

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ФАМ ТХАНЬ ЛИЕМ

**Система управления буровым агрегатом с нейросетевым каналом
настройки режимов функционирования**

**Специальность: 2.3.1. Системный анализ, управление
и обработка информации, статистика**

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент Акименко Татьяна Алексеевна

г. Тула, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БУРОВЫМИ АГРЕГАТАМИ	11
1.0. Введение	11
1.1. Анализ существующего бурового оборудования, как объектов управления	11
1.2. Общая структура ручного управления буровым агрегатом	18
1.2.1. Системы ручного управления	19
1.2.2. Полуавтоматическое	20
1.2.3. Автоматическое	20
1.2.4. Характеристики систем управления	23
1.3. Элементы системы управления буровым агрегатом	26
1.3.1. Объект управления	26
1.3.2. Управление механизмом вращения	27
1.3.3. Управление подачей бура	30
1.3.4. Регуляторы	31
1.3.5. Оценка существующей системы управления режимами бурения	37
1.4. Нейронные сети	39
1.5. Выводы	41
2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЗЛОВ И БЛОКОВ БУРОВОГО АГРЕГАТА	43
2.0. Введение	43
2.1. Состояние полиспастной системы	43
2.2. Модель трехфазного асинхронного привода с частотным управлением	51
2.3. Модель гидронасоса	54
2.4. Модель линейного гидропривода	63
2.5. Модель процесса бурения	69
2.6. Выводы	72

3. КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО БУРОВОГО АГРЕГАТА С ЦИФРОВЫМ КОНТРОЛЛЕРОМ	73
3.0. Введение	73
3.1. Буровой агрегат как объект управления	73
3.1.1. Взаимосвязь управляемых узлов в буровом агрегате	73
3.1.2. Структура гидравлической трансмиссии	74
3.1.3. Структура полиспада, как вязкоупругого передаточного звена	79
3.1.4. Структура взаимодействия бура и грунта	80
3.2. Общая структурная схема бурового агрегата СБШ-250МН-32Т	81
3.2.1. Работа агрегата в режиме бурения	82
3.2.2. Работа бурового агрегата в режиме поднятия/опускания бура	84
3.3. Модель цифровой системы управления	85
3.4. Устойчивость цифровой системы управления	96
3.4.1. Устойчивость системы без учета задержек по времени	96
3.4.2. Устойчивость системы с задержками по времени	98
3.5. Метод оценки времени задержки на принятие решения при цифровом управлении	99
3.6. Структура цифровой системы управления	104
3.7. Выводы	109
4. ЦИФРОВОЙ РЕГУЛЯТОР НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	110
4.0. Введение	110
4.1. Цифровой регулятор на основе нейронной сети	111
4.2. Цифровой контроллер с нейронной сетью	113
4.3. Нейронная сеть управления буровым агрегатом	117
4.4. Экспериментальное исследование предложенных методик управления	118
4.6. Выводы	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	133
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	136
ПРИЛОЖЕНИЯ	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Жесткая конкуренция на рынке буровых агрегатов и наличие готового оборудования среднего уровня производительности предопределяет поиск путей повышения эффективности процесса бурения, как за счет внедрения в установки новых узлов и блоков (экстенсивный путь развития), так и за счет сокращения времени на подготовительно-заключительные операции (интенсификация эксплуатации оборудования). В существующей структуре бурового агрегата СБШ-250-МН-32Т существуют узел, а именно линейный гидропривод, в котором для управления реверсом хода штока необходимо перераспределить ток рабочей жидкости из одной рабочей полости в другую, что приводит к возможности появления гидравлического удара, кавитационных явлений, и в конечном итоге к увеличению времени выхода на режим. В то же время, вследствие изменения механических характеристик грунта необходимость смены направления приложения продольной силы, формирующей величину подачи инструмента, может возникать по ходу бурения одной и той же скважины. Поэтому схема включения линейного гидропривода в гидравлическую трансмиссию не является рациональной.

Замена типа гидропривода, задача эффективного использования этого инженерного решения приводит к необходимости использования нового подхода к управлению буровым агрегатом, при котором оценка механических характеристик грунта будет производиться с помощью системы искусственного интеллекта, и в соответствии с этой оценкой будут настраиваться параметры блоков системы управления, обеспечивающие обратные связи управления отдельными узлами и блоками.

С другой стороны, буровой агрегат представляет собой достаточно сложный комплекс, узлы и блоки которого взаимосвязаны. Поэтому для оптимальной настройки параметров системы управления необходимо создание виртуального агрегата (цифрового двойника) объекта управления. Настройка

параметров при этом должна производиться по сравнению работы реального механизма при реальном бурении с виртуальным механизмом при виртуальном бурении.

В процессе бурения скважин различной глубины и диаметра, при различных значениях величины подачи инструмента параметры комплекса меняются в весьма широких пределах, начиная от значений, обеспечивающих абсолютную устойчивость, и заканчивая значениями, при которых устойчивость функционирования нарушается. Несмотря на широкий диапазон изменения параметров, интеллектуальная система управления должна выполнять функции получения первичной информации об объекте управления, обработку и оценку параметров бурения, в зависимости от состояния грунта, и на основании анализа результатов обеспечивать выбор законов управления, оптимальным образом обеспечивающих требуемые параметры бурения. Проблемы проектирования подобных систем решены далеко не полностью. В частности не решена проблема выбора линейного гидропривода, отсутствует полная модель процесса бурения, отсутствуют методы использования этой модели в нейронной сети. Указанное обстоятельство определяет актуальность темы диссертации.

Объектом исследования диссертационной работы является система управления буровым агрегатом СБШ-250-МН-32Т, включающая контуры управления отдельными узлами и блоками бурового агрегата и систему настройки узлов и блоков на основании нейронной сети.

Предметом исследования диссертации работы являются метод настройки системы управления с использованием сравнения параметров бурения, получаемых на реальном и виртуальном (цифровой двойник) агрегатах.

Проведенные исследования основаны на теориях управления, нейронных сетей, гидропривода, теоретической механики и электромеханики. В теорию управления сложными системами значительный вклад внесли В.А. Бесекерский, С.Л. Зенкевич, Н.Н. Макаров, Е.П. Попов, Н.В. Фалдин, С.В.

Феофилов, Е.И. Юревич, А.С. Ющенко, и др. Использованию нейросетей при управлении объектами посвящены работы зарубежных и российских ученых: М.В. Бураков, А.И. Галушкин, Х. Дай, Д.А. Дзюба, В.М. Лохин, И.М. Макаров, М. Морари, В.А. Терехов, С. Чен, А. Н. Чернодуб, и др.

Из всех существующих подходов к разработке систем управления буровыми агрегатами наиболее продуктивным представляется подход, основанный на *аналитических методах* математического моделирования, что позволяет целенаправленно планировать будущие свойства разрабатываемой динамической системы. Для этого в диссертации использованы: теория управления, теория нейронных сетей, теоретическая механика, теория гидропривода.

Цель диссертационной работы состоит в разработке методов построения систем управления буровым агрегатом, осуществляющих оценку характеристик функционирования системы в целом и производящих настройку регуляторов узлов и блоков таким образом, чтобы эти характеристики были близки к оптимальным значениям.

Задачи исследований.

1. Разработка функциональной схемы системы управления буровым агрегатом СБШ-250МН-32Т, включая функциональную схему механической, гидравлической конструкции и приводов рабочего органа.

2. Построение аналитических математических моделей узлов и блоков бурового агрегата, полиспаста и гидравлической трансмиссии как объекта управления.

3. Разработка упрощенной модели взаимодействия бурового агрегата и грунта.

4. Объединение моделей узлов и блоков в единую систему и формирование обобщенной структурной схемы бурового агрегата, как многоканального объекта с перекрестными связями между каналами.

5. Формирование модели цифрового регулятора с учетом его реальных временных характеристик

6. Разработка цифрового регулятора с нейросетевым каналом настройки режимов функционирования.

7. Апробация предложенных методов на задачах практического проектирования системы управления буровым агрегатом.

На защиту выносятся следующие положения, обладающие **научной новизной**:

1. Модель бурового агрегата как объекта управления, отличающаяся от известных тем, что в нее включено описание механической связи между узлами вращения и продольной подачи бура, возникающей за счет силового воздействия грунта на инструмент, что позволяет использовать ее при решении задачи настройки нейронного регулятора.

2. Характеристическое уравнение замкнутой многосвязной системы управления, отличающееся от известных тем, что в него включены задержки по времени, вносимые цифровым регулятором, что позволяет повысить точность модели управления и учесть временной фактор при конструировании нейросетевого регулятора.

3. Структура системы управления буровым агрегатом, включающей каналы управления узлом вращения бура и узлом его продольной подачи, отличающаяся от известных тем, что в нее включен нейросетевой блок настройки параметров каналов управления, что позволяет адаптировать режим бурения к текущим физико-механическим свойствам грунта.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные в диссертации методы ориентированы на использование при проектировании реальных систем управления как вновь разрабатываемого, так и модернизируемого бурового оборудования, что позволяет повысить эффективность их практического использования и сократить сроки разработки их систем управления.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается результатами моделирования в среде МАТЛАБ.

Реализация и внедрение результатов. Предложенные в диссертации методы будут использоваться в Институте горной науки и технологии (VINACOMIN-INSTITUTE OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY, Hanoi, Vietnam).

Ряд теоретических положений внедрен в учебный процесс Тульского государственного университета на кафедре «Промышленная автоматика и робототехника» в лекционных курсах по дисциплинам: «Проводы роботов и робототехнических систем», «Управление роботами и робототехническими системами».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. Научно-практические конференции профессорско-преподавательского состава Тульского государственного университета, Тула, 2018 - 2023 гг.

2. Всероссийская научно-техническая конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения лауреата Государственной премии СССР, доктора технических наук, профессора Дмитриева Льва Борисовича, Тула, 2023 г.

3. XVII международная научно-техническая конференция «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений» (РАСПОЗНАВАНИЕ — 2023) г.Курск, 2023 г.

4. V Всероссийской научно-практической конференции «Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, 2023 г.

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, включенных в список литературы, в том числе: 4 статьи в журнале, рекомендованном ВАК РФ, 2 статьи, представляющих материалы конференций различного уровня и 7 статей в межвузовском сборнике.

Краткое содержание диссертации.

Во введении показана актуальность выбора темы диссертационной работы, охарактеризован объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, дано краткое изложение результатов по основным разделам.

В первом разделе дан обзор существующих буровых агрегатов, а также технических решений, используемых при проектировании систем управления ими. Приводится существующая функциональная схема системы управления буровым агрегатом СБШ-250-МН-32Т. Показана низкая эффективность существующей системы ручного управления агрегатом, связанная с ограниченными возможностями по регулированию давления и расхода рабочей жидкости в напорной магистрали гидравлической трансмиссии, и недостаточным объемом получаемой информации о состоянии бурового агрегата. Предложено повысить управляемость бурильного агрегата за счет замены гидроцилиндров одностороннего действия на гидропривод двухстороннего действия с регулируемыми клапанами. Кроме того, для повышения объема информации о состоянии бурового агрегата предложено использовать сигналы, описывающие поступательное движение бура, а также текущие потери энергии при проходке. Поставлена задача проектирования системы управления буровым агрегатом с использованием нейронной сети для настройки параметров каналов управления угловой скоростью и подачей инструмента в процессе бурения.

Во втором разделе построена модель бурового агрегата как объекта управления, что необходимо для настройки нейросетевого блока при разработке системы управления. Буровой агрегат, как объект управления, разделяется на следующие относительно независимые узлы: полиспастная система, приводящая в движение линейным гидроприводом, гидравлическая трансмиссия подачи, включающая трехфазный асинхронный электродвигатель с частотным регулированием и гидронасос, нагруженный на линейный гидропривод, а также узел вращения бура с двигателем постоянного тока. Из модели насоса и линей-

ного двигателя с регулируемыми клапанами получена линейная модель в отклонениях гидротрансмиссии. Получено уравнение, описывающее узел вращения при бурении скважины в грунте с заданными механическими параметрами.

В третьем разделе разработаны структурные схемы бурового агрегата СБШ-250МН-32Т как объекта управления. Разработана методика оценки устойчивости замкнутой цифровой системы управления по критерию Рауса-Гурвица, которая предполагает получение инверсного характеристического уравнения системы, разложение комплексных экспонент, входящих в характеристическое уравнение, описывающего цифровую систему, в ряд Маклорена, оценку знаков коэффициентов полинома, и в частности коэффициента при первой степени инверсной комплексной переменной. Разработан метод оценки времени задержки на принятие решения при цифровом управлении, который заключается в том, что управляющий алгоритм представляется как полумарковский процесс, состояния которого являются операторами ввода-вывода алгоритма, полумарковская матрица, описывающая процесс, преобразуется в соответствии с решаемой задачей определения временного интервала, и по преобразованной матрице оценивается плотность распределения времени между двумя заданными транзакциями.

В четвертом разделе решена задача повышения эффективности управления буровой машиной СБШ-250МН-32Т за счет введения в структуру контроллера нейронного регулятора, который используется в режиме настройки параметров основных контуров управления. Разработана структурная схема регулятора цифрового контроллера с элементами искусственного интеллекта, которая позволяет производить обработку значительных объемов информации по достаточно сложным алгоритмам и реализовать оптимальные режимы бурения. Представлена апробация предложенных методов на задачах практического проектирования системы управления буровым агрегатом.

В заключении сделаны выводы по работе в целом, а также указаны достижения, сделанные в результате решения поставленных задач.

Приложения содержат акты внедрения.

1. АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БУРОВЫМИ АГРЕГАТАМИ

1.0. Введение

Повышение эффективности использования бурового оборудования связано, во-первых, с уменьшением времени его простоя при проведении подготовительно-заключительных операций, а во-вторых, с выбором рациональных режимов проходки скважин в процессе их бурения, адаптированных к характеру и механическим свойствам грунтов. Это предполагает внедрение в структуру буровых агрегатов систем управления, обеспечивающих, в первом приближении, поддержание выбранных человеком-оператором режимов проходки, а в более технологичном случае, как автоматический выбор режимов проходки, так и адаптацию режимов к меняющимся механическим свойствам грунта. Поэтому определяющим фактором технического развития бурового оборудования необходимо признать переход на качественно новый уровень его эксплуатации с опорой на современные цифровые системы управления.

1.1. Анализ существующего бурового оборудования, как объектов управления

Рассмотрим конструкции и технические характеристики некоторых из существующих буровых агрегатов. [13, 17, 21, 68, 74, 95, 116, 124, 168-180]. Наибольшее распространение получили модели: буровые агрегаты УБТ, СБШ, УРБ, МБШ, ПБУ, ГБУ отечественного производства, а также техника зарубежных компаний XCMG XZ230E, DITCH WITCH (Китай, США).

Одной из востребованных моделей в мире является буровой агрегат XCMG XZ230E (Китай) (рис.1.1) [179], предназначенный для горизонтального бурения для сооружения подземных коммуникационных сооружений до нескольких километров в длину. Допустимый диаметр скважины составляет до 1,2 метра. Проведение предварительного мониторинга процесса бурения позволяет задать требуемые характеристики. Оборудование XCMG позволяет производить бурильные работы в условиях опасной, или другой специфической местности: мосты, ж/д объекты, участки установки ЛЭП, автомагистрали с оживленным движением, городские участки с высокой плотностью застройки,

близкое нахождение нефте- и газопроводов, участки местности с оврагами, парками, лесами и водоемами.

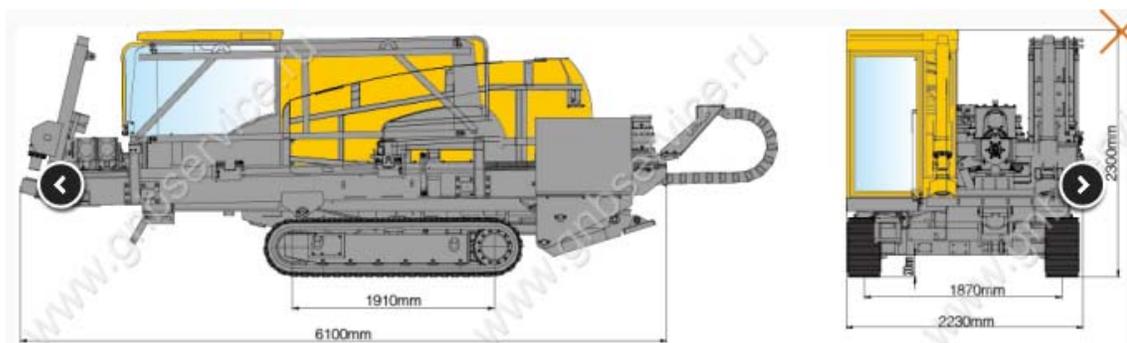


Рис. 1.1. Буровой агрегат XCMG XZ230E

Оборудование для горизонтально направленного бурения марки DITCH WITCH [169], выпущенное в США (рис. 1.2) представлено 10 моделями с различными характеристиками для монтажа трубопроводов различных диаметров и энергосетей. Модельный ряд буровых установок дополняется системами подготовки буровых растворов, установками управляемого прокола, штангами и коронками. Установки эксплуатируются с буровыми элементами диаметром до 100 см и тяговым усилием до 45 000 кг. Данные модели предназначены для бурения в различных условиях: плотной городской застройки, тяжелых скальных грунтах, вязких почвах и т.д. Оборудование для бурения DITCH WITCH производится с применением инновационных разработок для повышения эффективности и комфорта работ.



Рис. 1.2. Установка ГНБ Ditch Witch JT922

Установка УБГ-Л-20 "МАНГУСТ" [178], производства России (рис. 1.3) предназначена для бурения инженерных скважин в породах I-XII категории по буримости, в частности, для бурения под анкера, производства буроинъекционных и буронабивных свай, водопонижающих скважин и других работ в стесненных условиях закрытых корпусов различных зданий и на открытых площадках в условиях умеренного макроклиматического района. Область применения: анкера; буроинъекционные сваи; инженерно-геологические изыскания; бурение скважин на воду; инъекирование грунтов; геологоразведочные скважины; технические скважины и другие работы в стесненных условиях.



Рис.1.3. Установка буровая гидрофицированная легкой серии типа УБГ-Л-20 "МАНГУСТ" на гусеничной базе

Установка RS-90 [168] – флагманская модель бурового оборудования «Алмазгеобур» (Россия), полностью гидравлическая буровая установка с двигателем Cummins 6BТAA5.9-С205 / QSB 6,7 TIER III с телескопической мачтой, гидравлическими домкратами, с возможностью спуска мачты к устью скважины. Улучшенная система охлаждения позволяет агрегату работать в жарком климате (рис.1.4).

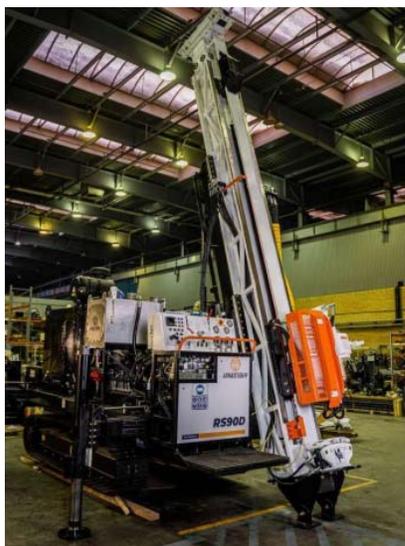


Рис. 1.4. Буровое оборудование RS-90D

Установки разведочного бурения «УРБ, МБШ, ПБУ» УРБ на МТЛБу (рис. 1.5) [177]. Быстроходный гусеничный транспортер-тягач МТЛБу предназначен для: ликвидации последствий аварий и чрезвычайных ситуации в труднодоступных районах; использования в качестве шасси под монтаж различного технологического оборудования; обслуживания транспортных и технологических магистралей; транспортировки людей и грузов в закрытом отапливаемом кузове, буксировки прицепов; использования в геолого-разведочных и поисковых партиях; обустройства зимних дорог и лежневых насыпных трасс.



Рис. 1.5. Установки разведочного бурения УРБ на МТЛБу

Установки разведочного бурения «УРБ, МБШ, ПБУ» УРБ на санях (рис. 1.6) [180], приводится в действие от палубного двигателя Д-245, ЯМЗ-238 с коробкой передач и сцеплением, глубина бурения до 300 метров.



Рис. 1.6. Установки разведочного бурения УРБ на санях

Установки разведочного бурения «УРБ, МБШ, ПБУ» Навес УРБ МИНИ [180] с палубным двигателем (рис. 1.7). Навес УРБ МИНИ с палубным двигателем предназначена для бурения вертикальных и наклонных скважин вращательным способом, с использованием шнекового и колонкового инструмента, бурение с промывкой и продувкой, под тепловые насосы, малогабаритная переносная.



Рис. 1.7. Навес УРБ МИНИ с палубным двигателем

Установки разведочного бурения «УРБ, МБШ, ПБУ» УСЗ М1 [180] (рис. 1.8) предназначены для испытания грунтов статическим зондированием и буре-

ния геологических скважин шнеком или колонковым способом для отбора проб грунтов при инженерно-геологических изысканиях. Установка может использоваться как в полевых, так и в стеснённых условиях, например, в подвальных помещениях или в местах недоступных для автомобильной техники. Перемещение установки по площадке осуществляется вручную. При зондировании грунтов на установке УСЗ 1 может использоваться любой из комплектов аппаратуры для статического зондирования грунтов.



Рис.1.8. Установки разведочного бурения УСЗ М1

Буровой агрегат СБШ-250МН-32Т (серия СБШ-250МН-32, СБШ-250МНА-32) [169-176] (рис. 1.9) – самоходный станок, который поставляется в комплектации с электроприводом и базой на гусеничном ходу. Разработан ООО УК «Рудгормаш» для бурения скважин шарошечными долотами (бурами) диаметром 250-270 мм в породах 2 и 3 категорий крепостью $f=8-20$ по шкале профессора М.М. Протодяконова [4, 65, 66] с высокой образивностью под заряд взрывчатых веществ на открытых горных работах. Скорость передвижения станка составляет от 0 до 1,3 км/ч с возможностью плавной регулировки хода.

Станок способен работать со штангами, которые позволяют пробурить скважину глубиной до 32 м. За счет исключения процесса наращивания и развинчивания става штанг, в разы повышается производительность буровых работ, что наиболее важно при работе в мягких и средней твердости породах, когда время проходки соизмеримо с временем, затраченным на вспомогательные

операции. Непрерывность хода подачи длинных штанг, обеспечивается использованием канатно-полиспастного привода подачи от двух лебедок. Технические характеристики представлены в таблице 1.1. [169-176]



Рис. 1.9. Буровой агрегат СБШ-250МН-32Т:

Таблица 1.1. Технические характеристики бурового агрегата СБШ-250МН-32Т

Диаметр скважины, мм	250-270
Глубина бурения, м	32
Угол наклона бурения (скважины), °	0; 15; 30
Усилие подачи, тонн	0-30
Длина штанги, м	8,2
Количество штанг, шт	4
Верхний предел частоты вращения бурового става, об/мин	120
Диаметр штанги, мм	203
Скорость подачи при бурении, м/мин	0-3

Буровой агрегат СБШ-250МН-32Т применяют при разработке карьеров для бурения, как вертикальных, так и наклонных скважин. Станок способен работать в любых погодных условиях.

1.2. Общая структура ручного управления буровым агрегатом

Буровые агрегаты состоят (рис. 1.10) из механизма подачи бура 1, привода подачи 2, энергетической установки 3 обеспечивающей силовое управление приводом, механизма вращения бура 4, привода вращения 5, и энергетической установки 6 обеспечивающей силовое управление приводом. Перемещение бура 7, измеряется датчиком продольной подачи 8 и датчиком вращения 9, сигналы которых подаются на индикаторы 10, 11 пульта 12. Информацию с индикаторов вращения 11 и перемещения 10 в пространстве, получает человек-оператор 13, который также наблюдает работу агрегата непосредственно, 14. По результатам наблюдения состояния бурового агрегата включаются соответствующие энергетические установки, 15.

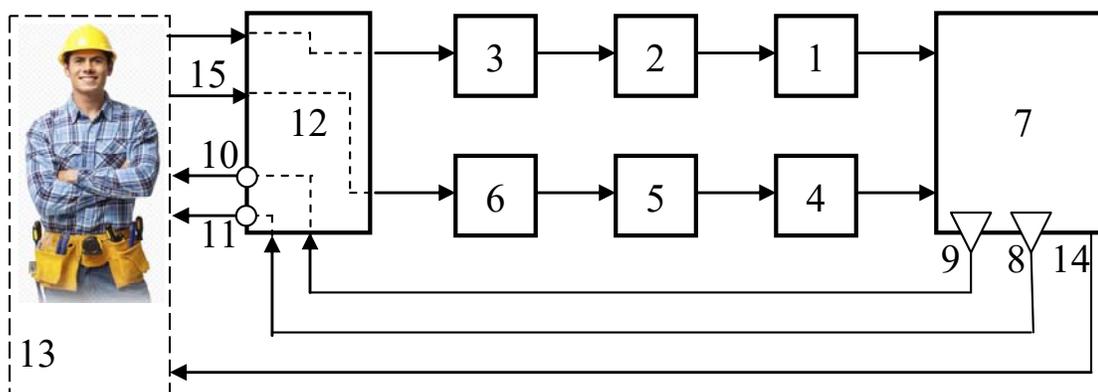


Рис. 1.10. Структура ручной системы управления бурового агрегата

Системы управления могут быть разделены по степени участия в принятии решения человека-оператора следующим образом (рис. 1.11) [8, 16, 26, 27, 29, 34, 41, 62, 63, 83-85, 109, 112].

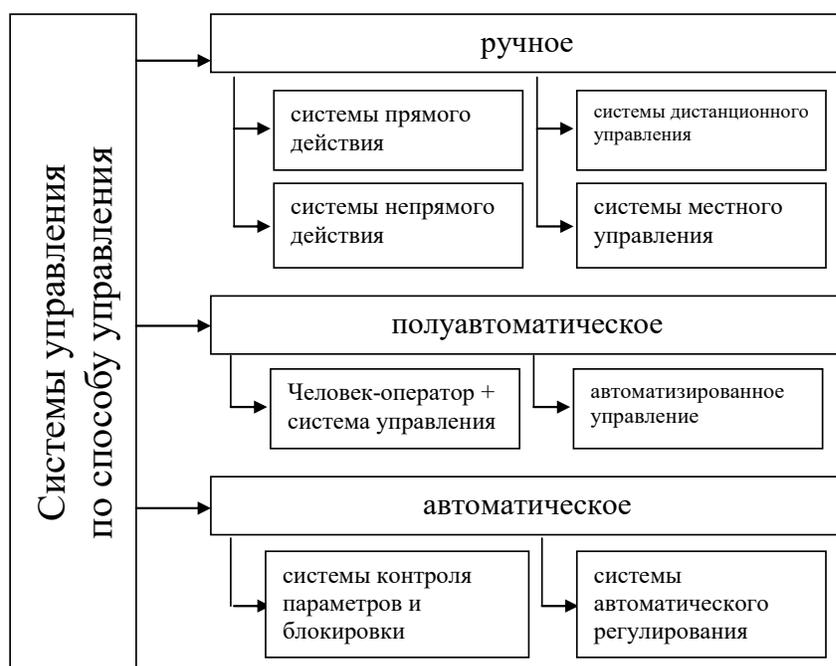


Рис. 1.11. Классификация систем управления буровыми агрегатами

1.2.1. Системы ручного управления

Ручное управление буровым агрегатом предполагает обязательное наличие человека-оператора, контролирующего режимы работы машины и изменяющего их в соответствии с принимаемыми решениями.

Наиболее простыми являются системы ручного управления прямого действия, в которых воздействие на силовое оборудование осуществляется за счёт затрат механической энергии оператора.

Системы ручного непрямого управления включают в свой состав источник энергии и усилители управляющих сигналов, которые позволяют воздействовать на исполнительные механизмы через вспомогательные приводы.

Системы местного управления и системы дистанционного управления различаются по расстоянию от человека-оператора до объекта управления. Системы дистанционного управления применяются при опасных условиях эксплуатации, когда условия работы сопряжены с угрозой для жизни или здоровья оператора, используются. В дополнение к компонентам систем непрямого управления такие системы содержат выносной пульт управления и коммуника-

ционные каналы, обеспечивающие передачу сигналов управления и контрольно-измерительной информации от бурового агрегата.

1.2.2. Полуавтоматическое

При полуавтоматическом управлении человек вручную задает режимы, которые затем поддерживаются системой управления. Человек-оператор с помощью визуального устройства сравнивает входные и выходные величины (параметры грунта, скорость бурения, перемещение бура, давление в напорной магистрали гидравлической трансмиссии и т.д.), выявляет ошибки и вручную исправляет и корректирует работу системы управления бурового агрегата. От внимания и быстродействия человека-оператора зависят динамические свойства системы в целом. Для создания математической модели такой системы управления необходимо не только учесть множество факторов, влияющих на работу системы управления буровыми агрегатами, но и участие человека-оператора как дополнительного входного воздействия на систему (условия работы, рабочее время, наличием чистого запаздывания равного времени реакции человека-оператора и т.д.).

Автоматизированное управление заключается в том, что система работает по заданной наперед программе, где не предусмотрено изменение параметров системы.

Таким образом, полуавтоматическая система управления не дает возможности создания универсальной модели с возможностью корректировки параметров системы в процессе эксплуатации бурового агрегата.

1.2.3. Автоматическое

Выбор и поддержание режимов осуществляет автомат. Человек наблюдает и корректирует работу автомата.

Системы автоматического управления, в зависимости от сложности внутренней организации, выполняют управление буровым агрегатом без привлечения оператора. В простейшем случае на систему управления возлагаются функ-

ции контроля согласованности развиваемых сил и моментов на рабочих органах с техническими характеристиками бурового агрегата, и блокировки в случае возникновения аварийных ситуаций. В более сложных случаях системы управления содержат регуляторы с устройствами для задания режима работы, которые обеспечивают поддержание на заданном уровне или изменение некоторого параметра по заданной программе, а также датчики контроля параметров для непрерывного отслеживания управляющих сигналов. В наиболее сложном случае система автоматического управления содержит развитые средства извлечения сенсорной информации о состоянии различных элементов исполнительной системы, а также мощные вычислительные ресурсы и эффективное алгоритмическое и программное обеспечение, осуществляющее поддержку функционирования бурового агрегата без участия человека-оператора.

На рис. 1.12 показана общая структура информационных потоков в системе управления бурового агрегата. Система управления содержит набор датчиков, основным назначением является извлечение информации о внутреннем состоянии бурового агрегата – пространственном положении рабочего органа, скоростях и ускорениях, крутящих моментах на валах и т.п. [86, 93, 124, 125]

Для этого применяются датчики угловых и линейных перемещений (резистивные, растровые, импульсные и кодовые оптические датчики положения, револьверы, сельсины, индуктивные и ёмкостные датчики линейных перемещений), датчики частоты вращения (тахогенераторы постоянного и переменного тока), однокомпонентные датчики измерения момента на валу, датчики силомоментного очувствления и т.п. На основе полученной сенсорной информации система управления формирует управляющие воздействия, передаваемые в исполнительную систему, образованную приводами и механизмами бурового агрегата. При этом должны быть обеспечены монотонность движения рабочего органа, стабильность динамических характеристик приводов и устранено взаимовлияние звеньев рабочего органа.



Рис. 1.12. Структура информационных потоков в системе управления бурового агрегата

Система управления на основе полученной измерительной информации обеспечивает выработку движений по отдельным степеням свободы. На основе формируемой датчиками информации решаются такие задачи, как:

планирование движений и положений – решает задачу определения развиваемых скоростей и ускорений исходя из требований технологического процесса и технических характеристик бурового агрегата;

планирование сил и моментов – решает задачу обеспечения согласования развиваемых сил и моментов во всех точках траекторий движения с техническими характеристиками бурового агрегата.

Непосредственное оценивание состояния среды в буровых агрегатах не применяется, однако, поскольку среда воздействует на исполнительный орган бурового агрегата, его состояние может быть косвенно оценено через измеряе-

мые параметры состояния исполнительного органа. Это, в принципе, позволяет строить модель внешней среды и корректировать управление агрегатом в соответствии с этой моделью и поставленной задачей функционирования.

Таким образом, система управления функционирует параллельно, обрабатывая множество сигналов от различных датчиков и заданий от вышележащих уровней управления.

1.2.4. Характеристики систем управления

В качестве основных характеристик систем управления, учитываемых при проектировании, можно указать мощность обслуживаемого силового оборудования, мощность, затрачиваемую на управление, мощность управляющих сигналов, коэффициенты усиления по мощности и амплитуде управляющих сигналов, точность поддержания режима, быстродействие, оцениваемое по скорости отработки сформированного управляющего сигнала или времени реакции на внешнее возмущение.

По режиму управления можно выделить системы с непрерывным и циклическим управлением. В последнем случае формирование управляющих воздействий осуществляется с паузами между последовательно формируемыми посылками управляющих сигналов.

По типу сигналов, поступающих на обработку и получающихся в результате обработки, системы управления разделяются на аналоговые и цифровые. Преимущества и недостатки этих систем показаны в таб. 1.2.

Таблица 1.2 - Преимущества и недостатки аналоговых и цифровых систем

	Преимущества	Недостатки
Аналоговые	Плавность регулирования Простота и надежность Отсутствие дискретизации	Ограниченная точность Уязвимость к помехам Ограниченные по сложности алгоритмов обработки данных
Цифровые	Высокая точность и стабиль-	Дискретизация сигнала

	Преимущества	Недостатки
	<p>ность</p> <p>Устойчивость цифровых сигналов к помехам</p> <p>Возможность применения сложных алгоритмов управления</p> <p>Возможность сохранения информации о режимах управления и накопления банков данных</p> <p>Возможность введения систем искусственного интеллекта</p>	<p>Наличие задержек, зависящих от сложности алгоритма обработки данных</p>

Как следует из рис. 1.11, существующие буровые агрегаты способны решать свои задачи только под непосредственным контролем человека-оператора. Именно оператор принимает решение о целесообразности выполнения тех или иных действий. Подобный принцип управления предполагает разделение системы управления на иерархические уровни, на каждом из которых решается свой определенный круг задач. Иерархические уровни и решаемые на них задачи представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Уровни иерархии системы управления буровым агрегатом

Уровень иерархии	Решаемые задачи	Принципы реализации
Стратегический	<ol style="list-style-type: none"> 1) Принятие решения о параметрах буримой скважины 2) Контроль общего состояния бурового агрегата и его узлов 3) Выбор режима проходки скважины 4) Контроль за исполнением команд агрегатом в целом 	<p>Решение принимает человек-оператор</p> <p>В настоящее время - человек-оператор, в перспективе - автомат</p>

Тактический	<ol style="list-style-type: none"> 1) Получение команд со стратегического уровня. 2) Генерация последовательности команд управления отдельными узлами и блоками бурового агрегата 3) Контроль исполнения команд управления и согласование работы узлов и блоков 4) Сбор информации от сенсоров о состоянии узлов и блоков бурового агрегата 	Цифровой контроллер
Функционально-логический	1) Реализация алгоритмов управления узлами и агрегатами с замыканием обратных связей.	<ol style="list-style-type: none"> 1) Управление от общего контроллера 2) Управление с использованием сети микроконтроллеров. 3) Аналоговые контуры управления. 4) Смешанный тип управления

Таким образом, на верхнем, *стратегическом* уровне иерархии системой управления генерируются самые общие команды управления. В соответствии с ней генерируется последовательность решаемых задач узлами и блоками бурового агрегата и передаются на тактический уровень.

На следующем, *тактическом* уровне, контроллер бурового агрегата получает команды на решение задач узлами и блоками объекта управления и преобразует их в желаемые параметры, определяющие функционирование отдельных узлов и блоков.

На *функционально-логическом* уровне происходит реализация алгоритмов управления узлами и блоками. При этом замыкаются обратные связи, осу-

ществляется синхронизация работы бортового оборудования по времени, энергетике и другим ресурсам, осуществляется обработка данных с сенсоров и т.п.

1.3. Элементы системы управления буровым агрегатом

1.3.1. Объект управления

Существующая функциональная схема системы управления буровым агрегатом СБШ-250-МН-32Т приведена на рис. 1.13. Механизм включает в себя: 1 – электродвигатель постоянного тока; 2 – редуктор узла вращения; 3 – шинно-шлицевая муфта; 4 – опорный узел; 5 – четырехкратная канатно-полиспастная система подачи; 6 – колонна вращающихся штанг; 7 – линейный гидропривод подачи; 8 – механизм наращивания штанг; 9 – измеритель величины подачи; 10 – измеритель угловой скорости вращения бура; 11 – силовое управление приводом вращения бура; 12 – маслостанция; 13 – система ручного управления. [89, 92].

Для управления буром существуют два механизма: поворотный механизм (вращатель) и механизм гидравлического сжатия (гидротрансмиссия) [31, 53, 60, 23, 116, 138, 141, 154, 162].

Вращение производится от электродвигателя постоянного тока. Скорость вращения двигателей постоянного тока регулируется устройством управления ТПЕ-200-460-У2.1. Эта скорость передается через редуктор (с соотношением 1:16/187) на опорный узел 4 шинно-шлицевой муфтой 3.

Сжатие осуществляется гидравлическим насосом, который подает рабочую жидкость в гидроцилиндр 7. Усилие гидроцилиндра 7 уменьшается в четыре раза и передается на опорный узел 4 четырехкратной канатно-полиспастной системы подачи.

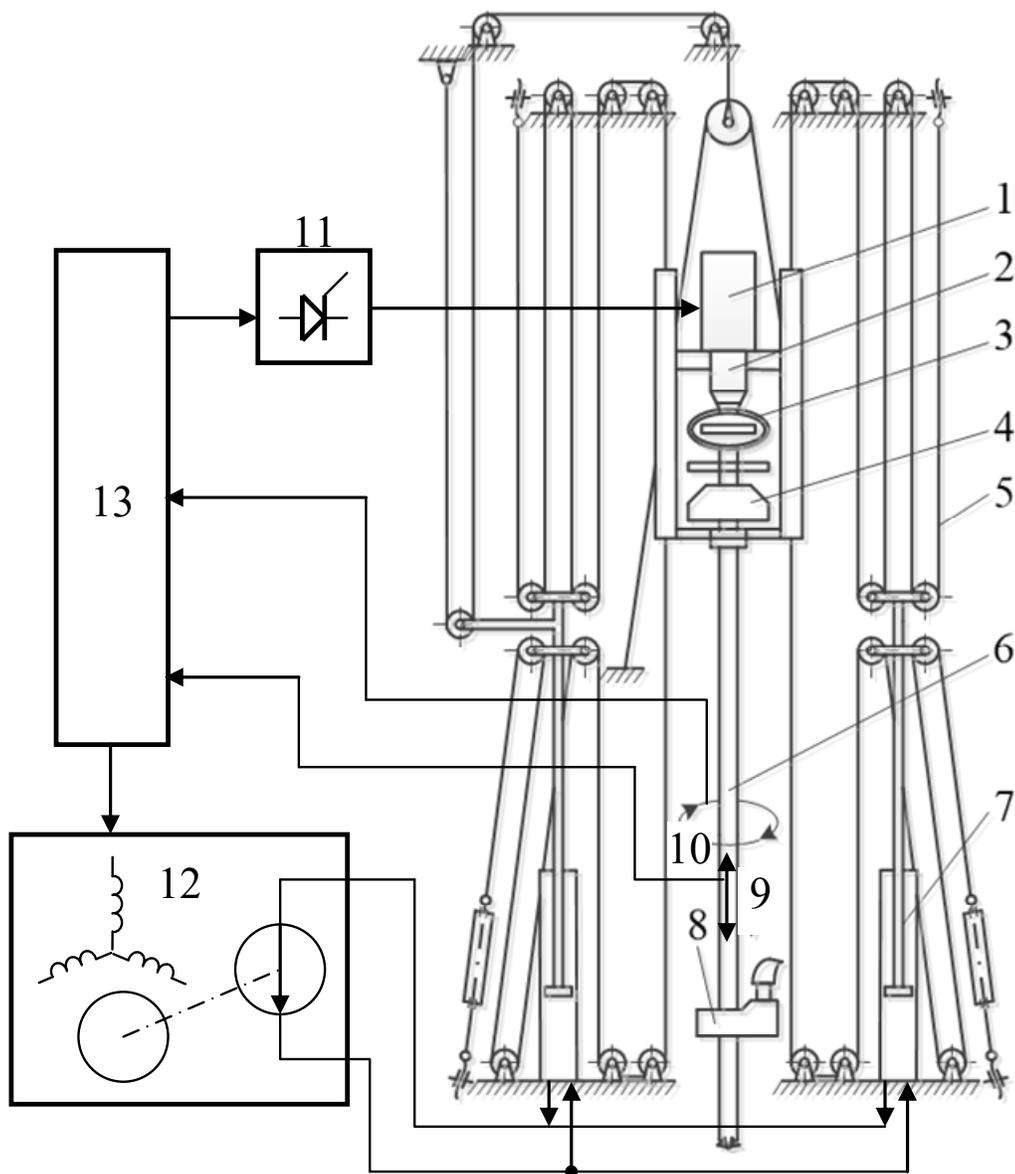


Рис.1.13. Функциональная схема системы управления буровым агрегатом СБШ-250-МН-32Т

Как видно, состав информационных сигналов, регистрируемых и обрабатываемых информационно-измерительной системой, может быть расширен. С другой стороны, для оценки состояния породоразрушающего бура необходимо добавить сигнал о твердости разрушаемой породы.

1.3.2. Управление механизмом вращения

Функциональная схема системы управления вращением бура показана на рис. 1.14. Жирными линиями показаны силовые цепи, а тонкими линиями показаны сигнальные цепи [5, 6, 9, 54, 86, 90, 107]. На рис. 1.14 использованы сле-

дующие обозначения: $K1$ – автомат; $Q1$ – контакторы; $L1...L3$ – катушки индуктивности; TA – трансформатор тока; DT – датчик тока; PT – регулировка тока; $ДН$ – датчик напряжения; $СУР$ – суммарный усилитель регулировки; $МС$ – трехфазная мостовая схема выпрямителя; $СИФУ$ – система импульсно-фазового управления; M – двигатель постоянного тока; $Q3$ – контакторы; $МСВ$ – мостовая схема выпрямителя возбuditеля; $СУВ$ – суммарный усилитель возбuditеля; $СИФУВ$ – система импульсно-фазового управления возбuditелем.

Система управления механизмом вращения бура работает следующим образом.

Вращение бура при работе бурового агрегата СБШ-250МН-32Т производится двигателем постоянного тока M , катушка возбуждения которого подключена к выходу трехфазного мостового выпрямителя $МС$. Скорость электродвигателя зависит от выходного напряжения мостового выпрямителя $МС$, которое определяется контроллером $СИФУ$. Катушка возбuditеля подключена к выходу трехфазного мостового выпрямителя $МС В$. Направление вращения бура, а также крутящий момент определяются возбuditелем двигателя постоянного тока M .

