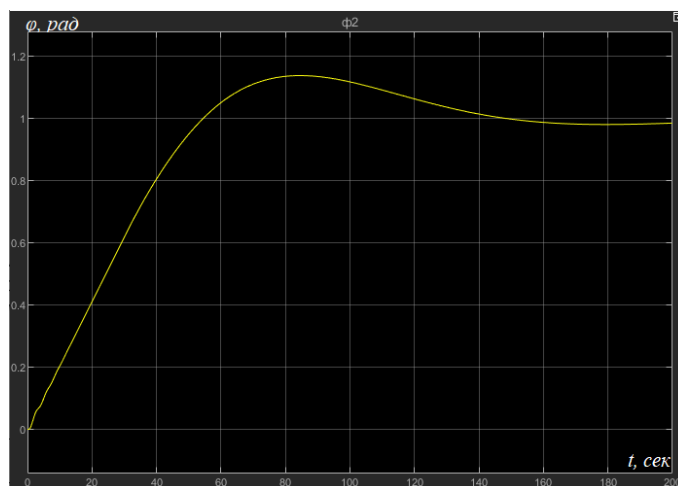


Рисунок 49 - Переходный процесс системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны с уменьшенным коэффициентом передачи в 2,5 раза без учета влияния забойного двигателя

Стоит отметить, что ранее представленные характеристики не учитывали влияние забойного двигателя, создающего реактивный момент, который пытается развернуть бурильную колонну. Учитывая этот реактивный момент со значением 10 Нм был построен переходный процесс системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны (рисунок 50). Чтобы приблизить переходный процесс к реальным условиям, для реактивного момента была установлена задержка, составляющая 150 секунд.

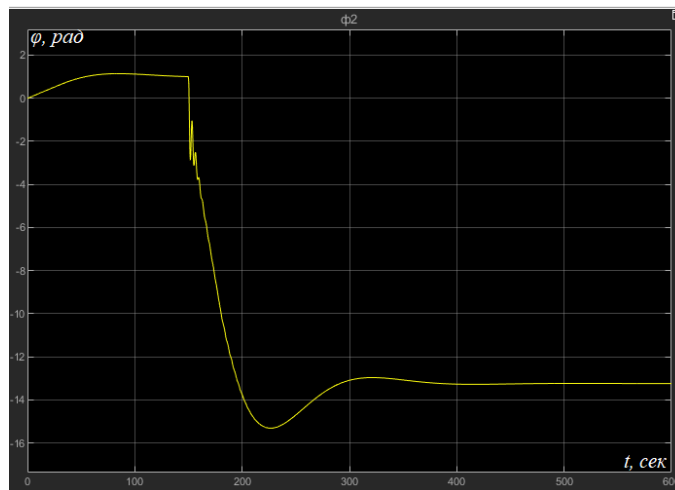


Рисунок 50 – Переходный процесс системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны с влиянием забойного двигателя

Из представленного рисунка видно, что забойный двигатель, создает реактивный момент, который отклонил положение рабочего инструмента на 13,5 радиан. При увеличении реактивного момента, отклонение будет увеличиваться, что соответствует действительности. На рисунке 51 представлена итоговая модель управления положением рабочего инструмента бурильной колонны.

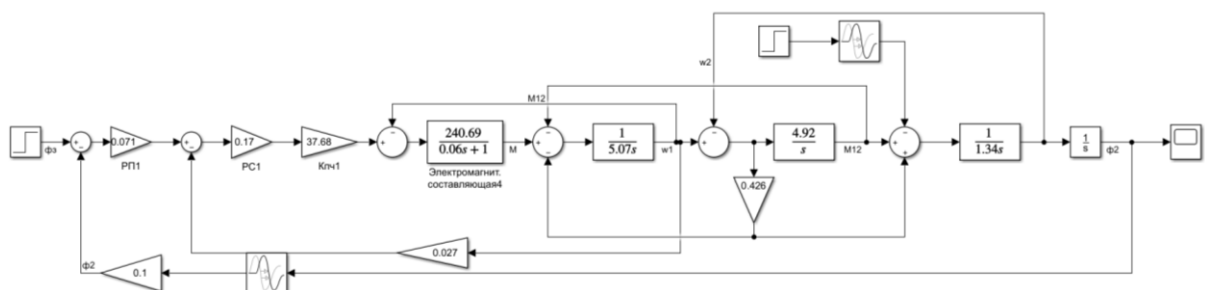


Рисунок 51 – Упрощенная модель управления положением рабочего инструмента бурильной колонны

Полученная модель системы управления положением рабочего инструмента является линейной (линеаризованной). В реальной системе присутствуют нелинейные элементы, такие как зоны нечувствительности, насыщения, люфт, и т.п. Все они оказывают влияние на систему, поэтому их необходимо учитывать. Учесть их представляется возможным при экспериментировании модели на реальных данных. Такое

экспериментирование даст наглядное понимание о точности реальной и приближенной модели.

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Необходимо понимать, что коммерческая привлекательность научного исследования определяется не только превышением технических параметров над предыдущими разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сумеет найти ответы на такие вопросы – будет ли продукт востребован рынком, какова будет его цена, каков бюджет научного проекта, какой срок потребуется для выхода на рынок и т.д.

Таким образом, целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы. Необходимо оценить полные денежные затраты на исследование (проект), а также дать хотя бы приближенную экономическую оценку результатов ее внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы. Раздел должен быть завершен комплексной оценкой научно-технического уровня ВКР на основе экспертных данных.

6.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

В данном пункте необходимо составить полный перечень проводимых работ, определить их исполнителей и рациональную продолжительность. Наглядным результатом планирования работ будет являться сетевой или линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей не превышает двух будет реализован линейный график. Чтобы построить его, требуется свести в таблицу хронологические упорядоченные данные. В таблице 4 представлен перечень работ и продолжительности их выполнения.

Таблица 4 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

| Этапы работы | Исполнители | Загрузка исполнителей |
|---|--------------------|------------------------------|
| Постановка целей и задач, получение исходных данных | НР | НР – 100% |
| Составление и утверждение ТЗ | НР, И | НР – 80% И – 20% |
| Подбор и изучение материалов по тематике | НР, И | НР – 30% И – 70% |
| Разработка календарного плана | НР, И | НР – 10% И – 90% |
| Подбор списка литература по тематике | НР, И | НР – 10% И – 90% |
| Обсуждение списка литературы | НР, И | НР – 50% И – 50% |
| Разработка функциональной схемы САУ | НР, И | НР – 15% И – 85% |
| Создание мат. модели САУ | И | И – 100% |
| Исследование компьютерной модели | И | И – 100% |
| Оформление расчетно-пояснительной записки | И | И – 100% |
| Оформление графического материала | И | И – 100% |
| Подведение итогов | НР, И | НР – 10% И – 90% |

6.1.1 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работы может быть осуществим с помощью двух методов:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

Первый применим в случаях, когда имеется достаточно развитая нормативная база трудоемкости процессов, что в свою очередь обусловлено их высокой повторяемостью в устойчивой обстановке. Так как исполнитель работы зачастую не располагает соответствующими нормативами, то используют опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Аналоговый способ является простым и имеет околонулевые затраты. Применим в том случае, когда у исполнителя НИР находится в поле зрения не устаревший аналог, т.е. проект в целом или часть его фрагмента, который по всем значимым параметрам идентичен выполняемой НИР. В большинстве случаев он может применяться только локально – для отдельных элементов (этапов работы).

Экспертный способ используется при отсутствии вышеуказанных информационных ресурсов и предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию. Для определения вероятных (ожидаемых) значений продолжительности работ $t_{ож}$ применяется нижеуказанная формула:

$$t_{ож} = \frac{t_{min} + 4 \cdot t_{prob} + t_{max}}{6}, \quad (73)$$

где t_{min} – минимальная продолжительность работы, дн.;

t_{prob} – наиболее вероятная продолжительность работы, дн.;

t_{max} – максимальная продолжительность работы, дн.

Приведенная формула дает более надежные оценки, однако предполагается большая «нагрузка» на экспертов.

Для выполнения перечисленных в таблице 4 работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель НИР (ВКР);
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ведется по формуле:

$$T_{pd} = \frac{t_{ожс}}{K_{BH}} \cdot K_{\delta}, \quad (74)$$

где $t_{ожс}$ – продолжительность работы, дн.;

K_{BH} – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияния внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно принять данный коэффициент равный 1;

K_{δ} – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ (обычно коэффициент лежит в границах (1 – 1,2) и исполнитель сам выбирает его значение).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{KD} = T_{pd} \cdot T_{\kappa}, \quad (75)$$

где T_{KD} – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

T_{κ} – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях.