Оператор устанавливает скорость вращения с пульта управления. На основании заданной скорости и сигнала обратной связи по напряжению от датчика напряжения $ДН$, $СУР$ минус отклонение управления. Результатом расчета является сигнал управления скоростью, отправляемый на регулятор тока.

Для обеспечения работы двигателя постоянного тока при мощности, не превышающей номинальную мощность, PT принимает сигнал обратной связи от DT в сочетании с сигналом управления скоростью, полученным от $СУР$, в рассчитывает угол α . Угол альфа-контроля соответствует выходному напряжению $МС$.

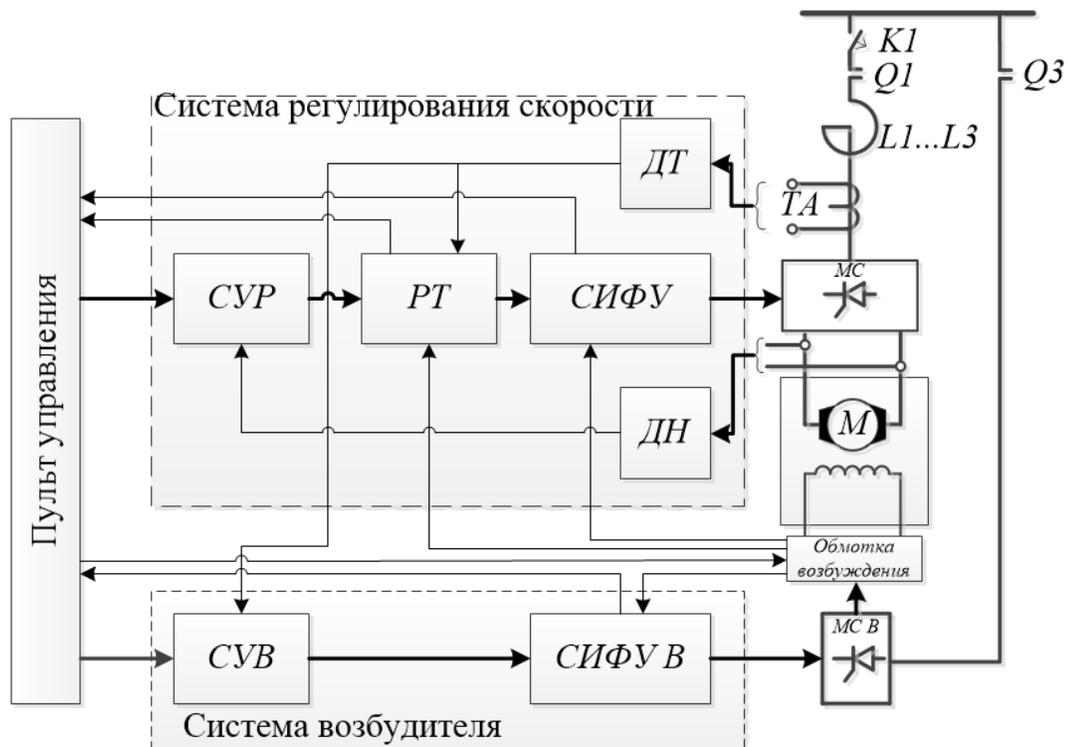


Рис. 1.14. Функциональная схема системы управления двигателем вращения бура

Оператор устанавливает ток возбуждения с пульта управления. На основании заданного тока возбуждения и тока обратной связи от датчика *ДТ*, усилитель *СУР* передает сигнал управления альфа-углом на контроллер *СИФУ*. Угол α соответствует выходному напряжению трехфазного мостового выпрямителя *МС В*. Это напряжение изменяется линейно относительно тока в обмотке возбуждения. Направление вращения электродвигателя также является направлением обмотки возбуждения, которое выбирается с пульта управления посредством приведения в действие возбудителя. Направление обмотки возбуждения контролируется двумя контакторами тока включенными в цепь питания обмотки.

Блоки обозначенные на рис. 1.14, выполняют следующие функции.

Регулятор тока *РТ* является нелинейным регулятором. Он выполняет функцию цифровой *ПИ*-регулятора для регулировки тока и дополнительно обеспечивает: быстрое ограничение тока при номинальном режиме (заданное

значение предотвращает внезапные изменения нагрузки при любой скорости); своевременную подачу импульса, когда сигнал в PT уменьшается или теряется, пропорционально значению входного сигнала; стабилизацию работы привода в постоянном токовом режиме, а также в режиме прерывистого тока.

Система импульсно-фазового управления *СИФУ* представляет собой набор каналов управления и служат для того, чтобы привести тиристоры в рабочее состояние. *СИФУ* имеет 6 каналов и возбуждения следующие функции:

генерирование управляющих импульсов и сдвига фаз в соответствии с управляющими сигналами. На каждом выходе канала имеется два управляющих импульса с длительностью импульса 400 μ s; отклонение между ними составляет 60° электрических;

ограничение входного сигнала между максимальными и минимальными значениями (ограничение максимального и наименьшего угла открытия тиристоров (α_{\max} , α_{\min}) с целью реализации предела изменения требований к импульсным фазам управления;

усиление и формирование управляющих импульсов для открытия и закрытия тиристоров.

1.3.3. Управление подачей бура

Функциональная схема системы управления подачей бура показана на рис. 1.15, где использованы следующие обозначения: $K1$ – автомат; $Q1$ – контакторы; TA – трансформатор тока; DT – датчик тока; M – двигатель [19, 24].

Система управления механизмом подачи бура работает следующим образом.

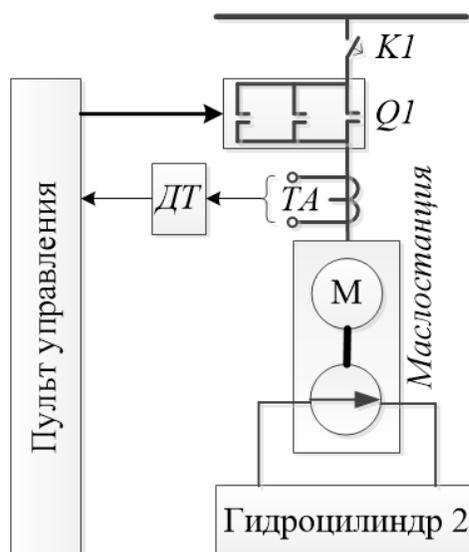


Рис. 1.15. Схема системы управления подачей бура

Скорость вращения двигателя M контролируется контактором $Q1$. Мотор M имеет три уровня управления скоростью: 750 об / мин, 1500 об / мин и 3000 об / мин. Которые выбирает оператор с помощью контактора $Q1$. Тяговый гидравлический насос с электродвигателем, обеспечивает усилие сжатия 30 тонн. Гидроцилиндр 2, движущийся вверх или вниз, управляется путем изменения направления вращения электродвигателя M .

1.3.4. Регуляторы

В общем виде контур регулирования (рис. 1.10) реализует операцию оценки текущего значения регулируемой величины, сравнение её с эталонным (заданным) значением, вычисление управляющего воздействия и выдачу его через управляющий орган на объект регулирования. [8, 16, 109, 113]

Автоматический регулятор представляет собой устройство, измеряющее, усиливающее и преобразующее сигнал отклонения регулируемой величины от заданной, и целенаправленно воздействующее на объект регулирования с целью поддержания заданного значения регулируемой величины, или изменения её по некоторому закону.

По характеру изменения регулирующего воздействия автоматические регуляторы подразделяются на регуляторы с линейным и нелинейным законами

регулирования. Типовыми линейными законами регулирования являются пропорциональный, интегральный, дифференциальный, а также их комбинации.

В буровых агрегатах системах управления чаще всего используются пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (ПИД регулятор). [37, 46, 50, 80, 113, 115, 121, 123, 148, 149, 153, 155, 158, 161]

В таком регуляторе для формирования управляющего воздействия используется информация о самой ошибке, её производной и интеграле от нее.

В таком регуляторе для формирования управляющего воздействия используется информация о самой ошибке, её производной и интеграле от нее.

$$U(s) = E(s) \left(k_{\text{п}} + k_{\text{и}} \frac{1}{s} + k_{\text{д}} s \right) \quad (1.1)$$

где $U(s)$ - значение выходного сигнала ПИД-регулятора; $E(s)$ - сигнал ошибки, преобразуемый ПИД-регулятором; s – оператор дифференцирования; $k_{\text{п}}$ - коэффициент передачи по пропорциональному каналу; $k_{\text{д}}$ - коэффициент передачи по дифференциальному каналу; $k_{\text{и}}$ - коэффициент передачи по интегральному каналу.

Характеристики типовых регуляторов представлены в таблице 1.4. [37, 46, 50, 80].

Таблица 1.4. Характеристики ПИД регуляторов

Вид характеристики	Характеристика регулятора типа		
	ПИ	ПИД	Д
Уравнение	$y = k_p \left(x + \frac{1}{T_{\text{из}}} \int_0^t x dt \right)$	$y = k_p \left(x + \frac{1}{T_{\text{из}}} \int_0^t x dt + T_{\text{пв}} \frac{dx}{dt} \right)$	$T_d \frac{dy}{dt} + y = k_d T_d \frac{dx}{dt}$
Передающая функция	$k_p \left(1 + \frac{1}{T_{\text{из}} p} \right)$	$k_p \left(1 + \frac{1}{T_{\text{из}} p} + T_{\text{пв}} p \right)$	$\frac{k_d T_d}{T_d p + 1}$

Вид характеристики	Характеристика регулятора типа		
	ПИ	ПИД	Д
Передаточная характеристика $h(t)$			
КЧХ $W(j\omega)$ Комплексные частотные характеристики			
АЧХ $A(\omega)$ Амплитудно-частотная характеристика			
ФЧХ $\varphi(\omega)$ Фазо-частотная характеристика			

Включение ПИД регулятора в контур обратной связи (рис. 1.16) дает следующую передаточную функцию замкнутой системы:

$$W(s) = \frac{x(s)}{g(s)} = \frac{W_{об}(s)W_p(s)}{1 + W_{об}(s)W_p(s)}, \quad (1.2)$$

где $W_{об}(s)$ - передаточная функция объекта управления; $W_p(s)$ - передаточная функция регулятора;

$$W_p(s) = \frac{k_{и} + k_{п}s + k_{д}s^2}{s}. \quad (1.3)$$

Корни характеристического уравнения

$$s + [k_{и} + k_{п}s + k_{д}s^2]W_{об}(s) = 0. \quad (1.4)$$

определяет качественные характеристики переходных процессов в управляемой системе с ПИД-регулятором в обратной связи. В свою очередь, корни характе-

ристического уравнения (1.4) определяются параметрами $k_{\text{п}}$, $k_{\text{д}}$ и $k_{\text{и}}$, а также параметрами передаточной функции объекта управления. Следовательно, с изменением коэффициентов передачи по пропорциональному, интегральному и дифференциальному каналам ($k_{\text{п}}$, $k_{\text{д}}$, $k_{\text{и}}$) позволяет скомпенсировать изменение параметров передаточной функции $W_{\text{об}}(s)$, например при изменении механических свойств проходимого грунта.

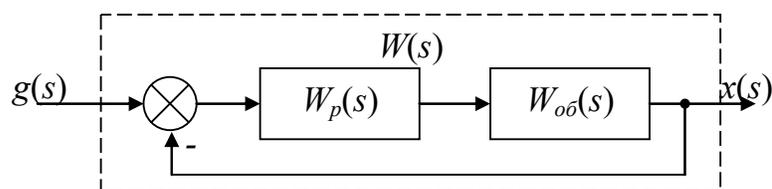


Рис. 1.16. Типовая схема включения ПИД-регулятора в контур обратной связи

В режиме ручного и полуавтоматического управления могут применяться и другие типы регуляторов.

На рис. 1.17 приведены другие типы автоматических регуляторов, сгруппированные по различным классификационным признакам. Рассмотрим подробнее линейные автоматические регуляторы.

В зависимости от особенностей конструкции различают регуляторы аппаратного типа (работают независимо от средств измерения регулируемого параметра), приборного типа (работают последовательно с вторичным измерительным прибором), агрегатные (состоят из унифицированных блоков) и модульные (состоят из унифицированных элементов, выполняющих простейшие операции).

В случае отбора для работы части энергии от объекта регулирования регулятор является устройством прямого действия. При наличии дополнительного источника энергии регулятор является устройством непрямого действия.

По виду используемой энергии различают электрические, пневматические, гидравлические регуляторы и их различные комбинации. Выбор регуля-

тора по виду используемой энергии определяется характером объекта регулирования и особенностями автоматической системы. Очевидно, что наиболее гибкими в использовании и универсальными являются электронные регуляторы.

По характеру изменения регулирующего воздействия автоматические регуляторы подразделяются на регуляторы с линейным и нелинейным законами регулирования. [8, 16, 26, 27, 29, 34, 41, 62, 63, 109, 112, 137]

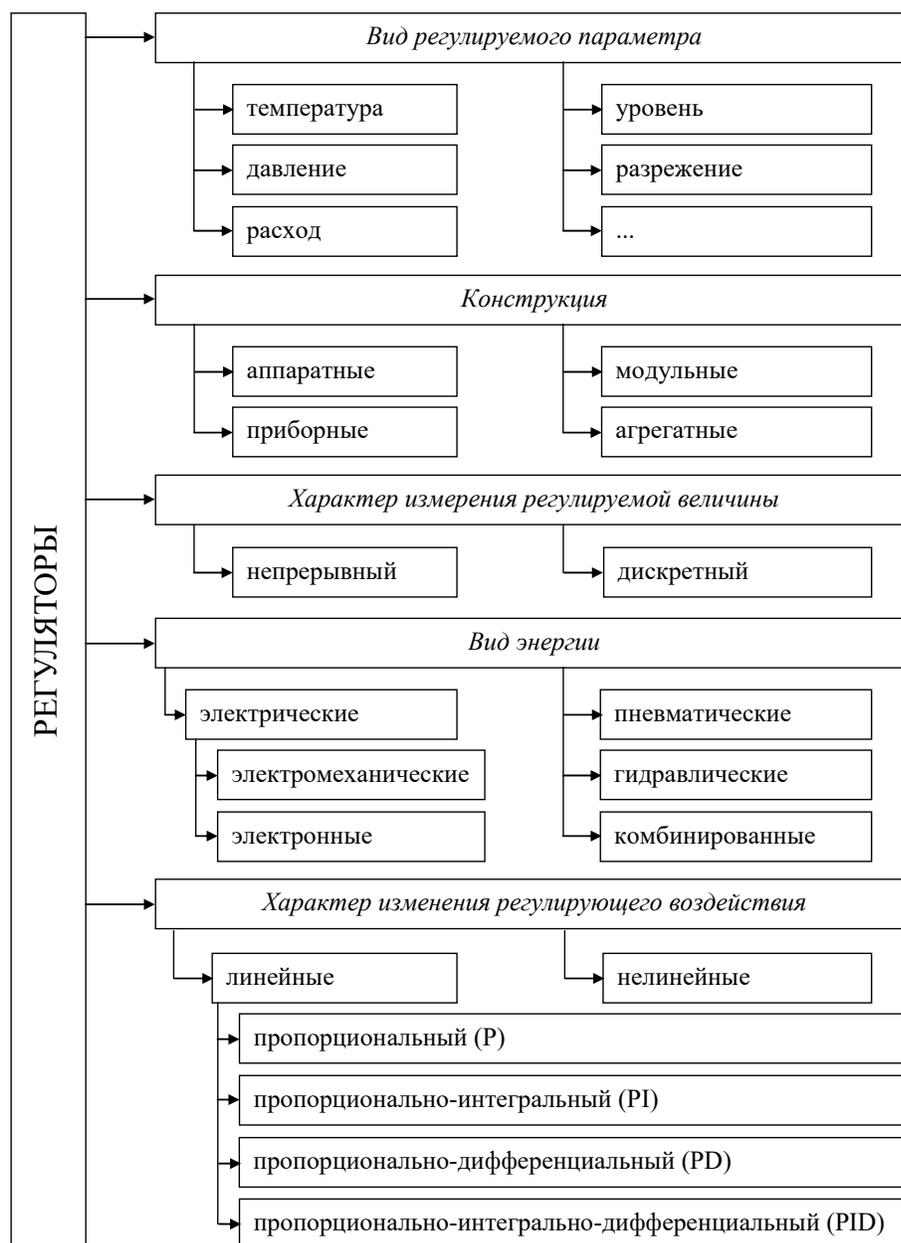


Рис. 1.17. Классификация линейных автоматических регуляторов

Таким образом, для работы системы управления эффективнее использовать цифровой регулятор.

Цифровой регулятор (рис. 1.18) включает в свой состав один или несколько датчиков, схему сопряжения (нормализации формируемых ими сигналов), аналого-цифрового преобразователь, вычислительные средства обработки и каналы ввода-вывода информации [8, 41, 109, 134, 135]. На рисунке приняты следующие обозначения: 1 - датчик; 2 - усилитель сигнала; 3 - аналого-цифровой преобразователь; 5 - контроллер; 4 - буферная память; 6 - цифро-аналоговый преобразователь; 7 - устройство ввода-вывода; 8 - информационные.

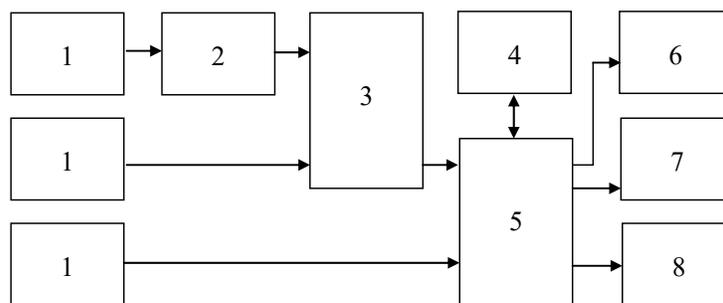


Рис. 1.18. Структура цифровой системы управления

ПИД-регулятор необходимо реализовать на цифровом контроллере. Цифровой контроллер обрабатывает поступающие данные по следующему алгоритму

$$U(n) = k_{\text{п}}E(n) + k_{\text{и}} \sum_{m=0}^{n-1} E(m) + k_{\text{д}}[E(n) - E(n-1)], \quad (1.5)$$

где n, m - дискретное время.

Для формирования интегральной составляющей необходимо запоминать все предыдущие сигналы ошибки $E(n)$ и суммировать их на каждом интервале, что существенно увеличивает время вычисления текущего значения управляющего воздействия.

Датчик (преобразователь информации) обеспечивает функциональное преобразование изменения измеряемой величины в соответствующий электрический сигнал, участвующий в некотором информационном процессе.

Блок аналого-цифрового преобразования обеспечивает усиление/нормирование сигнала, предварительную фильтрацию аналоговыми фильтрами и квантование по уровню. В результате формируется цифровой поток данных, несущий информацию о состоянии механизмов исполнительной системы агрегата и пригодный для передачи, хранения и обработки средствами вычислительной подсистемы.

Вычислительные средства (процессор, память) обеспечивают накопление и обработку в соответствии с заданным алгоритмом данных, полученных на этапе измерения регулируемой величины. Цифровая форма реализации регулирования обеспечивает построение регуляторов практически произвольной сложности, не подверженных воздействию внешних факторов, старению и прочим недостаткам, присущим аналоговым регуляторам.

Для формирования управляющего воздействия используется цифро-аналоговый преобразователь, формирующий электрический сигнал, пропорциональный цифровому коду, поданному на его вход процессором.

Устройство ввода-вывода обеспечивает сопряжение цифровой системы управления с другими компонентами бурового агрегата.

1.3.5. Оценка существующей системы управления режимами бурения

Из приведенного выше анализа системы управления скорости и подачи бура видно, что существующая система имеет единственное преимущество – простота конструкции.

Однако, данное достоинство не перекрывает ряд недостатков:

– оператор работает полностью пассивно; в процессе управления буровым агрегатом он не распознает ситуации, когда бур проходит через слои породы с различной крепостью, чтобы соответствующим образом изменять режим бурения;

– в системе управления скорости должна быть разработана система автоматического управления, скорость должна соответствовать твердости породы в скважине;

– необходимо разработать датчик, который косвенно определяет твердость породы в буровых скважинах посредством вибрации бура;

– из-за управления тремя различными уровнями скорости давление, создаваемое гидроцилиндром 2, не изменяется непрерывно;

– необходимо изменить механизм управления электромагнитным двигателем с помощью контактора (имеет три выбора регулировки скорости) для использования частотный преобразователь;

– *главный недостаток* - невозможность адаптации режима бурения к текущему состоянию грунта, для реверса необходим останов вследствие возможности гидравлического удара, что не позволяет использовать оперативно менять режимы работы в процессе бурения.

По вышеуказанным причинам предлагается новая интегрированная система управления скоростью вращения и подачи бура бурового агрегата с адаптацией объекта к автоматической системе управления с нейронным регулятором.

Совместную работу ПИД-регулятора с нейронной сетью называют гибридным нейро-ПИД управлением (NNPID Auto-tuning, Neuromorphic PID Self-tuning) [11, 19, 46, 50, 57, 103, 123, 153, 158, 161, 167]. В этом случае с использованием нейронных сетей осуществляется настройка ПИД-регулятора (рис. 1.19).

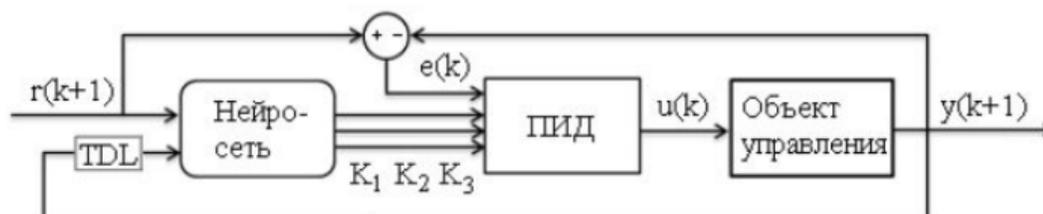


Рис. 1.19. Схема гибридного нейро-ПИД управления [103]

Нейронная сеть на входе получает требуемые и предыдущие значения состояния объекта, а на выходе получаются коэффициенты управления ПИД-регулятора. Далее сгенерированные значения параметров вместе с текущей ошибкой управления поступают на ПИД-регулятор, который в свою очередь генерирует управляющее воздействие на объект управления. Такая схема позволяет минимизировать ошибки обратной связи ПИД-регулятор становится нелинейным, что обеспечивает более высокое качество управления нелинейными объектами.

Таким образом, включение нейронной сети для настройки системы управления позволит выполнять следующие функции:

расчет измерение вибрации и скорости сверла, управлять скоростью вращения и скоростью подачи бура;

обеспечивает выполнение необходимых функций прежней системой;

сокращает время реакции на управление скоростью вращения и скоростью бура.

1.4. Нейронные сети

Нейронные сети применяются для решения множества сложных задач, таких как прогнозирование, распознавание и запоминание образов, статические методы обработки, исследование нелинейных объектов управления в условиях неполной информации и т.д. Нейронные сети применяют в различных сферах человеческой деятельности, позволяют представить наиболее полную картину работы сложных систем и спрогнозировать вероятность отказов. Многоконтурные объекты с точки зрения теории автоматического управления являются существенно нелинейными, а следовательно практическая реализация алгоритмов является сложной, трудоемкой и затратной задачей. Использование нейронных сетей для настройки системы управления бурового агрегата позволит существенно сократить время при бурении.

Структура нейронных сетей может быть однослойная или многослойная [3, 7, 14, 20, 40, 57, 71, 82, 101, 117, 128, 130, 136, 159, 163]. Однослойная струк-

тура нейронной сети (рис. 1.20) - представляет собой структуру взаимодействия нейронов, в которой сигналы со входного слоя сразу направляются на выходной слой, который, собственно говоря, не только преобразует сигнал, но и сразу же выдаёт ответ.

Многослойная нейронная сеть (рис. 1.21) - помимо выходного и входного слоёв, имеются ещё несколько скрытых промежуточных слоёв, число которых зависит от степени сложности нейронной сети.

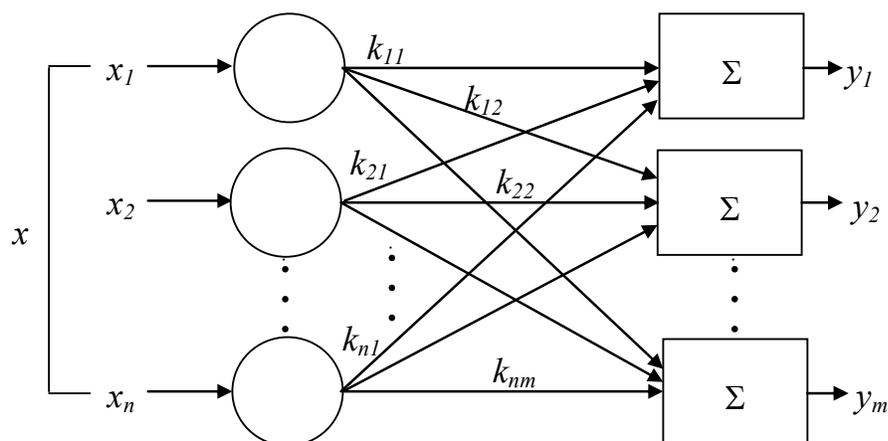


Рис. 1.20. Однослойная структура нейронной сети

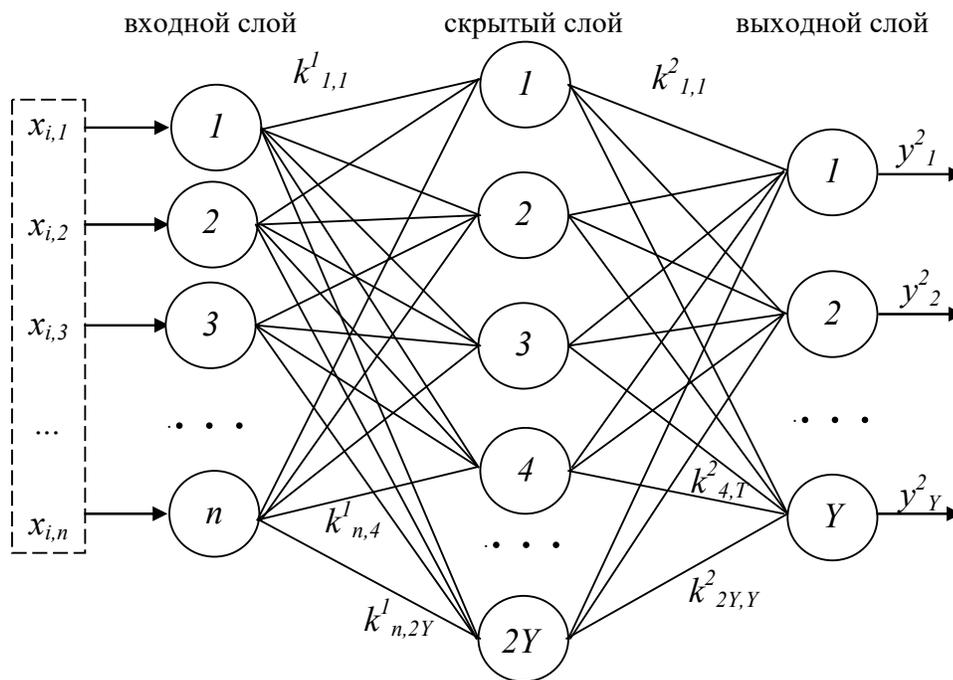


Рис. 1.21. Многослойная нейронная сеть

Кроме количества слоёв, нейронные сети можно классифицировать по направлению распределения информации по синапсам между нейронами.

Нейронные сети прямого распространения [72, 104, 106] – сигнал перемещается строго по направлению от входного слоя к выходному (рис. 1.22)

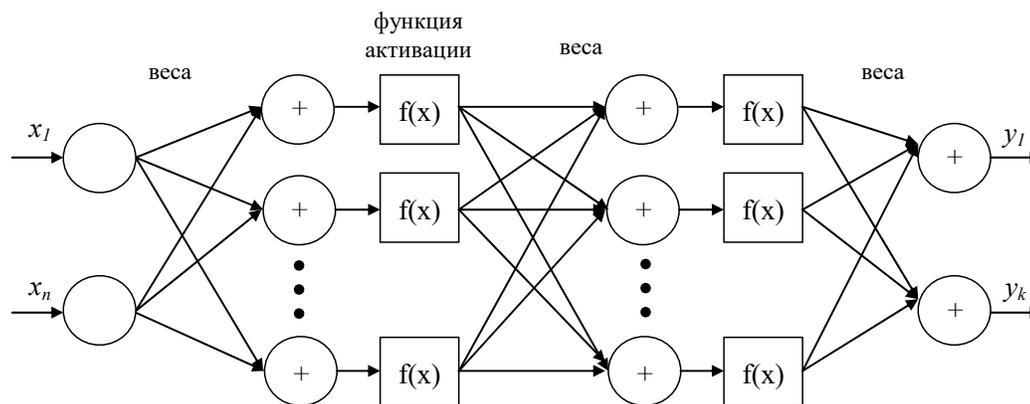


Рис. 1.22. Структура многослойной нейронной сети с прямой связью

В системах управления буровым агрегатом регуляторы работают по заданным алгоритмам. Следовательно, нужно рассматривать такие структуры нейронных сетей, которые позволяют оценить текущее состояние объекта управления и корректировать работу системы в целом: многослойные нейронные сети прямого распространения (за счет введения задержек в обратные связи и сигнал управления системой).

1.5. Выводы

1. На основании обзора существующих и перспективных буровых агрегатов сделан вывод об общности их структуры и выполняемых функций, что, в свою очередь, позволило сформулировать общую задачу проектирования систем управления буровых агрегатов.

2. Разработана обобщенная функциональная схема бурового агрегата и показано, что указанный тип технических средств включает трехфазный электродвигатель, гидромотор, гидравлический насос, линейный гидропривод, пол-испаст, ручную систему управления, а также рабочее место человека-оператора.

3. Рассмотрено устройство исполнительного органа бурового агрегата. Показано, что для эффективного управления процессом бурения необходимо разработать систему управления буровым агрегатом.

4. Представлены уровни иерархии системы управления буровым агрегатом. Сделан вывод о целесообразности замены верхнего уровня (стратегический) на нейронную сеть.

5. Рассмотрены варианты построения системы управления буровым агрегатом и сделан вывод о необходимости использования ПИД-регуляторов с нейросетевой настройкой для повышения эффективности процесса бурения.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЗЛОВ И БЛОКОВ БУРОВОГО АГРЕГАТА

2.0. Введение

Качество бурения скважин во многом определяется стабильностью режимов разрушения породы, в частности, стабильностью таких параметров, как продольная и поперечная подачи фрезы, а также скорость породоразрушающего элемента в точке контакта с породой. Для обеспечения воздействия на породу буровой агрегат включает в себя ряд взаимосвязанных узлов, управление которыми входит в задачу оператора. Однако, возможности оператора по поддержанию указанных параметров весьма ограничены вследствие того, что в реальных условиях между узлами в объекте управления, даже в штатных режимах функционирования на самых разных уровнях существует множество перекрестных связей, наличие которых затрудняет процесс управления. Кроме того, параметры бурового агрегата, как объекта управления, существенно зависят от текущего пространственного положения узлов, что также отрицательно сказывается на указанном процессе.

В полной мере учет особенностей данного типа технических устройств возможно только с применением современной вычислительной техники. Это, в свою очередь, предполагает использование достаточно гибкой системой управления для определения пространственного положения бура, качество и структуру грунта, а так же расчет оптимальных режимов управления объектом с учетом взаимовлияния каналов.

Применение цифровых ЭВМ, в свою очередь, приводит к необходимости создания комплексной математической модели бурового агрегата, как объекта измерения и управления.

2.1. Состояние полиспастной системы

Одной из основных систем управления бурового агрегата является полиспастная система. Исходя из анализа работы бурового агрегата, описанной в разделе 1.5, разработана кинематическая схема полиспастной системы, пред-

ставленная на рисунке 2.1. В состав кинематической системы входят: гидронасос, трехфазный асинхронный электродвигатель, бур, шкивы и канаты.

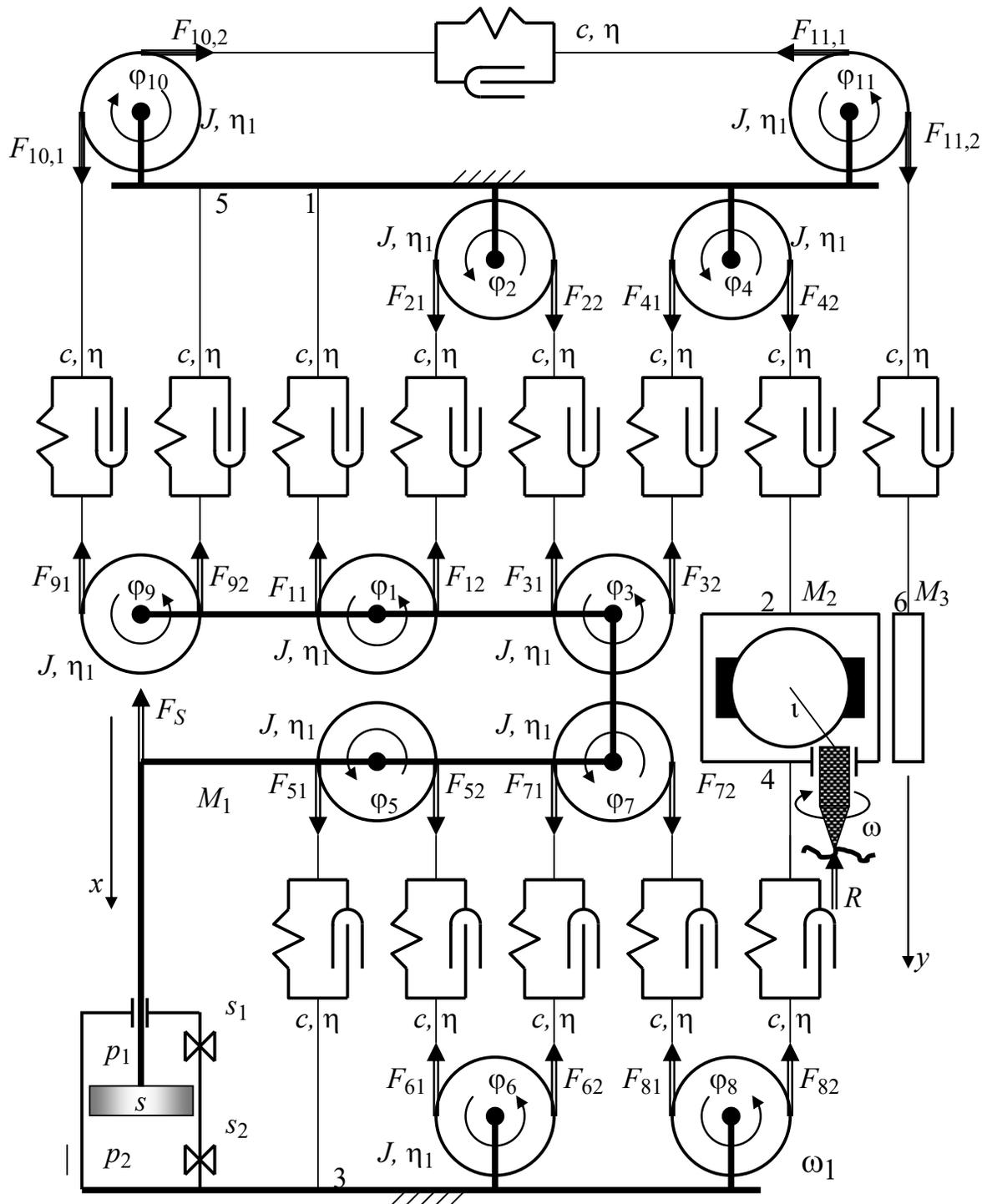


Рис. 2.1. Кинематическая схема полиспастной системы

При выводе уравнения, описывающего движение бура, используются следующие допущения:

все шкивы считаются одинаковыми, имеют радиус r [м], и момент инерции J [кг·м²];

диссипативные силы в шкивах создаются вязким трением с коэффициентом вязкого трения η_1 ;

канат считается однородной вязкоупругой нитью, коэффициент упругости c , [н·м/м] коэффициент вязкого трения η [н·с/м];

направление вращения всех шкивов, кроме 9-го, против часовой стрелки считается положительным, по часовой стрелке - отрицательным;

направление вращения 9-го шкива, по часовой стрелке считается положительным, а против часовой стрелки - отрицательным;

канаты (1-2) и (3-4) считаются предварительно растянутыми, сила предварительной растяжки каната компенсируется силами в точках крепления концов каната и шарнирных опор шкивов;

канат (5-6) растягивается под действием силы M_3g , где M_3 [кг] - масса направляющей, висящей на канате; g [м/с²] - ускорение свободного падения.

Вследствие того, что канаты (1-2) и (3-4) являются предварительно натянутыми, нижеследующие уравнения можно считать уравнениями в отклонениях.

Уравнения вращения шкивов при подъеме-опускании бура по цепочке (1-2) от точки крепления каната 1 до точки 2 подвеса привода вращения бура:

$$\begin{aligned} J\ddot{\phi}_1 + \eta_1\dot{\phi}_1 &= J\dot{\omega}_1 + \eta_1\omega_1 = -F_{11}r + F_{12}r; \\ J\ddot{\phi}_2 + \eta_1\dot{\phi}_2 &= J\dot{\omega}_2 + \eta_1\omega_2 = F_{21}r - F_{22}r; \\ J\ddot{\phi}_3 + \eta_1\dot{\phi}_3 &= J\dot{\omega}_3 + \eta_1\omega_3 = -F_{31}r + F_{32}r; \\ J\ddot{\phi}_4 + \eta_1\dot{\phi}_4 &= J\dot{\omega}_4 + \eta_1\omega_4 = F_{41}r - F_{42}r, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $\omega_{\dots} = \frac{d\phi_{\dots}}{dt}$; t - время.

Уравнения вращения шкивов при подъеме-опускании бура по цепочке (3-4) от точки крепления каната 3 до точки 4 крепления каната к узлу бурения M_2 :

$$\begin{aligned}
J\ddot{\phi}_5 + \eta_1\dot{\phi}_5 &= J\dot{\omega}_5 + \eta_1\omega_5 = F_{51}r - F_{52}r; \\
J\ddot{\phi}_6 + \eta_1\dot{\phi}_6 &= J\dot{\omega}_6 + \eta_1\omega_6 = -F_{61}r + F_{62}r; \\
J\ddot{\phi}_7 + \eta_1\dot{\phi}_7 &= J\dot{\omega}_7 + \eta_1\omega_7 = F_{71}r - F_{72}r; \\
J\ddot{\phi}_8 + \eta_1\dot{\phi}_8 &= J\dot{\omega}_8 + \eta_1\omega_8 = -F_{81}r + F_{82}r.
\end{aligned} \tag{2.2}$$

Уравнения вращения шкивов при подъеме-опускании направляющей по цепочке (5-6) от точки крепления каната 5 до точки 6 крепления каната к массе M_3 :

$$\begin{aligned}
J\ddot{\phi}_9 + \eta_1\dot{\phi}_9 &= J\dot{\omega}_9 + \eta_1\omega_9 = -F_{91}r + F_{92}r; \\
J\ddot{\phi}_{10} + \eta_1\dot{\phi}_{10} &= J\dot{\omega}_{10} + \eta_1\omega_{10} = -F_{10,1}r + F_{10,2}r; \\
J\ddot{\phi}_{11} + \eta_1\dot{\phi}_{11} &= J\dot{\omega}_{11} + \eta_1\omega_{11} = F_{11,1}r - F_{11,2}r.
\end{aligned} \tag{2.3}$$

Поступательное движение узла, включающего шкивы 1, 3, 5, 7, 9:

$$M_1\ddot{x} = -F_{11} - F_{12} - F_{31} - F_{32} + F_{51} + F_{52} + F_{71} + F_{72} - F_{91} - F_{92} - F_S, \tag{2.4}$$

где F_S - усилие, развиваемое на штоке гидропривода.

Поступательное движение узла M_2 без опоры на грунт:

$$M_2\ddot{y}_2 = -F_{42} + F_{82}. \tag{2.5}$$

Поступательное движение узла M_2 с опорой на грунт:

$$M_2\ddot{y}_2 = -F_{42} + F_{82} - R, \tag{2.6}$$

где R - противодействие грунта внедрению бура;

Поступательное движение узла M_3 :

$$M_3\ddot{y}_3 = -F_{11,2}. \tag{2.7}$$

Уравнения для натяжений канатов.

Уравнения, описывающие натяжения канатов при подъеме-опускании бура по цепочке (1-2) от точки крепления каната 1 до точки 2 подвеса привода вращения бура:

$$\begin{aligned}
F_{11} &= (x + \phi_1 r)c + (\dot{x} + \dot{\phi}_1 r)\eta; \\
F_{12} = F_{21} &= (x - \phi_1 r - \phi_2 r)c + (\dot{x} - \dot{\phi}_1 r - \dot{\phi}_2 r)\eta; \\
F_{22} = F_{31} &= (x + \phi_2 r + \phi_3 r)c + (\dot{x} + \dot{\phi}_2 r + \dot{\phi}_3 r)\eta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{32} = F_{41} &= (x - \varphi_{3r} - \varphi_{4r})c + (\dot{x} - \dot{\varphi}_{3r} - \dot{\varphi}_{4r})\eta \\
F_{42} &= (y_2 + \varphi_{4r})c + (\dot{y}_2 + \dot{\varphi}_{4r})\eta.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Уравнения, описывающие натяжения канатов при подъеме-опускании бура по цепочке (3-4) от точки крепления каната 3 до точки 4 крепления каната к узлу бурения M_2 :

$$\begin{aligned}
F_{51} &= (-x - \varphi_{5r})c + (-\dot{x} - \dot{\varphi}_{5r})\eta; \\
F_{52} = F_{61} &= (-x + \varphi_{5r} + \varphi_{6r})c + (-\dot{x} + \dot{\varphi}_{5r} + \dot{\varphi}_{6r})\eta; \\
F_{62} = F_{71} &= (-x - \varphi_{6r} - \varphi_{7r})c + (-\dot{x} - \dot{\varphi}_{6r} - \dot{\varphi}_{7r})\eta \\
F_{72} = F_{81} &= (-x + \varphi_{7r} + \varphi_{8r})c + (-\dot{x} + \dot{\varphi}_{7r} + \dot{\varphi}_{8r})\eta \\
F_{82} &= (-y_2 - \varphi_{8r})c + (-\dot{y}_2 - \dot{\varphi}_{8r})\eta.
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Уравнения, описывающие натяжения канатов при подъеме-опускании бура по цепочке (5-6) от точки крепления каната 5 до точки 6 крепления каната к массе M_3

$$\begin{aligned}
F_{92} &= (x - \varphi_{9r})c + (\dot{x} - \dot{\varphi}_{9r})\eta; \\
F_{10,1} = F_{91} &= (x + \varphi_{9r} + \varphi_{10r})c + (\dot{x} + \dot{\varphi}_{9r} + \dot{\varphi}_{10r})\eta; \\
F_{10,2} = F_{11,1} &= (-\varphi_{10r} - \varphi_{11r})c + (-\dot{\varphi}_{10r} - \dot{\varphi}_{11r})\eta; \\
F_{11,2} &= (y_3 + \varphi_{11r})c + (\dot{y}_3 + \dot{\varphi}_{11r})\eta
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Зависимости (8) - (10) позволяют исключить силы натяжений канатов из (1) - (7).