Рассчитывается он по формуле:

$$T_{\kappa} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (76)$$

где $T_{КАЛ}$ – количество календарных дней в году (366 дней);

$T_{ВД}$ – количество выходных дней в году (108 дня);

$T_{ПД}$ – количество праздничных дней в году (10 дней).

Подставив указанные значения в формулу (70):

$$T_k = \frac{366}{366 - 108 - 10} = 1,48.$$

В таблице 5 приведен расчет продолжительности этапов работ и их трудоемкость по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах (3 – 6) реализован экспертный способ по формуле (73). Столбцы 7 и 8 содержат величины трудоемкости этапа для каждого из двух участников проекта (научный руководитель и инженер) с учетом коэффициента K_δ , принимающего значение 1,2. Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение произведения $t_{ож}$ и K_δ . Столбцы 9 и 10 содержат те же трудоемкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на T_k , равного 1,48. Итог по столбцу 6 дает общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 9 и 10 – общие трудоемкости для каждого из участников проекта. Две последние величины далее будут использованы для определения затрат на оплату труда участников и прочие затраты. Величины трудоемкости этапов по исполнителям ТКД (данные столбцов 9 и 10 кроме итогов) позволяют построить линейный график осуществления проекта, приведенный в приложении В.

Таблица 5 – Трудозатраты на выполнение проекта

| Этап | Исполнители | Продолжительность работ, дни | | | | Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн. | | | |
|--|-------------|------------------------------|-----------|------------|--------------|--|--------------|--------------|--------------|
| | | | | | | $T_{РД}$ | | $T_{КД}$ | |
| | | t_{min} | t_{max} | t_{prob} | $t_{ож}$ | НР | И | НР | И |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Постановка целей и задач | НР | 2 | 3 | 2 | 2,2 | 2,64 | – | 3,9 | – |
| Разработка и утверждение технического задания (ТЗ) | НР, И | 1 | 3 | 2 | 2 | 1,92 | 0,48 | 2,84 | 0,71 |
| Подбор и изучение материалов по тематике | НР, И | 5 | 14 | 10 | 9,8 | 3,53 | 8,23 | 5,2 | 12,18 |
| Разработка календарного плана | НР, И | 2 | 4 | 3 | 3 | 0,36 | 3,24 | 0,53 | 4,79 |
| Подбор списка литературы | НР, И | 1 | 3 | 2 | 2 | 0,24 | 2,16 | 0,35 | 3,19 |
| Обсуждение литературы | НР, И | 3 | 6 | 4 | 4,2 | 2,52 | 2,52 | 3,73 | 3,73 |
| Разработка функциональной схемы САУ | НР, И | 7 | 12 | 9 | 9,2 | 1,66 | 9,38 | 2,46 | 13,88 |
| Создание мат. модели САУ | И | 7 | 12 | 11 | 10,5 | – | 12,6 | – | 18,65 |
| Исследование компьютерной модели | И | 5 | 7 | 6 | 6 | – | 7,2 | – | 10,66 |
| Оформление расчетно-пояснительной записки | И | 5 | 7 | 7 | 6,67 | – | 8 | – | 11,8 |
| Оформление графического материала | И | 5 | 8 | 6 | 6,2 | – | 7,44 | – | 11 |
| Подведение итогов | НР, И | 3 | 5 | 5 | 4,67 | 0,56 | 5,04 | 0,83 | 7,46 |
| Итого: | | | | | 66,44 | 13,43 | 66,29 | 19,84 | 98,05 |

6.1.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

6.1.3 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специальное приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает так называемые транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщика к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к

отпускной цене закупаемых материалов, как правило они составляют от 5 до 20 %. Исполнитель работы самостоятельно выбирает их величину в указанных границах. В таблице 6 представлен расчет затрат на материалы.

Таблица 6 – Расчет затрат на материалы

| Наименование материалов | Цена за ед., руб. | Кол-во | Сумма, руб. |
|--------------------------------|-------------------|--------|---------------|
| Бумага для принтера формата А4 | 248,7 | 2 уп. | 497,4 |
| Ручка шариковая синяя | 5,5 | 2 шт. | 11 |
| Картридж для принтера | 3850 | 1 шт. | 3850 |
| Итого: | | | 4358,4 |

Итоговая сумма составляет 4358,4 рублей. С учетом ТЗР, составляющих 10% от отпускной цены материалов, расходы материалов равны:

$$C_{\text{мат}} = 4358,4 \cdot 1,1 = 4794,24 \text{ руб.}$$

6.1.4 Расчет заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, в роли последнего выступает исполнитель проекта. Помимо этого, в эту статью включается премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада (МО) исполнителя. Оклад инженера принимается равным окладу соответствующего специалиста низшей квалификации в организации, где исполнитель проходил преддипломную практику.

Среднедневная тарифная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-г}} = \frac{МО}{20,7}, \quad (77)$$

где число, расположенное в знаменателе, среднее количество рабочих дней в месяце при пятидневной рабочей неделе с общим количеством 248 рабочих дней в текущем году. Для шестидневной рабочей недели количество рабочих дней в текущем году составляет 300 дней, тогда среднее количество рабочих дней – 25.

Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 5. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используются следующий ряд коэффициентов: K_{np} равный 1,1; $K_{дон зп}$ равный 1,188; K_p принимающий значение 1,3. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент. Коэффициент $K_{дон зп}$ со значением 1,188 применим при шестидневной рабочей недели, при пятидневной это значение равно 1,113. Тогда интегральный коэффициент K_u принимает значение для шестидневной недели значение 1,699, а для пятидневной – 1,62. В таблице 7 приведены затраты на заработную плату.

Таблица 7 – Затраты на заработную плату

| Исполнитель | Оклад, руб./мес. | Среднедневная ставка, руб./раб.день | Затраты времени, раб.дни | Коэффициент | Фонд з/платы, руб. |
|---------------|------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------|--------------------|
| НР | 47104 | 1884,16 | 19,84 | 1,699 | 63511,57 |
| И | 15470 | 747,34 | 98,05 | 1,62 | 118708,7 |
| Итого: | | | | | 182220,27 |

6.1.5 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы. С учетом налога:

$$C_{соц} = 182220,27 \cdot 0,3 = 54666,08.$$

6.1.6 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{эл.об} = P_{об} \cdot t_{об} \cdot Ц_э, \quad (78)$$

где $P_{об}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$t_{об}$ – время работы оборудования, час;

$Ц_э$ – тариф на 1 кВт час.

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 5 для инженера ($T_{РД}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{об} = T_{РД} \cdot K_t, \quad (79)$$

где K_t меньше или равен 1 – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{РД}$, определяется исполнителем самостоятельно.

В ряде случаев возможно определение $t_{об}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном} \cdot K_c, \quad (80)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

K_c меньше или равен 1 – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности.

Для технологического оборудования малой мощности коэффициент можно принять равным 1.

В таблице 8 представлен расчет затрат на электроэнергию для технологических целей.

Таблица 8 – Затраты на электроэнергию технологическую

| Наименование оборудования | Время работы оборудования $t_{об}$, час | Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт | Тариф $Ц_э$ на 1 кВт/ч | Затраты $C_{эл. об}$, руб. |
|---------------------------|--|--------------------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Персональный компьютер | 530*0,8 | 0,6 | 6,59 | 1676,49 |
| Струйный принтер | 2 | 0,1 | | 1,32 |
| Итого: | | | | 1677,81 |

6.1.7 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта. Для расчёта используется формула:

$$C_{AM} = \frac{H_A \cdot Ц_{ОБ} \cdot t_{pф} \cdot n}{F_0}, \quad (81)$$

где H_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$Ц_{ОБ}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

$t_{pф}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования;

F_0 – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку C_{AM} .

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

Согласно постановлению правительства РФ «О классификации основных средств, включенных в амортизационные группы» значение H_A составляет 0,5 для срока амортизации компьютера равное 2 годам. Тогда амортизационные отчисления для компьютера стоимостью 30000 рублей составят:

$$C_{AM}(ПК) = \frac{0,5 \cdot 30000 \cdot 530 \cdot 0,8 \cdot 1}{248 \cdot 8} = 3205,65 \text{ руб.}$$

Для принтера, стоимостью 10000 рублей со значением H_A равным 0,5 и значением F_0 равным 500, амортизационные отчисления составят:

$$C_{AM}(\text{Принтер}) = \frac{0,5 \cdot 10000 \cdot 2 \cdot 1}{500} = 20 \text{ руб.}$$

Тогда общие амортизационные отчисления составят:

$$C_{AM} = C_{AM}(\text{Принтер}) + C_{AM}(\text{ПК}) = 3225,65 \text{ руб.}$$

6.1.8 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных)

Сюда относятся:

- командировочные расходы, в том числе расходы по оплате суточных, транспортные расходы, компенсация стоимости жилья;
- арендная плата за пользование имуществом;
- оплата услуг связи;
- услуги сторонних организаций.