Для цепочки (1-2)

$$\begin{aligned}
J\ddot{\varphi}_1 + \eta_1\dot{\varphi}_1 + 2r^2\tilde{n}\varphi_1 + 2r^2\eta\dot{\varphi}_1 + r^2\tilde{n}\varphi_2 + r^2\eta\dot{\varphi}_2 &= 0; \\
J\ddot{\varphi}_2 + \eta_1\dot{\varphi}_2 + r^2c\varphi_1 + r^2\eta\dot{\varphi}_1 + 2r^2c\varphi_2 + 2r^2\eta\dot{\varphi}_2 + r^2c\varphi_3 + r^2\eta\dot{\varphi}_3 &= 0 \\
J\ddot{\varphi}_3 + \eta_1\dot{\varphi}_3 + r^2c\varphi_2 + r^2\eta\dot{\varphi}_2 + 2r^2c\varphi_3 + 2r^2\eta\dot{\varphi}_3 + r^2c\varphi_4 + r^2\eta\dot{\varphi}_4 &= 0 \\
J\ddot{\varphi}_4 + \eta_1\dot{\varphi}_4 + r^2\tilde{n}\varphi_3 + r^2\eta\dot{\varphi}_3 + 2r^2\tilde{n}\varphi_4 + 2r^2\eta\dot{\varphi}_4 + rcy + r\eta\dot{y} &= rcx + r\eta\dot{x}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Для цепочки (3-4)

$$J\ddot{\varphi}_5 + \eta_1\dot{\varphi}_5 + 2r^2c\varphi_5 + 2r^2\eta\dot{\varphi}_5 + r^2c\varphi_6 + 2r^2\eta\dot{\varphi}_6 = 0$$

$$\begin{aligned}
J\ddot{\phi}_6 + \eta_1\dot{\phi}_6 + r^2c\phi_5 + r^2\eta\dot{\phi}_5 + 2r^2c\phi_6 + 2r^2\eta\dot{\phi}_6 + r^2c\phi_7 + r^2\eta\dot{\phi}_7 &= 0 \\
J\ddot{\phi}_7 + \eta_1\dot{\phi}_7 + r^2c\phi_6 + r^2\eta\dot{\phi}_6 + 2r^2c\phi_7 + 2r^2\eta\dot{\phi}_7 + r^2c\phi_8 + r^2\eta\dot{\phi}_8 &= 0 \\
J\ddot{\phi}_8 + \eta_1\dot{\phi}_8 + r^2\tilde{n}\phi_7 + r^2\eta\dot{\phi}_7 + 2r^2\tilde{n}\phi_8 + 2r^2\eta\dot{\phi}_8 + rcy + r\eta\dot{y} &= -rcx - r\eta\dot{x} \quad (2.12)
\end{aligned}$$

Для цепочки (5-6)

$$\begin{aligned}
J\ddot{\phi}_9 + \eta_1\dot{\phi}_9 + 2r^2c\phi_9 + 2r^2\eta\dot{\phi}_9 + r^2c\phi_{10} + r^2\eta\dot{\phi}_{10} &= 0; \\
J\ddot{\phi}_{10} + \eta_1\dot{\phi}_{10} + r^2c\phi_9 + r^2\eta\dot{\phi}_9 + 2r^2c\phi_{10} + 2r^2\eta\dot{\phi}_{10} + r^2c\phi_{11} + r^2\eta\dot{\phi}_{11} &= 0; \\
J\ddot{\phi}_{11} + \eta_1\dot{\phi}_{11} + r^2c\phi_{10} + r^2\eta\dot{\phi}_{10} + 2r^2c\phi_{11} + 2r^2\eta\dot{\phi}_{11} + rcy_3 + r\eta\dot{y}_3 &= 0. \quad (2.13)
\end{aligned}$$

Исключение натяжений канатов из (4) дает

$$M_1\ddot{x} + 10\eta\dot{x} + 10cx + M_2\ddot{y}_2 + 2cy_2 + 2\eta\dot{y}_2 + rc\phi_{10}r + r\eta\dot{\phi}_{10} = -F_S \quad (2.14)$$

Исключение натяжения каната из (7) дает

$$M_3\ddot{y}_3 + cy_3 + \eta\dot{y}_3 + rc\phi_{11} + r\eta\dot{\phi}_{11} = 0 \quad (2.15)$$

Движение узла M_2

$$M_2\ddot{y}_2 + 2\tilde{n}y_2 + 2\eta_2\dot{y}_2 + rc\phi_4 + r\eta\dot{\phi}_4 + rc\phi_8 + r\eta\dot{\phi}_8 = -R, \quad (2.16)$$

В операторной форме система (11) - (16) принимает вид:

$$\begin{aligned}
\left[Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}\right]\phi_1(s) + r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_2(s) &= 0; \\
r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_1(s) + \left[Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}\right]\phi_2(s) + r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_3(s) &= 0; \\
r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_2(s) + \left[Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}\right]\phi_3(s) + r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_4(s) &= 0; \\
r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_3(s) + \left[Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}\right]\phi_4(s) + r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_7(s) + \\
+ \left[Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}\right]\phi_8(s) + r(\eta s + c)y_2(s) &= 0; \\
\left[Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}\right]\phi_5(s) + r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_6(s) &= 0 \\
r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_5(s) + \left[Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}\right]\phi_6(s) + r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_7(s) &= 0 \\
r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_6(s) + \left[Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}\right]\phi_7(s) + r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_8(s) &= 0 \\
r^2(\eta s + \tilde{n})\phi_7(s) + \left[Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}\right]\phi_8(s) + r(\eta s + c)x(s) + r(\eta s + c)y_2(s) &= 0 \\
\left[Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2c\right]\phi_9(s) + r^2(\eta s + c)\phi_{10}(s) &= 0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r^2(\eta s + c)\varphi_9(s) + [Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2c]\varphi_{10}(s) + r^2(\eta s + c)\varphi_{11}(s) &= 0; \\
r^2(\eta s + c)\varphi_{10}(s) + [Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2c]\varphi_{11}(s) + r(\eta s + c)y_3(s) &= 0; \\
r(\eta s + c)\varphi_{10}(s) + (M_1s^2 + 10\eta s + 10c)x(s) + (M_2s^2 + 2\eta s + 2c)y_2(s) &= -F_S. \\
r(\eta s + c)\varphi_4(s) + r(\eta s + c)\varphi_8(s) + (M_2s^2 + 2\eta s + 2c)y_2(s) &= -R \\
r(\eta s + c)\varphi_{11}(s) + (M_3s^2 + 2\eta s + 2c)y_3(s) &= 0
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Система (2.17) в компактной форме может быть записана в виде

$$A(s)Z(s) = F(s), \tag{2.18}$$

где s - оператор дифференцирования (переменная Лапласа); $Z(s) = [\varphi_1(s), \dots, \varphi_{11}(s), x(s), y_2(s), y_3(s)]^\theta$ - вектор координат состояния полиспастной системы; $A(s) = [a_{ij}(s)]$ - 14×14 невырожденная матрица; $F(s) = [0, \dots, 0, F_S(s), R(s), 0]^\theta$ - вектор входных воздействий; θ - операция транспонирования.

Комплексные коэффициенты $[a_{ij}(s)]$, $1 \leq i, j \leq 14$, определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
a_{11}(s) &= Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}; \quad a_{12}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); \quad a_{13}(s) = 0; \dots, \quad a_{1,14}(s) = 0; \\
a_{21}(s) &= r^2(\eta s + \tilde{n}); \quad a_{22}(s) = [Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}]; \quad a_{23}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); \\
a_{24}(s) &= 0; \dots, \quad a_{2,14}(s) = 0; \quad a_{31}(s) = 0; \quad a_{32}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); \\
a_{33}(s) &= [Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}]; \quad a_{34}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n})\varphi_1(s); \quad a_{35}(s) = 0; \dots, \\
a_{3,14}(s) &= 0; \quad a_{41}(s) = 0; \quad a_{42}(s) = 0; \quad a_{43}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); \\
a_{44}(s) &= Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}; \quad a_{45}(s) = 0; \quad a_{47}(s) = 0; \\
a_{48}(s) &= Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}; \quad a_{49}(s) = 0; \dots, \quad a_{4,12}(s) = 0; \quad a_{4,13}(s) = r(\eta s + c); \\
a_{4,14}(s); \quad a_{51}(s) &= 0; \dots, \quad a_{54}(s) = 0; \quad a_{55}(s) = Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& a_{56}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); a_{57}(s) = 0; \dots, a_{5,14}(s) = 0; a_{61}(s) = 0; \dots, a_{64}(s) = 0; \\
& a_{65}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); a_{66}(s) = [Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}]; a_{67}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); \\
& a_{68}(s) = 0; \dots, a_{6,14}(s) = 0; a_{71}(s) = 0; \dots, a_{75}(s) = 0; a_{76}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); \\
& a_{77}(s) = [Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}]; a_{78}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); a_{79}(s) = 0; \dots, \\
& a_{7,14}(s) = 0; a_{81}(s) = 0; \dots, a_{86}(s) = 0; a_{87}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); \\
& a_{88}(s) = [Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}]; a_{89}(s) = 0; \dots, a_{8,11}(s) = 0; a_{8,12}(s) = r(\eta s + c); \\
& a_{8,13}(s) = r(\eta s + c); a_{8,14}(s) = 0; a_{91}(s) = 0; \dots, a_{98}(s) = 0; \\
& a_{99}(s) = Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}; a_{9,10}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); a_{9,11}(s) = 0; \dots, \\
& a_{9,14}(s) = 0; a_{10,1}(s) = 0; \dots, a_{10,8}(s) = 0; a_{10,9}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}) \\
& a_{10,10}(s) = Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}; a_{10,11}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); a_{10,12}(s) = 0; \dots, \\
& a_{10,14}(s) = 0; a_{11,1}(s) = 0; \dots, a_{11,9}(s) = 0; a_{11,10}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}) \\
& a_{11,11}(s) = Js^2 + (\eta_1 + 2r^2\eta)s + 2r^2\tilde{n}; a_{11,12}(s) = 0; a_{11,13}(s) = 0; \\
& a_{11,14}(s) = r(\eta s + c); a_{12,1}(s) = 0; \dots, a_{12,9}(s) = 0; a_{12,10}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); \\
& a_{12,11}(s) = 0; a_{12,12}(s) = M_1s^2 + 10\eta s + 10c; a_{12,13}(s) = (M_2s^2 + 2\eta s + 2c); \\
& a_{12,14}(s) = 0; a_{13,1}(s) = 0; \dots, a_{13,3}(s) = 0; a_{13,4}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); a_{13,5}(s) = 0; \dots, \\
& a_{13,7}(s) = 0; a_{13,8}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); a_{13,13}(s) = M_2s^2 + 2\eta s + 2c; a_{13,14}(s) = 0; \\
& a_{14,1}(s) = 0; \dots, a_{14,10}(s) = 0; a_{14,11}(s) = r^2(\eta s + \tilde{n}); a_{14,12}(s) = 0; a_{14,13}(s) = 0; \\
& a_{14,14}(s) = M_3s^2 + 2\eta s + 2c.
\end{aligned}$$

Система (2.18) является алгебраической линейной системой из четырнадцати уравнений с четырнадцатью неизвестными.

Решение (2.17) дает следующие значения изображений координат $x(s)$, $y_2(s)$, $y_3(s)$ по Лапласу:

$$\begin{pmatrix} x(s) \\ y_2(s) \\ y_3(s) \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta_P(s)} \begin{pmatrix} \Delta_{12}(s) \\ \Delta_{13}(s) \\ \Delta_{14}(s) \end{pmatrix}, \quad (2.19)$$

где $\Delta_P(s) = \det[A(s)]$; $\Delta_{12}(s) = \det[A_{12}(s)]$; $\Delta_{13}(s) = \det[A_{13}(s)]$; $\Delta_{14}(s) = \det[A_{14}(s)]$; $A_{12}(s)$, $A_{13}(s)$, $A_{14}(s)$ - матрицы $A(s)$, у которых на столбцах $F(s) = [0, \dots, 0, F_S(s), R(s), 0]^0$ заменены двенадцатый, тринадцатый и четырнадцатый столбцы, соответственно.

2.2. Модель трехфазного асинхронного привода с частотным управлением

Функциональная схема гидронасоса с электродвигателем приведена на рис. 2.2.

Трехфазный асинхронный двигатель переменного тока включен по схеме «звезда». Он преобразует электрическую энергию в механическую, которая затем передается на гидронасос и далее на линейный привод и полиспасть. Различные подходы к формированию математической модели привода изложены в источниках [25, 31, 38, 39, 43, 44, 51, 52, 55, 58, 59, 81, 152]. Предлагается следующее описание магнитоэлектрических процессов, протекающих в статорных обмотках и короткозамкнутом роторе привода:

$$\begin{aligned} (L_S + M_S) \frac{di_A}{dt} + Ri_A + \frac{d}{dt} (M_{Aa}i_a + M_{Ab}i_b + M_{Ac}i_c) &= \frac{1}{3}(u_{AB} - u_{CA}); \\ (L_S + M_S) \frac{di_B}{dt} + Ri_B + \frac{d}{dt} (M_{Ba}i_a + M_{Bb}i_b + M_{Bc}i_c) &= \frac{1}{3}(u_{BC} + u_{AB}); \\ (L_S + M_S) \frac{di_C}{dt} + Ri_C + \frac{d}{dt} (M_{Ca}i_a + M_{Cb}i_b + M_{Cc}i_c) &= \frac{1}{3}(u_{CA} - u_{BC}), \end{aligned} \quad (2.20)$$

где L_S - индуктивность обмотки фазы статора; M_S - взаимная индуктивность обмоток фаз статора; R - активное сопротивление обмотки фазы статора; i_A, i_B, i_C - токи в обмотках А, В, С статора; i_a, i_b, i_c - токи, наводимые в короткозамкнутом роторе токами соответствующих обмоток; M_{Qq} - взаимная индуктивность обмотки фазы $\{A, B, C\}$ статора и фазы $\{a, b, c\}$ ротора; u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} - межфазное напряжение.

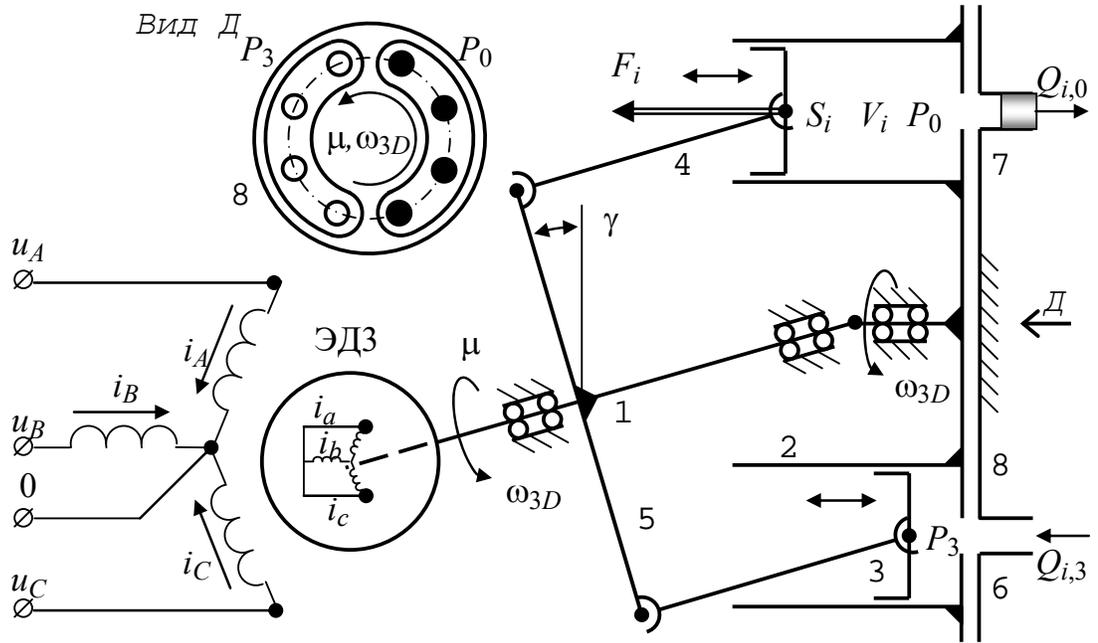


Рис. 2.2. Функциональная схема гидронасоса с электродвигателем

Суммарный электромагнитный момент, действующий на ротор, определяется по зависимости:

$$\mu_p = \mu_A + \mu_B + \mu_C, \quad (2.21)$$

где μ_Q - магнитный момент, создаваемый фазой Q ; $\kappa_\mu = \frac{3}{\pi} n D l \kappa_\beta$; $\kappa_\beta = \frac{\beta}{i}$ - коэффициент передачи (магнитная индукция)/(ток, создающий магнитный поток); D - диаметр ротора; l - активная длина проводника; n - количество триад стартовых обметок;

$$\begin{aligned} \mu_A &= -\kappa_\mu i_a \left[i_A \sin \Theta + i_B \sin \left(\Theta + \frac{4\pi}{3} \right) + i_C \sin \left(\Theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\ \mu_B &= -\kappa_\mu i_b \left[i_A \sin \left(\Theta + \frac{2\pi}{3} \right) + i_B \sin \Theta + i_C \sin \left(\Theta + \frac{4\pi}{3} \right) \right]; \\ \mu_C &= -\kappa_\mu i_c \left[i_A \sin \left(\Theta + \frac{4\pi}{3} \right) + i_B \sin \left(\Theta + \frac{2\pi}{3} \right) + i_C \sin \Theta \right], \end{aligned} \quad (2.22)$$

где Θ - угол между векторами магнитного поля, вращающегося с угловой скоростью $\frac{2\pi}{n}f_{3D}$, и ротора, вращающегося с угловой скоростью ω_{3D} , производная от Θ , $\frac{d\Theta}{dt} = \theta$ представляет собой величину скольжения.

Как следует из (2.20) - (2.22), создаваемый вращающимся магнитным полем момент при отсутствии потери потокосцепления пропорционален величине скольжения, т.е. разности между угловыми скоростями вращения ротора и электромагнитного поля. Это позволяет для малых изменений величины скольжения сформировать следующее уравнение механического равновесия ротора:

$$J\ddot{\Theta} + \eta_m \dot{\Theta} = \kappa_{3D}U_{3D} + \kappa_\mu \mu, \quad (2.23)$$

где J - момент инерции ротора; η_m - параметр, зависящий от конструкции двигателя и диссипативных сил, в частности вязкого трения в подшипниках ротора; κ_{3D} - коэффициент передачи по питающему трехфазному напряжению; U_{3D} - амплитуда трехфазного напряжения питания; κ_μ - коэффициент передачи по внешнему моменту, приложенному к двигателю; μ - внешний момент, приложенный к валу двигателя со стороны гидронасоса; $\dot{\Theta}$ - величина скольжения.

Угловая скорость вращения вала двигателя ω_{3D} определяется частотой питающего напряжения f_{3D} и величиной скольжения, т.е.

$$\omega_{3D} = \frac{2\pi}{n}f_{3D} - \theta, \quad (2.24)$$

где f_{3D} - частота управляющего напряжения, меняющаяся ступенчато; $\dot{\Theta}$ - величина скольжения [с^{-1}]; n - количество триад обмоток статора, создающих вращающееся магнитное поле..

Угловая скорость ω_{3D} трехфазного двигателя с частотным управлением определяет расход рабочей жидкости в насосе, а момент μ , развиваемый на валу двигателя, определяет давление в напорной магистрали.

2.3. Модель гидронасоса

Кинематическая схема гидронасоса аксиально-поршневого типа приведена на рис. 2.3. [1, 87, 88, 91, 94]

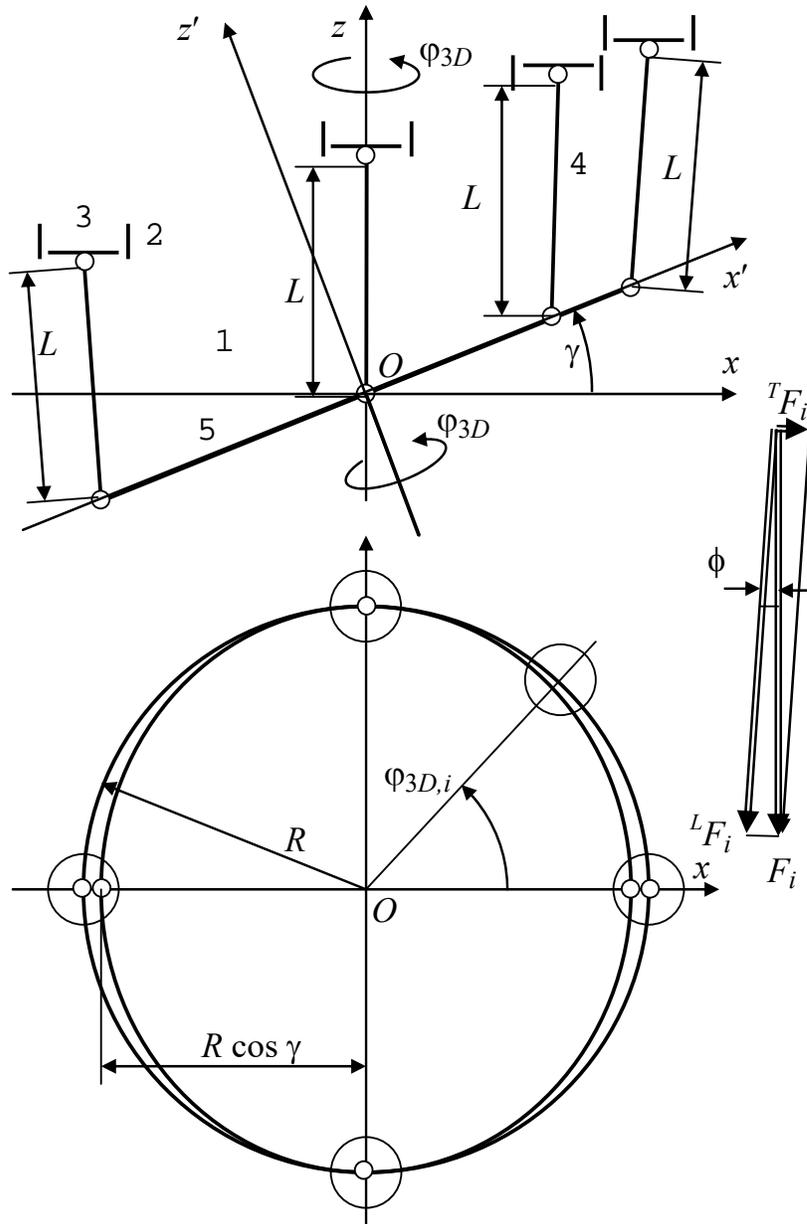


Рис. 2.3. Формирование сил, создающих момент на валу гидронасоса

Гидронасос [35, 73, 97, 108, 150] включает вращающийся блок 1 цилиндров 2, в котором возвратно-поступательно движутся поршни 3, связанные посредством шарнирно-стержневого соединения 4 с платой 5, установленной на валу электродвигателя 6. Электродвигатель 6 установлен таким образом, что

его вал связан шарнирно с валом блока 1 цилиндров 2 и образует с ним угол γ . Цилиндры вращающегося блока гидравлически связаны с входной 6 и выходной 7 магистралями через распределительную шайбу 8, которая при вращении блока цилиндров 1 обеспечивает подключение части цилиндров 2 к входной магистрали 6, а другой части цилиндров 2 - к выходной магистрали 7. Во входной магистрали 6 устанавливается атмосферное давление P_3 , а в выходной магистрали 7 устанавливается высокое давление P_0 , подаваемое на линейный гидропривод.

При разработке модели гидронасоса использованы следующие допущения:

рабочая жидкость является несжимаемой;
влияние упругости стенок трубопроводов пренебрежимо мало;
дресселирование рабочей жидкости осуществляется на выходном фильтре гидронасоса, и магистрали, соединяющей гидронасос с линейным гидроприводом.

поршни, работающие на всасывание жидкости, не создают крутящего момента вследствие того, что полости цилиндров, в которых перемещаются эти поршни, и входная магистраль находятся под одинаковым атмосферным давлением, а сечение входного отверстия достаточно велико, чтобы не создавать сопротивления ламинарному току рабочей жидкости.

Для построения математической модели функционирования гидронасоса вводятся следующие системы координат:

$xOyz$ - неподвижная система координат, центр O которой совпадает с центром платы 5, ось z параллельно направлению хода поршней 3 в цилиндрах 2, оси x и y образуют плоскость, ортогональную оси z ;

$x'Oy'z'$ - система координат, центр O которой совпадает с центром системы координат $xOyz$, ось z' совпадает с осью вращения вала электродвигателя, ось y' совпадает с осью y , а ось x' повернута относительно оси x на угол γ .

угол φ_{3D} отсчитывается от положительного направления оси x в системе координат $xOyz$ и от положительного направления оси x' в системе координат $x'Oy'z'$;

угловая скорость вращения вала и углы φ_{3D} , φ_3 связаны следующим соотношением:

$$\omega_{3D} = \frac{d\varphi_{3D}}{dt}; \quad d\varphi_{3D} = d\varphi_3,$$

где φ_3 - угловая скорость вращения платы 5 с поршнями.

В системе координат $xOyz$ представляются координаты шарниров, которыми центры поршней 3 соединяются со штангами шарнирно-стержневого соединения 4. По окружности радиусом R поршни устанавливаются с равномерным угловым шагом, равным $\frac{2\pi}{n}$. Таким образом, координаты i -го поршня равны

$$\begin{cases} x_i = R \cos \left[\varphi_{3D} + \frac{\pi(2i+1)}{n} \right]; \\ y_i = R \sin \left[\varphi_{3D} + \frac{\pi(2i-1)}{n} \right]; \\ z_i = 0, \end{cases} \quad (2.25)$$

где $0 \leq i \leq n-1$ - номер поршня; n - количество поршней; φ_{3D} - угол поворота вращающегося блока 1 цилиндров, равный углу поворота вала двигателя; x_i , y_i , z_i , - координаты i -го поршня в системе координат $xOyz$.

Аналогично в системе координат $x'Oy'z'$ координаты шарниров, которыми штанги шарнирно-стержневого соединения 4 соединяются с платой 5, определяются выражением

$$\begin{cases} x'_i = R \cos \left[\varphi'_{3D} + \frac{\pi(2i+1)}{n} \right]; \\ y'_i = R \sin \left[\varphi'_{3D} + \frac{\pi(2i-1)}{n} \right]; \\ z'_i = 0, \end{cases} \quad (2.26)$$

$\varphi_{3D} - \varphi'_{3D}$ - угол поворота платы относительно вала электродвигателя 6; x'_i , y'_i , z'_i , - координаты i -й точки крепления поршня в системе координат $x'Oy'z'$.

Пересчет координат из системы $x'Oy'z'$ в систему $xOyz$ осуществляется по зависимости:

$$\begin{pmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{pmatrix}, \quad (2.27)$$

где x''_i , y''_i , z''_i - координаты x'_i , y'_i , z'_i в системе координат $xOyz$.

Из формулы для расчета длины штанги по координатам ее конечных точек могут быть получены значения координат z поршней в системе координат $xOyz$

$$z_i = \sqrt{L^2 - (x_i - x''_i)^2 - (y_i - y''_i)^2}. \quad (2.28)$$

Направляющий вектор пространственного положения i -й штанги в системе координат $xOyz$ определяется следующим образом:

$$\rho_i = \begin{pmatrix} \rho_{ix} \\ \rho_{iy} \\ \rho_{iz} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x''_i)^2 + (y_i - y''_i)^2 + (z_i - z''_i)^2}} \begin{pmatrix} x_i - x''_i \\ y_i - y''_i \\ z_i - z''_i \end{pmatrix}, \quad (2.29)$$

где ρ_{ix} , ρ_{iy} , ρ_{iz} - проекции вектора на оси x , y , z , соответственно; x_i , y_i - координаты i -го поршня, определяемые системой (2.25); z_i - координата i -го поршня, определяемая выражением (2.28); x''_i , y''_i , z''_i - координаты точек шарнирного соединения штока и платы, определяемые матричным уравнением (2.27).

С учетом (2.29) угол ϕ_i между штоком и нормалью к плоскости поршня определяется по зависимости:

$$\phi_i = \arccos \frac{z_i - z''_i}{\sqrt{(x_i - x''_i)^2 + (y_i - y''_i)^2 + (z_i - z''_i)^2}}. \quad (2.30)$$

Нормаль к плоскости платы определяется в виде

$$\rho_N = \begin{pmatrix} \rho_{Nx} \\ \rho_{Ny} \\ \rho_{Nz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \gamma \\ 0 \\ \cos \gamma \end{pmatrix}. \quad (2.31)$$

С учетом (2.29) и (2.31) угол ϕ_i между штоком и нормалью к плоскости платы определяется выражением:

$$\phi_i = \arccos(\rho_{ix}\rho_{Nx} + \rho_{iy}\rho_{Ny} + \rho_{iz}\rho_{Nz}) = \arccos(\rho_{ix} \sin \gamma + \rho_{iz} \cos \gamma). \quad (2.32)$$

Гидронасос работает следующим образом. Крутящий момент μ , создаваемый на валу гидронасоса электродвигателем, уравнивается моментами, создаваемыми поршнями, находящимися под давлением P_0 :

$$\mu(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t), \quad (2.33)$$

где $\mu(t)$ - суммарный момент на валу гидропривода; $\mu_i(t)$ - момент, создаваемый i -м поршнем на валу; n - количество поршней, подключенных к выходной магистрали.

Давление в цилиндрах нагнетания при практическом отсутствии дросселирования рабочей жидкости на выходных трубопроводах, связывающих цилиндры с магистралью равно давлению в магистрали P_0 . В этом случае на поршни площадью S действует одинаковая сила

$$F_c = SP_0, \quad (2.34)$$

где S - площадь поршня, одинаковая для всех цилиндров гидронасоса.

Сила F_c , направлена вдоль оси z системы координат $xOyz$, связанной с осью вращения блока 1 цилиндров. Вдоль оси z возвратно-поступательно перемещаются поршни 2, создающие давление в выходной магистрали 7. Сила F_c раскладывается на продольную составляющую ${}^L F_i$, направленную вдоль штока шарнирно-стержневого соединения 4 с платой 5, и поперечную составляющую ${}^T F_i$, направленную поперек штока. Вследствие того, что штоки цилиндров расположены под разными углами к осевой, как продольная, так и поперечная составляющие силы F_c , будут иметь разные значения для разных поршней. На плату 5 передается только продольная составляющая ${}^L F_i$, направленная вдоль штока, и равная

$${}^L F_i = F_c \cos \phi_i, \quad (2.35)$$

где ϕ_i - угол между штоком шарнирно-стержневого соединения 4 и осью z, определяемый по зависимости (2.30).

Поперечная составляющая ${}^T F_i$ через стенку цилиндра воздействует на вращающийся блок 1 цилиндров.

Продольная составляющая ${}^L F_i$ прикладывается к плате 5 в точке крепления шарнира шарнирно-стержневого соединения. По координатам системы координат $xOyz$ вектор продольной составляющей ${}^L F_i$ раскладывается следующим образом:

$$\mathbf{F}_i = {}^L F_i \begin{pmatrix} v_{ix} \\ v_{iy} \\ v_{iz} \end{pmatrix}, \quad (2.36)$$

где v_{ix}, v_{iy}, v_{iz} - направляющие косинусы штанги, определяемые в соответствии с формулой (2.29); ${}^L \mathbf{F}_i$ - вектор; ${}^L F_i$ - скаляр.

Пересчет значений элементов вектора ${}^L \mathbf{F}_i$ в значения элементов вектора ${}^L \mathbf{F}'_i$, представленного в системе координат $x'Oy'z'$, осуществляется в соответствии выражением

$$\mathbf{F}'_i = \begin{pmatrix} {}^L F'_{ix} \\ {}^L F'_{iy} \\ {}^L F'_{iz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} {}^L F_i v_{ix} \\ {}^L F_i v_{iy} \\ {}^L F_i v_{iz} \end{pmatrix}, \quad (2.37)$$

где ${}^L F'_{ix}$ - составляющая, направленная вдоль оси x' ; ${}^L F'_{iy}$ - составляющая, направленная вдоль оси y' ; ${}^L F'_{iz}$ - составляющая, направленная вдоль оси z' .

Составляющая ${}^L F'_{iz}$ направлена вдоль оси z' , проходящей через вал электродвигателя, и уравновешивается статической силой в его подшипниках. Составляющие ${}^L F'_{ix}$ и ${}^L F'_{iy}$ создают моменты, уравновешивающие движущий момент μ электродвигателя, что показано на рис. 2.4.

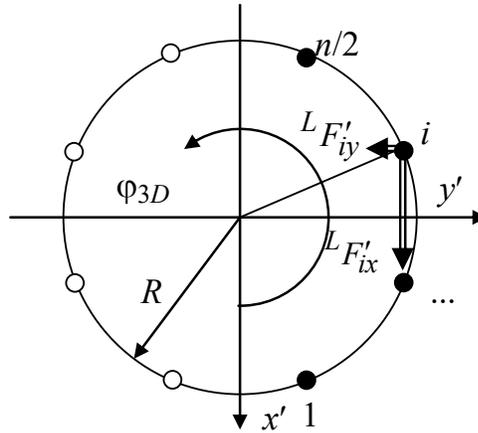


Рис. 2.4. Формирование момента на валу электродвигателя

На этом рисунке справа показаны точки, с первой по $(n/2)$, крепления шарниров, соединенных с поршнями, создающими давление в цилиндрах, которые подключены к напорной магистрали. Нумерация точек производится по углу, отсчитываемому от оси x' . Точка с номером i имеет угловую координату

$$\varphi_{3D,i} = \tilde{\varphi}_{3D,i} + \frac{2\pi i}{n}, \quad (2.38)$$

где $0 \leq i \leq \frac{n}{2} - 1$; $0 < \tilde{\varphi}_{3D} < \frac{2\pi}{n}$.

Суммарный момент, создаваемый давлением в магистрали на валу электродвигателя, определяется по зависимости

$$\mu(t) = R \cdot \sum_{i=0}^{n/2-1} \left[L F_{ix}(t) \cos \varphi_{3D,i} + L F_{iy}(t) \sin \varphi_{3D,i} \right], \quad (2.39)$$

где t - время.//

Из (2.39), а также из (2.33) ÷ (2.37) следует, что момент, создаваемый на валу давлением рабочей жидкости, пропорционален давлению, т.е.

$$\mu(t) = \kappa_{P0,\mu} \cdot P_0(t), \quad (2.40)$$

где $\kappa_{P0,\mu}$ - коэффициент передачи, определяемый конструктивными особенностями насоса, в частности количеством поршней, одновременно задействованных на создание давления в напорной магистрали, величиной радиуса R , по ко-

тому расположены центры отверстий, соединенных с напорной магистралью, длиной L штоков, соединяющих поршни с платов, углом γ наклона платы и т.п.

К моменту (2.40) добавляется момент инерции подвижных частей гидронасоса (плата 5 и блок 1 цилиндров) и момент вязкого трения в подшипниках платы 5 и подшипниках блока цилиндров 1. В результате уравнение, описывающее динамику гидронасоса, имеет вид:

$$J_p \ddot{\phi}_{3D} + \eta_p \dot{\phi}_{3D} = \kappa_{P0,\mu} \cdot P_0(t), \quad (2.41)$$

где J_p - момент инерции подвижных частей гидронасоса; η_p - коэффициент вязкого трения в подшипниках платы 5 и подшипниках блока цилиндров 1; $\dot{\phi}_{3D} = \frac{d\phi_{3D}}{dt}$; $\ddot{\phi}_{3D} = \frac{d\dot{\phi}_{3D}}{dt}$. Следует отметить, что силы, создающие крутящий момент, являются переменными, однако с достаточной для практических целей точностью их сумму можно считать постоянной.

Для определения объемного расхода рабочей жидкости следует оценить положение поршней во всех цилиндрах, одновременно находящихся под давлением P_0 . Положения поршней определяются зависимостью (2.28), а выражение для суммарного объемного расхода может быть получено путем дифференцирования суммы положений штоков цилиндров расходов по времени:

$$Q(t) = \kappa_Q \sum_{i=0}^{n/2-1} \frac{dz_i[\phi_{3D,i}(t)]}{dt} = \kappa_Q \sum_{i=0}^{n/2-1} \frac{dz_i[\phi_{3D,i}(t)]}{d\phi_{3D,i}(t)} \frac{d\phi_{3D,i}(t)}{dt}, \quad (2.42)$$

где $z_i[\theta_i(t)]$ - положение i -го поршня в текущий момент времени t , определяемое по зависимости (2.28); $\phi_{3D,i}(t)$ - угловое положение i -го поршня в текущий момент времени t ; κ_Q - коэффициент пропорциональности.

Но

$$\frac{d\phi_{3D,i}(t)}{dt} = \text{const}_i = \theta(s) + \frac{2\pi}{n} f_{3D}$$

следовательно,

$$Q(t) = \kappa'_Q \left[\theta(t) + \frac{2\pi}{n} f_{3D} \right], \quad (2.43)$$

где $\kappa'_Q = \kappa_Q \sum_{i=0}^{n/2-1} \frac{dz_i[\varphi_{3,i}(t)]}{d\varphi_{3,i}(t)}$.

С другой стороны, суммарный расход рабочей жидкости определяется разностью давлений в напорной магистрали и рабочих полостях исполнительных гидромеханизмов, данном случае линейного гидропривода:

$$Q(t) = \vartheta f_1 [P_0(t) - P_1(t)]^{1/2} + \vartheta f_2 [P_0(t) - P_2(t)]^{1/2}, \quad (2.44)$$

где $P_0(t)$ - давление в рабочих на данный момент цилиндрах гидропривода и магистрали; f_1 - площадь эффективного сечения дросселя, через который осуществляется наполнение рабочей жидкостью первой полости линейного гидроцилиндра; f_2 - площадь эффективного сечения дросселя, через который осуществляется наполнение рабочей жидкостью второй полости линейного гидропривода; $P_0(t)$ - давление в магистрали; $P_1(t)$, $P_2(t)$ - давления в рабочих полостях линейного гидропривода.

Из вышеприведенной системы уравнений, описывающей кинематические связи и силовое взаимодействие узлов гидронасоса, а также из зависимости (2.25), может быть получена система, связывающая входное силовое воздействие (μ , f_{3D} , Θ) и выходные силовые параметры (P_0 , Q) насоса.

$$\begin{cases} J_p \ddot{\Theta}(t) + \eta_p \left(\frac{2\pi}{n} f_{3D}(t) - \dot{\Theta}(t) \right) = \kappa_{P_0, \mu} \cdot P_0(t); \\ Q(t) = \vartheta f_1(t) [P_0(t) - P_1(t)]^{1/2} + \vartheta f_2(t) [P_0(t) - P_2(t)]^{1/2}; \\ Q(t) = \kappa'_Q \left[\frac{2\pi}{n} f_{3D}(t) - \dot{\Theta}(t) \right], \end{cases} \quad (2.45)$$

где $\frac{2\pi}{n} f_{3D}(t) - \dot{\Theta}(t)$ - угловая скорость вала насоса с учетом скольжения; f_{3D} -

const после выбора режима бурения, поэтому $\frac{df_{3D}}{dt} = 0$.

Линеаризация второго уравнения системы (2.44) и переход к операторной форме представления дифференциальных уравнения дает следующую систему:

$$\begin{cases} (J_p s + \eta_p) \left[\theta(s) + \frac{2\pi}{n} f_{3D}(s) \right] = \kappa_{P0,\mu} \cdot P_0(s); \\ Q(s) = a_{f,1,1} f_1(s) + a_{f,2,1} f_2(s) + a_{P,0,1} P_0(s) \\ + a_{P,1,1} P_1(s) + a_{P,2,1} P_2(s); \\ Q(s) = \kappa'_Q \left[\theta(s) + \frac{2\pi}{n} f_{3D}(s) \right], \end{cases} \quad (2.46)$$

где s - оператор дифференцирования (переменная Лапласа; $Q(s)$ - изображение расхода рабочей жидкости по Лапласу; $f_1(s)$ - изображение переменного значения эффективного сечения первого клапана, через который производится наполнение первой рабочей полости линейного гидропривода, по Лапласу; $f_2(s)$ - изображение переменного значения эффективного сечения первого клапана, через который производится наполнение второй рабочей полости линейного гидропривода, по Лапласу, $P_0(s)$ - изображение давления в напорной магистрали по Лапласу; $P_1(s)$, $P_2(s)$ - изображение давлений в рабочих полостях линейного гидропривода по Лапласу; \tilde{f}_1 , \tilde{f}_2 , \tilde{P}_0 , \tilde{P}_1 , \tilde{P}_2 - точки, в которых осуществлялось разложение функции расхода через соответствующие клапаны, в ряд Тейлора;

$$\begin{aligned} a_{f,1,1} &= \vartheta(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1)^{1/2}; \quad a_{f,2,1} = \vartheta(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1)^{1/2}; \quad a_{P,1,1} = -\vartheta\tilde{f}_1(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1)^{-1/2}; \\ a_{P,2,1} &= -\vartheta\tilde{f}_2(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_2)^{-1/2}; \quad a_{P,0,1} = \vartheta\tilde{f}_1(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1)^{-1/2} + \vartheta\tilde{f}_2(\tilde{P}_0 - \tilde{P}_2)^{-1/2}. \end{aligned}$$

Таким образом, построена аналитическая модель функционирования насоса с учетом воздействия частотного управляющего фактора.

2.4. Модель линейного гидропривода

Линейный привод двустороннего действия

Функциональная схема линейного гидропривода двустороннего действия приведена на рис. 2.5. [1] В состав привода входит поршень, цилиндр с двумя проточными полостями, V_1 и V_2 , регулируемые клапаны f_1 и f_2 , нерегулируемые дроссели f'_1 и f'_2 и шток F_{11} . Ход штока x и сила F_{11} , направленная вдоль штока, являются выходными параметрами привода. При описании привода двусто-

ронного действия с прямым ходом штока примем следующие дополнительные допущения:

масса подвижных частей штока отнесена к массе поршня m ;

вязкое трение в подвижных частях штока также учтено при описании каната;

привод жестко установлен на основание;

упругость штока и продольная упругость цилиндра пренебрежимо малы по сравнению с упругостью каната;

в гидросистеме циркулирует вязкая несжимаемая жидкость;

давление P_1 в полости V_1 и давление P_2 в полости V_2 обеспечивается двумя регулируемыми клапанами с эффективными площадями сечения f_1 и f_2 , соответственно;

дроссели на выходах полостей цилиндров имеют одинаковые эффективные площади $f'_1 = f'_2 = f_3$;

перетекание рабочей жидкости из одной полости в другую отсутствует;

трубопроводы считаются линиями с сосредоточенными параметрами, гидравлические сопротивления трубопроводов отнесены к сопротивлениям соответствующих регулируемых клапанов и выходных дросселей.

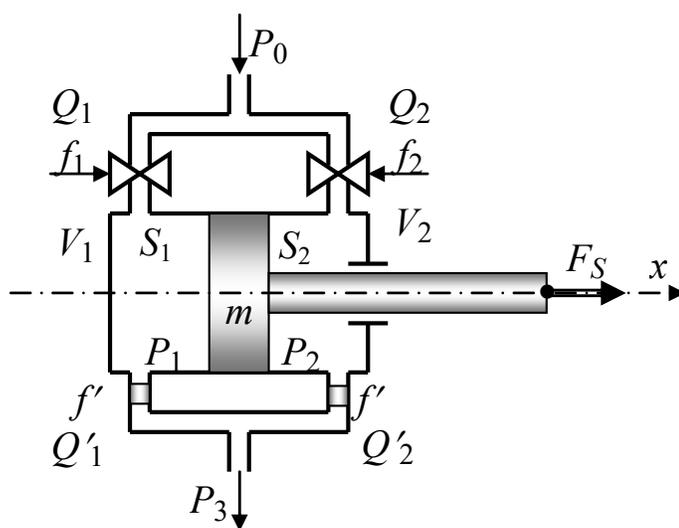


Рис. 2.5. Линейный гидропривод двустороннего действия

С учетом принятых допущений объемные расходы рабочего тела через первый и второй регулируемые клапаны определяются зависимостями:

$$Q_1(t) = C_1 f_1(t) \sqrt{\frac{2[P_0(t) - P_1(t)]}{\rho}}; \quad (2.47)$$

$$Q_2(t) = C_2 f_2(t) \sqrt{\frac{2[P_0(t) - P_2(t)]}{\rho}}, \quad (2.48)$$

где C_1, C_2 - коэффициент расхода через первый и второй регулируемые клапаны; $f_1(t), f_2(t)$ - площади проходных сечений первого и второго регулируемых клапанов, являющиеся управляющими воздействиями в приводе; ρ - плотность жидкости; $P_0(t) - P_1$ - перепад давления на первом регулируемом клапане; $P_0(t) - P_2(t)$ - перепад давления на втором регулируемом клапане; $P_0(t)$ - давление рабочей жидкости на входе в привод; t - время.

Коэффициенты расхода C_1, C_2 зависят от формы проточной части регулируемого клапана, являются функцией числа Рейнольдса и кинематической вязкости жидкости. Если в системе применяются одинаковые регулируемые клапаны, то $C_1 = C_2 = C$. Введем параметр \mathfrak{G} , определяемый по зависимости

$$\mathfrak{G} = \tilde{N} \sqrt{\frac{2}{\rho}}.$$

Тогда суммарный объемный приход рабочей жидкости в полости линейного гидропривода через входные клапаны f_1 и f_2 может быть представлен в виде:

$$Q(t) = Q_1(t) + Q_2(t) = \mathfrak{G} [f_1(t) \sqrt{P_0(t) - P_1(t)} + f_2(t) \sqrt{P_0(t) - P_2(t)}], \quad (2.49)$$

где $Q_1(t) = \mathfrak{G} f_1(t) \sqrt{P_0(t) - P_1(t)}$; $Q_2(t) = \mathfrak{G} f_2(t) \sqrt{P_0(t) - P_2(t)}$.

Суммарный объемный расход рабочей жидкости из полостей гидропривода через выходные дроссели с учетом симметрии устройства и постоянства проходных сечений выходных отверстий определяются в виде

$$Q'(t) = Q'_1(t) + Q'_2(t) = \mathfrak{G}' f' [\sqrt{P_1(t) - P_3} + \sqrt{P_1(t) - P_3}]; \quad (2.50)$$

где $Q_1'(t) = \mathfrak{G}'f'\sqrt{P_1(t) - P_3}$ и $Q_2'(t) = \mathfrak{G}'f'\sqrt{P_2(t) - P_3}$ - объемные расходы жидкости через первый и второй неуправляемые дроссели, соответственно; $\mathfrak{G}' = \tilde{N}'\sqrt{\frac{2}{\rho}}$; f' - площади проходных сечений неуправляемых дросселей; P_3 - атмосферное давление; \tilde{N}' - коэффициент расхода через первый и второй выходные дроссели.

Поток является ламинарным, поэтому уравнение неразрывности имеет вид

$$Q'(t) = Q(t) = \mathfrak{G}'f'[\sqrt{P_1(t) - P_3} + \sqrt{P_1(t) - P_3}] \quad (2.51)$$

С учетом невысокого быстродействия привода, потоки жидкости в первой и второй полостях можно считать ламинарными, поэтому для них может быть записано уравнение неразрывности:

$$\begin{aligned} \mathfrak{G}f_1(t)\sqrt{P_0(t) - P_1(t)} &= \mathfrak{G}'f'\sqrt{P_1(t) - P_3} + S\dot{x}; \\ \mathfrak{G}f_2(t)\sqrt{P_0(t) - P_2(t)} &= \mathfrak{G}'f'\sqrt{P_2(t) - P_3} - S\dot{x}, \end{aligned} \quad (2.52)$$

где $Q_1 = S\frac{dx}{dt} + Q_1'$; $Q_2 = -S\frac{dx}{dt} + Q_2'$; \dot{x} - скорость движения штока; S - площадь поршня, одинаковая для левой и правой полостей.

Выражения (2.47) - (2.52) должны быть дополнены уравнением сил

$$m\ddot{x}(t) + \eta_2\dot{x}(t) = F_S(t) + S_1P_1(t) - S_2P_2(t), \quad (2.53)$$

где $F_S(t)$ - сила, развиваемая на штоке (рис. 1); m - масса подвижных частей гидропривода; η_2 - коэффициент вязкого трения поршня о стенки цилиндра.

Предположим, что шток зафиксирован в статическом состоянии, в котором $\dot{x}(t) = 0$, $\dot{f}_0(t) = 0$, $\dot{f}_1(t) = 0$, $\dot{f}_2(t) = 0$, $\dot{P}_0(t) = 0$, $\dot{P}_1(t) = 0$, $\dot{P}_2(t) = 0$. Значения давлений в проточных полостях в этом состоянии определяется зависимостями:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_1 &= \frac{\mathfrak{G}^2 \tilde{f}_1^2 \tilde{P}_0 + \mathfrak{G}'^2 f'^2 P_3}{\mathfrak{G}^2 \tilde{f}_{10}^2 + \mathfrak{G}'^2 f'^2}; \\ \tilde{P}_2 &= \frac{\mathfrak{G}^2 \tilde{f}_2^2 \tilde{P}_0 + \mathfrak{G}'^2 f'^2 P_3}{\mathfrak{G}^2 \tilde{f}_{20}^2 + \mathfrak{G}'^2 f'^2} \end{aligned} \quad (2.54)$$

где $\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \tilde{P}_0$ фиксированные установившиеся значения соответствующих параметров.

Разложение (2.52) и (2.51) в ряд Тейлора в окрестностях точки $\tilde{f}_1, \tilde{f}_2, \tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \tilde{P}_0$, и исключение из выражений фиксированных значений параметров дает следующую линейную систему дифференциальных уравнений, описывающих гидропривод:

$$\begin{aligned} a_{P,1,2}P_1(t) + S\dot{x}(t) &= a_{f,1,2}f_1(t) + a_{P,0,1,2}P_0(t); \\ a_{P,2,2}P_2(t) - S\dot{x}(t) &= a_{f,2,2}f_2(t) + a_{P,0,2,2}P_0(t); \\ Q(t) &= a_{P,1,3}P_1(t) + a_{P,2,3}P_2(t) \\ SP_1(t) - SP_2(t) + m\ddot{x}(t) + \eta_2\dot{x}(t) &= F_S(t). \end{aligned} \tag{2.55}$$

где $\tilde{P}_0, \tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \tilde{f}_1, \tilde{f}_2$ - точки разложения нелинейных зависимостей в ряд Тейлора; f' - эффективное сечение сливного дросселя; P_3 - давление в сливной магистрали, равное атмосферному давлению;

$$\begin{aligned} a_{P,1,2} &= \frac{\partial \mathfrak{F}_1(t) \sqrt{P_0(t) - P_1(t)} - \mathfrak{F}' f' \sqrt{P_1(t) - P_3}}{\partial P_1(t)} = -\frac{\mathfrak{F}_1}{2\sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1}} - \frac{\mathfrak{F}' f'}{2\sqrt{\tilde{P}_1 - P_3}}; \\ a_{f,1,2} &= -\frac{\partial \mathfrak{F}_1(t) \sqrt{P_0(t) - P_1(t)}}{\partial f_1(t)} = -\mathfrak{F} \sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1}; \\ a_{P,0,1,2} &= \frac{\partial \mathfrak{F}_1(t) \sqrt{P_0(t) - P_1(t)}}{\partial P_0(t)} = \frac{\mathfrak{F}_1}{2\sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1}}; \\ a_{P,2,2} &= \frac{\partial \mathfrak{F}_2(t) \sqrt{P_0(t) - P_2(t)} - \mathfrak{F}' f' \sqrt{P_2(t) - P_3}}{\partial P_2(t)} = -\frac{\mathfrak{F}_2}{2\sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_2}} - \frac{\mathfrak{F}' f'}{2\sqrt{\tilde{P}_2 - P_3}}; \\ a_{f,2,2} &= -\frac{\partial \mathfrak{F}_2(t) \sqrt{P_0(t) - P_2(t)}}{\partial f_2(t)} = -\mathfrak{F} \sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_2}; \\ a_{P,0,2,2} &= \frac{\partial \mathfrak{F}_2(t) \sqrt{P_0(t) - P_2(t)}}{\partial P_0(t)} = \frac{\mathfrak{F}_2}{2\sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_2}}. \end{aligned}$$

Из первого уравнения выражаем $P_1(t)$, а из второго - $P_2(t)$. Все подставляем в третье уравнение, получаем:

$$m\ddot{x}(t) + S^2 \left[\left(\frac{1}{a_{P,1,2}} + \frac{1}{a_{P,2,2}} \right) + \eta_2 \right] \dot{x}(t) = \frac{a_{f,1,2}S}{a_{P1}} f_1(t) - \frac{a_{f,2,2}S}{a_{P,2,2}} f_2(t) + \left[\frac{a_{P,0,1,2}}{a_{P,1,2}} - \frac{a_{P,0,2,2}}{a_{P,2,2}} \right] SP_0(t) + F_S(t). \quad (2.56)$$

Кроме того, ход штока $x(t)$ создает разность расходов рабочей жидкости через первый и второй клапаны, т.е.

$$S\dot{x}(t) = \vartheta \left[f_1(t) \sqrt{P_0(t) - P_1(t)} - f_2(t) \sqrt{P_0(t) - P_2(t)} \right] = a_{f,1,3} f_1(t) + a_{f,2,3} f_2(t) + a_{P,1,3} P_1(t) + a_{P,2,3} P_2(t) + a_{P,0,3} P_0(t) \quad (2.57)$$

В операторной форме (2.56) имеет вид

$$\left\{ ms^2 + S^2 \left[\left(\frac{1}{a_{P,1,2}} + \frac{1}{a_{P,2,2}} \right) + \eta_2 \right] s \right\} x(s) = \frac{a_{f,1,2}S}{a_{P,1,2}} f_1(s) - \frac{a_{f,2,2}S}{a_{P,2,2}} f_2(s) + \left[\frac{a_{P,0,1,2}}{a_{P,1,2}} - \frac{a_{P,0,2,2}}{a_{P,2,2}} \right] SP_0(s) + F_S(s). \quad (2.58)$$

Уравнение (2.56) описывает динамику линейного гидропривода. При разгоне штока он работает как апериодическое звено. Постоянная времени разгонной характеристики определяется по зависимости:

$$\tau_{HD} = \frac{m}{S^2 \left[\left(\frac{1}{a_{P,1,2}} + \frac{1}{a_{P,2,2}} \right) + \eta_2 \right]}. \quad (2.59)$$

Коэффициенты передачи по каналам управления:

по каналу $F_{11}(s)$ -

$$\kappa_{F11} = \frac{1}{S^2 \left[\left(\frac{1}{a_{P,1,2}} + \frac{1}{a_{P,2,2}} \right) + \eta_2 \right]};$$

по каналу $f_1(s)$ -

$$K_{f1} = \frac{a_{f,1,2}}{S a_{P1} \left[\left(\frac{1}{a_{P,1,2}} + \frac{1}{a_{P,2,2}} \right) + \eta_2 \right]}$$

по каналу $f_2(s)$ -

$$K_{f1} = \frac{a_{f,2,2}}{S a_{P,2,2} \left[\left(\frac{1}{a_{P,1,2}} + \frac{1}{a_{P,2,2}} \right) + \eta_2 \right]};$$

по каналу $P_0(s)$ -

$$K_{P,0} = \frac{\frac{a_{P,0,1,2}}{a_{P,1,2}} - \frac{a_{P,0,2,2}}{a_{P,2,2}}}{S \left[\left(\frac{1}{a_{P,1,2}} + \frac{1}{a_{P,2,2}} \right) + \eta_2 \right]}$$

В операторной форме (2.57) имеет вид

$$Ss x(s) = a_{f,1,3} f_1(s) + a_{f,2,3} f_2(s) + a_{P,1,3} P_1(s) + a_{P,2,3} P_2(s) + a_{P,0,3} P_0(s), \quad (2.60)$$

где $a_{f,1,3} = \mathfrak{G} \sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1}$; $a_{f,2,3} = -\mathfrak{G} \sqrt{\tilde{P}_0(t) - \tilde{P}_2(t)}$; $a_{P,1,3} = -\frac{\mathfrak{G} \tilde{f}_1}{2\sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1}}$;

$$a_{P,2,3} = -\frac{\mathfrak{G} \tilde{f}_2}{2\sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_2}}; \quad a_{P,0,3} = \frac{\mathfrak{G} \tilde{f}_1}{2\sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_1}} - \frac{\mathfrak{G} \tilde{f}_2}{2\sqrt{\tilde{P}_0 - \tilde{P}_2}}$$

2.5. Модель процесса бурения

В установке СБШ-250МН-32Т применен узел бурения, построенный по схеме [2], приведенной на рисунке 2.6, где приняты следующие обозначения: ЭДП – электродвигатель постоянного тока; Р – редуктор вращателя с шинно-шлицевой муфтой на выходном валу; Б – собственно бур. Управление двигателем осуществляется по якорной обмотке Я сигналом управления U_D . На обмотку возбуждения ОВ подается постоянное напряжения.

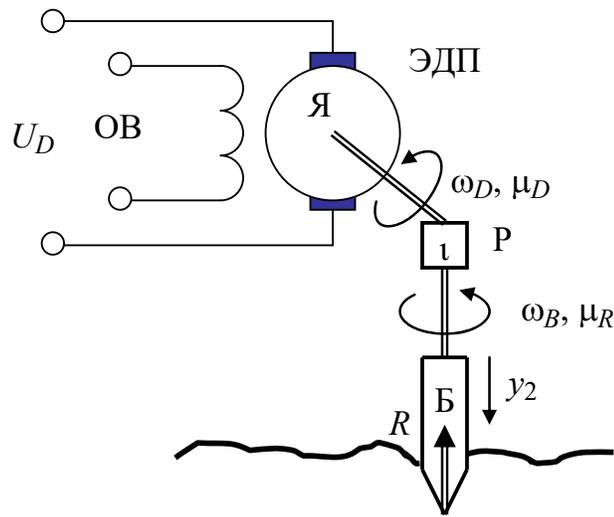


Рис. 2.6. Схема электродвигателя постоянного тока

На бур со стороны грунта действует осевая (продольная) сила сопротивления R и момент сопротивления ω_R . [42, 78, 79, 110] Бур вращается с угловой скоростью ω_B . Редуктор P имеет коэффициент передачи ι .

Угловая скорость ω_D вращения вала электродвигателя ЭД, управляющее напряжение U_D , подаваемое на его якорную обмотку, и момент μ_D полезной нагрузки, формируемый на входном валу, связаны следующим дифференциальным уравнением:

$$T_D \dot{\omega}_D(t) + \omega_D(t) = k_U U_D(t) - k_\mu \mu_D(t), \quad (2.61)$$

где T_D - постоянная времени разгонной характеристики электродвигателя (механическая постоянная времени); k_U - коэффициент передачи электродвигателя по управляющему напряжению $U_D(t)$; k_μ - коэффициент передачи по моменту.

Момент полезной нагрузки создается силами сопротивления внедрению бура в грунт и в первом приближении определяется следующей зависимостью:

$$\mu_B(t) = k_{\mu\omega} \omega_B(t) + k_{\mu R} R(t), \quad (2.62)$$

где $k_{\mu\omega}$ - коэффициент передачи по угловой скорости, определяющий скорость возрастания момента при возрастании угловой скорости вращения бура; ω_B -

угловая скорость вращения бура; $k_{\mu R}$ - коэффициент передачи по осевой силе внедрения бура в грунт, определяющий скорость возрастания момента при возрастании силы $R(t)$.

Подача бура увеличивается с возрастанием угловой скорости его вращения и с возрастанием осевой силы внедрения бура в грунт, и в первом приближении определяется по зависимости

$$\dot{y}_2(t) = k_{y\omega}\omega_B(t) + k_{yR}R(t), \quad (2.63)$$

где $k_{y\omega}$ - коэффициент передачи по угловой скорости, определяющий возрастание подачи при возрастании угловой скорости вращения бура; k_{yR} - коэффициент передачи по осевой силе внедрения бура в грунт, определяющий возрастание подачи при возрастании осевой силы $R(t)$.

Суммирование (2.62) и (2.63) дает

$$\mu_B(t) + k_{\mu y}\dot{y}_2(t) = (k_{\mu\omega} + k_{\mu y}k_{y\omega})\omega_B(t) + (k_{\mu R} + k_{\mu y}k_{yR})R(t) \quad (2.64)$$

Между полезным моментом на валу и полезным моментом на буре существует следующее соотношение:

$$\mu_B(t) = \iota\mu_D(t), \quad (2.65)$$

где ι коэффициент редукции.

Между угловой скоростью вала и угловой скоростью вращения бура существует следующее соотношение:

$$\omega_B(t) = \frac{\omega_D(t)}{\iota}, \quad (2.66)$$

Подстановка (2.65) и (2.66) в (2.64) дает:

$$\iota^2\mu_D(t) + \iota k_{\mu y}\dot{y}_2(t) = (k_{\mu\omega} + k_{\mu y}k_{y\omega})\omega_D(t) + \iota(k_{\mu R} + k_{\mu y}k_{yR})R(t). \quad (2.67)$$

Подстановка (2.67) в (2.61) дает

$$\tilde{T}_D\dot{\omega}_D(t) + \omega_D(t) = \tilde{k}_U U_D(t) + \tilde{k}_y\dot{y}_2(t) + \tilde{k}_R R(t), \quad (2.68)$$

где \tilde{T}_D - постоянная времени нагруженного привода; \tilde{k}_U - коэффициент передачи нагруженного привода по управляющему напряжению; \tilde{k}_y - коэффициент

передачи нагруженного привода по подаче; \tilde{k}_R - коэффициент передачи нагруженного привода по сопротивлению грунта внедрению бура;

$$\tilde{T}_D = \frac{T_D \cdot \iota^2}{k_\mu (k_{\mu\omega} + k_{\mu y} k_{y\omega}) + \iota^2};$$

$$\tilde{k}_U = \frac{k_U \cdot \iota^2}{k_\mu (k_{\mu\omega} + k_{\mu y} k_{y\omega}) + \iota^2};$$

$$\tilde{k}_y = \frac{k_\mu k_{\mu y} \cdot \iota}{k_\mu (k_{\mu\omega} + k_{\mu y} k_{y\omega}) + \iota^2};$$

$$\tilde{k}_R = \frac{k_\mu (k_{\mu R} + k_{\mu y} k_{yR}) \cdot \iota}{k_\mu (k_{\mu\omega} + k_{\mu y} k_{y\omega}) + \iota^2}.$$

2.6. Выводы

1. Разработана кинематическая схема полиспастной системы бурового агрегата, на основании которой, составлена линейная система дифференциальных уравнений четырнадцатого порядка.

2. Из системы дифференциальных уравнений получена линейная алгебраическая система, описывающая буровой агрегат в частотной области.

3. Предложена модель гидравлической трансмиссии, в которую входят трехфазный асинхронный привод с частотным управлением, гидронасос и линейный двухсторонний гидропривод.

4. Разработана математическая модель узла вращения, включающего управляемых двигатель постоянного тока, редуктор (посмотреть по схеме из 1 раздела).

5. Разработана упрощенная модель бурения при работе линейного гидропривода.

3. КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОГО БУРОВОГО АГРЕГАТА С ЦИФРОВЫМ КОНТРОЛЛЕРОМ

3.0. Введение

В разделе 2 была разработана математическая модель полиспастной системы бурового агрегата, которая позволяет описать как его статические режимы, так и динамику функционирования. Система управления буровым агрегатом представляется как полумарковский процесс, состояния которого являются операторами ввода-вывода алгоритма, полумарковская матрица, описывающая процесс, преобразуется в соответствии с решаемой задачей определения временного интервала, и по преобразованной матрице оценивается плотность распределения времени между двумя заданными транзакциями.

В данном разделе по математическим описаниям узлов и блоков будет дана оценка устойчивости замкнутой цифровой системы управления и оценка времени задержки на принятие решения при цифровом управлении.

3.1. Буровой агрегат как объект управления

3.1.1. Взаимосвязь управляемых узлов в буровом агрегате

Взаимосвязь узлов в буровом агрегате СБШ-250МН-32Т как объекте управления приведена на рис. 3.1.

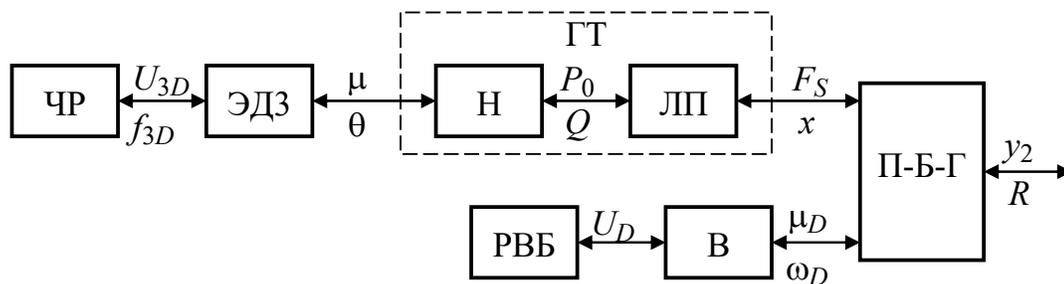


Рис. 3.1. СБШ-250МН-32Т как объект управления

На схеме приняты следующие обозначения ЧР - частотный регулятор, который определяет угловую скорость вращения вала двигателя; ЭДЗ - трехфаз-

ный асинхронный двигатель; Н - насос; ЛП - линейный гидропривод; РВБ - регулятор скорости вращения вала вращателя бура; В - вращатель бура, включающий электродвигатель постоянного тока и редуктор; П-Б-Г - триада полиспа-ст-бур-грунт.

На выходе частотного регулятора ЧР формируется трехфазный управляющий сигнал с действующим напряжением величины U_{3D} и частотой f_{3D} . Трехфазный асинхронный электродвигатель управляющий сигнал преобразует в физическую скорость $\dot{\varphi}_{3D}$ вращения вала. В свою очередь, угловая скорость вращения вала складывается из угловой скорости вращения магнитного поля, определяемого частотой f_{3D} питающего напряжения, и величины скольжения $\dot{\Theta}$. Поскольку динамика пары электродвигатель-насос определяется величиной скольжения, считается, что электродвигатель, как элемент системы управления, вырабатывает скольжение $\dot{\Theta}$ и взаимосвязанный с ним полезный момент μ .

Насос и линейный гидропривод образуют гидравлическую трансмиссию ГТ, передающую механическую энергию от трехфазного асинхронного двигателя с частотным регулированием на полиспа-ст

3.1.2. Структура гидравлической трансмиссии

Для построения структурной схемы буровой установки СБШ-250МН-32Т как объекта управления дифференциальные уравнения, описывающие трехфазный асинхронный двигатель, насос; линейный гидропривод, вращатель, триаду привод- бур-грунт, должны быть описаны в операторной форме. [92, 93, 98] Частотный регулятор и регулятор скорости вращения вала вращателя бура считаются элементами, задающими желаемые угловые скорости соответствующих двигателей, и поэтому в операторной форме не представляются.

Операторное описание *трехфазного асинхронного электродвигателя* при малых отклонениях величины скольжения от установившегося значения формируется из (2.23), (2.24). [56, 77, 139] Вследствие того, что коэффициенты пе-

редачи по величине действующего трехфазного напряжения U_{3D} , κ_{3D} , и моменту μ , κ_μ , имеет вид

$$(Js + \eta_m)\theta(s) = \kappa_{3D}(f_{3D})U_{3D}(s) + \kappa_\mu(f_{3D})\kappa_{P0,\mu} \cdot P_0(s) + \kappa_{f3D} \frac{\exp(-s\tau_{f,3D})}{s} \Delta_{f3D}(s), \quad (3.1)$$

где $\theta(s) = L[\dot{\theta}(t)]$ - изображение по Лапласу величины скольжения; $\kappa_{3D}(f_{3D})$ - значение коэффициента передачи по величине питающего напряжения для заданной частоты f_{3D} ; $\kappa_\mu(f_{3D})$ - значение коэффициента передачи по моменту для заданной частоты f_{3D} ; κ_{f3D} - значение коэффициента передачи по изменению частоты питающего напряжения; $\frac{\exp(-s\tau_{f,3D})}{s} = L[\eta(t - \tau_{f3D})]$ - изображение по Лапласу смещенной единичной функции Хевисайда, моделирующей акт переключения/включения частотного регулятора на питание трехфазного асинхронного двигателя на данной частоте, если $\tau_{f3D} > 0$, то это моделирует переключение частотного регулятора, если $\tau_{f3D} = 0$, τ_{f3D} - момент переключения/включения; $L[...]$ - преобразование Лапласа; s - переменная Лапласа (оператор дифференцирования) [15, 36, 99, 100, 131, 144, 147].

Передаточная функция формирования параметра скольжения, определяющего динамику пары трехфазный асинхронный двигатель/насос, из (3.1) определяется следующим образом:

$$\theta(s) = W_{U3D,\theta}(s) \cdot U_{3D}(s) + W_{P0,\theta}(s) \cdot P_0(s) + W_{f3D,\theta}(s) \Delta_{f3D}, \quad (3.2)$$

где $W_{U3D,\theta}(s)$, $W_{P0,\theta}(s)$, $W_{\mu,\theta}(s)$ - передаточные функции от соответствующего варьируемого параметра к величине скольжения;

$$W_{U3D,\theta}(s) = \frac{\kappa_{3D}(f_{3D})}{(Js + \eta_m)};$$

$$W_{P0,\theta}(s) = \frac{\kappa_\mu(f_{3D})\kappa_{P0,\mu}}{(Js + \eta_m)};$$

$$W_{f_{3D},\theta}(s) = \frac{\kappa_{f,3D} \exp(-s\tau_{f,3D})}{s(Js + \eta_m)}$$

Функционирование *насоса* описывается следующей системой алгебраических уравнений, получаемой из (2.46) за счет введения величины скольжения $\theta(s)$:

$$\begin{cases} (J_p s + \eta_p) [\theta(s) + (2\pi/n)f_{3D}(s)] = \kappa_{P0,\mu} \cdot P_0(s); \\ Q(s) = a_{f,1,1}f_1(s) + a_{f,2,1}f_2(s) + a_{P,0,1}P_0(s) \\ + a_{P,1,1}P_1(s) + a_{P,2,1}P_2(s); \\ Q(s) = \kappa'_Q [\theta(s) + (2\pi/n)f_{3D}], \end{cases} \quad (3.3)$$

Выражая из третьего уравнения системы величину расхода $Q(s)$ и подставляя ее во второе уравнение, получим:

$$\begin{cases} (J_p s + \eta_p) [\theta(s) + (2\pi/n)f_{3D}(s)] = \kappa_{P0,\mu} \cdot P_0(s); \\ \kappa'_Q [\theta(s) + (2\pi/n)f_{3D}] = a_{f,1,1}f_1(s) + a_{f,2,1}f_2(s) + a_{P,0,1}P_0(s) \\ + a_{P,1,1}P_1(s) + a_{P,2,1}P_2(s); \end{cases} \quad (3.4)$$

Заменяя во втором уравнении (3.4) правую часть на линеаризованное выражение (2.51), (2.55) будем иметь:

$$\begin{cases} (J_p s + \eta_p) [\theta(s) + (2\pi/n)f_{3D}(s)] = \kappa_{P0,\mu} \cdot P_0(s); \\ \kappa'_Q [\theta(s) + (2\pi/n)f_{3D}(s)] = a_{P,1,3}P_1(s) + a_{P,2,3}P_2(s). \end{cases} \quad (3.5)$$

Функционирование линейного гидропривода в составе системы описывается следующими линейными алгебраическими уравнениями, получаемыми из (2.55)

$$\begin{cases} a_{P,1,2}P_1(s) + Ssx(s) = a_{f,1,2}f_1(s) + a_{P,0,1,2}P_0(s); \\ a_{P,2,2}P_2(s) - Ssx(s) = a_{f,2,2}f_2(s) + a_{P,0,2,2}P_0(s); \\ \kappa'_Q [\theta(s) + (2\pi/n)f_{3D}(s)] = a_{P,1,3}P_1(s) + a_{P,2,3}P_2(s); \\ SP_1(s) - SP_2(s) + (ms^2 + \eta_2s)x(s) = F_S(s). \end{cases} \quad (3.6)$$

С учетом того, что второе уравнение (3.5) совпадает с третьим уравнением (3.6), из (3.5) и (3.6) может быть получена следующая объединенная система линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \kappa_{P0,\mu} \cdot P_0(s) - (J_p s + \eta_p) \theta(s) = (J_p s + \eta_p) (2\pi/n) f_{3D}(s); \\ a_{P,0,1,2} P_0(s) - a_{P,1,2} P_1(s) - S s x(s) = -a_{f,1,2} f_1(s); \\ a_{P,0,2,2} P_0(s) - a_{P,2,2} P_2(s) + S s x(s) = -a_{f,2,2} f_2(s); \\ a_{P,1,3} P_1(s) + a_{P,2,3} P_2(s) - \kappa'_Q \theta(s) = -\kappa'_Q (2\pi/n) f_{3D}(s); \\ S P_1(s) - S P_2(s) + (m s^2 + \eta_2 s) x(s) = F_S(s). \end{cases} \quad (3.7)$$

Неизвестными переменными в (3.7) являются:

давление в напорной магистрали $P_0(s)$;

давления $P_1(s)$, $P_2(s)$ в полостях линейного гидропривода;

величина скольжения $\theta(s)$;

ход штока $x(s)$.

Входными воздействиями, определяющими состояние системы, являются:

частота питающего напряжения трехфазного двигателя $f_{3D}(s)$;

площади эффективного сечения $f_1(s)$, $f_2(s)$ клапанов, соединяющих рабочие полости линейного гидропривода с напорной магистралью;

полезная нагрузка на штоке линейного гидропривода $F_S(s)$.

Решением системы (3.7), определяющим динамику хода штока с учетом инерционности асинхронного трехфазного электродвигателя и гидронасоса будет следующее выражение:

$$x(s) = \frac{\Delta_x(s)}{\Delta_s(s)}, \quad (3.8)$$

где $\Delta(s)$ - главный определитель системы (3.7); $\Delta_x(s)$ - определитель неизвестного $x(s)$;

$$\Delta_s(s) = \begin{vmatrix} \kappa_{P0,\mu} & 0 & 0 & (J_p s + \eta_p) & 0 \\ a_{P,0,1,2} & a_{P,1,2} & 0 & 0 & S s \\ a_{P,0,2,2} & 0 & a_{P,2,2} & 0 & S s \\ 0 & a_{P,1,3} & a_{P,2,3} & \kappa'_Q & 0 \\ 0 & S & S & 0 & (m s^2 + \eta_2 s) \end{vmatrix}; \quad (3.9)$$

$$\Delta_x(s) = \begin{vmatrix} \kappa_{P0,\mu} & 0 & 0 & (J_p s + \eta_p)(J_p s + \eta_p)(2\pi/n)f_{3D}(s) \\ a_{P,0,1,2} & a_{P,1,2} & 0 & 0 & -a_{f,1,2}f_1(s) \\ a_{P,0,2,2} & 0 & a_{P,2,2} & 0 & a_{f,2,2}f_2(s) \\ 0 & a_{P,1,3} & a_{P,2,3} & \kappa'_Q & -\kappa'_Q(2\pi/n)f_{3D}(s) \\ 0 & S & S & 0 & F_S(s) \end{vmatrix}. \quad (3.10)$$

Решение (3.8) в развернутом виде представляется следующим образом:

$$x(s) = W_{x,f1}(s)f_1(s) + W_{x,f2}(s)f_2(s) + W_{x,3D}(s)f_{3D}(s) + W_{x,FS1}(s)F_S(s), \quad (3.11)$$

где $W_{x,f1}(s)$ - передаточная функция, отображающая влияние площади эффективного сечения $f_1(s)$ первого клапана на перемещение $x(s)$ штока линейного гидропривода; $W_{x,f2}(s)$ - передаточная функция, отображающая влияние площади эффективного сечения $f_2(s)$ второго клапана на перемещение $x(s)$ штока линейного гидропривода; $W_{x,3D}(s)$ - передаточная функция, описывающая частотное управление трехфазным асинхронным двигателем; $W_{x,FS1}(s)$ - передаточная функция, описывающая обратную связь, создаваемую полиспастом;

$$W_{x,f1}(s) = \frac{\begin{vmatrix} \kappa_{P0,\mu} & 0 & 0 & (J_p s + \eta_p) \\ a_{P,0,2,2} & 0 & a_{P,2,2} & 0 \\ 0 & a_{P,1,3} & a_{P,2,3} & -\kappa'_Q \\ 0 & S & S & 0 \end{vmatrix}}{\Delta(s)};$$

$$W_{x,f2}(s) = \frac{\begin{vmatrix} \kappa_{P0,\mu} & 0 & 0 & (J_p s + \eta_p) \\ a_{P,0,1,2} & 0 & a_{P,1,2} & 0 \\ 0 & a_{P,1,3} & a_{P,2,3} & -\kappa'_Q \\ 0 & S & S & 0 \end{vmatrix}}{\Delta(s)}$$

$$W_{x,3D}(s) = \frac{\begin{vmatrix} a_{P,0,1,2} & -a_{P,1,2} & 0 & 0 \\ a_{P,0,2,2} & 0 & a_{P,2,2} & 0 \\ 0 & a_{P,1,3} & a_{P,2,3} & -\kappa'_Q \\ 0 & S & S & 0 \end{vmatrix}}{\Delta(s)} + \frac{\begin{vmatrix} \kappa_{P0,\mu} & 0 & 0 & (J_p s + \eta_p) \\ a_{P,0,1,2} & a_{P,1,2} & 0 & 0 \\ a_{P,0,2,2} & 0 & a_{P,2,2} & 0 \\ 0 & S & S & 0 \end{vmatrix}}{\Delta(s)};$$

$$W_{x,FS1}(s) = \frac{\begin{vmatrix} \kappa_{P0,\mu} & 0 & 0 & (J_p s + \eta_p) \\ a_{P,0,1,2} & a_{P,1,2} & 0 & 0 \\ a_{P,0,2,2} & 0 & a_{P,2,2} & 0 \\ 0 & a_{P,1,3} & a_{P,2,3} & -\kappa'_Q \end{vmatrix}}{\Delta(s)}$$

3.1.3. Структура полиспада, как вязкоупругого передаточного звена

Система уравнений, описывающих полиспад, приведена в разделе 2. Там же эта система разрешена относительно координат состояния $x(s)$, $y_2(s)$, $y_3(s)$, и решение получено в виде (2.17), которое в развернутом виде может быть представлено как

$$\begin{cases} x(s) = W_{x,FS2}(s)F_S(s) + W_{x,R}(s)R(s); \\ y_2(s) = W_{y2,FS}(s)F_S(s) + W_{y2,R}(s)R(s); \\ y_3(s) = W_{y3,FS}(s)F_S(s) + W_{y3,R}(s)R(s); \end{cases} \quad (3.12)$$

где $W_{x,FS2}(s)$ - передаточная функция, описывающая движение $x(s)$ узла, состоящего из подвижных шкивов 1, 3, 5, 7, 9 (рис. 2.1), при приложении к нему силы $F_S(s)$; $W_{x,R}(s)$ - передаточная функция, описывающая движение узла, состоящего из подвижных шкивов 1, 3, 5, 7, 9 (рис. 2.1), при приложении к нему силы реакции грунта R ; $W_{y2,FS}(s)$ - передаточная функция, описывающая поступательное движение $y_2(s)$ вращателя с буром при приложении к узлу подвижных шкивов продольной силы $F_S(s)$; $W_{y2,R}(s)$ - передаточная функция, описывающая движение $y_2(s)$ вращателя с буром при приложении к нему силы реакции грунта R ; $W_{y3,FS}(s)$ - передаточная функция, описывающая движение $y_3(s)$ направляющей, при приложении к узлу подвижных шкивов продольной силы $F_S(s)$; $W_{y3,R}(s)$ - передаточная функция, описывающая движение $y_3(s)$ направляющей, при приложении к вращателю силы сопротивления грунта R .

Передаточные функции в (3.12) формируются из выражения (2.19) следующим образом:

$$W_{x,FS2}(s) = \frac{\det[{}_{FS}A_{12}(s)]}{\det[A(s)]};$$

$$W_{x,R}(s) = \frac{\det[{}_RA_{12}(s)]}{\det[A(s)]};$$

$$W_{y2,FS2}(s) = \frac{\det[{}_{FS}A_{13}(s)]}{\det[A(s)]};$$

$$W_{y2,R}(s) = \frac{\det[{}_RA_{13}(s)]}{\det[A(s)]};$$

$$W_{y3,FS2}(s) = \frac{\det[{}_{FS}A_{14}(s)]}{\det[A(s)]};$$

$$W_{y3,R}(s) = \frac{\det[{}_RA_{14}(s)]}{\det[A(s)]},$$

где ${}_{FS}A_{12}(s)$ - алгебраическое дополнение, которое получается за счет удаления из $A_{12}(s)$ двенадцатой строки и четырнадцатого столбца; ${}_RA_{12}(s)$ - алгебраическое дополнение, которое получается за счет удаления из $A_{12}(s)$ тринадцатой строки и четырнадцатого столбца; ${}_{FS}A_{13}(s)$ - алгебраическое дополнение, которое получается за счет удаления из $A_{13}(s)$ двенадцатой строки и четырнадцатого столбца; ${}_RA_{13}(s)$ - алгебраическое дополнение, которое получается за счет удаления из $A_{13}(s)$ тринадцатой строки и четырнадцатого столбца; ${}_{FS}A_{14}(s)$ - алгебраическое дополнение, которое получается за счет удаления из $A_{14}(s)$ двенадцатой строки и четырнадцатого столбца; ${}_RA_{14}(s)$ - алгебраическое дополнение, которое получается за счет удаления из $A_{14}(s)$ тринадцатой строки и четырнадцатого столбца;

3.1.4. Структура взаимодействия бура и грунта

Вращатель бурового станка и грунт описываются системой уравнений (2.62), (2.63) и (2.68), которая в операторной форме имеет вид:

$$\begin{cases} \omega_B(s) = W_{\omega B, UD}(s)U_D(s) + W_{\omega B, y_2}(s)y_2(s) + W_{\omega B, R}(s)R(s) \\ \mu_B(s) = W_{\mu B, \omega B}(s)\omega_B(s) + W_{\mu B, y_2}(s)y_2(s) \\ R(s) = W_{R, \omega B}(s)\omega_B(s) + W_{R, y_2}(s)y_2(s) \end{cases}, \quad (3.13)$$

где $\omega_B(s)$ - изображение по Лапласу угловой скорости вращения бура; $U_D(s)$ - изображение по Лапласу сигнала управления угловой скоростью вращения бура; $y_2(s)$ - продольное перемещение бура; $R(s)$ - изображение по Лапласу продольной силы сопротивления грунта; $W_{\omega B, UD}(s)$ - передаточная функция описывающая реакцию вращателя на сигнал управления; $W_{\omega B, y_2}(s)$, $W_{\omega B, R}(s)$ - передаточная функция, описывающая реакцию вращателя на возмущающие воздействия (скорость продольного перемещения бура y_2 и реакция грунта); $W_{\mu B, \omega B}(s)$ - передаточная функция, описывающая связь между моментом, прилагаемым к буру со стороны грунта (полезная нагрузка), и угловой скоростью вращения бура; $W_{\mu B, y_2}(s)$ - передаточная функция, описывающая связь между полезной нагрузкой и скоростью продольного перемещения бура; $W_{R, \omega B}(s)$ - передаточная функция, описывающая влияние на реакцию грунта угловой скорости вращения бура; $W_{R, y_2}(s)$ - передаточная функция, описывающая влияние на реакцию грунта продольной скорости перемещения бура;

$$W_{\omega B, UD}(s) = \frac{i\tilde{k}_U}{\tilde{T}_D s + 1}; \quad W_{\omega B, y_2}(s) = \frac{i\tilde{k}_{y_2} s}{\tilde{T}_D s + 1}, \quad W_{\omega B, R}(s) = \frac{i\tilde{k}_R}{\tilde{T}_D s + 1};$$

$$W_{\mu B, \omega B}(s) = \frac{k_{yR}}{k_{\mu\omega} k_{yR} - k_{\mu R} k_{y\omega}}; \quad W_{\mu B, y_2}(s) = \frac{-k_{\mu R} s}{k_{\mu\omega} k_{yR} - k_{\mu R} k_{y\omega}};$$

$$W_{R, \omega B}(s) = \frac{-k_{y\omega}}{k_{\mu\omega} k_{yR} - k_{\mu R} k_{y\omega}}; \quad W_{R, y_2}(s) = \frac{k_{\mu\omega} s}{k_{\mu\omega} k_{yR} - k_{\mu R} k_{y\omega}}.$$

3.2. Общая структурная схема бурового агрегата СБШ-250МН-32Т

Буровой агрегат может функционировать в двух режимах:

в режиме бурения, когда осуществляется взаимодействие бура с грунтом;

в режиме поднятия/опускания бура без взаимодействия бура с грунтом.

3.2.1. Работа агрегата в режиме бурения

Структурная схема бурового агрегата, работающего в режиме бурения, как объекта управления, показана на рис. 3.2. Структура естественным образом разделяется на следующие относительно независимые узлы: гидравлическая трансмиссия 1, включающая трехфазный асинхронный электродвигатель с частотным регулированием насос и линейный гидропривод; полиспаст 2; вращатель 3; взаимодействующие бур и грунт 4. [2, 114, 120, 160, 164, 166] Передаточные функции структурных единиц, образующих гидравлическую трансмиссию 1, представлены уравнением (3.11). Передаточные функции структурных единиц, образующих полиспаст, определены в пояснениях к системе уравнений (3.12). Передаточные функции, описывающие функционирование вращателя, а также взаимодействие бура и грунта, показаны в пояснениях к системе (3.13).