Для лиц, участвующих в проекте, командировки не предусмотрены, поэтому расходы по данному пункту C_{np} составляют 0 рублей.

6.1.9 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10 % от суммы всех предыдущих расходов, т.е.:

$$C_{проч} = (C_{mat} + C_{зн} + C_{соц} + C_{эл.об} + C_{AM} + C_{np}) \cdot 0,1. \quad (82)$$

С учетом вышеизложенного прочие расходы составят:

$$C_{проч} = (4794,24 + 182220,27 + 54666,08 + 1677,81 + 3225,65) \cdot 0,1 = 24658,41 \text{ руб.}$$

6.2 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта (табл. 9).

Таблица 9 – Смета затрат на разработку проекта

| Статья затрат | Условное обозначение | Сумма, руб. |
|------------------------------------|----------------------|------------------|
| Материалы и покупные изделия | $C_{\text{мат}}$ | 4794,24 |
| Основная заработная плата | $C_{\text{зп}}$ | 182220,27 |
| Отчисления в социальные фонды | $C_{\text{соц}}$ | 54666,08 |
| Расходы на электроэнергию | $C_{\text{эл.об}}$ | 1677,81 |
| Амортизационные отчисления | $C_{\text{ам}}$ | 3225,65 |
| Непосредственно учитываемы расходы | $C_{\text{нр}}$ | 0 |
| Прочие расходы | $C_{\text{проч}}$ | 24658,41 |
| Итого: | | 271242,45 |

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 271242,45$ руб.

6.3 Расчет прибыли

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации (масштаб и характер получаемого результата, степень его определенности и коммерциализации, специфика целевого сегмента рынка и т.д.) может определяться различными способами. Если исполнитель работы не располагает данными для применения «сложных» методов, то прибыль следует принять в размере от 5 до 20 % от полной себестоимости проекта. В данном случае она составляет 54248,49 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

6.4 Расчет НДС

НДС составляет 20 % от суммы затрат на разработку и прибыли, т.е.

$$\text{НДС} = (271242,45 + 54248,49) \cdot 0,2 = 65098,19 \text{ руб.}$$

6.5 Цена разработки НИР

Цена равна полной сумме полной себестоимости, прибыли и НДС.

$$C_{\text{нир(кр)}} = 271242,45 + 54248,49 + 65098,19 = 390589,12 \text{ руб.}$$

6.6 Оценка экономической эффективности проекта

Основная цель ВКР – разработка системы управления, которая способна поддерживать заданное положение рабочего органа бурильной колонны при наклонно-направленном бурении глубоких скважин. Дать стоимостную оценку результата в текущей ситуации довольно трудно, так как требуется обширное количество труднодоступной информации. Поэтому можно дать только содержательную оценку достигаемого экономического эффекта.

При использовании системы управления положением рабочего инструмента бурильной колонны затраты, связанные с бурением наклонно-направленной скважины, снизятся, как и общее время бурения. При этом бурение наклонно-направленной части траектории занимает 50 % времени. Предполагается, что предлагаемая разработка позволит сократить временные затраты на 10 % при наклонно-направленном бурении, что в общем сократит время бурения на 5 %.

7 Социальная ответственность

Научно-исследовательская работа связана с разработкой системы управления, которая способна поддерживать положение рабочего органа бурильной колонны при наклонно-направленном бурении глубоких скважин. В качестве рабочего органа выступает шарошечное долото. Разработка направлена на потенциальных отечественных и зарубежных пользователей. К первой категории можно отнести таких крупных пользователей, как Газпром, Роснефть, Лукойл и другие. В качестве зарубежных можно выделить Shlumberger, Aidriller, Halliburton, ВР и другие нефтедобывающие компании.

Непосредственно сама научно-исследовательская выполнялась в офисном помещении компании ООО «Интеллектуальные системы бурения». Помещение оснащено персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ), устройствами для сканирования и печати, компьютерными столами, стульями, магнитно-маркерными досками, кондиционером. Помимо этого, в помещении установлены средства противопожарной защиты: противопожарная сигнализация, дымовые детекторы, а также огнетушители.

Характеристики офисного помещения:

- Длина рабочего помещения – 6 метров, ширина – 3 метра, высота – 3метра;
- Площадь помещения – 18 м²;
- Объем помещения – 54 м³;
- Присутствует естественная вентиляция: окно, дверь и вытяжное вентиляционное отверстие;
- В помещение имеется естественное освещение, а также установлено искусственное освещение.

В помещении оборудовано три рабочих места с ПЭВМ, что не противоречит санитарным нормам. Площадь рабочего места не превышает 4,5 м² для ПЭВМ с плоским экраном.

7.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Трудовой кодекс Российской Федерации регулирует отношения между работником и работодателем, которые касаются трудового распорядка, оплаты труда, защиты персональных данных, отдыха и отпусков, а также многого другого.

Согласно статье 91 ТК РФ, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

В процессе разработки системы управления продолжительность рабочего времени составила 40 часов в неделю, что соответствует 5-дневной рабочей недели с продолжительностью дня не более 8-ми часов. При этом в течении рабочего, согласно статье 108 ТК РФ, работнику предоставляется перерыв для отдыха или питания. Сам же перерыв в организации составил 1 час, что не превышает необходимую продолжительность, составляющую два часа, а также не является минимальной, составляющей 30 минут. Стоит учесть, что время перерыва для отдыха или питания не входит в рабочее время.

За выполненную работу работодатель или организация выплачивает заработную плату работникам, которая не может быть меньше прожиточного минимума. Размер платы в субъекте РФ устанавливается с учетом социально-экономических условий и величины прожиточного минимума трудоспособного населения в соответствующем субъекте [38].

7.2 Производственная безопасность

Основными факторами, которые оказывают существенное влияние на состояние здоровья исполнителя научно-исследовательской работы, являются физические и психофизиологические факторы. Вредные и опасные производственные факторы представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Вредные и опасные производственные факторы при выполнении работ

| Источник фактора, наименование видов работ | Факторы (по ГОСТ 12.0.003-2015) | | Нормативные документы |
|---|---|---|---|
| | Вредные | Опасные | |
| 1) Разработка системы управления, которая поддерживает заданное направление рабочего органа при наклонно-направленном бурении | 1) Повышенный уровень электромагнитных излучений; 2) Отклонение показателей микроклимата; 3) Недостаточная освещенность рабочей зоны; 4) Превышение уровня шума; 5) Монотонность труда; 6) Эмоциональные перегрузки. | 1) Нарушение правил электробезопасности | 1) СанПиН 2.2.4.3359-16; 2) СанПиН 2.2.4.548-96; 3) СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03; 4) СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03; 5) Р 2.2.2006-05; 6) Р 2.2.2006-05. |

7.2.1 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Разработка системы исполнителем, как оговаривалось ранее, ведется с помощью персонального компьютера. В процессе работы исполнитель подвергается вредному электромагнитному излучению, состоящему из электрической (E) и магнитной (H) составляющих, от компьютера. Это излучение сложно по спектральному составу, и оно изменяется в диапазоне частот от 0 до 1 ГГц.

Норма допустимых уровней напряженности полей и излучений регламентируется СанПиН 2.2.4.3359-16 и нормами «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы» [32]. По установленным нормам время пребывания исполнителя в рабочей зоне вычисляется по приведенной ниже формуле:

$$T = \left(\frac{50}{E} - 2 \right), \quad (83)$$

где T – допустимое время пребывания в электромагнитном поле при соответствующем уровне напряженности, ч;

E – напряженность электромагнитного поля, кВ/м.

Для того, чтобы исполнитель мог работать без средств защиты в течении 8-ми часов, необходимо, чтобы напряженность составляла до 5 кВ/м. Если же напряженность составляет от 20 до 25 кВ/м, то присутствие исполнителя в рабочей зоне без СИЗ сократиться до 10 минут.

На рабочем месте исполнителя, уровень напряженности электрический полей не превышает значения 4,5 кВ/м. Подставив это значение в формулу (83) получится:

$$T = \left(\frac{50}{4,5} - 2 \right) = 9,1 \text{ ч.}$$

Отсюда следует, что разрешено пребывать в рабочей зоне порядка 9 часов. Как говорилось ранее, рабочая смена длится 8 часов, следовательно, уровень электромагнитных излучений на рабочем месте находится в норме.

7.2.2 Отклонение показателей микроклимата

Под микроклиматом рабочего помещения понимают климат внутренней среды помещения, в котором находятся сотрудники в течение рабочего времени. Микроклимат определяется совокупностью показателей, действующих на организм работника. К таким показателям относятся: температура воздуха и поверхностей, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха и интенсивности теплового облучения.