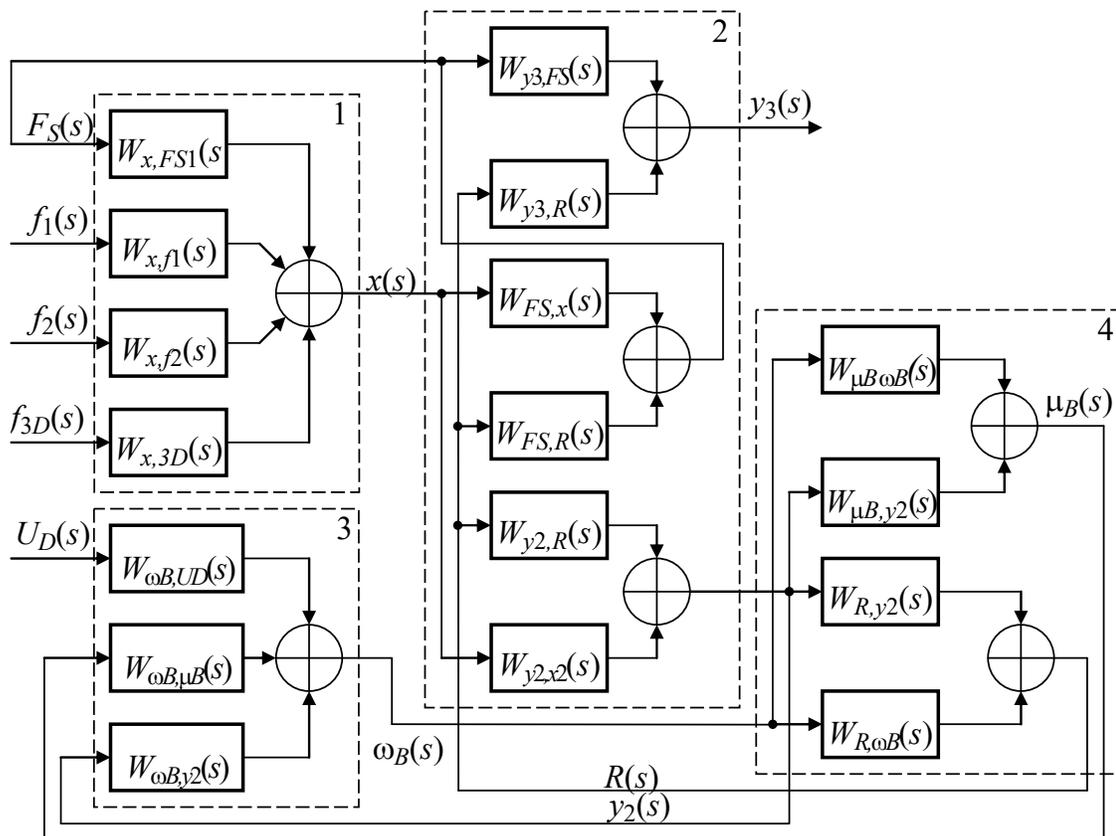


Рис. 3.2. Структурная схема бурового агрегата СБШ-250МН-32Т как объекта управления, функционирующего в режиме бурения:
 1 - модель гидравлической трансмиссии; 2 - модель полиспаста;
 3 - модель вращателя; 4 - модель взаимодействия бура и грунта

Входными воздействиями, определяющими желаемый режим работы и состояние бурового агрегата, являются:

частота $f_{3D}(s)$ питающего напряжения трехфазного асинхронного электродвигателя;

проходные сечения клапанов $f_1(s)$ и $f_2(s)$, соединяющих насос с проточными полостями линейного гидропривода;

напряжение $U_D(s)$, подаваемое на якорные обмотки электродвигателя постоянного тока, входящего в состав вращателя.

Регулируются:

продольное перемещение бура $y_2(s)$,

подача бура $\dot{y}_2(s)$;

угловая скорость вращения бура $\omega_B(s)$;

координата $y_3(s)$, зависящая от координаты $y_2(s)$;

сила $R(s)$ давления бура на грунт.

В структурной схеме имеются обратные связи, как перекрестные, так и прямые между каналом, обеспечивающим подачу бура, и каналом, определяющим угловую скорость вращения бура. За счет обратных связей порядок характеристического уравнения, описывающего динамику разомкнутой системы, является высоким, и складывается из порядков характеристических уравнений описывающих трехфазный асинхронный электродвигатель (первый), гидравлическую трансмиссию (второй), полиспаст (второй), пару грунт/бур (первый) и вращатель (первый).

Коэффициенты передачи по каналам управления в значительной мере определяются механическими свойствами буримого грунта. В свою очередь, механические свойства зависят от состава грунта (почва, песок, глина, камень, щебень, и т.п.) и его состояния (влажность, температура, наличие остатков корневой системы растительности и т.п.). Для обеспечения требуемой скорости проходки скважины при минимизации износа инструмента необходимо опера-

тивное управление подачей и угловой скоростью вращения бура, что может быть реализовано только за счет разработки цифровой системы управления.

3.2.2. Работа бурового агрегата в режиме поднятия/опускания бура

Структурная схема бурового агрегата, функционирующего в режиме поднятия/опускания бура, например, при выполнении технологической операции наращивания длины бура, формируется из структурной схемы, приведенной на рис. 3.2 путем удаления из структуры блоков, описывающих взаимодействие бура с грунтом и связей этих блоков с другими блоками системы (рис. 3.3).

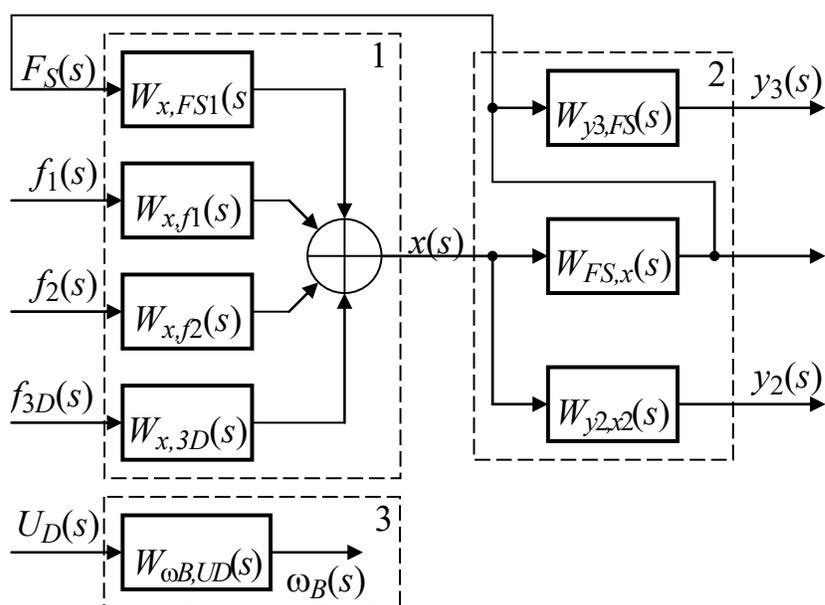


Рис. 3.3. Структурная схема бурового агрегата СБШ-250МН-32Т как объекта управления, функционирующего в режиме поднятия/опускания бура: 1 - модель гидравлической трансмиссии; 2 - модель полиспаста; 3 - модель вращателя;

Эта схема включает два независимых блока: блок, включающий гидравлическую трансмиссию 1 и полиспаст 2, и вращатель 3. Управление переносом бура технической сложности не представляет и может быть реализовано, как в ручном режиме, так и с помощью цифрового контроллера.

3.3. Модель цифровой системы управления

Сложность задачи управления процессом бурения и возможные изменения параметров объекта управления при проходке даже одной скважины, предполагают, что система управления буровым агрегатом должна быть цифровой. В качестве прибора, осуществляющего расчет управляющих воздействий, в цифровых системах принято использовать контроллеры с последовательной интерпретацией операторов управляющих программ. Как опрос датчиков, так и опрос исполнительных устройств в подобных контроллерах осуществляется в реальном времени с помощью процедуры программного опроса - поллинга. Управляющая программа включает ряд исполняемых операторов, на интерпретацию каждого из которых тратится реальной физическое время. Поэтому при поллинге между моментом измерения текущего состояния и моментом выдачи данных на исполнительные органы проходит определенное время, которое с точки зрения теории управления является чистым запаздыванием, вносимым системой управления. Вследствие сложности структуры самого объекта и высокого порядка характеристического уравнения, запаздывание в контурах приводит к ухудшению таких показателей качества переходных процессов, как перерегулирование и время регулирования, и может привести к потере устойчивости замкнутой системы управления в целом. [32, 33, 49, 67, 156, 165]

Рассмотрим обобщенную структуру замкнутой системы управления K -контурным объектом (рис. 3.4). Элементы структурной схемы $W_{1,1}(s), \dots, W_{k,l}(s), \dots, W_{K,K}(s)$ описывают динамические процессы, протекающие в объекте управления (буровой агрегат в целом), через передаточные функции блоков, включенных в объект. Перекрестные межблочные связи, когда $k \neq l$, отражают реальное взаимодействие узлов и блоков в объекте управления, например, взаимосвязь между каналами управления подачей и управления угловой скоростью вращения бура.[145, 146, 157] Элементы структурной схемы $\Phi_{01}(s), \dots, \Phi_{0k}(s), \dots, \Phi_{0K}(s)$ описывают передаточные функции сенсоров, измеряющих состояния соответствующих узлов и блоков объекта и формирующих сигналы

обратной связи. Объект управляется контроллером Фон Неймановского типа, который связан с объектом через интерфейс ввода-вывода данных.

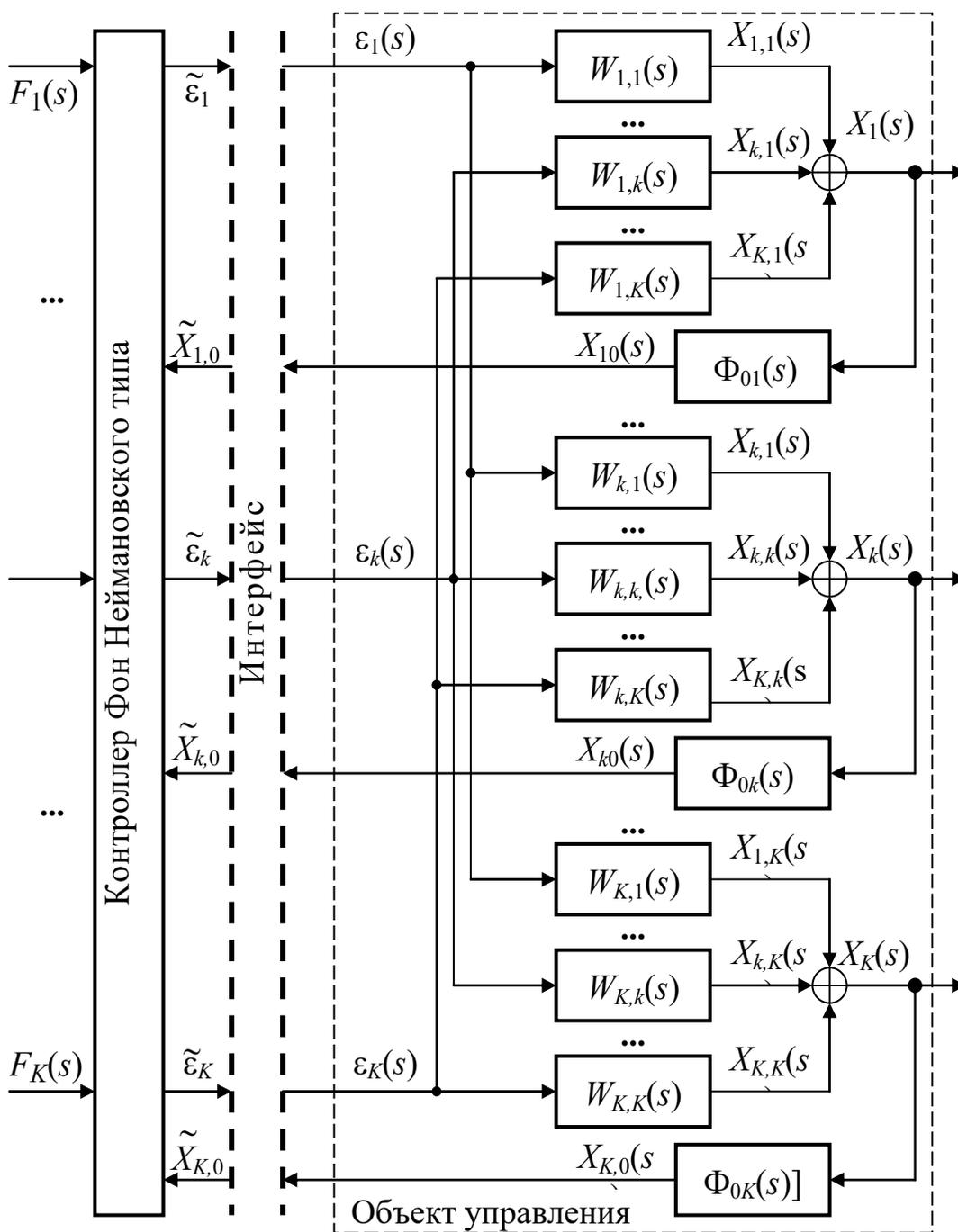


Рис. 3.4. Обобщенная структурная схема цифровой системы управления многоконтурными объектами.

Система функционирует следующим образом. В цифровой контроллер человеком-оператором, или автоматически, через цифровой контроллер более высокого иерархического уровня вводится вектор сигналов $F(s) = [F_1(s), \dots, F_k(s), \dots, F_K(s)]^{\mathfrak{g}}$, формирующих цель управления, (желаемое состояние объекта). В контроллере реализуется алгоритм поллинга, который программно опрашивает датчики, измеряющие состояние объекта.

Состояние объекта определяется вектором $X(s) = [X_1(s), \dots, X_k(s), \dots, X_K(s)]^{\mathfrak{g}}$, где $X_k(s)$ - обобщенная координата состояния, например, величина $x(s)$ хода штока линейного привода, или величина $y_2(s)$ продольного перемещения бура; \mathfrak{g} - операция транспонирования. Датчики с задержкой, определяемой их быстродействием, формируют вектор аналоговых сигналов $X_0(s) = [X_{01}(s), \dots, X_{0k}(s), \dots, X_{0K}(s)]^{\mathfrak{g}}$. На интерфейсе указанный вектор преобразуется в вектор данных $\tilde{X}_0(s) = [\tilde{X}_{01}(s), \dots, \tilde{X}_{0k}(s), \dots, \tilde{X}_{0K}(s)]$, поступающих непосредственно на программную обработку.

В результате программной обработки по значениям элементов векторов $F(s) = [F_1(s), \dots, F_k(s), \dots, F_K(s)]^{\mathfrak{g}}$ и $\tilde{X}_0(s) = [\tilde{X}_{01}(s), \dots, \tilde{X}_{0k}(s), \dots, \tilde{X}_{0K}(s)]^{\mathfrak{g}}$ контроллер рассчитывает значения кодов элементов вектора $\tilde{\varepsilon}(s) = [\tilde{\varepsilon}_1(s), \dots, \tilde{\varepsilon}_k(s), \dots, \tilde{\varepsilon}_K(s)]^{\mathfrak{g}}$, имеющего физический смысл кодов ошибок между желаемым и измеренным текущим состоянием объекта. Выходная последовательность кодов генерируется в соответствии с законом управления и циклограммой, заложенной в алгоритмическое и программное обеспечение контроллера. Данные прокачиваются через интерфейс и преобразуются в вектор управляющих сигналов $\varepsilon(s) = [\varepsilon_1(s), \dots, \varepsilon_k(s), \dots, \varepsilon_K(s)]^{\mathfrak{g}}$, подаваемых на исполнительные приводы (например, на сервомеханизмы, изменяющие проходные сечения клапанов $f_1(s)$, $f_2(s)$, или на электронные схемы, изменяющую частоту $f_{3D}(s)$ питающего напряжения асинхронного трехфазного электродви-

гателя, или на электронные схемы, меняющие напряжение U_D , подаваемое на якорную обмотку электродвигателя постоянного тока.

Управляющие сигналы $\varepsilon(s) = [\varepsilon_1(s), \dots, \varepsilon_k(s), \dots, \varepsilon_K(s)]^{\mathfrak{G}}$ объектом на физическом уровне преобразуются в вектор $X(s) = [X_1(s), \dots, X_k(s), \dots, X_K(s)]^{\mathfrak{G}}$ состояний, и таким образом в системе замыкается векторная обратная связь.

Из векторной формы системы уравнений, описывающих объект,

$$\begin{bmatrix} X_1(s) \\ \dots \\ X_k(s) \\ \dots \\ X_K(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{l=1}^K W_{1,l}(s)\varepsilon_l(s) \\ \dots \\ \sum_{l=1}^K W_{k,l}(s)\varepsilon_l(s) \\ \dots \\ \sum_{l=1}^K W_{K,l}(s)\varepsilon_l(s) \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

может быть получена матричная форма

$$X(s) = W(s) \cdot \varepsilon(s), \quad (3.15)$$

где $X(s) = [X_1(s), \dots, X_k(s), \dots, X_K(s)]^{\mathfrak{G}}$; $\varepsilon(s) = [\varepsilon_1(s), \dots, \varepsilon_l(s), \dots, \varepsilon_K(s)]^{\mathfrak{G}}$; \mathfrak{G} - операция транспонирования; $W(s) = [W_{k,l}(s)]$ - матрица передаточных функций; $W_{k,l}(s)$ - передаточная функция, отображающая l -е воздействие в k -й элемент вектора состояния объекта.

В свою очередь, передаточные функции, входящие в (3.15), имеют вид

$$W_{k,l}(s) = \frac{B_{k,l}(s)}{C_{k,l}(s)}, \quad (3.16)$$

где $B_{k,l}(s)$ и $\tilde{N}_{k,l}(s)$ - полиномы

$$B_{k,l}(s) = \sum_{m(b,k,l)=0}^{M(b,k,l)} b_{m(b,k,l)} s^{m(b,k,l)};$$

$$\tilde{N}_{k,l}(s) = \sum_{n(c,k,l)=0}^{N(c,k,l)} c_{n(c,k,l)} s^{n(c,k,l)}$$

$m(b,k,l)$ - индекс функция, обозначающая порядок степени переменной Лапла-

са s ; первый аргумент которой указывает, к какому элементу она принадлежит, второй аргумент определяет первый индекс элемента $W_{k,l}(s)$, а третий аргумент - второй индекс указанного элемента; $M(b,k,l)$ - порядок полинома $B_{k,l}(s)$; $N(c,k,l)$ - порядок полинома $\tilde{N}_{k,l}(s)$; в реальных системах $N(c,k,l) > M(b,k,l)$.

Формирование вектора сигналов обратной связи описывается следующим матричным уравнением;

$$X_0(s) = W(s) \cdot \Phi_0(s) \cdot \varepsilon(s), \quad (3.17)$$

где $\Phi_0(s)$ - $K \times K$ диагональная матрица передаточных функций сенсоров; $\Phi_{0,k}(s)$ - передаточная функция k -го сенсора

$$\Phi_0(s) = \begin{bmatrix} \Phi_{0,1}(s) \dots & 0 & \dots & 0 \\ & \ddots & & \\ 0 & \Phi_{0,k}(s) \dots & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & \dots & 0 & \dots \Phi_{0,K}(s) \end{bmatrix}.$$

На выходах сенсоров формируется вектор аналоговых сигналов $X_0(s) = [X_{01}(s), \dots, X_{0k}(s), \dots, X_{0K}(s)]^{\text{q}}$, и динамика их изменения полностью определяется матрицей (3.16). На интерфейсе этот вектор преобразуется в вектор цифровых данных $\tilde{X}_0(s) = [\tilde{X}_{01}(s), \dots, \tilde{X}_{0k}(s), \dots, \tilde{X}_{0K}(s)]^{\text{q}}$. Элементы этого вектора формируются аналого-цифровым преобразователем, который управляется с помощью процедуры поллинга. интервал времени, через который данные поступают непосредственно на программную обработку, складывается из времени работы собственно алгоритма поллинга и времени, затрачиваемого на преобразование аналогового сигнала в цифровую форму.

Будем считать за начало отсчета при вводе данных момент, когда от управляющей программы поступила команда на начало преобразования сигнала $X_{01}(s)$ в цифровую форму, а время на аналого-цифровое преобразование относить ко времени программной обработки данных. Тогда между началами вводов аналоговых сигналов сенсорной подсистемы в контроллер существуют следующие соотношения:

$$\begin{cases} t_{in,1} - t_{in,1} = \tau_{in,1,1} = 0; \\ \dots \\ t_{in,k} - t_{in,1} = \tau_{in,1,k}; \\ \dots \\ t_{in,K} - t_{in,1} = \tau_{in,1,K}, \end{cases}$$

где $t_{in,k}$, $1 \leq k \leq K$ - момент начала ввода k -го сигнала в контроллер; $\tau_{in,1,k}$ - задержки по времени между вводом первого и k -го сигнала (перекос данных при вводе).

Если рассматривать контроллер как физический прибор, осуществляющий обработку данных, то преобразование аналоговых сигналов в цифровой код может быть описано как работа звена с чистым запаздыванием. Диагональная $K \times K$ матрица, описывающая векторную обработку данных в этом случае, имеет вид:

$$N_{in}(s) = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \exp(-\tau_{in,k}s) & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \ddots & \dots & \exp(-\tau_{in,K}s) \end{pmatrix}. \quad (3.18)$$

Формирование вектора $\tilde{X}_0(s)$ из вектора $X_0(s)$ может быть представлено как

$$\tilde{X}_0(s) = N_{in}(s) \cdot X_0(s). \quad (3.19)$$

Будем считать за начало отсчета при выводе данных момент, когда аналого-цифровой преобразователь завершил преобразование кода $\tilde{\varepsilon}_1(s)$, генерируемого программой поллинга, в аналоговый сигнал, а время на цифро-аналоговое преобразование относить ко времени программной обработки данных. Тогда между окончаниями преобразований сигналов вектора $\tilde{\varepsilon}(s)$ существуют следующие соотношения:

$$\begin{cases} t_{out,1} - t_{out,1} = \tau_{out,1,1} = 0; \\ \dots \\ t_{out,k} - t_{out,1} = \tau_{out,1,k}; \\ \dots \\ t_{out,K} - t_{out,1} = \tau_{out,1,K}, \end{cases} \quad (3.20)$$

где $t_{out,k}$, $1 \leq k \leq K$ - момент окончания преобразования k -го сигнала в аналоговую форму; $\tau_{out,1,k}$ - задержки по времени между окончанием преобразования первого и k -го сигнала (перекос данных при выводе).

Преобразование цифровых кодов в аналоговые сигналы также может быть описано как работа звена с чистым запаздыванием. Диагональная $K \times K$ матрица, описывающая векторную обработку данных в этом случае, имеет вид:

$$N_{out}(s) = \begin{pmatrix} 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \exp(-\tau_{out,k}s) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \exp(-\tau_{out,K}s) \end{pmatrix}. \quad (3.21)$$

Формирование вектора $\varepsilon(s)$ из вектора $\tilde{\varepsilon}(s)$ может быть представлено как

$$\varepsilon(s) = N_{out}(s) \cdot \tilde{\varepsilon}(s). \quad (3.22)$$

Кроме аналого-цифровых преобразований и прокачки данных по интерфейсам ввода-вывода контроллер затрачивает физическое процессорное время на собственно обработку данных. [10, 12] Вследствие того, что обрабатываемые данные существуют в виде массивов кодов, их компьютерная обработка в обобщенном виде может быть представлена как

$$\begin{cases} \tilde{\varepsilon}_1(n) = \phi_1[\tilde{X}(n), \dots, \tilde{X}(n-m), \dots, \tilde{X}(n-M)] \\ \dots \\ \tilde{\varepsilon}_k(n) = \phi_k[\tilde{X}(n), \dots, \tilde{X}(n-m), \dots, \tilde{X}(n-M)] \\ \dots \\ \tilde{\varepsilon}_K(n) = \phi_K[\tilde{X}(n), \dots, \tilde{X}(n-m), \dots, \tilde{X}(n-M)] \end{cases} \quad (3.23)$$

где $\phi_k[\dots]$ - скалярная функция векторных аргументов; n - текущее дискретное время; m - дискретный интервал между текущим и более ранними моментами

дискретного времени; M - высший порядок конечной разности от вектора $\tilde{X}(n)$ используемого для расчета управляющих воздействий.

Операции дифференцирования и интегрирования при компьютерном расчете управляющих воздействий заменяются на операции вычисления конечных сумм и конечных разностей, соответственно. Применение преобразования Лапласа к дискретным функциям (3.23) с аргументом $n\tau_c$, где τ_c - период дискретизации, дает так называемое D -преобразование:

$$D[\tilde{\varepsilon}(n, \tau_c)] = \tilde{\varepsilon}(d), \quad D[\tilde{X}(n, \tau_c)] = \tilde{X}(d),$$

где d - оператор конечной разности (комплексный аргумент) D -преобразования.

Исключение из D -преобразования периода дискретизации τ_c дает Z -преобразование

$$Z[\tilde{\varepsilon}(n)] = \tilde{\varepsilon}(z); \quad Z[\tilde{X}(n)] = \tilde{X}(z),$$

где z - оператор конечной разности (комплексный аргумент) Z -преобразования.

Если период дискретизации $\tau_c \rightarrow 0$, то при моделировании функционирования цифрового контроллера возможна замена Z -преобразования на обычное преобразование Лапласа. [22, 23] В этом случае векторы $\tilde{X}(n) \rightarrow \tilde{X}(t)$, $\tilde{X}(z) \rightarrow \tilde{X}(s)$, $\tilde{\varepsilon}(n) \rightarrow \tilde{\varepsilon}(t)$, $\tilde{\varepsilon}(z) \rightarrow \tilde{\varepsilon}(s)$ и выражение (3.23) принимает вид:

$$\begin{cases} \tilde{\varepsilon}_1(t) = \tilde{\phi}_1[\tilde{X}^{(0)}(t), \dots, \tilde{X}^{(m)}(t), \dots, \tilde{X}^{(M)}(t)]; \\ \dots \\ \tilde{\varepsilon}_k(t) = \tilde{\phi}_k[\tilde{X}^{(0)}(t), \dots, \tilde{X}^{(m)}(t), \dots, \tilde{X}^{(M)}(t)]; \\ \dots \\ \tilde{\varepsilon}_K(t) = \tilde{\phi}_K[\tilde{X}^{(1)}(t), \dots, \tilde{X}^{(m)}(t), \dots, \tilde{X}^{(M)}(t)], \end{cases} \quad (3.24)$$

где $\tilde{\phi}_k[\dots]$, $1 \leq k \leq K$ - скалярные функции векторных аргументов; t - непрерывное время; $\tilde{X}^{(m)}(t)$, $1 \leq m \leq M$ - производная m -го порядка, используемая для расчета управляющих воздействий; M - высший порядок производных, используемых при расчете управляющих воздействий.

Если обратные связи, по всем замкнутым контурам являются отрицательными, и при замыкании обратных связей реализуется линейный закон управле-

ния, то

$$\tilde{\varepsilon}(s) = V(s)[F(s) - \tilde{X}(s)], \quad (3.25)$$

где $V(s)$ - закон управления, реализованный в системе; $\Xi_{k,l}(s)$ и $\Psi_{k,l}(s)$ - полиномы

$$V(s) = \begin{bmatrix} V_{1,1}(s) & \dots & V_{1,l}(s) & \dots & V_{1,K}(s) \\ V_{k,1}(s) & \dots & V_{k,l}(s) & \dots & V_{k,K}(s) \\ V_{K,1}(s) & \dots & V_{K,l}(s) & \dots & V_{K,K}(s) \end{bmatrix};$$

$$V_{k,l}(s) = \frac{\Xi_{k,l}(s)}{\Psi_{k,l}(s)}, \quad (3.26)$$

$$\Xi_{k,l}(s) = \sum_{m(\xi,k,l)=0(\xi,k,l)}^{M(\xi,k,l)} \xi_{m(\xi,k,l)} s^{m(\xi,k,l)};$$

$$\Psi_{k,l}(s) = \sum_{n(\psi,k,l)=0(\psi,k,l)}^{N(\psi,k,l)} \psi_{n(\psi,k,l)} s^{n(\psi,k,l)}.$$

С учетом того, что на вычисление скалярных функций векторных аргументов $\tilde{\Phi}_k[\dots]$, входящих в (3.24), тратится машинное время, матрица $V(s)$ принимает вид

$$\tilde{V}(s) = \begin{bmatrix} \tilde{V}_{1,1}(s) & \dots & \tilde{V}_{1,l}(s) & \dots & \tilde{V}_{1,K}(s) \\ \tilde{V}_{k,1}(s) & \dots & \tilde{V}_{k,l}(s) & \dots & \tilde{V}_{k,K}(s) \\ \tilde{V}_{K,1}(s) & \dots & \tilde{V}_{K,l}(s) & \dots & \tilde{V}_{K,K}(s) \end{bmatrix}, \quad (3.27)$$

где $\tilde{V}_{k,l}(s)$ - элементы, описывающие передаточные функции с учетом задержек по времени, затрачиваемого на расчеты; $\tau_{calc,k,l}$ - процессорное время, затрачиваемое на расчет $\tilde{\varepsilon}_l(s)$ после поступления на обработку кода $\tilde{X}_{0,k}(s)$;

$$\tilde{V}_{k,l}(s) = \frac{\Xi_{k,l}(s)}{\Psi_{k,l}(s)} \exp(-\tau_{calc,k,l}). \quad (3.28)$$

С учетом (3.19), (3.22), (3.28) математическое описание обработки данных на контроллере бурового агрегата СБШ-250МН-32Т от выходов аналоговых датчиков до аналоговых входов исполнительных приводов принимает вид:

$$\varepsilon(s) = N_{out}(s)\tilde{V}(s)F(s) - N_{out}(s)\tilde{V}(s)N_{in}(s) \cdot X_0(s). \quad (3.29)$$

Обозначим $N_{out}(s)\tilde{V}(s)N_{in}(s) = \hat{V}(s)$. Тогда

$$\varepsilon(s) = N_{out}(s)\tilde{V}(s)F(s) - \hat{V}(s) \cdot X_0(s), \quad (3.30)$$

где $\tau_{\Sigma,k,l}$ - суммарные затраты машинного времени на ввод информации от k -го сенсора, расчет l -го управляющего воздействия и вывод управляющего воздействия на l -й привод;

$$\tau_{\Sigma,k,l} = \tau_{in,k} + \tau_{calc,k,l} + \tau_{out,l}$$

$$\hat{V}(s) = \begin{bmatrix} V_{1,1}(s)\exp(-\tau_{\Sigma,1,1}s) & \dots & V_{1,l}(s)\exp(-\tau_{\Sigma,1,l}s) & \dots & V_{1,K}(s)\exp(-\tau_{\Sigma,1,K}s) \\ V_{k,1}(s)\exp(-\tau_{\Sigma,k,1}s) & \dots & V_{k,l}(s)\exp(-\tau_{\Sigma,k,l}s) & \dots & V_{k,K}(s)\exp(-\tau_{\Sigma,k,K}s) \\ V_{K,1}(s)\exp(-\tau_{\Sigma,K,1}s) & \dots & V_{K,l}(s)\exp(-\tau_{\Sigma,K,l}s) & \dots & V_{K,K}(s)\exp(-\tau_{\Sigma,K,K}s) \end{bmatrix}; \quad (3.31)$$

Из (3.15), (3.17) и (3.30) может быть получено матричное уравнение замкнутой системы, управляемой цифровым контроллером:

$$X(s) = W(s)[E + \hat{V}(s) \cdot W(s) \cdot \Phi_0(s)]^{-1} N_{out}(s)\tilde{V}(s)F(s), \quad (3.32)$$

где E - $K \times K$ единичная диагональная матрица.

В (3.32) знаменатель определяется следующим образом:

$$[E + \hat{V}(s) \cdot W(s) \cdot \Phi_0(s)]^{-1} = \frac{U(s)}{\det[E + \hat{V}(s) \cdot W(s) \cdot \Phi_0(s)]}, \quad (3.33)$$

где $U(s) = [U_{k,l}(s)]$ - матрица алгебраических дополнений, элементы $U_{k,l}(s)$ которой формируются путем вычеркивания из матрицы $E + \hat{V}(s) \cdot W(s) \cdot \Phi_0(s)$ k -й строки и l -го столбца и умножения результата на $(-1)^{k+l}$.

Во временной области вектор состояния $X(t)$ определяется следующим образом:

$$X(t) = \text{Res} \left\{ \frac{W(s)U(s)N_{out}(s)\tilde{V}(s)F(s)e^{st}}{\det[E + \hat{V}(s) \cdot W(s) \cdot \Phi_0(s)]} \right\}_{\det[\dots]=0, F(s) \rightarrow \infty}, \quad (3.34)$$

В частности, векторный импульсный отклик системы $\delta_X(t)$ определяется как

$$\delta_X(t) = \text{Res} \left\{ \frac{W(s)U(s)N_{out}(s)\tilde{V}(s)e^{st}}{\det[E + \hat{V}(s) \cdot W(s) \cdot \Phi_0(s)]} \right\}_{\det[\dots]=0}, \quad (3.35)$$

где $\delta_X(t) = [\delta_{x,1}(t), \dots, \delta_{x,k}(t), \dots, \delta_{x,K}(t)]^g$ - вектор импульсных откликов по каналам управления; $\delta_{x,k}(t)$ - импульсный отклик по k -й переменной, определяющей состояние объекта при взаимодействии с другими каналами; $\text{Res}[\dots]$ - вычет функции [50].

Из (3.34), (3.35) следует, что динамические свойства замкнутой цифровой системы управления определяются характеристическим уравнением

$$\det[E + \hat{V}(s) \cdot W(s) \cdot \Phi_0(s)] = 0, \quad (3.36)$$

корни которого формирует систему полюсов, определяющих значения вычетов.

При отсутствии задержек по времени вносимых цифровым контроллером, уравнение (3.36) преобразуется в выражение

$$\det[E + V(s) \cdot W(s) \cdot \Phi_0(s)] = 0, \quad (3.37)$$

которое в развернутом виде может быть представлено как

$$\sum_{n(\alpha)=0(\alpha)}^{N(\alpha)} \alpha_{n(\alpha)} s^{n(\alpha)} = 0, \quad (3.38)$$

где $\alpha_{n(\alpha)}$ - постоянные или медленно меняющиеся коэффициенты, определяемые параметрами объекта управления, сенсорной подсистемы и закона управления, алгоритмически реализуемого на цифровом контроллере; $N(\alpha)$ - порядок системы, складывающийся из порядков передаточных функций, входящих в $V(s)$ $W(s)$ $\Phi_0(s)$.

В частности, в буровом агрегате СБШ-250МН-32Т порядок характеристического уравнения, без учета инерционности датчиков и исполнительных

приводов складывается из порядков уравнений, описывающих трехфазный асинхронный двигатель, гидравлическую трансмиссию, полиспасть, взаимодействующие бур и грунт, вращатель.

3.4. Устойчивость цифровой системы управления

Основное, что должна обеспечивать система цифрового управления буровым агрегатом СБШ-250МН-32Т, является устойчивость собственно процесса бурения, под которой понимается поддержание на оптимальном предопределенном уровне следующих параметров: давление на грунт $R(s)$, подача $y_2(s)$, угловая скорость вращения бура $\omega_B(s)$. Вследствие того, что характеристическое уравнение замкнутой системы имеет весьма высокий порядок, целесообразно для оценки устойчивости применять алгебраические критерии, в частности критерий Раусса-Гурвица. Однако, для прямого применения подобного критерия необходимо точно знать порядок характеристического уравнения системы. В тоже время, при разработке модели объекта управления был сделан ряд допущений, которые позволили искусственно занизить этот порядок. Поэтому для использования метода оценки устойчивости Раусса-Гурвица необходима коррекция метода. [46-48, 69, 70, 75, 102, 108, 109]

3.4.1. Устойчивость системы без учета задержек по времени

Справедливо следующее

Утверждение 3.1. Если уравнение (3.38) имеет отрицательные действительные корни и/или пары комплексно-сопряженных корней с отрицательными действительными частями, то уравнение

$$\sum_{n(\alpha)=0(\alpha)}^{N(\alpha)} \alpha_{n(\alpha)} s^{n(\alpha)-N(\alpha)} = 0 \quad (3.39)$$

также имеет отрицательны действительные корни и/или корни с отрицательными действительными частями.

Доказательство. Допустим, что в (3.38) $\alpha_{M(\alpha)} = 1$. Тогда

$$\alpha_0(\alpha) = \prod_{n(\alpha)=1}^{N(\alpha)} s_n(\alpha),$$

где $s_n(\alpha)$, $1(\alpha) \leq n(\alpha) \leq N(\alpha)$ - корни. (3.40)

Обозначим $s^{-1} = r$ и разделим обе части (3.40) на $\alpha_0(\alpha)$. Тогда (3.40)

примет вид

$$\sum_{n(\tilde{\alpha})=0}^{N(\tilde{\alpha})} \tilde{\alpha}_n(\tilde{\alpha}) r^{n(\tilde{\alpha})} = 0, \quad (3.41)$$

где $\tilde{\alpha}_n(\tilde{\alpha}) = \frac{\alpha_n(\alpha)}{\alpha_{N(\alpha)}}$; $\tilde{\alpha}_0(\tilde{\alpha}) = \prod_{n(\tilde{\alpha})=1}^{N(\tilde{\alpha})} r_{n(\tilde{\alpha})} = \prod_{n(\alpha)=1}^{N(\alpha)} \frac{1}{s_n(\alpha)}$; $\tilde{\alpha}_{N(\tilde{\alpha})} = 1$;

$$n(\tilde{\alpha}) = N(\alpha) - n(\alpha)$$

Таким образом, корни (3.41) являются обратными по отношению к корням уравнения (3.38).

Допустим, что в $s_n(\alpha) = \text{Re } s_n(\alpha) + i \text{Im } s_n(\alpha)$, где $\text{Re}(\dots)$ - действительная часть комплексного числа; $\text{Im}(\dots)$ - мнимая часть комплексного числа; $i = \sqrt{-1}$, $\text{Re } s_n(\alpha) < 0$, что соответствует устойчивой системе управления. Тогда

$$\text{Re}[\text{Re } s_n(\alpha) + i \text{Im } s_n(\alpha)]^{-1} = \frac{\text{Re } s_n(\alpha)}{[\text{Re } s_n(\alpha)]^2 + [\text{Im } s_n(\alpha)]^2} < 0.$$

что также соответствует устойчивой системе.

В частном случае, когда $\text{Im } s_{q(m)} = 0$, $\frac{\text{Re } s_{q(m)}}{[\text{Re } s_{q(m)}]^2} = \frac{1}{\text{Re}(s)} < 0$, что соответ-

ствует устойчивой системе.

Таким образом, утверждение 3.1. доказано.

Для оценки устойчивости можно воспользоваться критерием Рауса-Гурвица. Определитель Рауса-Гурвица [127, 132, 134] для инверсного характеристического уравнения (3.41) с использованием значений коэффициентов из уравнения (3.38) принимает вид

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \alpha_1(\alpha) & \alpha_0(\alpha) & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \alpha_3(\alpha) & \alpha_2(\alpha) & \alpha_1(\alpha) & \dots & 0 & 0 \\ \alpha_5(\alpha) & \alpha_4(\alpha) & \alpha_3(\alpha) & \dots & 0 & 0 \\ & & & \dots & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \alpha_{N(\alpha)-1} & \alpha_{N(\alpha)-2} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \alpha_{N(\alpha)} \end{bmatrix}. \quad (3.42)$$

Для устойчивости системы необходимо, чтобы все коэффициенты, $\alpha_0(\alpha)$, ..., $\alpha_m(\alpha)$, ..., $\alpha_M(\alpha)$, были положительны и все определители матрицы Рауса-Гурвица, получаемые из левого верхнего минора были бы также положительными. В частности, положительным должен быть минор $|\alpha_1(\alpha)| = \alpha_1(\alpha) > 0$. Уменьшение положительного коэффициента $\alpha_1(\alpha)$ подводит систему ближе к границе устойчивости.

3.4.2. Устойчивость системы с задержками по времени

Вернемся к системе (3.36). Вследствие того, что в этой системе вместо сомножителя $V(s)$, не зависящего от времени задержки, вносимой цифровым контроллером, имеется сомножитель $\hat{V}(s)$, в числителях передаточных функций которых, в соответствии с (3.28), (3.31), присутствует комплексная экспонента $\exp(-\tau_{\Sigma,k,l})$. Добавление комплексной экспоненты к характеристическому уравнению (3.37) означает, что оно перестает быть полиномиальным уравнением. [140, 142, 145, 146] Естественно, меняются и его корни.

Справедливо *утверждение 3.2*. Несмотря на комплексную экспоненту, стоящую в левой части (3.35), решение этого характеристического уравнения представляет множество действительных, или пар комплексно-сопряженных чисел.

Для доказательства утверждения разложим комплексные экспоненты $\exp(-\tau_{\Sigma,k,l}s)$ в ряд Маклорена:

$$\exp(-\tau_{\Sigma,k,l}s) = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-\tau_{\Sigma,k,l}s)^j}{j!}. \quad (3.43)$$

Выражение, стоящее в правой части представляет собой полином от s . Произведение полинома, стоящего в числителе (3.37) на полином (3.43) представляет собой также полином. Это, в свою очередь доказывает справедливость утверждения 3.2.

Ограничимся в разложении (3.43) первыми двумя членами ряда. Тогда матрица (3.31) может быть представлена в виде следующей суммы матриц:

$$\hat{V}(s) = V(s) - s \begin{bmatrix} \tau_{\Sigma,1,1}V_{1,1}(s) & \dots & \tau_{\Sigma,1,l}V_{1,l}(s) & \dots & \tau_{\Sigma,1,K}V_{1,K}(s) \\ \tau_{\Sigma,k,1}V_{k,1}(s) & \dots & \tau_{\Sigma,k,l}V_{k,l}(s) & \dots & \tau_{\Sigma,k,K}V_{k,K}(s) \\ \tau_{\Sigma,K,1}V_{K,1}(s) & \dots & \tau_{\Sigma,K,l}V_{K,l}(s) & \dots & \tau_{\Sigma,K,K}V_{K,K}(s) \end{bmatrix}. \quad (3.44)$$

Умножение второй матрицы (3.44) на переменную Лапласа s означает, что коэффициент $\alpha_0(\alpha)$ представления (3.38) характеристического уравнения не меняется, а уменьшение начинается с коэффициента $\alpha_1(\alpha)$. Это, в свою очередь, означает, что уменьшается первый минор матрицы Рауса-Гурвица, т.е. $|\alpha_1(\alpha)| = \alpha_1(\alpha) \rightarrow 0$, а следовательно, замкнутая система приближается к границе устойчивости.

Поскольку время задержки на принятие решения при цифровом управлении оказывает существенное влияние на устойчивость системы, при разработке программного обеспечения необходимо использовать методы оценки временных интервалов, затрачиваемых на обработку данных.

3.5. Метод оценки времени задержки на принятие решения при цифровом управлении

Как было показано п. 3.1 при В соответствии с выражением (3.2) программно последовательно рассчитываются значения элементов вектора $u_c(n)$. Рассчитанные значения включаются в массив данных для их использования при определении значений $u_c(n+i)$, где i - целое число, $i > 0$, а также выводятся через интерфейс на объект управления. Интерпретация алгоритма расчета кодов и ввода/вывода данных через интерфейс осуществляется

циклически и разворачивается в реальном физическом времени. В качестве точки отсчета, определяющей начало цикла, может быть выбран момент формирования цифрового образа $x_{c,1}(n)$ элемента вектора состояния $x_1(t)$. При программном опросе (полинге) цифровые коды $x_{c,k}(n)$ формируются с задержками по времени $\tau_{1(x),k(x)}$, $2(x) \leq k(x) \leq K(x)$, относительно кода $x_{c,1}(n)$. Задержки образуют т.н. «перекося данных», который оказывает влияние на качество переходных процессов в системе, а следовательно, является одним из параметров, влияющих на ее отказы [102, 111, 126, 143, 150].

Измеренные временные интервалы между моментами формирования кодов $x_{c,k}(n)$ и моментами вывода кодов $u_{c,l}(n)$, где $1 \leq k, l \leq K$ дают задержки по времени $\tau_{k(x),l(u)}$, где $k(x) = k, l(x) = l$, вывода управляющих кодов $u_{c,l}(n)$ относительно моментов формирования кодов $x_{c,k}(n)$. Задержки по времени между транзакциями ввода и вывода данных также влияют на качество переходных процессов и поэтому является одной из причин возникновения отказов системы управления.

Перекося данных при выводе компонентов вектора $u_c(n)$ может быть определен как временной интервал $\tau_{1(u),k(u)}$, который отсчитывается от момента вывода кода $u_{c,1}(n)$ до момента вывода кода $u_{c,k}(n)$, где $2(u) \leq k(u) \leq K(u)$. Выход этого параметра за определенный уровень также может приводить к отказу системы управления [18, 45, 111, 145].

Кроме того отказом управляющей программы следует считать несоблюдение условий Найквиста теоремы об отсчетах при организации процедуры полинга [111].

Общий поток транзакций, формируемый в результате процедуры полинга, показан на рис. 3.5.

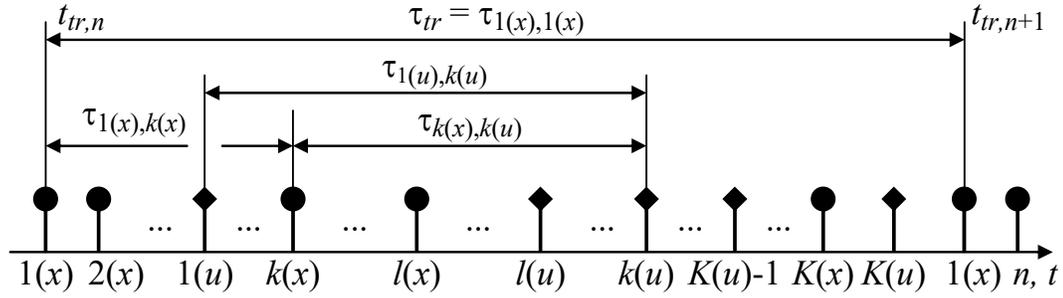


Рис. 3.5. Поток транзакций, формируемый при управлении объектом

На рисунке обозначены: стрелками с круглым концом - моменты ввода кодов $x_{c,k}(n)$, определяющих состояние объекта управления; стрелками с квадратным концом - моменты вывода кодов управления $u_{c,k}(n)$. Моменты начала цикла обозначены как $t_{tr,n} = n\tau_{1(x),1(x)}$. Они привязаны к моменту ввода компонента $x_{c,1}(n)$ вектора $\mathbf{x}_c(n)$. Период цикла транзакций обозначен как $\tau_{tr} = \tau_{1(x),1(x)}$. Он длится от момента ввода компонента $x_{c,1}(n)$ до ввода компонента $x_{c,1}(n+1)$.

Для оценки временных интервалов должна быть построена модель функционирования контроллера, как физического прибора, реализующего программную обработку компонентов вектора $\mathbf{x}_c(n)$ для расчета компонентов вектора $\mathbf{u}_c(n)$ [135, 157]. Для упрощения модели алгоритм обработки представляется только операторами ввода $\mathbf{x}_c(n)$ и вывода $\mathbf{u}_c(n)$. Считается, что все расчеты компонентов $\mathbf{u}_c(n)$ производятся внутри операторов соответствующих транзакций.

Адекватной моделью функционирования контроллера является полумарковский процесс, представленный $Z \times Z$ полумарковской матрицей [18, 131]

$$\mathbf{h}(t) = [h_{\xi,\zeta}(t)] = [g_{\xi,\zeta}(t)] \otimes [p_{\xi,\zeta}], \quad (3.45)$$

где $p_{\xi,\zeta}$ - вероятности прямого переключения полумарковского процесса из состояния ξ в состояние ζ ; $g_{\xi,\zeta}(t)$ - плотность распределения времени пребывания процесса в состоянии ξ , если априорно известно, что следующим состоя-

нием будет ζ ; \otimes - знак прямого перемножения матриц; $\xi, \zeta \in \{1(x), \dots, k(x), \dots, K(x), 1(u), \dots, k(u), \dots, K(u)\}$; $Z = 2K$ - общее количество состояний полумарковского процесса, равное количеству транзакций, генерируемых программой; $p_{\xi, \zeta} = 0$, если $\xi = \zeta$.

Вследствие того, что программа полинга является циклической, и в течение цикла все транзакции должны быть актуализированы, структурно полумарковская модель (3.45) представляется полным сильносвязным графом с петлями, который показан на рис. 3.6 а.

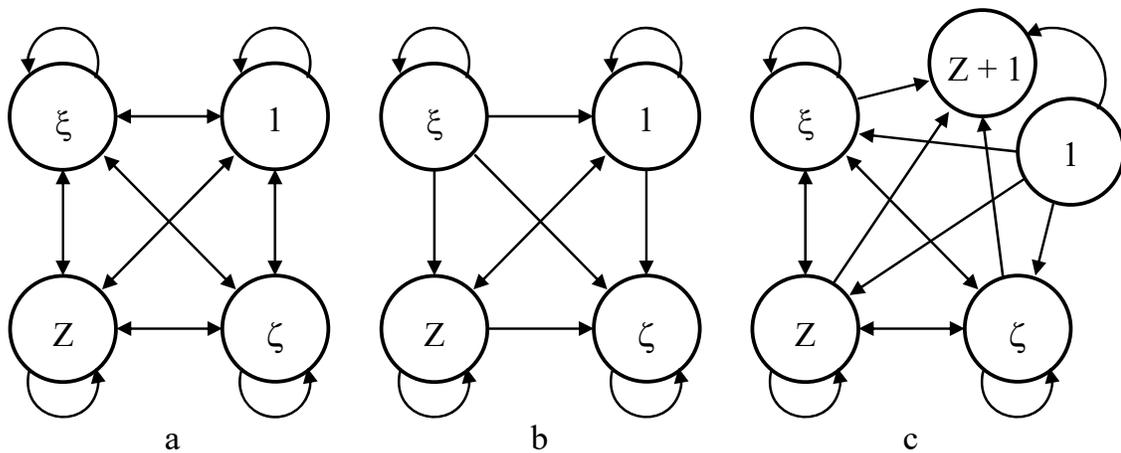


Рис. 3.6. Структура полумарковского процесса: а - исходная; б - для оценки временного интервала между транзакциями; в - для оценки времени возврата в начало цикла

Полумарковский процесс (3.45) является эргодическим, и в нем отсутствуют поглощающие, или полупоглощающие состояния. Поэтому на вероятности матрицы $[p_{\xi, \zeta}]$ и плотности распределения матрицы $[g_{\xi, \zeta}(t)]$ накладываются следующие ограничения:

$$0 < T_{\xi, \zeta}^{\min} \leq \arg[g_{\xi, \zeta}(t)] \leq T_{\xi, \zeta}^{\max} < \infty, 1 \leq \xi, \zeta \leq Z;$$

$$\sum_{\zeta=1}^Z p_{\xi, \zeta} = 1; 1 \leq \xi \leq Z;$$

$$\int_{T_{\xi,\zeta}^{\min}}^{T_{\xi,\zeta}^{\max}} g_{\xi,\zeta}(t) dt = 1,$$

где $T_{\xi,\zeta}^{\min}$ и $T_{\xi,\zeta}^{\max}$ - верхняя и нижняя границы области определения плотности распределения $g_{\xi,\zeta}(t)$.

При оценке временного интервала между транзакциями неважно, по какой траектории переключения полумарковский процесс попадает из состояния ξ в состояние ζ . Определяющим является то, что это попадание должно быть первым, а не вторым, третьим и т.д. Для оценки временного интервала структура эргодического полумарковского процесса, представленная на рис. 3.6 а, должна быть преобразована в структуру, изображенную на рис. 3.6 б, на которой состояние ξ является стартовым, а состояние ζ - поглощающим [131]. Преобразование сводится к обнулению ξ -го столбца, что делает невозможным переключение в ξ -е состояние, и ζ -й строки, что делает невозможным переключение из ζ -го состояния. Кроме того вероятности во всех строках матрицы, за исключением ζ -й должны быть пересчитаны, чтобы все состояния, кроме ζ -го остались непоглощающими. Таким образом полумарковская модель (3.45) преобразуется в модель

$$\mathbf{h}'(t) = [g_{i,j}(t)] \otimes [p'_{i,j}], \quad (3.46)$$

где $1 \leq i, j \leq Z$; в $g_{i,j}(t)$ изменились только обозначения индексов;

$$p'_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{when } i = \zeta, \text{ or } j = \xi; \\ \frac{p_{i,j}}{1 - p_{i,\xi}} & \text{in all other cases.} \end{cases}$$

Задержка по времени оценивается по зависимости:

$$g_{\xi,\zeta}^{\Sigma}(t) = \mathbf{I}_{\xi}^r \cdot L^{-1} \left[\sum_{i=1}^{\infty} \{L[\mathbf{h}'(t)]\}^i \right] \cdot \mathbf{I}_{\zeta}^c, \quad (3.47)$$

где $L[\dots]$ и $L^{-1}[\dots]$ - прямое и обратное преобразования Лапласа, соответственно [7, 145]; \mathbf{I}_{ξ}^r - Z -элементный вектор-строка, ξ -й элемент которого равен едини-

це, а остальные элементы равны нулю; I_{ζ}^c - Z -элементный вектор-строка, ζ -й элемент которого равен единице, а остальные элементы равны нулю.

3.6. Структура цифровой системы управления

Структура систем исследуемого класса показана на рис. 3.7 и является классической. Система включает объект управления, (ОУ) и цифровой контроллер (ЦК) объединенные интерфейсом (И). Состояние ОУ $X(s)$ измеряется сенсорной подсистемой, и преобразуется в цифровой поток данных $\tilde{X}(s)$. ЦК представляет собой ЭВМ Фон Неймановского типа, управляющий алгоритм которой сравнивает текущее состояние объекта с желаемым состоянием, определяемым вектором данных $\tilde{F}(s)$, формирует вектор ошибки $\varepsilon(s)$, рассчитывает компоненты потока данных $\tilde{U}(s)$, и выводит эти компоненты через интерфейс в виде вектора $U(s)$ сигналов управления, подаваемых на приводы исполнительных органов ОУ.

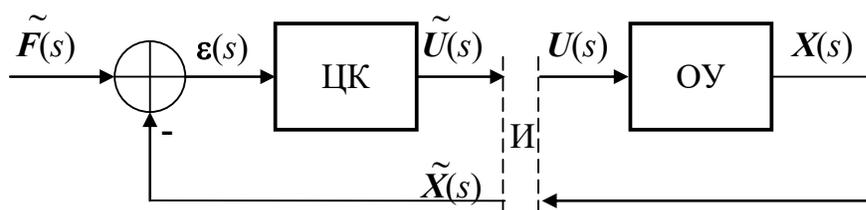


Рис. 3.7. Общая структура цифровой системы управления

Общая динамическая модель, описывающая ОУ, может быть получена из системы дифференциальных уравнений, описывающей объект как таковой, его датчики и приводы, линеаризации модели и применения к линейной форме прямого преобразования Лапласа [8, 29, 112]. Модель выглядит следующим образом:

$$\bar{A}(s) \cdot X(s) = \bar{B}(s) \cdot U(s), \quad (3.48)$$

где $X(s)$ и $U(s)$ - K -элементные векторы; $\bar{A}(s)$ и $\bar{B}(s)$ - $K \times K$ невырожденные матрицы общего вида; s - оператор дифференцирования.

Для удобства с использованием методов линейной алгебры [10] уравнение (3.48) может быть сведено к форме

$$\mathbf{A}(s) \cdot \mathbf{X}(s) = \mathbf{B}(s) \cdot \mathbf{U}(s), \quad (3.49)$$

где $\mathbf{A}(s) = [A_{k,l}(s)]$ - $K \times K$ диагональная матрица; $\mathbf{B}(s) = [B_{k,l}(s)]$ - $K \times K$ матрица общего вида; $A_{k,l}(s)$ и $B_{k,l}(s)$ - элементы, расположенные на пересечении k -й строки и l -го столбца;

$$A_{k,l}(s) = \begin{cases} \sum_{m(a,k)=0(a,k)}^{M(a,k)} a_{m(a,k)} s^{m(a,k)}, & \text{when } k = l, \\ 0, & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (3.50)$$

$$B_{k,l}(s) = \sum_{m(b,k,l)=0(b,k,l)}^{M(b,k,l)} b_{m(b,k,l)} s^{m(b,k,l)}. \quad (3.51)$$

В (3.50) и (3.51) $m(\dots)$ - индекс-функция, первый аргумент которой обозначает, к какой матрице принадлежит индекс, второй элемент обозначает номер строки, а третий – номер столбца.

Для выполнения условий леммы Жордана [63, 64, 67] можно потребовать, чтобы $\max_{k,l} [M(b,k,l)] < \min_k [M(a,k)]$.

В общем случае алгоритм управления, реализованный в ЦК, рассчитывает те или иные функции дискретного аргумента [63]. Результатом применения к дискретному аргументу преобразования является Z-преобразование [14]. При стремлении периода дискретизации к нулю возможна замена Z-преобразования на обычное преобразование Лапласа и линейный закон управления, реализованный в ЦК может быть описан как

$$\mathbf{C}(s) \cdot \tilde{\mathbf{U}}(s) = \mathbf{D}(s) \cdot [\tilde{\mathbf{F}}(s) - \tilde{\mathbf{X}}(s)], \quad (3.52)$$

где $\mathbf{C}(s) = [C_{k,l}(s)]$ - $K \times K$ диагональная матрица; $\mathbf{D}(s) = [D_{k,l}(s)]$ - $K \times K$ общего вида; $\max_{k,l} [M(d,k,l)] < \min_k [M(c,k)]$;

$$C_{k,l}(s) = \begin{cases} \sum_{m(c,k)=0(c,k)}^{M(c,k)} c_{m(c,k)} s^{m(c,k)}, & \text{when } k = l, \\ 0 & \text{otherwise;} \end{cases} \quad (3.53)$$

$$D_{k,l}(s) = \sum_{m(d,k,l)=0(d,k,l)}^{M(d,k,l)} d_{m(d,k,l)} s^{m(d,k,l)}. \quad (3.54)$$

Практическая реализация зависимости (3.52) сводится к реализации некоторого управляющего алгоритма, который организует чтение элементов вектора $\tilde{X}(s)$, расчет

$$\tilde{U}(s) = C^{-1}(s) \cdot D(s) \cdot [\tilde{F}(s) - \tilde{X}(s)], \quad (3.55)$$

и вывод элементов вектора $\tilde{U}(s)$.

Алгоритм опроса датчиков и приводов может иметь сколь угодно сложную структуру, но две его особенности являются общими для всех алгоритмов этого типа: цикличность и задержка по времени между запросами любой выбранной пары транзакций. В простейшем случае внутри цикла алгоритм является линейным и может иметь структуру, показанную на рис. 3.8.



Рис. 3.8. Структура простейшего управляющего алгоритма

В алгоритме, изображенном на рис. 3.8, в цикле опрашиваются элементы вектора $\tilde{X}(s)$, рассчитывается управляющее воздействие по зависимости (3.56), и результаты расчета с использованием операторов $1(u), \dots, k(u), \dots, l(u), \dots, K(u)$ прокачиваются через интерфейс И на входы приводов. Период транзакций

$\tau_{1(x),1(x)}$ начинается с начала чтения данных, поступающих от первого датчика и оканчивается выводом управляющего воздействия на $K-1$ привод:

$$\tau_{1(x),1(x)} = \sum_{i(x)=1(x)}^{K(x)} \tau_{i(x)} + \tau_p + \sum_{i(u)=1(u)}^{K(u)} \tau_{i(u)}, \quad (3.56)$$

где $\tau_{i(x)}$ - время ввода данных с $i(x)$ -го сенсора; $\tau_{i(u)}$ - время вывода данных на $i(u)$ -й привод; τ_p - время обработки данных.

Для грубой оценки задержки в контурах управления с учетом времени, затрачиваемого контроллером Фон Неймановского типа на обработку данных, в этом случае может быть использовано среднее время, затрачиваемое на чтение, плюс среднее время, затрачиваемое на обработку, плюс среднее время, затрачиваемое на вывод данных [146].

$$\tau = \frac{1}{2} \left[\sum_{i(x)=1(x)}^{K(x)} \tau_{i(x)} + \sum_{i(u)=1(u)}^{K(u)} \tau_{i(u)} \right] \quad (3.57)$$

С учетом (3.57), зависимость (3.52) может быть преобразовано в выражение

$$U(s) = C^{-1}(s) \cdot D(s) \cdot [\tilde{F}(s) - \exp(-\tau s) \cdot X(s)], \quad (3.58)$$

где комплексная экспонента в квадратных скобках представляет собой изображение по Лапласу чистого запаздывания.

Подстановка (3.49) в (3.58) дает

$$X(s) = \left[A(s) + \exp(-\tau s) B(s) \cdot C^{-1}(s) \cdot D(s) \right]^{-1} \cdot B(s) \cdot C^{-1}(s) \cdot D(s) \cdot F(s), \quad (3.59)$$

где $A(s) + \exp(-\tau s) B(s) \cdot C^{-1}(s) \cdot D(s)$ - характеристический полином многоконтурной цифровой замкнутой системе управления.

Динамика управляемого технологического оборудования полностью определяется корнями характеристического уравнения [16, 17], полученного из (3.59):

$$\left| A(s) \cdot \det C(s) + \exp(-\tau s) \cdot B(s) \cdot C_{\mu}(s) \cdot D(s) \right| = \det[Q(s)] = 0. \quad (3.60)$$

где $C_{\mu}(s)$ - матрица миноров;

$$\det[\mathbf{Q}(s)] = \sum_{m(q)=0(q)}^{M(q)} \tilde{q}_{m(q)} s^{m(q)} + \exp(-\tau s) \sum_{m(q)=1(q)}^{\tilde{M}(q)} \tilde{p}_{m(q)} s^{m(q)}; \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m(q)=0(q)}^{M(q)} \tilde{q}_{m(q)} s^{m(q)} &= \prod_{k=1}^K \sum_{m(a,k)=0(a,k)}^{M(a,k)} a_{m(a,k)} s^{m(a,k)} \times \\ &\times \prod_{k=1}^K \sum_{m(c,k)=0(c,k)}^{M(c,k)} a_{m(c,k)} s^{m(c,k)}; \end{aligned} \quad (3.62)$$

$$M(q) = \sum_{k=1}^K M(a,k) + \sum_{k=1}^K M(c,k). \quad (3.63)$$

Выражение (3.60) может быть переписано в виде

$$\sum_{m(q)=0(q)}^{M(q)} q_{m(q)} s^{m(q)} = 0, \quad (3.64)$$

где

$$q_{m(q)} = \begin{cases} \tilde{q}_{m(q)} + \tilde{p}_{m(q)} \cdot \exp(-\tau s), & \text{when } 0(q) \leq m(q) \leq \tilde{M}(q); \\ \tilde{q}_{m(q)}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.65)$$

Отметим, что в системе без задержек (17) принимает вид

$$q_{m(q)} = \begin{cases} \tilde{q}_{m(q)} + \tilde{p}_{m(q)}, & \text{when } 0(q) \leq m(q) \leq \tilde{M}(q); \\ \tilde{q}_{m(q)}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (3.66)$$

Для устойчивой замкнутой системы действительные корни характеристического уравнения (3.60) должны быть отрицательными, а пары комплексно-сопряженных корней должны иметь отрицательные действительные части.

Разложим комплексную экспоненту системы с задержками в ряд Тейлора, т.е..

$$\exp(-\tau s) \cdot q_0(q) = (1 - \tau s) q_0(q). \quad (3.67)$$

Постановка (3.67) в (3.66) дает следующее значение первого минора Рауса-Гурвица:

$$q_1(q,d) = q_1(q) - \tau q_0(q), \quad (3.68)$$

где $q_1(q,d)$ - первый минор системы с задержками; $q_1(q)$ - первый минор системы без задержек; $q_0(q) > 0$ и $\tau > 0$ по определению.

Выражение (3.68) показывает, что наличие задержки по времени при обработке данных в Фон Неймановском контроллере приближает систему управления к границе устойчивости, и для того, чтобы приблизить характеристики системы с цифровой обработкой к системе с аналоговой обработкой необходимо сокращать вычислительную сложность алгоритма управления.

Полученные результаты необходимо подтвердить моделированием работы системы управления буровым агрегатом нейронным регулятором.

3.7. Выводы

1. Разработана система управления буровым агрегатом СБШ-250МН-32Т на основе структуры гидравлической трансмиссии, структуры полиспада, как вязкоупругого передаточного звена и структуры взаимодействия бура и грунта.

2. Доказана устойчивость системы без учета задержек по времени. Для оценки устойчивости использовался критерий Рауса-Гурвица.

3. Доказана устойчивость системы с задержками по времени. Поскольку время задержки на принятие решения при цифровом управлении оказывает существенное влияние на устойчивость системы, при разработке программного обеспечения необходимо использовать методы оценки временных интервалов, затрачиваемых на обработку данных.

4. Разработан метод оценки времени задержки на принятие решения при цифровом управлении.

4. ЦИФРОВОЙ РЕГУЛЯТОР НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

4.0. Введение

Существующая система управления буровым агрегатом СБШ-250МН-32Т обладает низким уровнем интеллектуализации, который характеризуется большим количеством операций, выполняемых вручную (нажатие кнопок, вращение потенциометров, включение/выключение ключей и т.п.). В качестве средств, отражающих текущее состояние агрегата применяются светодиоды, транспаранты, щитовые измерительные приборы и т.п. Для программирования свойств, параметров и логики функционирования агрегата используются элементы электроавтоматики. Обеспечение требуемых параметров проходки осуществляется путем ручной настройки узлов, входящих в систему управления на основании опыта и квалификации оператора, обслуживающего агрегат.

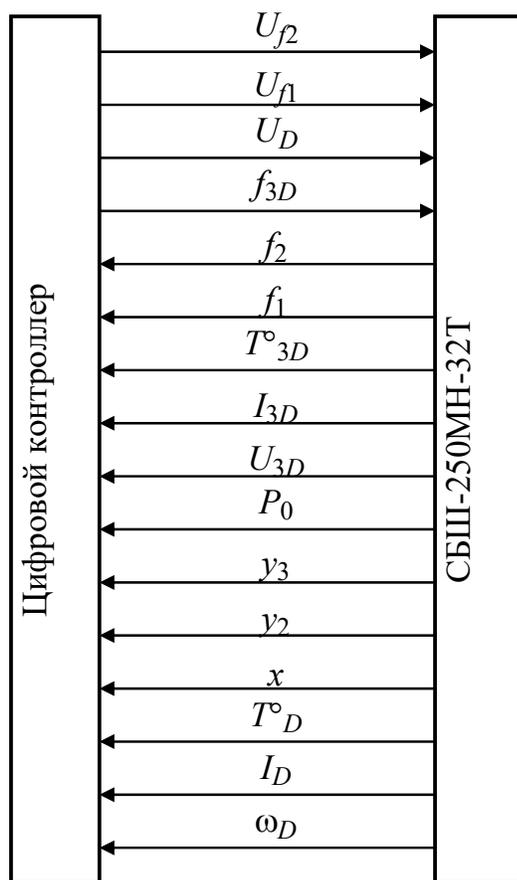
Применение цифрового контроллера с элементами искусственного интеллекта позволяет производить обработку значительных объемов информации по достаточно сложным алгоритмам. В зависимости от состояния объекта управления по результатам обработки информации могут быть реализованы оптимальные режимы бурения. При этом контроллер выполняет функции одновременно и функцию замыкания обратных связей. Оператору, наряду с традиционной формой представления, информация предъявляется после предварительной обработки на экране монитора, цифровых индикаторах. Управление приводом возможно как с пульта управления, так и дистанционно, по стандартному интерфейсу.

В блоках управления приводами с высокой степенью интеллектуализации применяются микропроцессорные контроллеры или управляющая ЭВМ, в которой применен механизм т.н. "гибкого программирования", что позволяет перепрограммировать функции контроллера без проведения монтажных работ или замены микросхем, содержащих программный код. Кроме того, в системах с «гибким программированием» существует возможность реализации интерфейса с обслуживающим оператором, от текстового до графического. Операто-

ру информация представляется с помощью графического интерфейса либо на виртуальной мнемосхеме или в виде изображений приборов на экране монитора, причем часть информации содержит цветовое кодирование. Программирование свойств приводов с высокой степенью интеллектуализации осуществляется на алгоритмическом уровне. Математическое обеспечение блока управления имеет унифицированную модульную структуру, что позволяет снизить трудоемкость его разработки.

4.1. Цифровой регулятор на основе нейронной сети

Структурная схема цифрового регулятора на основе нейронной сети приведена на рис. 4.1.



4.1. Структурная схема регулятора

Основными регулируемыми параметрами при работе в режиме бурения являются:

угловая скорость ω_D вала привода постоянного тока вращателя;

перемещение y_2 бура;

изменение угла наклона штанги u_3 .

Дополнительными регулируемыми параметрами при работе в режиме бурения являются:

величины f_1 и f_2 проходных сечений управляемых клапанов линейного гидропривода,

Следующие измеряемые управляющей системой параметры используются для выбора режима и параметров бурения:

величина тока I_D привода постоянного тока вращателя;

температура T_D° привода постоянного тока вращателя;

положение штока x линейного гидропривода;

напряжение U_{3D} питания трехфазного асинхронного привода гидронасоса;

ток I_{3D} в цепи питания трехфазного асинхронного привода гидронасоса;

температура T_{3D}° трехфазного асинхронного привода гидронасоса;

давление P_0 в напорной магистрали гидравлической трансмиссии;

Для управления основными и дополнительными регулируемыми параметрами цифровой контроллер генерирует следующие сигналы:

переменное трехфазное силовое напряжение питания f_{3D} с частотами, обеспечивающими вращение вала двигателя с угловыми скоростями 750 об/мин, 1500 об/мин, или 3000 об/мин.

напряжение U_D , подаваемое на якорную обмотку привода постоянного тока вращателя;

сигнал управления U_{f1} , подаваемый на привод первого регулируемого клапана;

сигнал управления U_{f2} , подаваемый на привод второго регулируемого клапана.

Переменное трехфазное силовое напряжение питания f_{3D} и управляющее напряжение U_D , подаваемое на якорную обмотку привода постоянного тока, обеспечивают заданный режим бурения, т.е. заданную скорость вращения вала двигателя постоянного тока ω_D и величину подачи бура y_2 . В свою очередь, при бурении между каналами управления подачей и угловой скорости вращателя возникает перекрестная связь. Коэффициенты $k_{\mu\omega}$, $k_{\mu R}$ зависимости (2.62) и $k_{y\omega}$, k_{yR} зависимости (2.63), определяющие величину перекрестной связи с одной стороны, существенно зависят от типа грунта и его физического состояния, а с другой стороны определяют динамику переходных процессов при бурении. Указанные коэффициенты могут изменяться как от скважины к скважине, так и в процессе бурения одной скважины. [96, 122, 129] Для компенсации изменения в систему управления вводится нейронная сеть, которая оценивает состояние системы и изменяет коэффициенты передачи по каналам управления.

4.2. Цифровой контроллер с нейронной сетью

Схема цифрового контроллера с нейронной сетью приведена на рис. 4.2.

Контроллер подключается к объекту управления через интерфейс, на котором:

сигнал f_{3D} представляет собой трехфазное силовое напряжение с выбранной частотой, обеспечивающей вращение вала двигателя с одной из выбранных скоростей (750 об/мин, 1500 об/мин, 300 об/мин);

сигналы U_{f1} , U_{f2} , U_D представляют собой цифровые коды, пропорциональные скоростям изменения проходных сечений клапанов линейного двигателя и угловой скорости вращения двигателя постоянного тока вращателя;

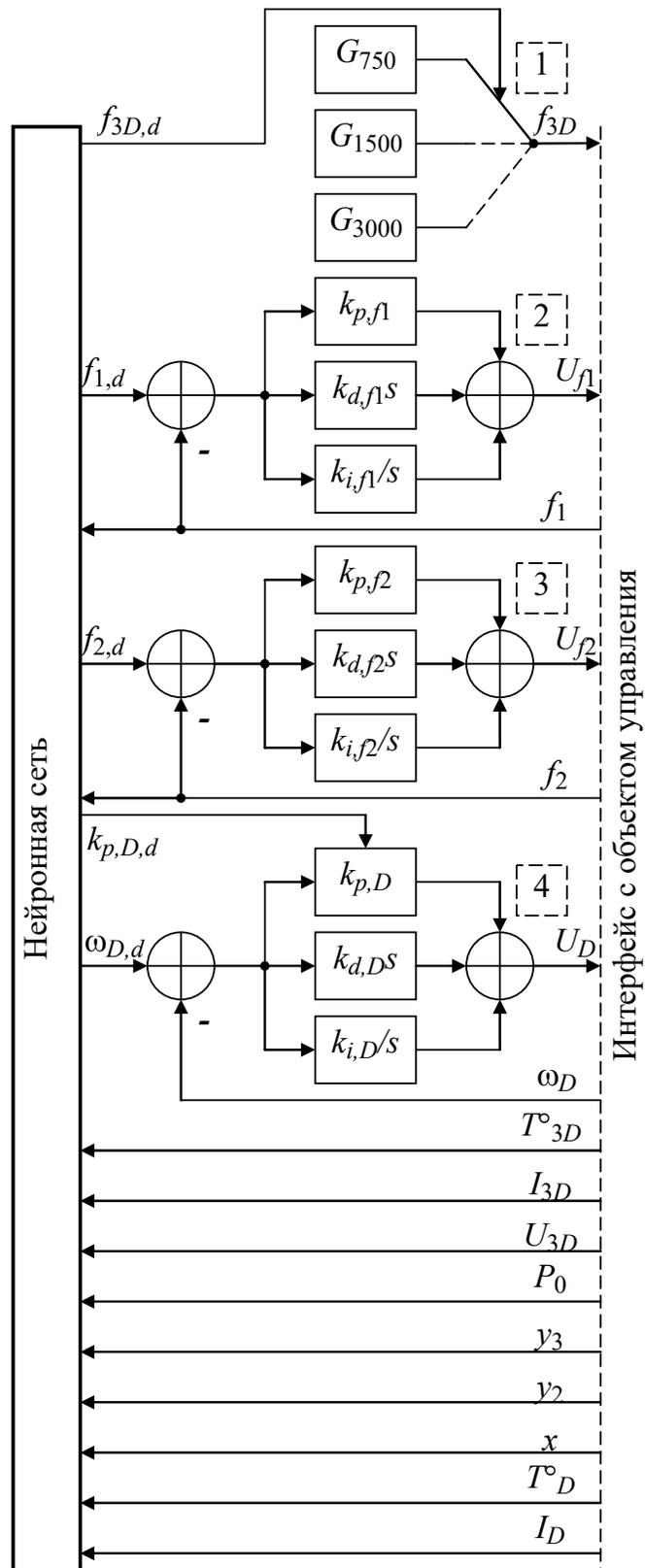


Рис. 4.2. Цифровой контроллер с нейронной сетью

сигналы угловой скорости ω_D , перемещения y_2 , изменения угла наклона y_3 , состояния клапанов f_1 и f_2 , величины тока I_D , температуры T_D° , положение штока x , контроля напряжения U_{3D} и тока I_{3D} , температуры T_{3D}° , давления P_0 представляют собой цифровые коды с разрядностью, обеспечивающей требуемую точность управления.

В регулятор входят:

контактор 1 переключения частот силового трехфазного напряжения;

ПИД-регулятор 2 управления состоянием первого клапана f_1 линейного гидропривода;

ПИД-регулятор 3 управления состоянием второго клапана f_2 линейного гидропривода;

ПИД-регулятор 4 управления скоростью вращения ω_D вала привода постоянного тока вращателя;

нейронная сеть.

На выходе нейронной сети формируются сигналы:

$f_{f3D,d}$ - выбора частоты трехфазного силового питающего напряжения;

$f_{1,d}$ - желаемого значения проходного сечения первого регулируемого клапана линейного гидропривода;

$f_{2,d}$ - желаемого значения проходного сечения второго регулируемого клапана линейного гидропривода;

$k_{p,D,d}$ - желаемого значения коэффициента передачи канала П ПИД регулятора угловой скорости вращения вала двигателя постоянного тока;

$\omega_{D,d}$ - желаемого значения угловой скорости вращения вала двигателя постоянного тока.

Обозначим сигналы $f_{f3D,d}$, $f_{1,d}$, $f_{2,d}$, $k_{p,D,d}$, $\omega_{D,d}$, генерируемые нейронной сетью, через $B = [\beta_1, \dots, \beta_5]$, а сигналы ω_D , y_2 , y_3 , f_1 , f_2 , I_D , T_D° , x , U_{3D} , I_{3D} , T_{3D}° , P_0 , измеряемые сенсорной подсистемой бурового агрегата,

через $\alpha_1, \dots, \alpha_{12}$. Все пространство параметров $A = [\alpha_1, \dots, \alpha_{12}]$ разобьем на V областей $\sigma_1, \dots, \sigma_v, \dots, \sigma_V$, каждой из которых соответствует набор значений параметров $B_v = [\beta_{v,1}, \dots, \beta_{v,6}]$, обеспечивающих оптимальный режим бурения (рис. 4.3).

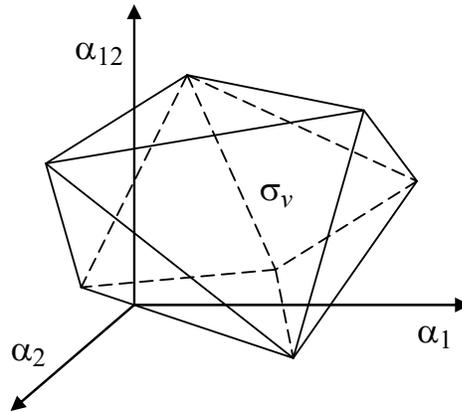


Рис. 4.3. Пространство параметров

В случае, если границы области определяется линейной формой, то факт попадания вектора параметров внутрь области σ_v определяется системой линейных неравенств:

$$\sum_{i=1}^{12} \gamma_{j,i} \alpha_i </> 0, \quad (4.1)$$

где $\gamma_{j,i}$ - коэффициенты линейной формы, определяющей границу области; $</>$ - знак больше, или меньше; j - номер границы; $1 \leq j \leq J$; J - количество гиперплоскостей ограничивающих область σ_v .

Обучение нейронной сети сводится к определению коэффициентов $\gamma_{j,i}$ линейной формы, которое предлагается проводить по комплексу математических динамических моделей функционирования СБШ-250МН-32Т при различных условиях эксплуатации. Для обеспечения безаварийных режимов функционирования все пространство параметров должно быть разделено на области, для которых должны быть выбраны свои, оптимальные режимы эксплуатации.

В частности, для того, чтобы избежать гидроудара и кавитации в гидравлической трансмиссии, ход рабочего органа линейного гидропривода может быть разделен на диапазоны, для каждого из которых может быть выбрана своя оптимальная скорость позиционирования.

4.3. Нейронная сеть управления буровым агрегатом

Для эффективной работы бурового агрегата используем нейронную сеть для настройки оборудования.

Параметры объекта, на основании которых происходит настройка регулятора: $\omega_D, y_2, y_3, f_1, f_2, I_D, T_D^\circ, x, U_{3D}, I_{3D}, T_{3D}^\circ, P_0$.

Изменение каждого параметра системы позволяет получить один из вариантов настройки системы управления. Нейронная сеть обучается единожды и данные сохранены в настройках. Тип нейронной сети представлен на рис. 4.4.

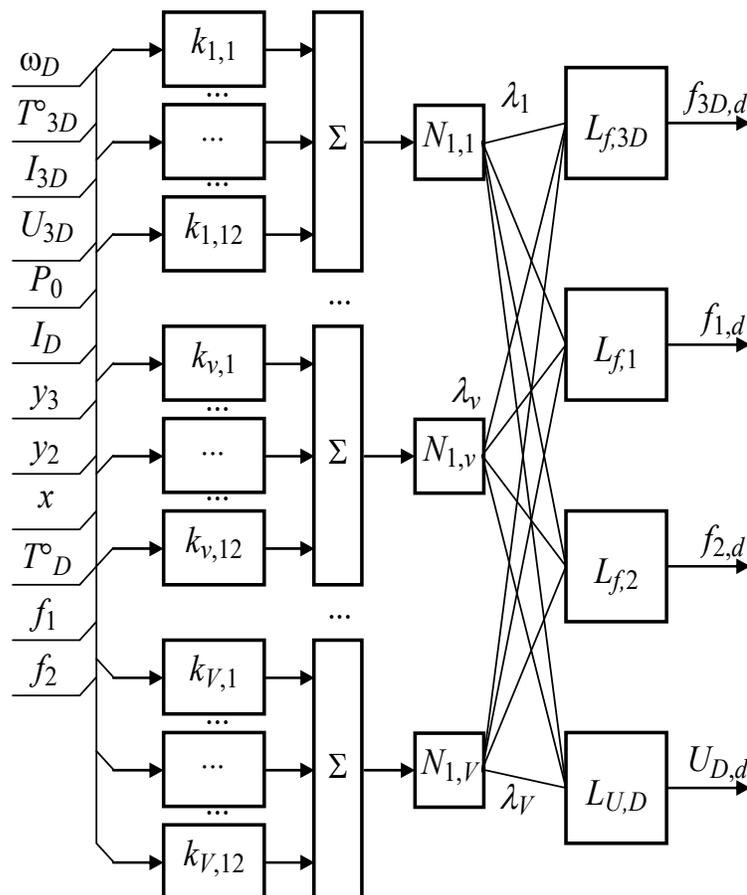


Рис. 4.4. Система управления буровым агрегатом нейронным регулятором.

В нейронной сети параметры представлены в дизъюнктивной нормальной форме, определяющей политоп.

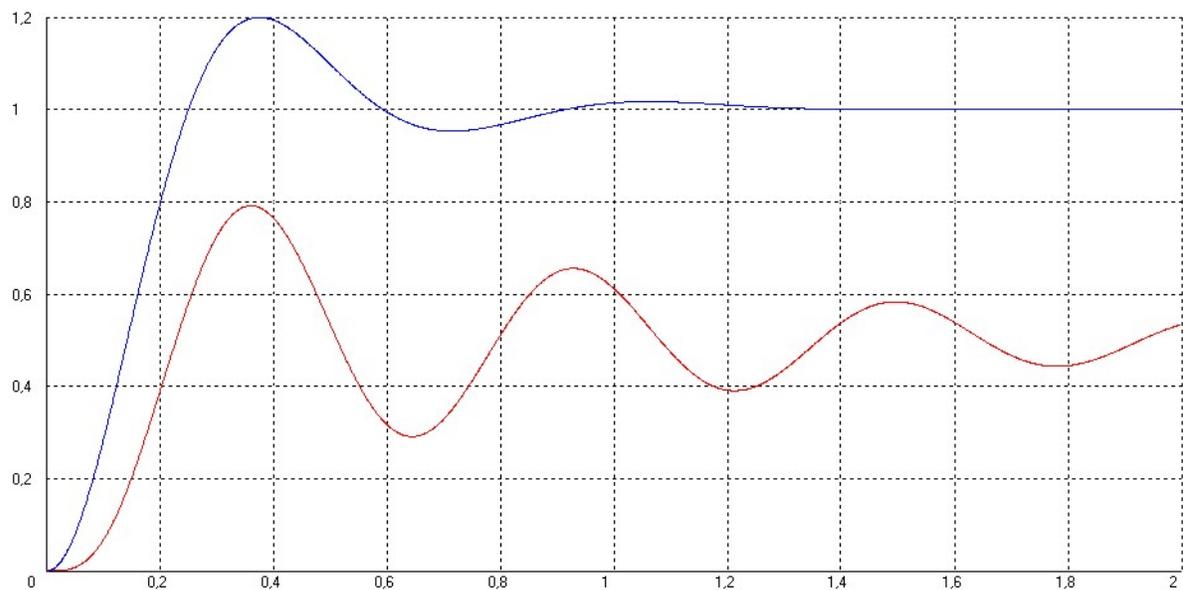
$$\begin{aligned}\xi_{3D} &= \bigvee_i [\zeta_{f3D}(\lambda_1, i) \wedge \dots \wedge \zeta_{f3D}(\lambda_v, i) \wedge \dots \wedge \zeta_{f3D}(\lambda_V, i)] \\ \xi_{f1} &= \bigvee_i [\zeta_{f1}(\lambda_1, i) \wedge \dots \wedge \zeta_{f1}(\lambda_v, i) \wedge \dots \wedge \zeta_{f1}(\lambda_V, i)] \\ \xi_{f2} &= \bigvee_i [\zeta_{f2}(\lambda_1, i) \wedge \dots \wedge \zeta_{f2}(\lambda_v, i) \wedge \dots \wedge \zeta_{f2}(\lambda_V, i)] \\ \xi_U &= \bigvee_i [\zeta_U(\lambda_1, i) \wedge \dots \wedge \zeta_U(\lambda_v, i) \wedge \dots \wedge \zeta_U(\lambda_V, i)]\end{aligned}\quad (4.2)$$

где $\zeta_{\dots}(\lambda_v) = \begin{cases} 0, & \text{если рассматривается область над } v\text{-й плоскостью;} \\ 1, & \text{если рассматривается область под } v\text{-й плоскостью} \end{cases}$

Параметры выбираются из соответствующей области, лежащей внутри политопа.