Нормативные показатели микроклимата регламентируются СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [33]. Санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые значения показателей в рабочей зоне, что позволяет создавать благоприятные условия работы, которые соответствуют физиологическим потребностям организма человека. Для поддержания и доведения

микроклиматических показателей до нормативных значений проводятся мероприятия, которые обязательно должны включаться в комплексные планы предприятий по охране труда.

Выполняемая работа исполнителем, относится к категории *Ia*, так как она является мало подвижной и мало интенсивной. Вся работа проводится практически сидя с минимальными физическими напряжениями. В таблице 11 представлены оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений, а в таблице 12 – допустимые.

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часового рабочего дня при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах.

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часового рабочего дня. Они не вызывают повреждений или нарушений здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

Допустимые величины показателей микроклимата устанавливаются в случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономически обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные величины.

Таблица 11 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [34]

| Период года | Температура воздуха, °С | Температура поверхностей, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Холодный | 22-24 | 21-25 | 60-40 | 0,1 |
| Теплый | 23-25 | 22-26 | 60-40 | 0,1 |

Таблица 12 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений [34]

| Период года | Температура воздуха, °С | | Температура поверхностей, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с | |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---|---|
| | диапазон ниже оптимальных величин | диапазон выше оптимальных величин | | | для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более | для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более |
| Холодный | 20,0 - 21,9 | 24,1 - 25,0 | 19,0 - 26,0 | 15 - 75 | 0,1 | 0,1 |
| Теплый | 21,0 - 22,9 | 25,1 - 28,0 | 20,0 - 29,0 | 15 - 75 | 0,1 | 0,2 |

Измеренные показатели на рабочем месте исполнителя принимают нижеприведенные значения для холодного периода года:

- Температура воздуха 22,9 °С – оптимальное значение;
- Температура поверхностей 21,5 °С – допустимое значение;
- Относительная влажность воздуха 50 % - оптимальное значение;
- Скорость движения воздуха 0,1 м/с – оптимальное значение.

Все измеренные показатели удовлетворяют санитарным нормам для рабочих помещений.

7.2.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Низкая освещенность рабочей зоны в значительной степени влияет на органы зрения рабочего. Происходит снижение зрительной способности, происходит изменение настроения и общего самочувствия, что в свою очередь сказывается на эффективности выполнения работы. Нерациональная организация освещения является одной из причин травматизма на рабочем месте, так как ухудшение видимости объектов и неадекватное восприятие наблюдаемых предметов может быть спровоцировано плохо освещенными опасными зонами, слепящими источниками света, резкими тенями, световыми бликами, а также пульсацией световых источников.

В помещениях для работы с персональными компьютерами должно быть естественное и искусственное освещение. Нормативные показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения в соответствии с СанПиНом 2.2.1/2.1.1.1278-03 представлены в таблице 13 и таблице 14 [31].

Таблица 13 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения [31]

| Помещения | Рабочая поверхность и плоскость нормирования КЕО и освещенности и высота плоскости над полом, м | Естественное освещение | | Совмещенное освещение | |
|--|---|---|-----------------------|---|-----------------------|
| | | КЕО e_n , % | | КЕО e_n , % | |
| | | при верхнем или комбинированном освещении | при боковом освещении | при верхнем или комбинированном освещении | при боковом освещении |
| Помещения для работы с дисплеями, залы ЭВМ | Г-0,8 Экран монитора: В-1,2 | 3,5 - | 1,2 - | 2,1 - | 0,7 - |

Таблица 14 – Нормируемые показатели естественного, искусственного и совмещенного освещения [31]

| Искусственное освещение | | | | |
|-------------------------------|-----------|---------------------|------------------------------------|--|
| освещенность, лк | | при общем освещении | показатель дискомфорта М, не более | коэффициент пульсации освещенности, Кп, % не более |
| при комбинированном освещении | | | | |
| всего | от общего | | | |
| 500 | 300 | 400 | 15 | 10 |
| - | - | 200 | - | - |

На месте работы исполнителя использовано сочетание естественного и искусственного типа, т.е. освещение смешанного типа.

Естественным освещением помещение обеспечивается за счет оконных проемов, при этом освещение должно исходить с левой стороны от рабочего места. Для искусственного освещения используются светильники, которые размещаются в верхней зоне помещения и создают равномерное распределение освещенности на рабочих местах. Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть от 300 до 500 лк. При этом освещение не должно создавать бликов на экране. Светильники местного освещения должны иметь непросвечивающий отражатель с защитным углом не менее 40 градусов согласно СанПиНу 2.2.2/2.4.1340-03 [32].

Работа исполнителя предполагает длительные монотонные операции за компьютером с высоким уровнем зрительной работы, то есть различие объектов, размером от 3 до 5 мм. Такая работа относится к классу III и как говорилось ранее, норма освещенности рабочего места составляет от 300 до 500 лк. Стены в помещении имеют светлую поверхность, потолок побелен, а на полу расположен светлый линолеум, следовательно, коэффициенты отражения для стен – 50 %, потолка – 70 % и для пола – 30 %.

Естественное освещение в помещении осуществляется через один оконный проем размером 2х1.5 метра в наружной стене. Искусственный свет в

помещении представлен 2-мя светильниками, расположенными на потолке, типа ЛПО40 с 2-мя люминесцентными лампами холодного белого света ЛБ-40.

Помещение имеет размеры 6х3х3 м, световой поток используемых ламп равен 4200 лм.

Индекс помещения i определяется по нижеприведенной формуле [35]:

$$i = \frac{S}{h \cdot (a+b)}, \quad (84)$$

где S – площадь помещения, м²;

h – расстояние между светильником и горизонтальной поверхностью, на которой рассчитывается освещенность;

a – длина помещения, м;

b – ширина помещения, м.

Для рабочего места исполнителя, с высотой стола 0,8 м, индекс помещения равен:

$$i = \frac{18}{(3-0,8) \cdot (6+3)} = 0,91.$$

Для полученного индекса помещения, коэффициент использования помещения U составляет 40 % [26].

Освещенность E определяется:

$$E = \frac{\Phi \cdot U}{S \cdot k_3 \cdot 100}, \quad (85)$$

где Φ – общий световой поток, определяемый по количеству светильников, лампочек в этом светильнике и светового потока лампочки;

k_3 – коэффициент запаса, который показывает поправку на запыленность.

Запыленность рабочего места исполнителя меньше 1 мг/м³, поэтому коэффициент запаса принимает значение 1,2 [35]. Тогда освещенность E :

$$E = \frac{4200 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 40}{18 \cdot 1,2 \cdot 100} = 311 \text{ лк.}$$

Полученное значение освещенности рабочего места исполнителя полностью соответствует нормативным значениям.

7.2.4 Повышенный уровень шума на рабочем месте

Шумом называется совокупность различных звуков, возникающих в процессе производства и неблагоприятно воздействующих на организм работника, так как под воздействием шума нарушаются физиологические функции, уменьшается концентрация внимания, проявляется усталость и напряжение. Таким образом, шум уменьшает работоспособность и снижает производительность работника.

Для различных категорий рабочих помещений нормативные уровни шума регламентируются ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ [14]. Помещения для работы с ПЭВМ не могут граничить с помещениями в которых присутствует повышенный уровень шума. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБа. Оборудование, которое превышает нормативный уровень шума должно находиться вне помещения, где работа осуществляется на ПЭВМ.

В рабочем помещении исполнителя основными источниками шума являются ПЭВМ, принтер и кондиционер. С учетом максимального числа работников в смену уровень шума составляет 54 дБА, что незначительно превышает норму.

Для того, чтобы снизить шум, можно использовать нижеописанные рекомендации:

- Звукопоглощающие материалы для обшивки стен;
- Звукопоглощающие экраны и перегородки;
- Использование беруш;
- Проверка состояния оборудования. При не частой очистке ПЭВМ, устройство забивается пылью, что влияет на нагрев внутренних компонентов. В таком случае устройство будет генерировать повышенный шум, так как вентиляторы работают более эффективно;

- Через щели поступают внешние шумы с улицы и соседних рабочих помещений, поэтому необходима герметизация помещения.

7.2.5 Монотонность труда

Умственный труд подразделяется на три типа: сенсорный, сенсомоторный и логический. Работа исполнителя является умственным трудом, а сам труд – логическим. Он заключается в приеме информации и ее переработке, и выработке нестандартного решения. При такой работе большое значение имеет процесс мышления, выбор оптимального решения из ряда логических вариантов. Поиск решения связан с опытом, знаниями и особенностями нервной системы человека.