4.4. Экспериментальное исследование предложенных методик управления

Рассмотрим имитационную модель работы системы полиспаг-бур и бур (рис. 4.5)



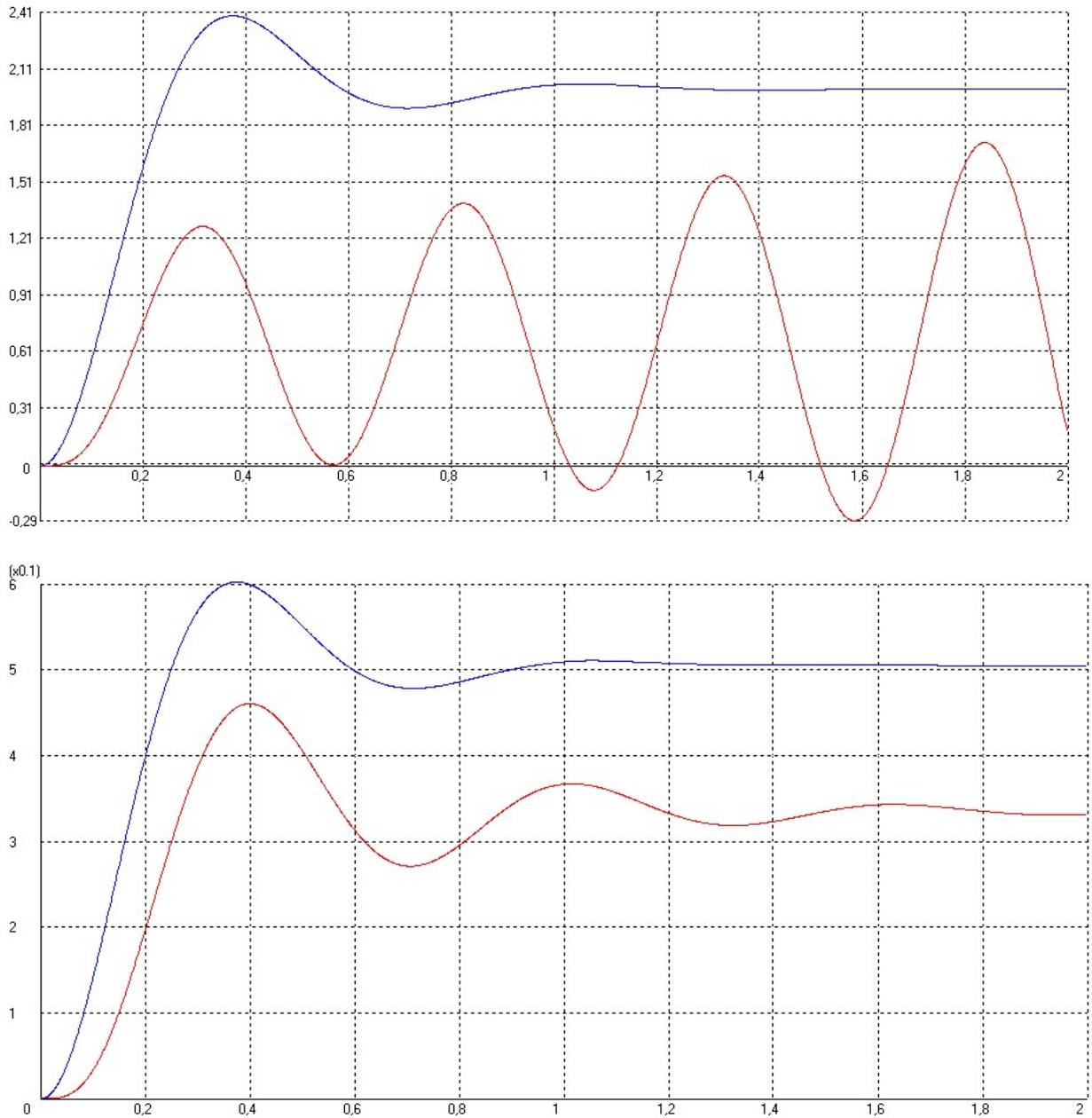


Рис. 4.5. Система полиспа-бур и бур коэффициент передачи полиспа-ста $k=1$, коэффициент передачи бура: а) $k=1$; б) $k=2$; в) $k=0,5$

Из графиков видно, что при увеличении коэффициента передачи бура система становится не устойчивой и для эффективной работы бурового агрегата необходимо менять настройки системы управления.

На графиках (рис.4.6 - рис.4.14): синий – работа бура, красный - работа полиспа-ста с буром при различных временных задержках.

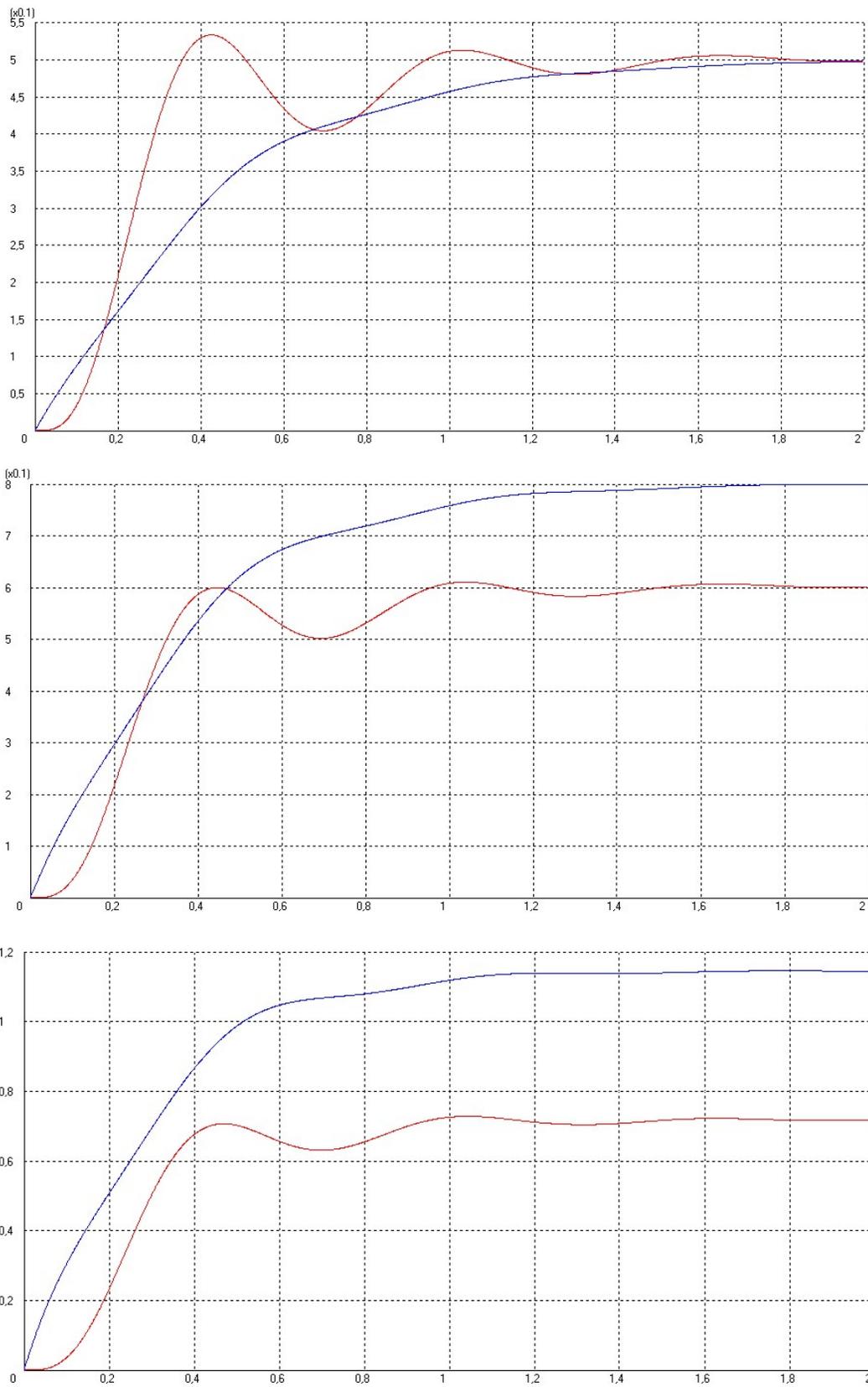


Рис. 4.6. Система обратная связь, время задержки $t=0$ коэффициент передачи полиспада $k=0,5$, коэффициент передачи бура: а) $k=0,5$; б) $k=1$; в) $k=2$

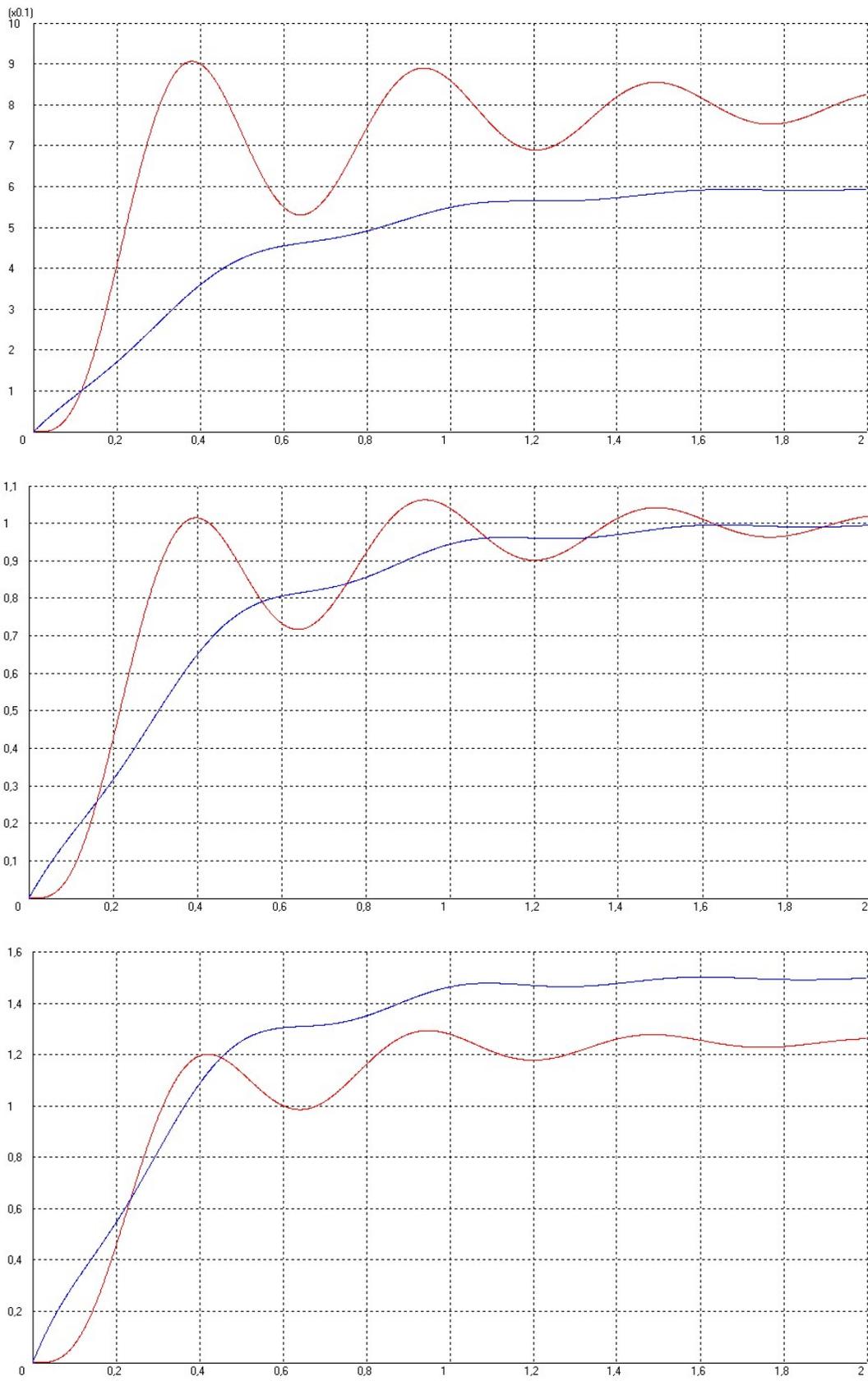


Рис. 4.7. Система обратная связь, время задержки $t=0$ коэффициент передачи полиспаста $k=1$, коэффициент передачи бура: а) $k=0,5$; б) $k=1$; в) $k=2$

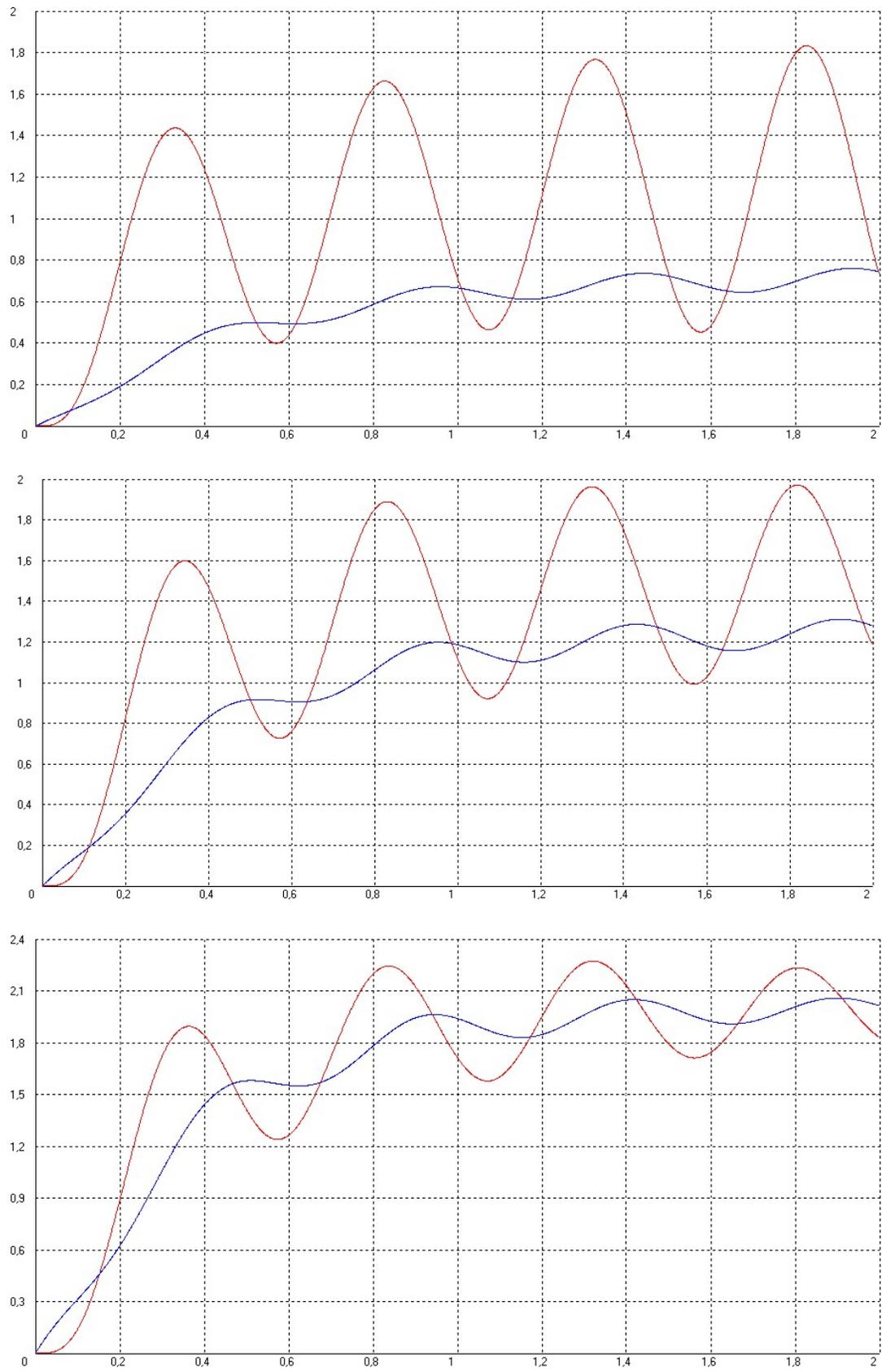


Рис. 4.8. Система обратная связь, время задержки $t=0$ коэффициент передачи полиспаста $k=2$, коэффициент передачи бура: а) $k=0,5$; б) $k=1$; в) $k=2$

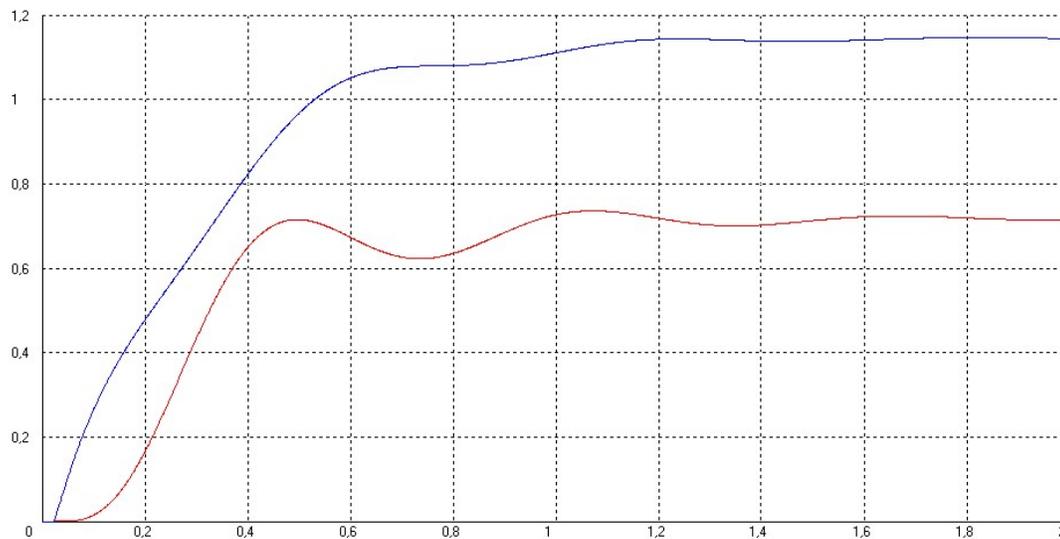
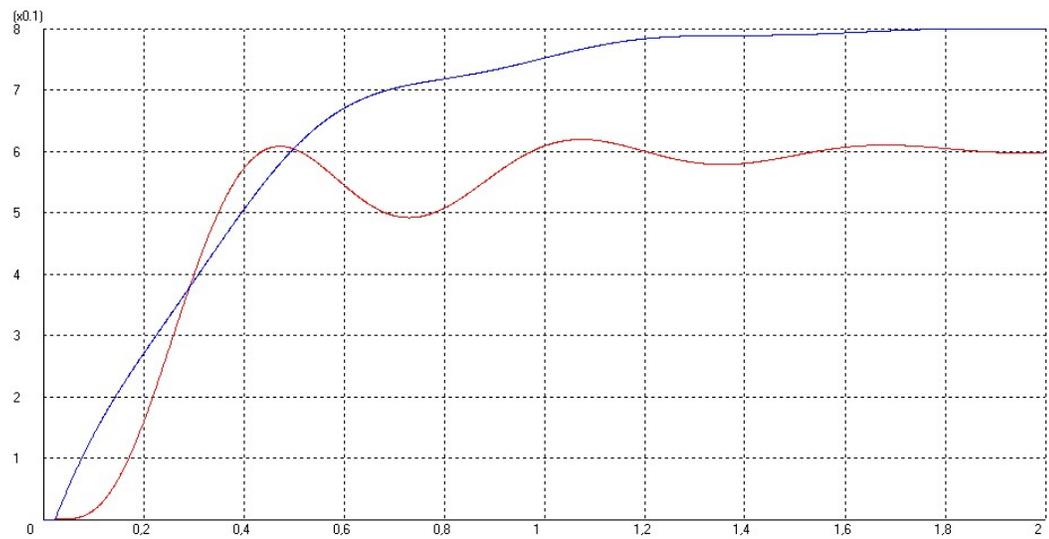
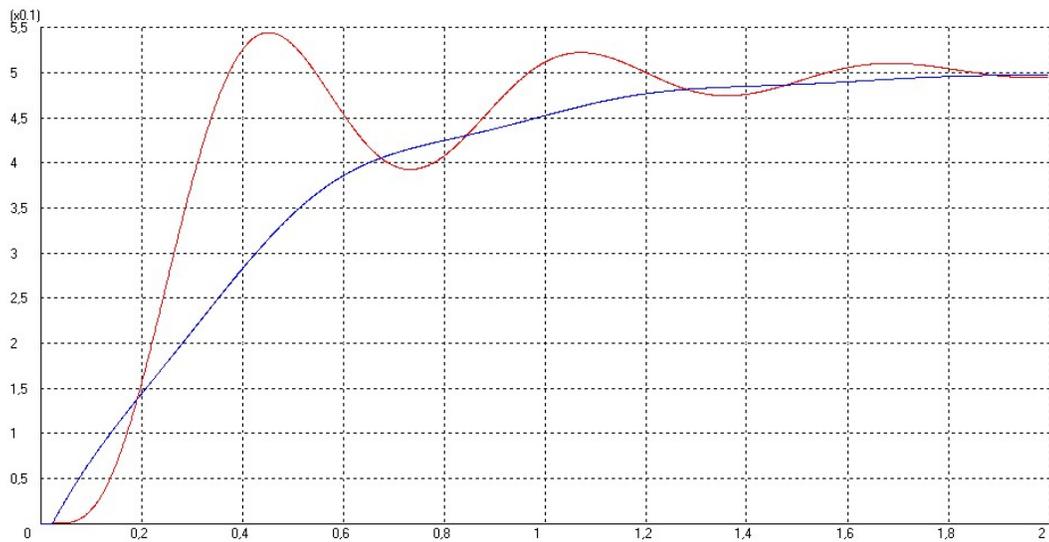


Рис. 4.9. Система обратная связь, время задержки $t=0,025$ коэффициент передачи полиспада $k=0,5$, коэффициент передачи бура: а) $k=0,5$; б) $k=1$; в) $k=2$

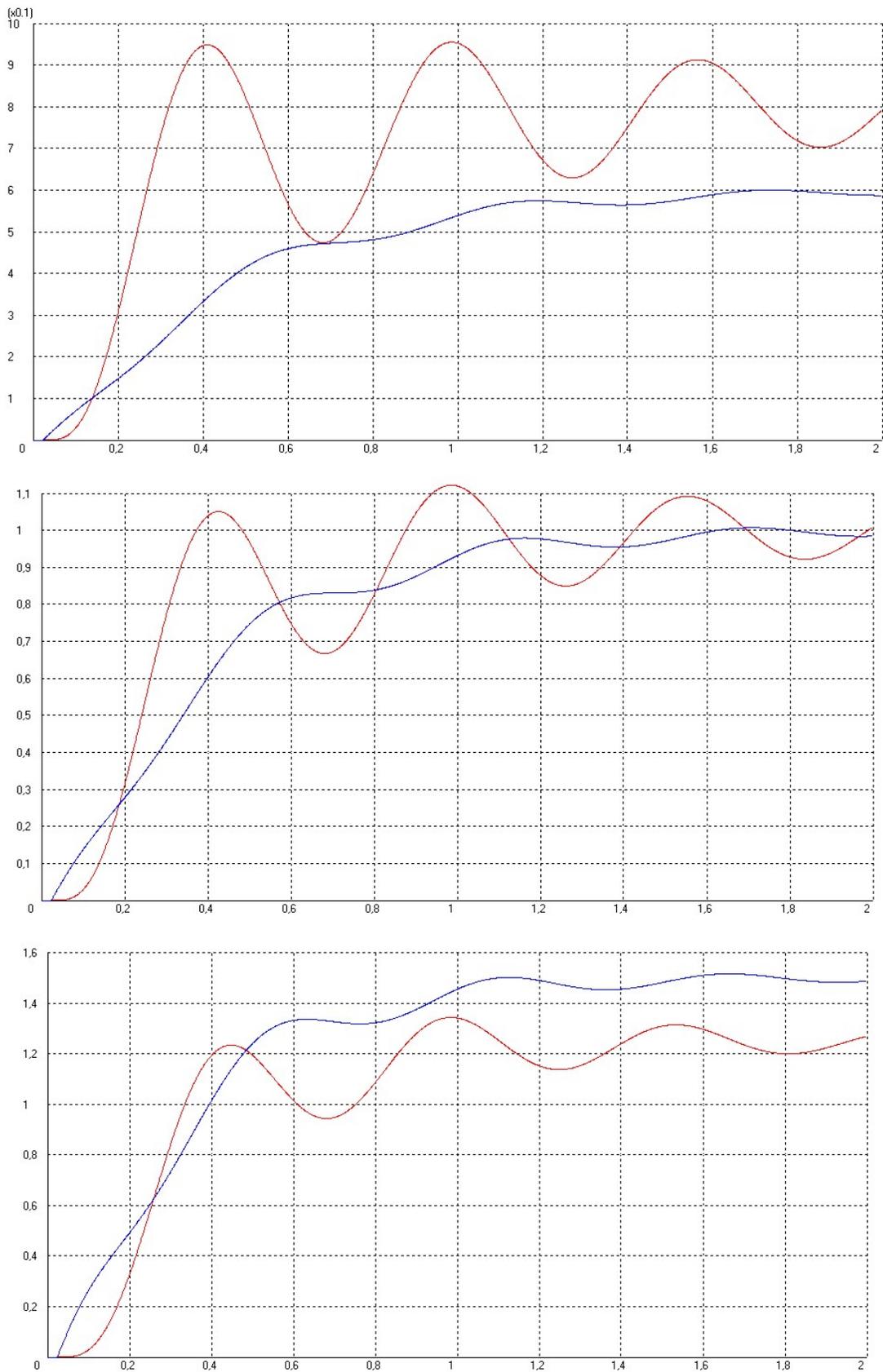


Рис. 4.10. Система обратная связь, время задержки $t=0,025$ коэффициент передачи полиспаста $k=1$, коэффициент передачи бура: а) $k=0,5$; б) $k=1$; в) $k=2$

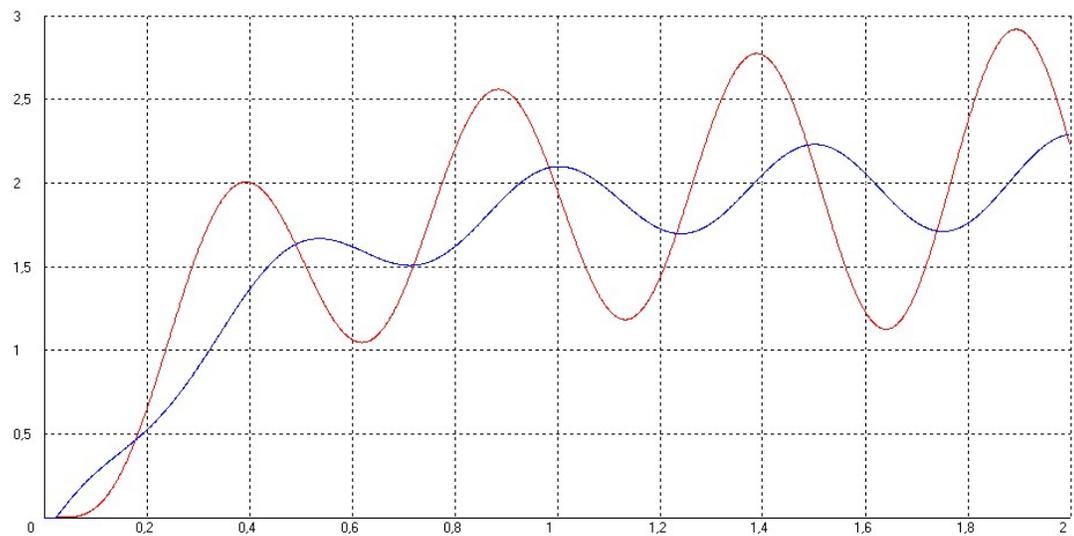
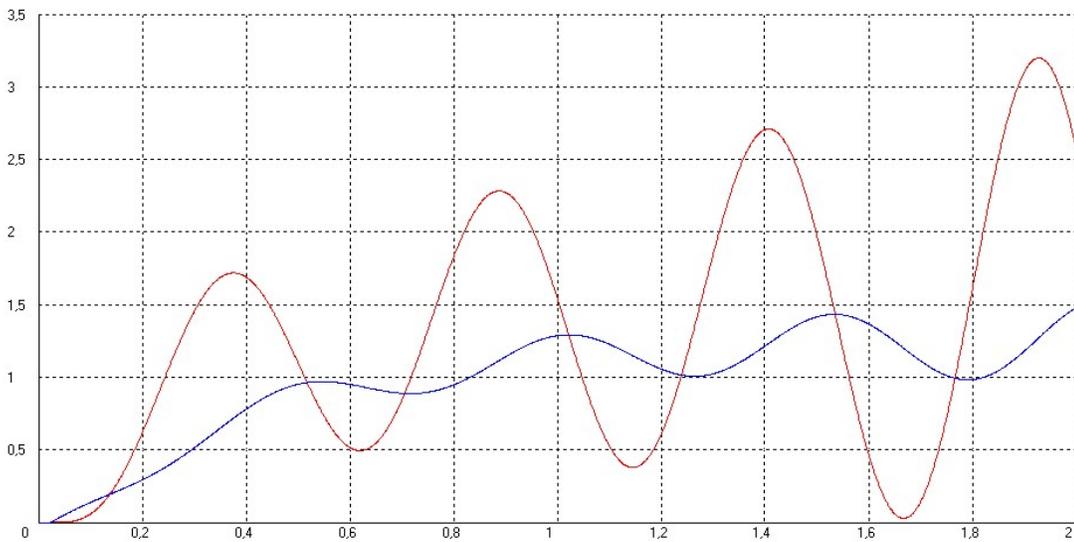
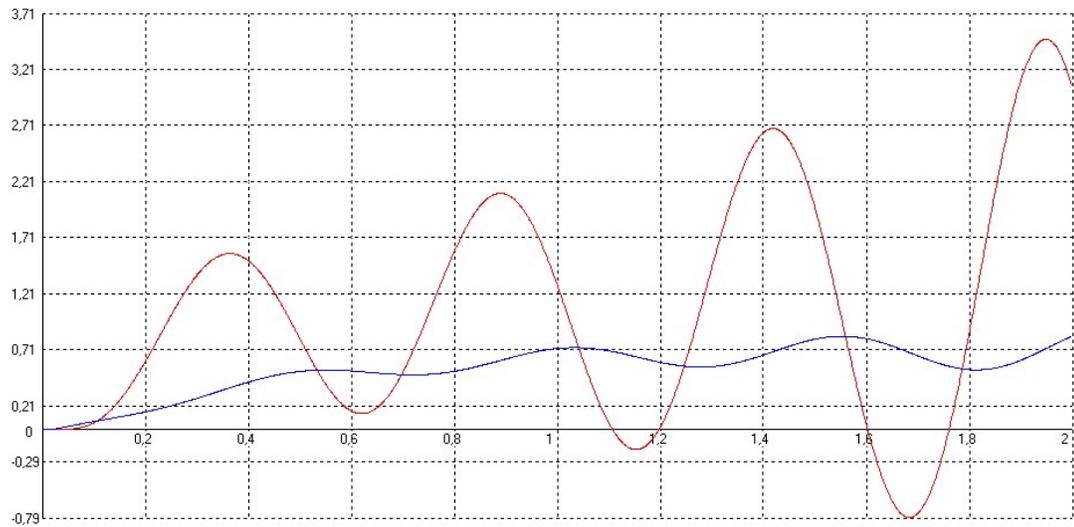


Рис. 4.11. Система обратная связь, время задержки $t=0,025$ коэффициент передачи полиспаста $k=2$, коэффициент передачи бура: а) $k=0,5$; б) $k=1$; в) $k=2$

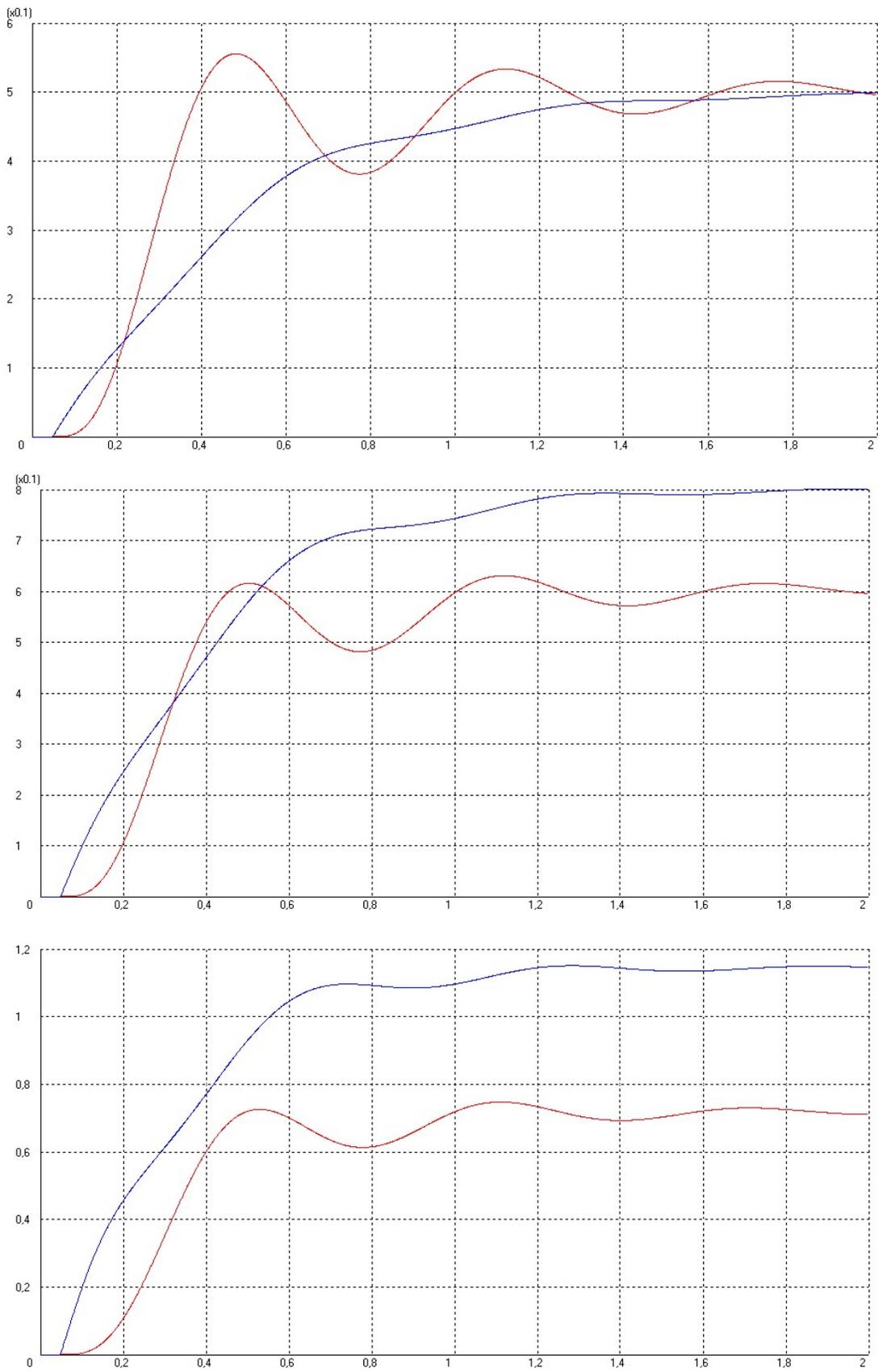


Рис. 4.12. Система обратная связь, время задержки $t=0,05$ коэффициент передачи полиспаста $k=0,5$, коэффициент передачи бура: а) $k=0,5$; б) $k=1$; в) $k=2$

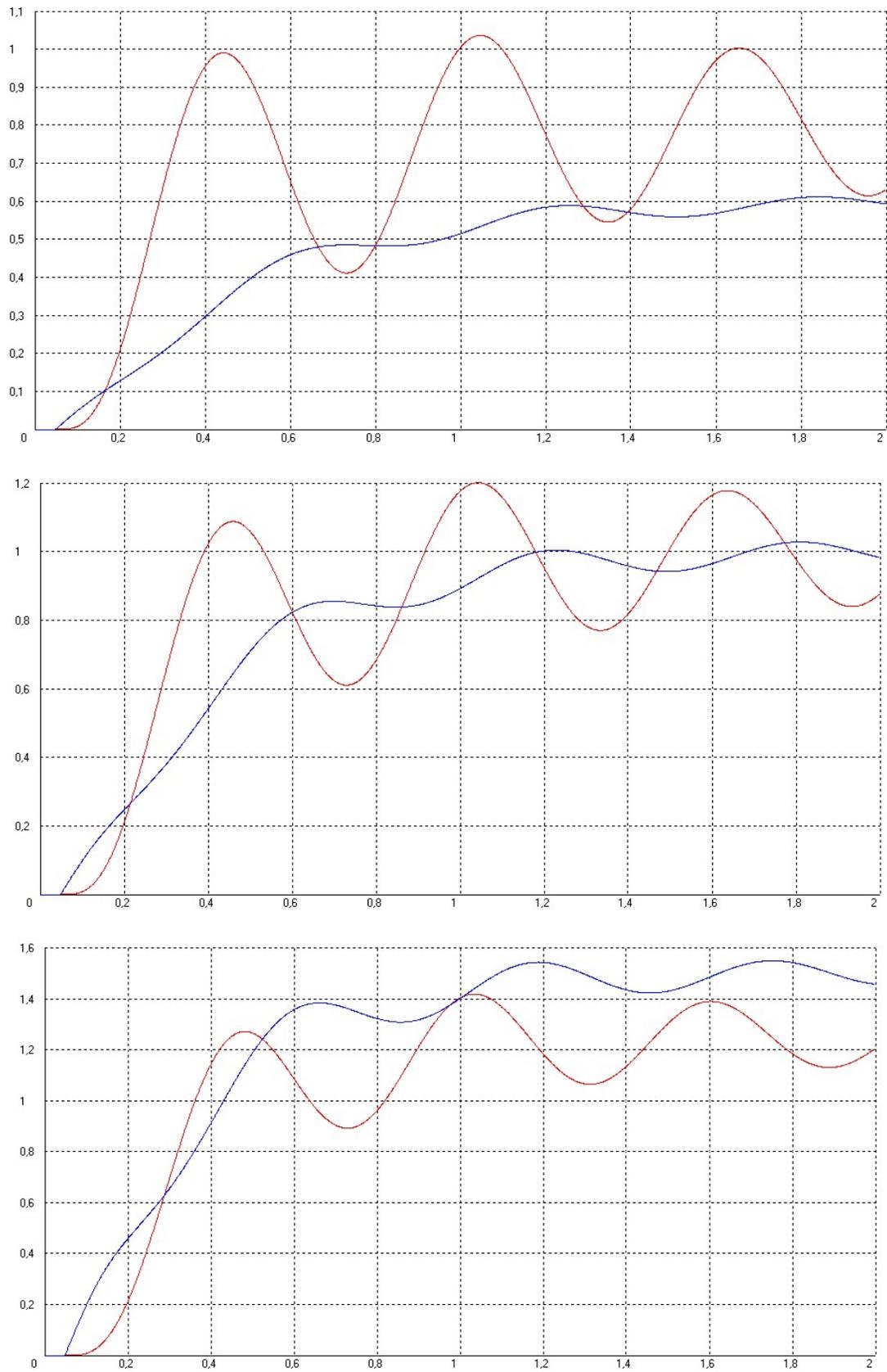


Рис. 4.13. Система обратная связь, время задержки $t=0,05$ коэффициент передачи полиспада $k=1$, коэффициент передачи бура: а) $k=0,5$; б) $k=1$; в) $k=2$

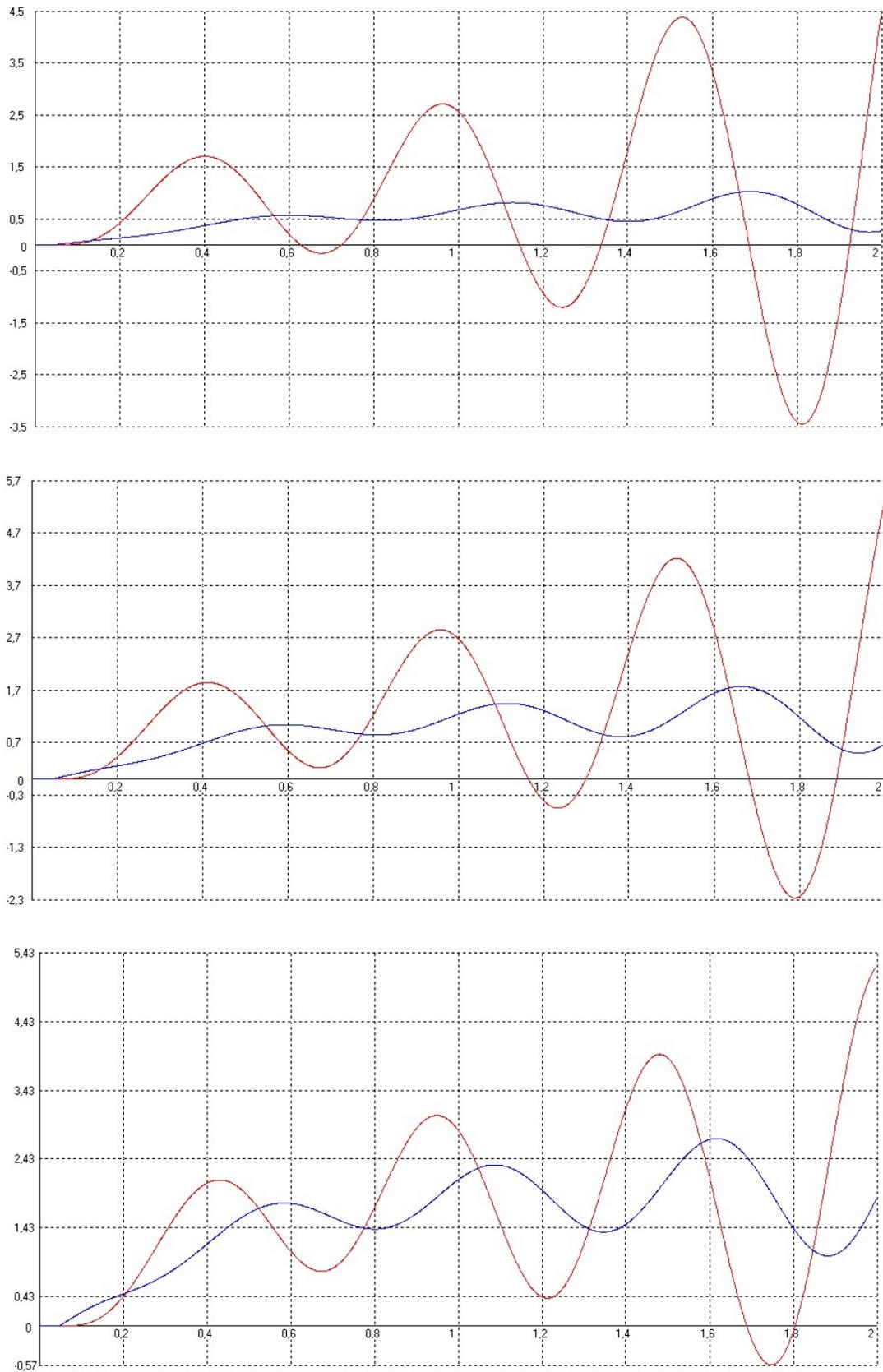


Рис. 4.14. Система обратная связь, время задержки $t=0,05$ коэффициент передачи полиспада $k=2$, коэффициент передачи бура: а) $k=0,5$; б) $k=1$; в) $k=2$

Если грунт достаточно вязкий, то обратная связь может стать положительной. (рис. 4.15 -4. 17)

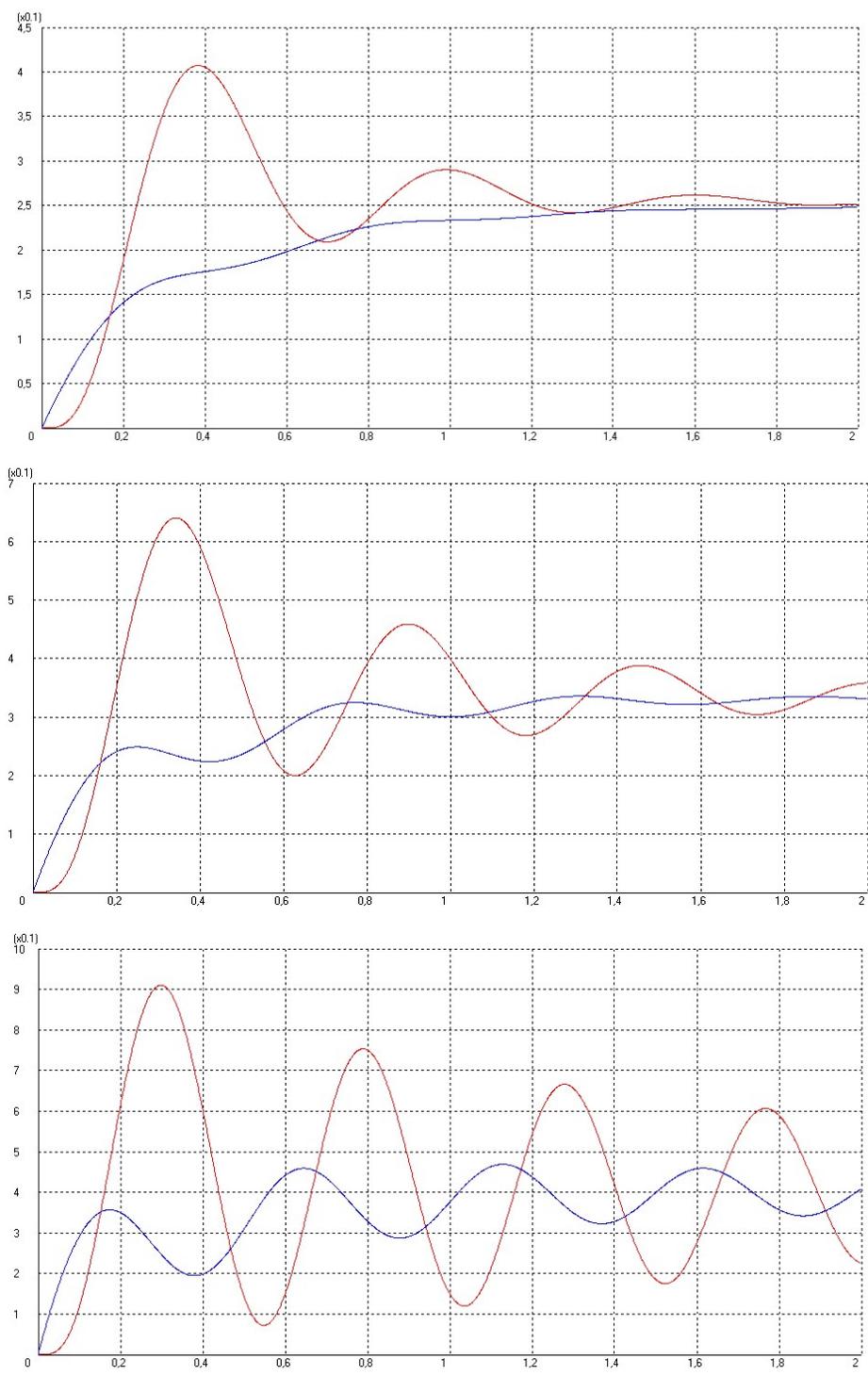


Рис. 4.15. Система обратная связь (положительная), время задержки $t=0$ с:
 а) коэффициент передачи полиспада $k=0,5$, коэффициент передачи бура $k=0,5$;
 б) коэффициент передачи полиспада $k=1$, коэффициент передачи бура $k=1$;
 в) коэффициент передачи полиспада $k=2$, коэффициент передачи бура $k=2$.