Умственный труд является напряженным, от чего страдают зрительные и слуховые анализаторы, центральная нервная система, в частности высшие психические функции, такие как память, мышление и воображение.

К факторам возникновения эмоциональных перегрузок можно отнести длительное эмоциональное напряжение, хроническую усталость, хроническое нарушение режимов труда и отдыха, социальные перемены, значимые жизненные трудности т.д.

Вследствие влияния таких факторов, у работника начинают проявляться последствия: снижения интереса к работе и работоспособности, проявление раздражительности и конфликтности, повышение количества ошибок в работе и психоэмоциональные сдвиги.

Для снижения эмоциональных перегрузок допустимо использовать следующие мероприятия:

- Умственные тренировки и повышение квалификации;
- Умеренная и постоянная производственная нагрузка;
- Улучшение культуры труда и быта;
- Правильное трудовое, психологическое и эстетическое воспитание;

- Развитие умения отвлекаться от причины стрессового состояния;
- Создание условий для возникновения положительных эмоций;
- Оптимальная организация отдыха.

7.2.6 Нарушение правил электробезопасности

Источниками электрической опасности являются электрические сети, электрифицированное оборудование и инструмент, вычислительная и организационная техника, работающая на электричестве. В связи с большим количеством электрических приборов и вычислительных машин на представленном рабочем месте, электробезопасность является важной составляющей производственной безопасности.

При работе с электрифицированными приборами необходимо соблюдать технику безопасности, которая представляет собой систему мероприятий и технических средств, направленных на предотвращение воздействий на работников вредных и опасных факторов.

В рабочем помещении может происходить накопление статического электричества, его разряды не представляют опасности для работников, но могут привести к проблемам с ПЭВМ. Чтобы снизить величины зарядов статического электричества покрытие полов в помещении выполняется из однослойного линолеума.

Опасность поражения электрическим током являются серьезной потенциальной проблемой, так как человеческие органы чувств не могут обнаружить наличие электрического напряжения на расстоянии.

Риск поражения электрическим током возрастает при следующих условиях: повышенная влажность, когда относительная влажность воздуха выше 75 %; высокая температура воздуха и поверхностей, более 35 °С; наличие токопроводящей пыли и токопроводящих полов; возможность одновременного

соприкосновения к заземленным металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Работа может проводиться исключительно в помещениях, исключаяющих повышенную опасность, однако, есть риск возникновения опасности другого рода:

- при прикосновении к токоведущим частям (во время ремонта ПЭВМ);
- при прикосновении к нетоковедущим частям, которые оказались под напряжением (при нарушении изоляции);
- при соприкосновении с полом или стенами, оказавшимися под напряжением (при нарушении электрической сети);
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках.

Представленное место работы исполнителя не относится к помещениям повышенной опасности. В помещении используются приборы, потребляющие напряжение 220 В переменного тока с частотой 50 Гц. Для предотвращения возникновения опасных ситуаций обязательны следующие меры предосторожности:

- перед началом рабочей смены необходимо убедиться, что выключатели и розетки закреплены и не имеют оголенных токоведущих частей;
- при обнаружении неисправности оборудования и приборов, необходимо сообщить ответственному лицу, не делая никаких самостоятельных исправлений;
- запрещено загромождать рабочее место лишними предметами.

7.3 Экологическая безопасность

Человечество всегда оказывает влияние на окружающую среду, на текущий момент влияние имеет катастрофические масштабы, так как

воздействие человека и его потребление ресурсов перешло на тот уровень, когда планета не способна воспроизвести столько ресурсов, сколько потребляет человечество. Такое отношение к планете привело к дефициту экосистем и экологическому кризису.

Наука не стоит на месте, развивается и представляет новые способы предотвращения и исправления экологических проблем. Защита окружающей среды требует полного перехода к безотходным и малоотходным производствам и технологиям, к правильной утилизации отходов. Для этого необходим комплекс технологических и организационных мероприятий, основанных на использовании современных научных достижений.

Утилизация компьютерной и организационной техники ограничено законодательно, так как в производстве такой техники используется большое количество материалов, способных нанести большой вред окружающей среде. Утилизация компьютерного оборудования происходит через обязательное извлечение компонент, их сортировку и последующую отправку для повторного использования. Такая утилизация обязательно производится на оборудованных полигонах с привлечением квалифицированного персонала.

Люминесцентные лампы являются одним из самых распространенным источником загрязнения ртутью, так как при неправильной утилизации ламп ртуть, находящаяся в них, попадает в почву, что очень опасно для планеты и для жизни людей. Правильной утилизацией люминесцентных ламп является передача лицензированным компаниям для переработки и вторичного использования сырья в качестве материала для производств.

Утилизация мусорных отходов, таких как бумажная макулатура, отходы от канцелярских принадлежностей, отходы от продуктов питания, личной гигиены, производится через сбор, обязательную сортировку и утилизацию. Отходы, которые можно использовать повторно, например, макулатуру, после сортировки отправляют на переработку через компании, занимающиеся сбором таких отходов.

Используя такую систему утилизации отходов работы можно реально уменьшить свое воздействие на окружающую среду, а также на собственное здоровье, так как качественная утилизация отходов исключает отравление опасными веществами и попадание тяжелых металлов в организмы.

7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайной ситуацией (ЧС) называется обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы или другого бедствия, которая может повлечь за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. ЧС для представленного рабочего помещения исполнителя является пожар. Данная ЧС может произойти в случае несоблюдения мер пожарной безопасности, нарушения техники использования электрических приборов и ПЭВМ, нарушениях разводки электрических сетей и ряда других причин.

Рабочее помещение исполнителя согласно Федеральному закону от 22.07.2013г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», можно отнести к категории В (пожароопасное) [41].

В качестве возможных причин возникновения пожара можно указать следующие причины:

- короткое замыкание;
- перегрузка сетей, которая ведет за собой сильный нагрев токоведущих частей и загорание изоляции;
- пуск оборудования после неквалифицированного ремонта.

Для предотвращения ЧС необходимо соблюдать правила пожарной безопасности, чтобы обеспечить состояние защищенности работников и имущества от пожара.

Для защиты от коротких замыканий и перегрузок необходимо правильно выбирать, устанавливать и использовать электрические сети и средства автоматизации.

Для предупреждения возникновения пожаров необходимо исключить образование горючей среды, следить за применением при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов.

Необходимо проводить следующие пожарно-профилактические мероприятия:

- организационные мероприятия, касающиеся технического процесса с учетом пожарной безопасности объекта (инструктаж персонала, обучение правилам техники безопасности, издание инструкций, плакатов, планов эвакуации);
- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию используемого оборудования (соблюдение эксплуатационных норм оборудования, обеспечение свободного подхода к оборудованию, поддержание исправности изоляции проводников);
- технические и конструктивные мероприятия, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов (соблюдение противопожарных мероприятий при устройстве электропроводок, оборудования, систем отопления, вентиляции и освещения).

Для повышения устойчивости рабочего помещения к ЧС необходимо произвести установку систем противопожарной сигнализации, реагирующих на дым и другие продукты горения, установку огнетушителей. Также, два раза в год проводить учебные тревоги для отработки действий при пожаре.

В представленном рабочем помещении исполнителя при входе представлен план эвакуации, установлена система противопожарной сигнализации. Помещение оборудовано углекислотными огнетушителями типа

ОУ-2 в количестве 2 штук на одну рабочую зону. В зоне досягаемости работниками находится электрощит, с помощью которого можно полностью обесточить рабочее помещение.

В случае возникновения возгорания, необходимо вызвать пожарную службу по телефону и сообщить место возникновения ЧС, предпринять меры по эвакуации работников в соответствии с планом эвакуации. При отсутствии прямых угроз здоровью и жизни произвести попытку тушения возникшего возгорания имеющимися углекислотными огнетушителями. В случае потери контроля над пожаром, необходимо эвакуироваться вслед за сотрудниками по плану эвакуации и ждать приезда специалистов пожарной службы.

7.5 Выводы

В заключении следует, что существенные нарушения по организации работы не нарушены. Поставленные требования и нормы безопасности соблюдены, а организационные вопросы по обеспечению рабочих условий подтверждены законодательно и не нарушают законодательный регламент.

Заключение

В процессе разработки системы управления траектории при наклонно-направленном бурении осуществлялся поиск информации по данной тематике. На основании полученной информации была поставлена следующая гипотеза – модель бурильной колонны можно представить, как двухмассовую упругую систему. Анализ этой гипотезы показал, что: при бурении глубоких скважин необходимо учитывать диссипативные силы, которые оказывают свое влияние на систему. Основным внешним возмущением является реактивный момент – он пытается развернуть буровую колонну.

Управление углом положения бурильной колонны осуществляется системой верхнего привода. Бурильная колонная представляет собой динамическую нагрузку привода. Привод обладает асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. В настоящее время управление приводом осуществляется преобразователем частоты.

Применение асинхронного двигателя с преобразователем частоты в системе недостаточно, так как динамические характеристики являются удовлетворительными. Для улучшения динамических характеристик был проведен синтез системы. Время переходного процесса сократилось в 3,72 раза.

Так как в реальной системе присутствует задержка сигнала, то в обратную связь системы было добавлено звено запаздывания. Система при этом потеряла устойчивость. Устойчивость системы была восстановлена благодаря уменьшению значения коэффициента передачи.

Исследования на компьютерной модели подтвердили работоспособность полученной системы управления.

Таким образом получена идеальная модель управления положением рабочего органа при наклонно-направленном бурении. В дальнейшем необходимо провести анализ полученной модели на других исторических данных, чтобы оценить ее адекватность и точность.

Список использованной литературы

- 1 FANDOM. Бурильная колонна, ее назначение. Элементы буровой колонны. [Электронный ресурс]: URL https://neftegaz.fandom.com/wiki/%D0%91%D1%83%D1%80%D0%B8%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0_%D0%B5%D0%B5_%D0%BD%D0%B0%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B_%D0%B1%D1%83%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B. (дата обращения 03.03.2020).
- 2 Neftegaz.ru. Роторы – Техническая библиотека [Электронный ресурс]: URL <https://neftegaz.ru/tech-library/burovye-ustanovki-i-ikh-uzly/141197-rotory/> (дата обращения 03.03.2020).
- 3 Raschet.info. Расчетные формулы основных параметров асинхронных двигателей [Электронный ресурс]: URL <https://raschet.info/raschetnye-formuly-osnovnyh-parametrov-asinhronnyh-dvigatlej/> (дата обращения 09.04.2020).
- 4 Studbooks.net. Повышение производительности электропривода механизма поворота [Электронный ресурс]: URL https://studbooks.net/1829417/matematika_himiya_fizika/obschie_svedeniya_ekskavatora (дата обращения 16.03.2020)
- 5 Studbooks.net. Синтез двухконтурной системы подчиненного регулирования [Электронный ресурс]: URL https://studbooks.net/1829424/matematika_himiya_fizika/sintez_dvuhkonturnoy_sistemy_podchinennogo_regulirovaniya (дата обращения 15.03.2020).
- 6 Studbooks.net. Структурные схемы объекта регулирования [Электронный ресурс]: URL https://studbooks.net/1829423/matematika_himiya_fizika/strukturnye_shemy_obekta_regulirovaniya (дата обращения 18.03.2020).

- 7 StudRef.com. Телеметрические системы [Электронный ресурс]: URL https://studref.com/454034/tehnika/telemetricheskie_sistemy (дата обращения 05.03.2020).
- 8 Блейз Е.С., Бродовский В.Н., Введенский В.А., Чемоданов Б.К., и др. Следящие приводы. Том 2. –М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 800с.
- 9 Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. –М: Academa, 2004. – 202с.
- 10 Булатов А.И., Проселков Е.Ю., Проселков Ю.М. Бурение горизонтальных скважин. Справочное пособие. –Краснодар: Совет.Кубань, 2008. – 424с.
- 11 Быков И.Ю., Заикин С.Ф., Перминов Б.А., Перминов В.Б., Полетаев С.В., Ягубов З.Х. Исследование структурной модели бурильной колонны // Научно-методический электронный журнал «Концепт». –2014. – Т. 20. –С. 2316-2320.
- 12 Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования: Учеб. Пособие для вузов. –М: Высш. шк., 2006. – 365с.
- 13 Горбачевский Н.И., Ганиев Р.Н. Электропривод в нефтехимических предприятиях. Учебно-методическое пособие. –Нижнекамск: НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2015. – 114с.
- 14 ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200118606> (дата обращения 27.04.2020).
- 15 Гурецкий Х., Пер. с польского Дмитриева А.Н. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. –М: «Машиностроение», 1974. – 328с.
- 16 Дорф Р., Бишоп Р., Пер. с англ. Копылова Б.И. Современные системы управления –М: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832с.
- 17 Епихин А.В. Технология бурения нефтяных и газовых скважин. Курс лекций [Электронный ресурс]: URL

https://portal.tpu.ru/SHARED/e/EPIKHIN/eng/Pedagogics/Tab/Lecture_TBNG_5.pdf (дата обращения 05.03.2020).

18 Задорожний Н.А. Элементы теории электромеханического взаимодействия в двухмассовых системах электропривода с упругими механическими связями. Учебное пособие по дисциплине «Теория электропривода» для студентов специальности «Электромеханические системы автоматизации и электропривод». Часть 1. –Краматорск: ДГМА, 2006. – 75с.

19 Калинин А.Г., Никитин Б.А., Солодкий К.М., Султанов Б.З. Бурение наклонных и горизонтальных скважин. –М: Недра, 1997. – 648с.

20 Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. –М: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288с.

21 Ключев В.И. Теория электропривода. –М: Энергоатомиздат, 2001. – 704с.

22 Мир знаний. Синтез систем подчиненного регулирования [Электронный ресурс]: URL <https://mirznanii.com/a/122120/sintez-sistem-podchinennogo-regulirovaniya/> (дата обращения 15.04.2020).

23 Музапаров М.Ж. Направленное бурение. Том 2. Безориентированная технология. Роторное бурение. –Алматы, 2005. – 209с.

24 Петрухин В.В., Петрухина Н.И. Бурильная колонна. Элементы бурильной колонны. Методические указания для практических занятий по дисциплине «Основы нефтегазопромыслового дела» для студентов всех форм обучения направления 130100.62 «Нефтегазовое дело» – Тюмень: Издательский центр БИК ТюмГНГУ, 2013. – 20с.

25 Петухов С.В., Кришьянис М.В. Электропривод промышленных установок. Учебное пособие. –Архангельск: С(А)ФУ, 2015. – 303с.

26 Пособие к МГСН 2.06-99. Расчет и проектирование искусственного освещения помещений общественных зданий. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200005932> (дата обращения 01.05.2020).

27 Пупков К.А., Егупов Н.Д., и др. Синтез регуляторов систем автоматического управления. Том 3. –М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616с.

28 Р 2.2.2006-05. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификации условий труда. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200040973> (дата обращения 27.04.2020).

29 Сайт для нефтяников. Типы КНБК, применяемые для бурения различных интервалов наклонно-направленной скважины. Принцип выбора КНБК [Электронный ресурс]: URL <http://www.megapetroleum.ru/typy-knbk-primenyaemye-dlya-bureniya-razlichnyx-intervalov-naklonno-napravlennoj-skvazhiniy-princip-vybora-knbk/> (дата обращения 25.05.2020).

30 Самохвалов М.А. Монтаж и эксплуатация бурового оборудования. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 312с.

31 СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901859404> (дата обращения 26.04.2020).

32 СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901865498> (дата обращения 26.04.2020).

33 СанПиН 2.2.4.3359–16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420362948/> (дата обращения 25.04.2020).

34 СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/901704046> (дата обращения 25.04.2020).

35 СНиП 23-05-95*. Естественное и искусственное освещение. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/871001026> (дата обращения 01.05.2020).

36 Соловьев В.А. Расчет характеристик трехфазного асинхронного двигателя. Методические указания к самостоятельной работе студентов по дисциплинам «Электротехника и электроника», «Основы электропривода». –М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 44с.

37 Степанов А.Г. Динамика машин. –Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 302с.

38 Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020). – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34683/ (дата обращения 25.04.2020).

39 Усольцев А.А. Электрический привод. Учебное пособие. –СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 238с.

40 Фащиленко В.Н., Ляхомский А.В. Управление электромеханическими системами горных машин. –М: Московский государственный горный университет, 2004. – 290с.

41 Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения 28.04.2020).

42 Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Часть 1. Учебное пособие для вузов. –Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. Ун-та, 1997. – 279с.

Приложение А (справочное)

Расчет электромеханических показателей двигателя постоянного тока

Постоянная времени якорной цепи:

$$T_{яц} = \frac{L_{яц}}{R_{яц}}. \quad (\text{П.1})$$

Передачный коэффициент по току якорной цепи:

$$k_{яц} = \frac{1}{R_{яц}}. \quad (\text{П.2})$$

Расчетное сопротивление всей якорной цепи двигателя:

$$R_{яц} = 2 \cdot R_{яо} + 2 \cdot R_{мп} + R_{ц} + 2 \cdot R_{о} + R_{сд}. \quad (\text{П.3})$$

Динамическое сопротивление тиристоров:

$$R_{о} = \frac{(0,2 \div 0,3) \cdot U_k \cdot m}{I_n}, \quad (\text{П.4})$$

где U_k - Падение напряжение на тиристоре, В; m - число пульсаций выпрямленного напряжения на периоде напряжения сети.

Активное сопротивление сглаживающего дросселя:

$$R_{сд} = \frac{2 \cdot U_n \cdot (0,005 - 0,01)}{I_n}, \quad (\text{П.5})$$

где U_n - номинальное напряжение двигателя, В.

Сопротивление щеточного контакта:

$$R_{ц} = \frac{2}{I_n}. \quad (\text{П.6})$$

Сопротивление якорной цепи отдельного двигателя, приведенное к рабочей температуре:

$$R_{яо} = \alpha_t (R_{я} + R_{он} + R_{ко}) + R_{ц}, \quad (\text{П.7})$$

где $R_{я}$ - сопротивление якоря двигателя, Ом; $R_{он}$ - сопротивление дополнительных полюсов, Ом; $R_{ко}$ - сопротивление дополнительной обмотки, Ом.

Активное сопротивление трансформатора:

$$R_{mp} = \alpha \cdot R_{\phi.mp.}, \quad (\text{П.8})$$

где α - число обмоток трансформатора, $R_{\phi.mp.}$ - активное сопротивление фазы вторичной обмотки трансформатора, Ом.

Коэффициент двигателя:

$$c_{\phi} = \frac{2 \cdot U_n - 2 \cdot R_{яд} \cdot I_n}{\omega_n}. \quad (\text{П.9})$$

Индуктивность цепи выпрямленного тока:

$$L_{\text{нц}} = \frac{l_n \cdot E_{\alpha 0}}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot m \cdot i_n \cdot I_n}, \quad (\text{П.10})$$

где i_n - относительная величина действующего значения первой гармоники тока нагрузки (0,02-0,05), А; l_n - относительная величина действующего значения первой гармоники выпрямленного напряжения при max угле управления, А; $E_{\alpha 0}$ - максимальное значение ЭДС вентильного преобразователя при угле управления α .

Приложение Б

(обязательное)

Структурные схемы системы управления положением рабочего инструмента с двигателем постоянного тока и с асинхронным двигателем

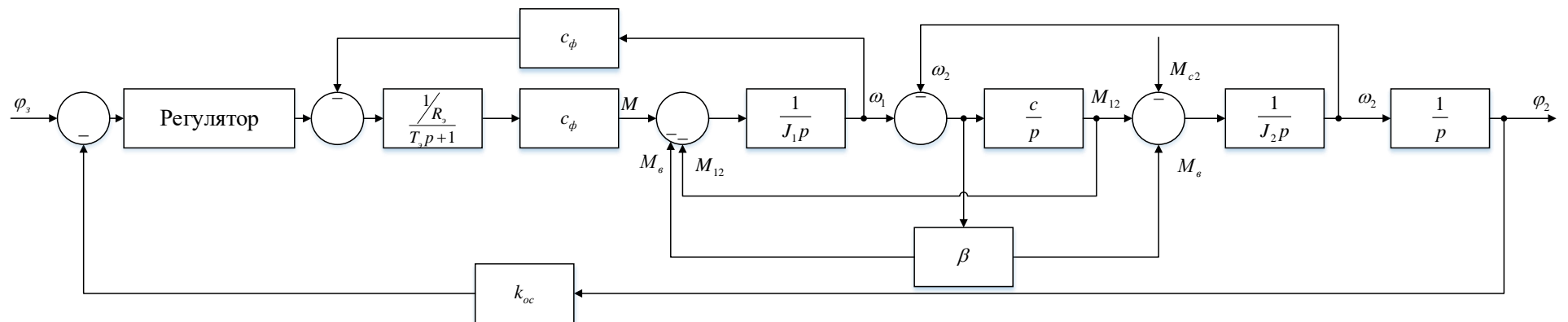


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления положением рабочего инструмента с двигателем постоянного тока

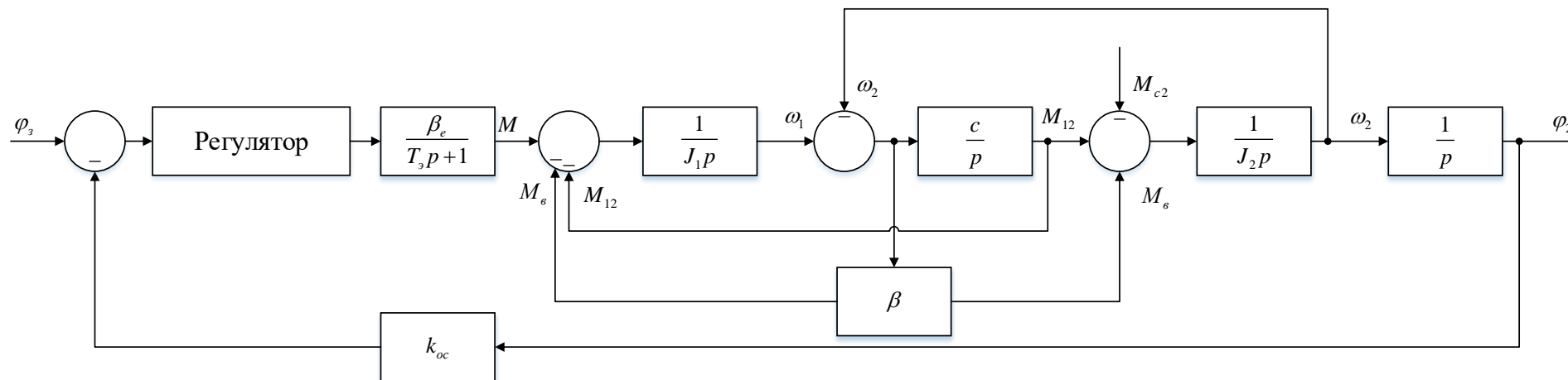


Рисунок 2 - Структурная схема системы управления положением рабочего инструмента с асинхронным двигателем

Приложение В

(справочное)

Линейный график работ

| Этап | Н | И | Март | | | Апрель | | | Май | | | Июнь | |
|------|------|-------|------|----|----|--------|----|----|-----|----|----|------|-----|
| | | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 |
| 1 | 3,9 | – | ■ | | | | | | | | | | |
| 2 | 2,84 | 0,71 | ■ | ■ | | | | | | | | | |
| 3 | 5,2 | 12,18 | | ■ | ■ | | | | | | | | |
| 4 | 0,53 | 4,79 | | | ■ | | | | | | | | |
| 5 | 0,35 | 3,19 | | | | ■ | | | | | | | |
| 6 | 3,73 | 3,73 | | | | ■ | | | | | | | |
| 7 | 2,46 | 13,88 | | | | ■ | | | | | | | |
| 8 | – | 18,65 | | | | | ■ | ■ | | | | | |
| 9 | – | 10,66 | | | | | | ■ | ■ | | | | |
| 10 | – | 11,8 | | | | | | | ■ | ■ | | | |
| 11 | – | 11 | | | | | | | | ■ | | | |
| 12 | 0,83 | 7,46 | | | | | | | | | ■ | | |

HP – ■; И – ■

Приложение Г
(справочное)

Literature review

Студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------|---------|------------|
| 8ТМ81 | Чернов А.С. | | 03.06.2020 |

Руководитель ВКР:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|--|---------------|---------------------------|---------|------------|
| Профессор- консультант ОАР ИШИТР | Гончаров В.И. | д.т.н профессор | | 03.06.2020 |

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-------------------|----------------|---------------------------|---------|------------|
| Ст. преподаватель | Горбатова Т.Н. | | | 03.06.2020 |

Introduction

Nowadays the main idea of the oil and gas industry is improving the efficiency and quality of drilling. This task can include both an increase in high-speed drilling performance and an improvement in the quality of drilling operations. The priority is horizontal directional drilling (HDD) boreholes.

Deviations associated with increased depth during drilling or with other reasons entail serious violations of the exploration grid and field elaboration. Shafts that have displacements concerning the plan frequently have ledges and sharp bends, which affect the further results of wiring, fastening, and maintenance. Barrel curvature can complicate the drilling process so much that it will have to be stopped before reaching the specified depths.

Conducting boreholes in a given direction will permit undesirable sequelae, connected with their contortion, as well as increase speed drilling and reduce spendings.

Today, the principle of wellbore management consists of the exact definition of the relative barrel position from the entry point for direction to a predetermined exit point. Control is carried out manually by the driller. Control criterion are calculating using basic measurements [2]:

- Pipe length;
- Inclination;
- Azimuth;
- Tool face.

The position of rejector allows defining tool face. It can be maintained in a specific area or completely changed.

Errors may occur during borehole trajectory control, both in measured data and in control. Driller makes a control decision according to indications. The quality and effectiveness of the work depends a lot on his work experience, but this does not preclude erroneous decisions during drilling.

Telemetry systems

Telemetry systems are used for receiving information about the toolpath, drilling modes, technical condition of boreholes, etc. The main component of such systems is the communication channel of devices located at a depth with devices on the surface.

Telesystems possess three types of communication channels for transmitting information from sensors located in the layout of the bottom-hole assembly(BHA) of the drill string, to surface equipment, namely [5]:

- Electric lines;
- Hydraulic channel;
- Electromagnetic field.

Electric lines have a large number of advantages: speed, great information content, noise resistance, fault-tolerance, and several others. However, this type of channel has not received much popularity, syne the presence of cable in the drill string produces drilling severities: it is necessary to protect against mechanical damage and also lay the cable. These take a fair amount of time [6].

Information transfer using an electromagnetic field is devoided of the above disadvantages. This type of passing the information is easy to manage, has the inverse coupling. It is resistant to abrasive drilling mud. The disadvantages are limited by drill-pipe material range as well as the complexity of the control block rendering [4].

The most common communication channel is the hydraulic channel. The information is going through the drilling mud, which reduces the cost of organizing a communication channel. One more advantage is the channel range. A limited amount of transmitted information in real-time is the biggest disadvantage.

To transmit data using drilling mud usually use one of the implemented on the waveform methods:

1. Positive pulse pressure;
2. Negative pulse pressure;

3. Simple harmonic motion.

The first is based on the use of a device that reduces the bore of the pipe in the drill string, which allows us to create positive pressure pulses. Information is transferred by triggering device a certain number of times with a concrete time interval. This creates a set of pressure pulses that are recognized and decoded on the surface.

The negative pulse pressure method has a different mechanism: the valve in the open position connects the space inside the tube and beyond. This valve creates a negative impulse due to the flow of a small amount of drilling mud beyond the drill pipe. Information is generated and transmitted similarly to the first method. The final step is decoding.

The last method is less common, as it is difficult to implement, in comparison to the above. A slotted disk is mounted on an engine disposed in the downhole portion. The second disk is fixed opposite the previous one. Permanent, undamped pressure changes are creating during engine operation, which leads to the appearance of an undamped harmonic wave. To form an information block, it is necessary to reduce the engine speed during the information transmission. The surface equipment detects these changes and decodes the message.

One of the systems that use mud to transmit information is a foreign system measurement while drilling (MWD) in real-time. The system includes a survey tool that allows us to measure zenith and azimuth, in addition to providing orientation of the working tool at the bottom. The average time for such systems to transmit information about the position of the drilling bit from the inclinometer to devices on the surface is 15-30 seconds.

Sensors included in the MWD system allow us to measure zenith and azimuth angles, as well as provide an orientation of the tool face. Accelerometers and magnetometers are used there. The first sensors measure the parameters of the Earth's gravitational field, the second - the magnetic field. Information on the orientation of the sensors concerning the direction of the fields, and the directions themselves. Allows

us to establish the orientation of the working body, as well as the azimuth and zenith angles of the wellbore.

Drilling Measurement System

Modern drilling rigs give the possibility of determining the location, depth, or orientation of the working tool. Accurate tracking path allows us to complete the drilling. It is accomplished by periodically reading the inclination and azimuth of the drill string. There are three types of sensors for these purposes:

- Electronic beacon systems (walkover);
- Inertial navigation systems;
- Combination magnetometer-accelerometer.

Beacon systems consist of a transmitter, a receiver, and a remote monitor, which is near the driller. A battery powers the transmitter, which is located at the bottom of the drill string. The main task of this device is a continuous transfer of a magnetic signal. A receiver needs to measure the signal strength, which generates a transmitter. The information obtained by this method is used to determine the position and orientation of the tool face. This information is also stored in the system for further profiling of the path of a bore. The main drawback of such systems is the inability to use in drilling deeper than 100 feet.

Boreholes that are intended to produce oil products are known to have a depth of more than 100 feet. Consequently, the use of electronic beacon systems is impossible.

The structure of the inertial navigation system includes gyroscopes and accelerometers for measuring the azimuth and inclination of the tool face. The gyros are calibrated according to the true north of the Earth before drilling. If a deviation from the true north is observed during drilling, a signal is sent to the operator's computer. There the azimuth, tilt, and position of the working tool are calculated. Inertial systems are mainly used for calibration, as they are too sensitive and expensive.

Combination systems have three magnetometers and three accelerometers. Magnetometers measure the position of the tool face in the Earth's magnetic field, and accelerometer - tilt position in the gravitational field of the Earth. Information from the sensors is sent to the operator's computer via a wired line. The calculation tool face position and orientation occurs on the computer of the driller.

Typically, combined systems are susceptible to magnetic influences from metal objects that are near the sensors, as well as from power lines. Some systems are protected against this kind of impact [3].

Existing solutions

Automated technology to optimize directional drilling

The structure of the BHA includes a bent sub, allowing to produce borehole bending. This bend is necessary to transfer the borehole from a vertical section to a horizontal one. Consequently, the bent sub is intended to control the path. During the HDD, it is necessary to perform operations that include a large number of processes. Half of these processes are manual and controlled by the driller. Drilling efficiency depends on the rig skill level, and largely depends on driller's experience.

Drilling using only the downhole motor is called sliding, as the drill string moves along the borehole without rotation. In this case, longitudinal drag occurs. To reduce the influence of longitudinal drag, we use various technical methods and procedures. One of them is oscillation. This procedure involves the rotation of the drill pipe to the left/right by the Top Drive system.

In the drilling, one of the most important indicators is the torque of the top drive system. The transition from rotary drilling to sliding is carried out with the required torque. The tool face position attained by additional rotation to the left/right.

Reactive torque appears in the process of sliding. It is transmitted up the drill pipe, trying to unwind it, overcoming the drag. An automated system has been developed to prevent this phenomenon. It searches for torque during oscillation.

System performance depends on the following indicators:

- Top Drive torque;

- Standpipe pressure;
- Tool face angle.

The system itself is a software that collects the necessary parameters for regulation. Field tests have shown that this system is effective. Moreover, the system does not require additional equipment, which improves the efficiency and quality of drilling.

Automatic control of the directional drilling

The structure of the presented system for predictable control of the tool face angle includes: programmable logic controller(PLC), sensors, control block, and operator panel. PLC allows us to control the variables of the Top Drive system in real-time. While the sensors measure the torque value and the shaft position of the top drive system using an internal encoder.

Using the obtained values control is carried out. It is associated with the acceleration or deceleration of the Top Drive system rotation speed. The accident leads to deceleration which result in a stop and automatic brake of the Top Drive system.

Initial tests showed that to improve the quality of control it is required to use the data of the tool face position in real-time and to conduct further modeling on a PLC.

The use of PLC there allows us to save information about the tools used for further analysis. The data also serves as the material for researches, as well as for searching patterns in previously stored information.

The main feature of the system is that it can conduct an assessment on the current indicator and derive the resulting direction of the tool face. It also provides an automatic mode for controlling the position of the working tool. This means that the system can work without a driller. However, if there is a situation when human participation is required, the system asks the confirmation from the driller. So the final decision is made by the specialist.

Field tests have shown that the system is efficient. In some areas of sliding experienced drillers have had difficulties in control during the process of drilling. The

system has assumed primary control of multiple slide intervals. However, the data obtained from the experiment is not sufficient to conclude the effectiveness of the tool face position control during sliding [1].

References

- 43 Boone S.G. Applying Computer Based Precision Drill Pipe Rotation and Oscillation to Automate Slide Drilling Steering Control. In: SPE 148192-MS, Canadian Unconventional Conference, Calgary, 15 – November 2011.
- 44 Horizontal Directional Drilling Training Manual. –Texas: Horizontal Drilling International, 1999 – 188p.
- 45 Willoughby D.A. Horizontal Directional Drilling. Utility and pipeline applications. –New York: The McGraw-Hill, 2005. – 267p.
- 46 StudRef.com. Телеметрические системы [Электронный ресурс]: URL https://studref.com/454034/tehnika/telemetricheskie_sistemy (дата обращения 05.03.2020).
- 47 Булатов А.И., Проселков Е.Ю., Проселков Ю.М. Бурение горизонтальных скважин. Справочное пособие. –Краснодар: Совет.Кубань, 2008. – 424с.
- 48 Епихин А.В. Технология бурения нефтяных и газовых скважин. Курс лекций [Электронный ресурс]: URL https://portal.tpu.ru/SHARED/e/EPIKHIN/eng/Pedagogics/Tab/Lecture_TBNG_5.pdf (дата обращения 05.03.2020).