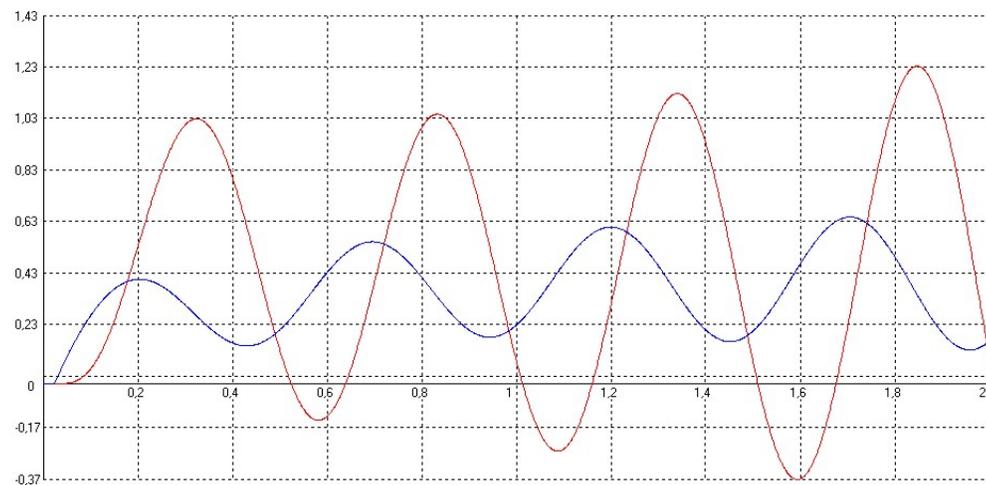
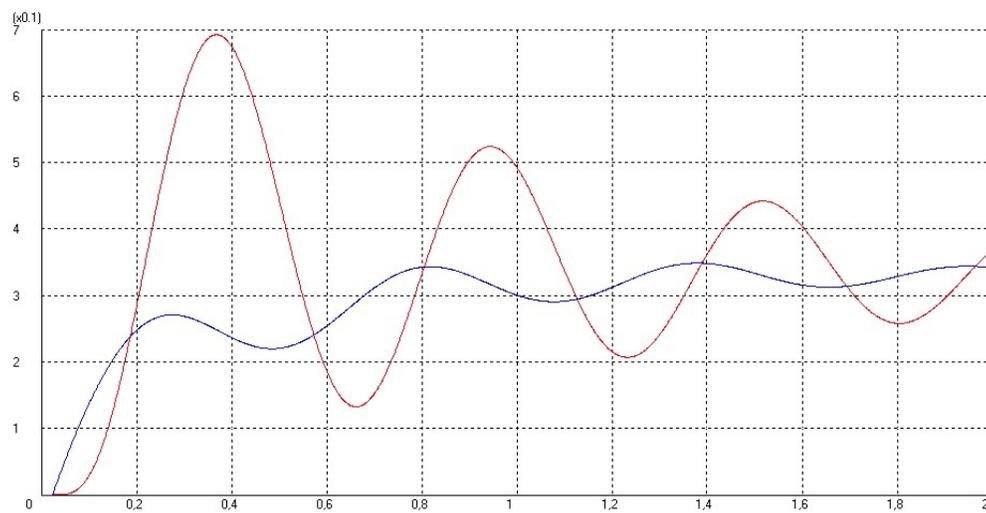
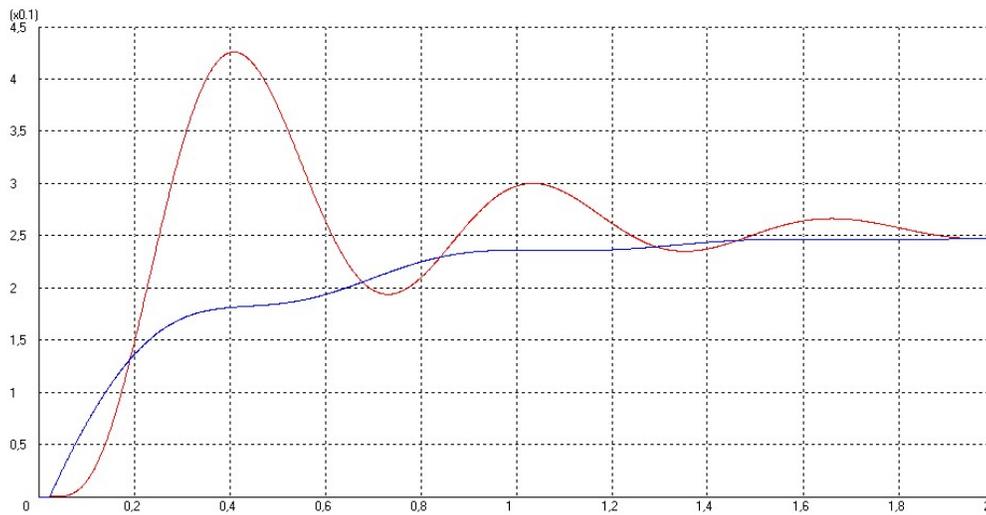


Рис. 4.16. Система обратная связь (положительная), время задержки $t=0,025$ с:
 а) коэффициент передачи полиспаста $k=0,5$, коэффициент передачи бура $k=0,5$;
 б) коэффициент передачи полиспаста $k=1$, коэффициент передачи бура $k=1$;
 в) коэффициент передачи полиспаста $k=2$, коэффициент передачи бура $k=2$.

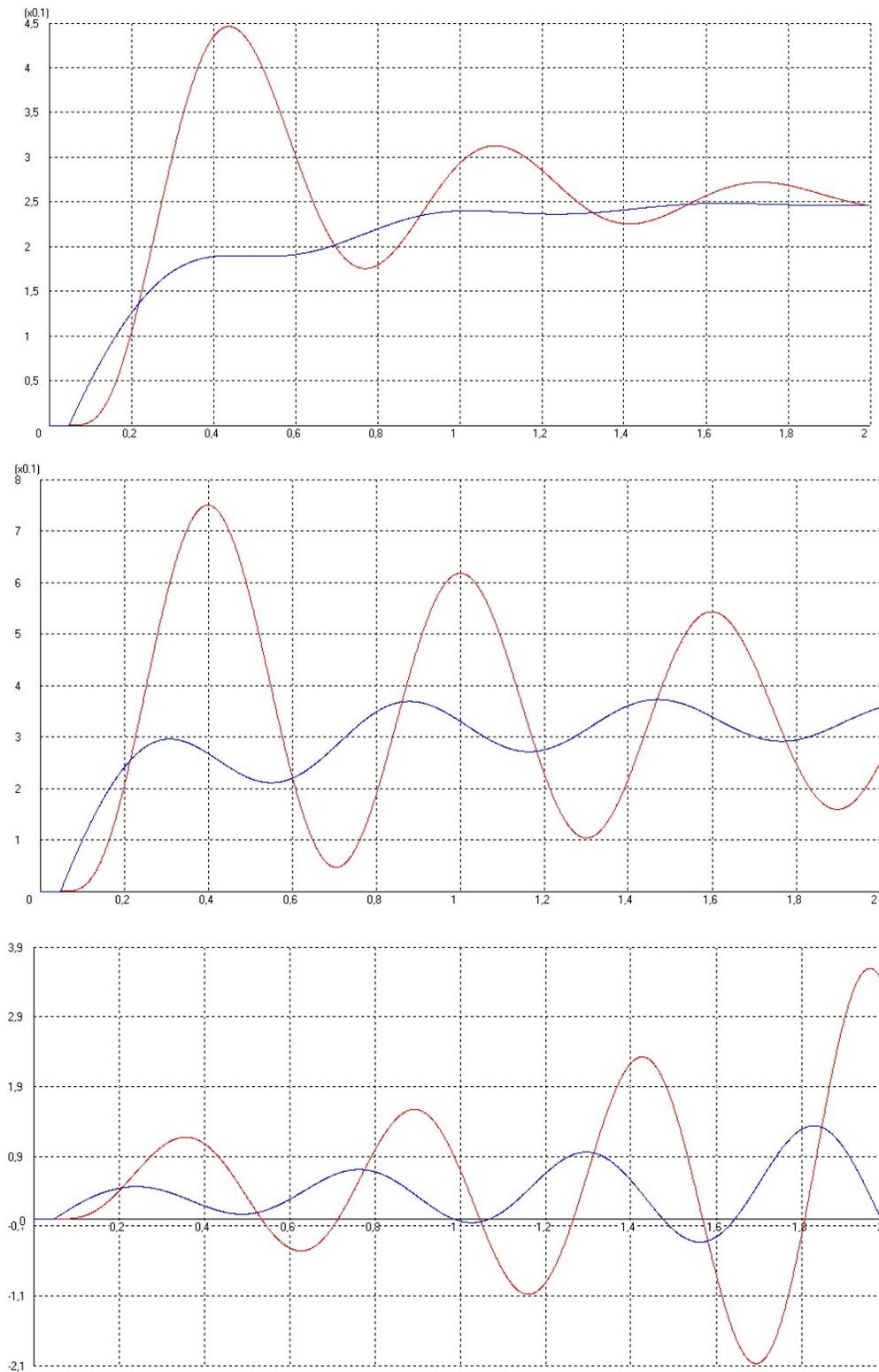


Рис. 4.17. Система обратная связь (положительная), время задержки $t=0,05$ с:
 а) коэффициент передачи полиспада $k=0,5$, коэффициент передачи бура $k=0,5$;
 б) коэффициент передачи полиспада $k=1$, коэффициент передачи бура $k=1$;
 в) коэффициент передачи полиспада $k=2$, коэффициент передачи бура $k=2$.

Из графиков видно, что чем меньше угловая скорость бура, тем меньше сопротивление, а значит тем больше скорость проходки, уменьшение скорости проходки приводит к увеличению угловой скорости бура. Наибольшие колебания возникают за счет включения в систему насоса и линейного электродвигателя, так как они несут запаздывание по фазе и происходят колебания системы. Включение обратной связи через трехфазный двигатель, насос и линейный двигатель приводит к потере устойчивости. Компенсировать ее можно при управлении насосом. Возникают дополнительные сдвиги, система становится неустойчивой и падает в два раза коэффициент передачи. Попытка повысить коэффициент передачи системы через коэффициент передачи по контуру приводит систему к неустойчивости. Таким образом, нейросетевой регулятор позволяет настраивать оперативно режимы устойчивого бурения.

4.5. Выводы

1. Разработана структурная схема регулятора цифрового контроллера с элементами искусственного интеллекта, которая позволит производить обработку значительных объемов информации по достаточно сложным алгоритмам и реализовать оптимальные режимы бурения. Для компенсации изменения в систему управления вводится нейронная сеть, которая оценивает состояние системы и изменяет коэффициенты передачи по каналам управления.

2. Представлен цифровой контроллер с нейронной сетью. Обучение нейронной сети сводится к определению коэффициентов линейной формы, которое предлагается проводить по комплексу математических динамических моделей функционирования СБШ-250МН-32Т при различных условиях эксплуатации.

3. Разработана нейронная сеть управления буровым агрегатом. Проведена ее настройка.

4. Проведена апробация предложенных методов на задачах практического проектирования системы управления буровым агрегатом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По проведенным исследованиям могут быть сделаны следующие выводы.

1. На основании обзора существующих и перспективных буровых агрегатов сделан вывод об общности их структуры и выполняемых функций, что, в свою очередь, позволило сформулировать общую задачу проектирования систем управления буровых агрегатов.

2. Разработана обобщенная функциональная схема бурового агрегата и показано, что указанный тип технических средств включает трехфазный электродвигатель, гидромотор, гидравлический насос, линейный гидропривод, полиспасть, ручную систему управления, а также рабочее место человека-оператора.

3. Рассмотрено устройство исполнительного органа бурового агрегата. Показано, что для эффективного управления процессом бурения необходимо разработать систему управления буровым агрегатом.

4. Представлены уровни иерархии системы управления буровым агрегатом. Сделан вывод о целесообразности замены верхнего уровня (стратегический) на нейронную сеть.

5. Рассмотрены варианты построения системы управления буровым агрегатом и сделан вывод о необходимости использования ПИД регуляторов с нейросетевой настройкой для повышения эффективности процесса бурения.

6. Разработана кинематическая схема полиспастной системы бурового агрегата, на основании которой, составлена линейная система дифференциальных уравнений четырнадцатого порядка.

7. Из системы дифференциальных уравнений получена линейная алгебраическая система, описывающая буровой агрегат в частотной области.

8. Предложена модель гидравлической трансмиссии, в которую входят трехфазный асинхронный привод с частотным управлением, гидронасос и линейный двухсторонний гидропривод.

9. Разработана математическая модель узла вращения, включающего управляемый двигатель постоянного тока, редуктор (посмотреть по схеме из 1 раздела).

10. Разработана упрощенная модель бурения при работе линейного гидропривода.

11. Разработана система управления буровым агрегатом СБШ-250МН-32Т на основе структуры гидравлической трансмиссии, структуры полиспаста, как вязкоупругого передаточного звена и структуры взаимодействия бура и грунта.

12. Доказана устойчивость системы без учета задержек по времени. Для оценки устойчивости использовался критерий Рауса-Гурвица.

13. Доказана устойчивость системы с задержками по времени. Поскольку время задержки на принятие решения при цифровом управлении оказывает существенное влияние на устойчивость системы, при разработке программного обеспечения необходимо использовать методы оценки временных интервалов, затрачиваемых на обработку данных.

14. Разработан метод оценки времени задержки на принятие решения при цифровом управлении.

15. Разработана структурная схема регулятора цифрового контроллера с элементами искусственного интеллекта, которая позволит производить обработку значительных объемов информации по достаточно сложным алгоритмам и реализовать оптимальные режимы бурения. Для компенсации изменения в систему управления вводится нейронная сеть, которая оценивает состояние системы и изменяет коэффициенты передачи по каналам управления.

16. Представлен цифровой контроллер с нейронной сетью. Обучение нейронной сети сводится к определению коэффициентов линейной формы, которое предлагается проводить по комплексу математических динамических моделей функционирования СБШ-250МН-32Т при различных условиях эксплуатации.

17. Разработана нейронная сеть управления буровым агрегатом. Проведена ее настройка.

18. Проведена апробация предложенных методов на задачах практического проектирования системы управления буровым агрегатом.

19. Дальнейшее развитие работы найдет применение в горной промышленности, в частности, в Институте горной науки и технологии (г. Ханой, Социалистическая республика Вьетнам) при разработке системы управления буровых агрегатов и системы управления приводов горного оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акименко Т.А., Ларкин Е.В., Фам Т.Л. Модель гидравлической трансмиссии// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 54-59.
2. Акименко Т.А., Фам Т.Л. Модель процесса бурения установки СБШ-250МН-32Т// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. № 11. С. 100-102.
3. Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Грабовский Г.Г., Рюмшин Н.А. Нейронные сети в системах автоматизации. – К.: Техника, 1999 – 234 с.
4. Барон Л.И. Коэффициенты крепости горных пород. М.: Изд-во «Наука», 1972, – 176 с.
5. Белов М. П., Новиков В. А. Оптимизация интегрированных электроприводных систем механизмов, агрегатов, машин и комплексов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. – 300 с.
6. Беляков Ю.И. Проектирование экскаваторных работ. - М.: Недра, 1983. – 349 с.
7. Бенджио, Йошуа и др. Жадное послойное обучение глубоких сетей// Достижения в области нейронных систем обработки информации 19 (2007): 153.
8. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления: линейные системы. Нелинейные системы. Импульс. системы. Цифровые и адаптив. системы. Критерии устойчивости. Случайные процессы / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. - 4-е изд., перераб. и доп. - СПб.: Профессия, 2004 (ГП Техн. кн.). – 747 с.
9. Бидрин Д.И. Промысловые исследования влияния дифференциального давления на механическую скорость проходки / Д.И.Бидрин, Е.И.Бенит // Бурение.1969. № 7. С.41-52.
10. Брумхед, Дэвид С. и Дэвид Лоу. Радиальные базисные функции, функциональная интерполяция со многими переменными и адаптивные сети. №

РСРЭ-МЕМО-4148. Королевская сигнализация и радарная установка Малверн (Великобритания), 1988.

11. Бураков, М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учебное пособие. Нейронные сети и нейроконтроллеры / М.В. Бураков. – СПб.: ГУАП, 2013. – 282 с.

12. Бурлар, Эрве и Ив Камп. «Автоассоциация с помощью многослойных перцептронов и разложение по сингулярным значениям»// Биологическая кибернетика 59.4-5 (1988): С. 291-294.

13. Буровые станки на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет: Учебное пособие / В.С. Квагинидзе, Г. И. Козовой, Ф. А. Чакветадзе, Ю. А. Антонов. – Москва : Горная книга, 2012. – 291 с.

14. Ван Вин, Ф. и Лейнен, С. (2019). Нейросетевой зоопарк. Получено с <https://www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo>.

15. Винсент, Паскаль и др. «Извлечение и составление надежных функций с помощью автоэнкодеров с шумоподавлением»// Материалы 25-й международной конференции по машинному обучению. АСМ, 2008. doi:10.1145/1390156.1390294

16. Галиев А. Л., Галиева Р. Г. Элементы и устройства автоматизированных систем управления: Учеб. пособие. – Стерлитамак: Стерлитамак. гос. пед. акад., 2008. – 220 с.

17. Горные машины и оборудование карьеров. Станок буровой шарошечный: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. В.В. Габов, Ю.В. Лыков, Д.А. Задков, В.С. Романова. СПб, 2020. – 35 с.

18. Гостев В. И. Системы управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – К.: Тэхника, 1990. – 280 с. ISBN 5-335-00369-3

19. Грей Д.Р. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей): Пер. с англ. / Д.Р.Грей, С.Г.Дарли. М.: Недра, 1985. – 509 с.

20. Гудфеллоу Ян и др. Генераторно-состязательные сети// Достижения в области нейронных систем обработки информации (2014). doi.org/10.48550/arXiv.1406.2661
21. Демченко И.И. Горные машины карьеров / Демченко И.И., Плотников И.С. – Краснояр.: СФУ, 2015. – 252 с.
22. Денисенко В.В. Заземление в системах промышленной автоматизации // Современные технологии автоматизации. 2006. № 2. С. 94-99.
23. Денисенко В.В., Халявко А.Н. Защита от помех датчиков и соединительных проводов систем промышленной автоматизации // Современные технологии автоматизации. 2001. № 1. С. 68-75.
24. Долгий И.Е. Сопротивление горных пород разрушению при бурении скважин / И.Е. Долгий, Н.И. Николаев // Записки Горного института. 2016. Т.221. С.655-660. DOI 10.18454/PMI.2016.5.655
25. Евсиков, А.А. Автоматизированный электропривод с частотным управлением: учебное пособие / А.А. Евсиков, В. А. Коковин, А. П. Леонов. – Дубна : Гос. ун-т «Дубна», 2020. – 121 с.
26. Заединов Р.В., Зенкевич С.Л. Нейросетевое управление манипулятором на основе предсказания состояния внешней среды /Заединов Р. В., Зенкевич С. Л. // Интегральный робот: сб. ст. / ред. Харламов А. А. – М., 2006. - (Нейрокомпьютеры и их применение; кн. 20). – С. 67-76.
27. Зайцев Г. Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп.– К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 431 с.
28. Зейлер, Мэтью Д. и др. «Деконволюционные сети». Компьютерное зрение и распознавание образов (CVPR), конференция IEEE 2010 г. IEEE, 2010.
29. Зенкевич С. Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: учебник для вузов / Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. - 478 с:
30. Зенкевич С.Л. Решение обратной задачи о скорости методами теории оптимального управления // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. - 2005. - № 2. - С. 21-32.

31. Иванов–Смоленский А.В. Электрические машины. Т. 1. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 652 с.
32. Интеллектуальные системы автоматического управления: Профессиональное управление / ред. И.М. Макаров, В.М. Лохин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 575 с.
33. Ишбаев Г.Г. Теория подбора фракционного состава кольматанта / Г.Г.Ишбаев, М.Р.Дальмиев // Бурение и нефть. 2011. № 5. С.34-39.
34. Кангин В. В., Козлов В.Н. Аппаратные и программные средства систем управления. Промышленные сети и контроллеры: учебное пособие / В. В. Кангин, В. Н. Козлов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 418 с.
35. Каргин С.А. Анализ потерь электроэнергии при работе группы насосов, оснащенных регулируемым приводом // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 3. С. 12 – 18.
36. Кингма, Дидерик П. и Макс Веллинг. «Автокодирование вариационного Байеса». Препринт arXiv arXiv:1312.6114 (2013).
37. Козаченко В. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам// Chip News: Инженерная микроэлектроника. 1999. № 1. С. 29.
38. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин.- М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
39. Коршунов А.И. Математическая модель асинхронного трехфазного двигателя с фазным ротором, не использующая понятия вращающегося магнитного поля // Силовая электроника. № 2019'6. с. 12 - 19. www.power-e.ru.
40. Кулкарни, Теджас Д. и др. Глубокая сверточная обратная графическая сеть// Достижения в области нейронных систем обработки информации. 2015.
41. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

42. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом: Учебник для вузов. – 3-е изд., стер. (ВЗРЫВНОЕ ДЕЛО) / Б.Н. Кутузов. - Москва : Горная книга (МГГУ), 2018. – 476 с.

43. Ларкин Е.В., Акименко Т.А., Лиём Ф.Т. Математическая модель работы линейного привода двустороннего действия// В сборнике: Проблемы и перспективы развития автоматизации технологических процессов. Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения лауреата Государственной премии СССР, доктора технических наук, профессора Дмитриева Льва Борисовича. Сер. "Вестник Тульского государственного университета" Тула, 2023. С. 240-243.

44. Лезнов Б. С. Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. М.: Машиностроение, 2013. – 176 с.

45. ЛеКун, Янн и др. «Градиентное обучение, применяемое для распознавания документов»// Труды IEEE 86.11 (1998): 2278-2324.

46. Линейные оптимальные системы управления [Электронный ресурс] / Х. Квакернаак [и др.]. – М.: Мир, 1977. – 650 с.

47. Макаров Н.Н., Плыкина Е.В., Руднев С.А. Применение цифрового скользящего режима в следящем приводе// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 11. С. 262-268.

48. Макаров Н.Н., Семашкин В.Е. Методы исследования точности систем управления на множестве внешних воздействий// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 2. С. 173-176.

49. Марк'Аурелио Ранзато, Кристофер Поултни, Сумит Чопра и Янн ЛеКун. «Эффективное изучение разреженных представлений с помощью модели, основанной на энергии»// Труды НИПС. 2007.

50. Математические основы теории автоматического регулирования/ В.А. Иванов, В.С. Медведев, Б.К. Чемоданов, А.С. Ющенко. Под ред. Б.К. Чемоданова. - М.: Высшая школа, 1977. - Т. 1: 367 с., Т. 2: 416 с.

51. Милых В.И., Майстренко А.М. Математическая модель трехфазного асинхронного двигателя для исследовательского виртуального стенда и ее практическая реализация // Электротехніка і Електромеханіка. 2009. - № 5 - С. 28 - 32.
52. Милых В.И., Полякова Н.В. Определение электромагнитных параметров электрических машин на основе численных расчетов магнитных полей // Электротехніка і електромеханіка. - 2006. - № 2. - С. 40 - 46.
53. Мурфи Д. Факторы, влияющие на скорость бурения // Бурение. 1969. № 12. С.18-35.
54. Новиков В.А., Савва С.В., Татаринцев Н.И. Электропривод в современных технологиях. М.: Академия, 2014. – 400 с.
55. Обухов Д., Стенин С., Струнин Д., Фрадкин А. Модуль управления электроприводом на микроконтроллере PIC16C62 и драйвере IR2131// Chip-News. - 1999. -№6.
56. Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г. Обеспечение живучести электродвигателей переменного тока: Монография. –Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 187 с.
57. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения: пер. с англ. – М.: ИПРЖР, 2000 – 272 с.
58. Омельченко Е.Я. Математическая модель асинхронного электродвигателя с фазным ротором // Электротехника. - 2007. -№ 11. - С. 19-24.
59. Омельченко Е.Я. Математическая модель трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Энергетика». Вып. 15, 2011. С. 49 - 53.
60. Орлов Ю.М. Объемные гидравлические машины. Конструкция, проектирование, расчет. М.: Машиностроение, 2006. – 222 с.
61. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров: Учеб. для вузов. – 6-изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГГУ, 2007. – 680 с.

62. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 304 с.

63. Попов Е. П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие.– 2-е изд., стер.– М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.–256 с.

64. Прокопов А.А., Кахоров Р.А., Новиков В.А., Белов М.П. Математические модели электроприводных систем насосных агрегатов и станций // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. - № 10. - С. 44 - 54.

65. Протодьяконов М. М. Крепость горных пород с точки зрения горного искусства// Труды съезда деятелей по горному делу, металлургии и машиностроению. Екатеринослав, 1911.

66. Протодьяконов М. М. О крепости горных пород с точки зрения горного искусства// Горнозаводское дело, 1911, № 52.

67. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления:Учебник.М.:Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана,2001–744с.

68. Решетняк С.П. Перспективы развития основного технологического оборудования для открытых горных работ// В кн.: Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых и освоения подземного пространства северо-запада России, ч. 2. Апатиты, изд. Кольского научного центра РАН, 2001, С. 5-25.

69. Розенблатт, Фрэнк. «Персептрон: вероятностная модель хранения и организации информации в мозге». Психологический обзор 65.6 (1958): 386 с.

70. Ружников А.Г. Удельная механическая энергия как критерий подбора оптимальных параметров режимов бурения // Электр. научный журнал «Нефтегазовое дело». 2014. № 5. С.1-13.

71. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М.: Горячая линия - Телеком, 2008. – 383 с.

72. Сабур Сара, Фрост Николас и Хинтон Г.Е. Динамическая маршрутизация между капсулами// В «Достижениях в области нейронных систем обработки информации» (2017): 3856-3866.

73. Сербин Ю. В., Прокопов А. А., Бугров В. П. Параллельная работа насосных агрегатов при использовании технологии частотного регулирования // Информ. бюллетень инж. центра «Арт». 2007. № 2. С. 57–65.

74. Системы управления технологическими процессами и информационные технологии: учебное пособие для вузов/ В.В. Троценко, В.К. Федоров, А.И. Забудский, В.В. Комендантов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2023. – 136 с.

75. Смоленский П. Обработка информации в динамических системах: Основы теории гармонии. № КУ-КС-321-86// Университет Колорадо на отделении компьютерных наук Боулдера, 1986.

76. Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьеров // В.А. Фокин, Г.Е. Тарасов, М.Б. Тогунов, А.А. Данилкин, Ю.А. Шитов. - Апатиты, изд. Кольского научного центра, 2008. – 226 с.

77. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2007. – 272 с.

78. Солодухин М.А. Справочник техника-геолога по инженерно-геологическим и гидро-геологическим работам/ М.А.Солодухин, И.В.Архангельский. М.: Недра, 1981. – 282 с.

79. Справочник «Открытые горные работы». М., изд. «Горное бюро», 1994 – 591 с.

80. Теория управления (дополнительные главы): Учебное пособие / Б.Р. Андриевский [и др.]; ред. Д.А. Новикова. – М.: ЛЕНАНД, 2019. – 552 с.

81. Терехов В.А. Нейросетевые системы управления: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Упр. и информатика в техн. 131 системах» и направлению «Автоматизация и упр.» / В.А. Терехов, Д.В. Ефимов, И.Ю. Тюкин. – М: Высш. шк, 2002. – 182 с.

82. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов. - М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
83. Фалдин Н.В. Оптимальное по быстродействию управление линейным объектом// Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 1981. № 2. С. 1351.
84. Фалдин Н.В., Феофилов С.В. Исследование периодических движений в релейных системах, содержащих звенья с ограничителями// Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2007. № 2. С.15-27.
85. Фалдин Н.В., Феофилов С.В. Прикладные методы синтеза оптимальных по точности и быстродействию релейных следящих приводов// Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 10. С. 38-44.
86. Фам Т.Л. Исследование информационно-измерительной и управляющей системы проходческого комбайна// Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 9.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 46-52.
87. Фам Т.Л. Лопастные насосы и гидромоторы// Приборы и управление: Сборник статей. Вып. 20/ Под общ. ред. Е.В.Ларкина. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 115-117.
88. Фам Т.Л. Модели гидроприводов// Приборы и управление: Сборник статей. Вып. 21/ Под общ. ред. Е.В.Ларкина. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 73-77.
89. Фам Т.Л. Обобщенная структурная схема тоннельного укладчика// Приборы и управление: Сборник статей. Вып. 21/ Под общ. ред. Е.В.Ларкина. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 80-85.
90. Фам Т.Л. Общая структура привода горного комбайна// Приборы и управление: Сборник статей. Вып. 20/ Под общ. ред. Е.В.Ларкина. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 112-115.
91. Фам Т.Л. Поршневые насосы и гидромоторы// Приборы и управление: Сборник статей. Вып. 20/ Под общ. ред. Е.В.Ларкина. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 117-122.

92. Фам Т.Л. Разработка системы автоматического управления скоростью вращения и подачи долота бурового станка СБШ-250МН-32Т// Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. С. 216-224.

93. Фам Т.Л. Системы автоматического управления горных машин// В сборнике: Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов и обработки изображений. Сборник материалов XVII Международной научно-технической конференции. Курск, 2023. С. 231-233.

94. Фам Т.Л. Структурные схемы компонентов силовой гидросистемы// Приборы и управление: Сборник статей. Вып. 21/ Под общ. ред. Е.В.Ларкина. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 77-80.

95. Фам Т.Л., Акименко Т.А. Буровые агрегаты// Приборы и управление: Сборник статей. Вып. 22/ Под общ. ред. Е.В.Ларкина. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. С. 83-89.

96. Феофилов С.В. Прикладные методы анализа и синтеза релейных автоколебательных систем с нелинейными объектами управления/ диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук/ Тульский государственный университет. Тула, 2009

97. Фокин М.С., Голодных Г.П. Математическая модель осевого насоса// Автоматика и программная инженерия. 2018, №1(23). С. 56 - 60.

98. Хамзаев А. А. Разработка наиболее эффективной схемы управления привода вращателя бурового станка СБШ-250 МН-32, в условиях карьера «Мурнтау»// А. А. Хамзаев, М. Э. Хайдарова. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 14 (118). – С. 195-199.

99. Хейс, Брайан. «Первые звенья цепи Маркова». American Scientist 101.2 (2013): 252 с..

100. Хинтон, Джеффри Э. и Терренс Дж. Сейновски. Обучение и переучивание на машинах Больцмана// Параллельная распределенная обработка: Исследования микроструктуры познания 1 (1986): С. 282-317.

101. Хопфилд, Джон Дж. Нейронные сети и физические системы с появляющимися коллективными вычислительными способностями// Труды Национальной академии наук 79.8 (1982): С. 2554-2558.
102. Хохрайтер Зепп и Юрген Шмидхубер. Долгая кратковременная память// Нейронные вычисления 9.8 (1997): С. 1735–1780.
103. Чернодуб, А.Н. Обзор методов нейроруправления/ А.Н. Чернодуб, Д.А. Дзюба // Проблемы программирования. – 2011. – № 2. – С. 79-94.
104. Чунг, Джунён и др. Эмпирическая оценка закрытых рекуррентных нейронных сетей при моделировании последовательностей// Препринт arXiv arXiv:1412.3555 (2014).
105. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты - Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
106. Шустер, Майк и Кулдип К. Паливал. Двухнаправленные рекуррентные нейронные сети// Транзакции IEEE по обработке сигналов 45.11 (1997): С. 2673-2681.
107. Щерба В.Е. Рабочие процессы компрессоров объемного действия. М.: Наука, 2009. - 319 с.
108. Щерба В.Е., Григорьев А.В., Виниченко В.С., Ульянов Д.А. Математическое моделирование рабочих процессов насоса объемного действия// Омский научный вестник. - 2010. - № 3 (93) - С. 77 - 91.
109. Щербина Ю.В. Технические средства автоматизации и управления: Учебное пособие; Моск. гос. ун-т печати. М.: МГУП, 2002. – 448 с.
110. Эйгелес Р.М. Разрушение горных пород при бурении. М.: Недра, 1971. 163 с.
111. Элман Джеффри Л. Обнаружение структуры во времени// Когнитивная наука 14.2 (1990): С. 179-211.
112. Юревич Е. И. Теория автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2016.– 560 с.: ил.

113. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society) , 2006. – 460 p.
114. Abrams A. Mud Design to Minimize Rock Impairment Due to Particle Invasion // Journal of petroleum technology. 1977. N 5713. Pp.7-12.
115. Ang K.H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. Vol. 13. No. 4. P. 559-576.
116. ANSI/API 131/ISO 10416 Recommended Practice for Laboratory Testing of Drilling Fluids / American petroleum institute. 2004. 137 p.
117. Bengio, Yoshua, et al. “Greedy layer-wise training of deep networks.” Advances in neural information processing systems 19 (2007): 153 p.
118. Bourlard, Hervé, and Yves Kamp. “Auto-association by multilayer perceptrons and singular value decomposition.” Biological cybernetics 59.4-5 (1988): Pp. 291-294.
119. Broomhead, David S., and David Lowe. Radial basis functions, multi-variable functional interpolation and adaptive networks. No. RSRE-MEMO-4148. ROYAL SIGNALS AND RADAR ESTABLISHMENT MALVERN (UNITED KINGDOM), 1988.
120. Celada B. The use of the special drilling energy for rock mass characterization and TBM drilling during tunnel construction / B.M.Celada, J.M.Galada, C.Vunoz // ITA – AITES World Tunnel Congress. Budapest. Hungary. 2009. P.9-12.
121. Chang W.D., Hwang R.C., Hsieh J.G. A multivariable on-line adaptive PID controller using auto-tuning neurons // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2003 – Vol. 16, Issue 1 – P. 57 – 63
122. Chung, Junyoung, et al. “Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling.” arXiv preprint arXiv:1412.3555 (2014).
123. D’Emilia G., Marrab A., Natalea E. Use of neural networks for quick and accurate autotuning of PID controller // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2007 – Vol. 23 – P. 170 – 179

124. Dukstra M.W. Drillstring Component Mass Imbalance: A. Major Source of Downhole Vibration / M.W.Dukstra, D.S-K.Chen, T.M.Warren // Journal of petroleum technology. 1995. N 29350. Pp.2-8.

125. Dunayevskye V.A. Dynamic Stability of Drillstring / V.A.Dunayevskye, F.Abbassian, A.Judzis // Journal of petroleum technology SPE Drilling and Completion. 1993. N 14329. Pp.5-9.

126. Elman, Jeffrey L. "Finding structure in time." Cognitive science 14.2 (1990): Pp. 179-211.

127. Fred E.B. Maximizing ROP With Real – Time Analysis of Digital Data and MSE / E.B.Fred, J.W.Witt, S.M.Remmert // International Petroleum Technology Conference. 2005. N 10607. Pp.8-14.

128. Goodfellow, Ian, et al. "Generative adversarial nets." Advances in Neural Information Processing Systems (2014).

129. Graves, Alex, et al. "Hybrid computing using a neural network with dynamic external memory." Nature 538 (2016): Pp. 471-476.

130. Graves, Alex, Greg Wayne, and Ivo Danihelka. "Neural turing machines." arXiv preprint arXiv:1410.5401 (2014).

131. Hayes, Brian. "First links in the Markov chain." American Scientist 101.2 (2013): 252.

132. He, Kaiming, et al. "Deep residual learning for image recognition." arXiv preprint arXiv:1512.03385 (2015).

133. Helio S. Consequences and Relevance of Drillstring Vibration on Wellbore Stability / S.Helio, R.Plasido, C.Wolter // Journal of petroleum technology. 1999. N 52820. P.3-7.

134. Hinton, Geoffrey E., and Terrence J. Sejnowski. "Learning and relearning in Boltzmann machines." Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition 1 (1986): Pp. 282-317.

135. Hochreiter, Sepp, and Jürgen Schmidhuber. "Long short-term memory." Neural computation 9.8 (1997): Pp. 1735-1780.

136. Hopfield, John J. "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities." *Proceedings of the national academy of sciences* 79.8 (1982): Pp. 2554-2558.
137. Huang, Guang-Bin, et al. "Extreme learning machine: Theory and applications." *Neurocomputing* 70.1-3 (2006): 489-501.
138. Ibrahim A.A. Drilling mechanics: Consequences and relevance of drill string vibration on wellbore stability / A.A.Ibrachim, T.A.Musa, A.M.Fadoul // *Journal of applied sciences*. 2004. N 4 (1). Pp.106-109.
139. Jaderberg, Max, et al. "Spatial Transformer Networks." In *Advances in neural information processing systems* (2015): 2017-2025.
140. Jaeger, Herbert, and Harald Haas. "Harnessing nonlinearity: Predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication." *science* 304.5667 (2004): Pp. 78-80.
141. Joao C.R. Drillstring Vibration and Wellbore Instability / C.R.Joao, R.H.Santos, Y.D.Galeano//*Journal of Energy Resources*. 2002. N 124 (4). P.217-222.
142. Kingma, Diederik P., and Max Welling. "Auto-encoding variational bayes." *arXiv preprint arXiv:1312.6114* (2013).
143. Kohonen, Teuvo. "Self-organized formation of topologically correct feature maps." *Biological cybernetics* 43.1 (1982): Pp. 59-69.
144. Kulkarni, Tejas D., et al. "Deep convolutional inverse graphics network." *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2015.
145. Larkin, E., Privalov, A., Bogomolov, A., Akimenko, T. Model of digital control system by complex multi-loop objects / VII International conference "Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures" (SPCECI2021)/AIP Conference Proceedings, 2023, 2700, 030009
146. Larkin, E.V., Akimenko, T.A., Bogomolov, A.V. The Swarm Hierarchical Control System// *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2023, 13968 LNCS, Pp. 30–39

147. LeCun, Yann, et al. "Gradient-based learning applied to document recognition." *Proceedings of the IEEE* 86.11 (1998): Pp. 2278-2324.

148. Leva A., Cox C., Ruano A. Hands-on PID autotuning: a guide to better utilisation. — IFAC Professional Brief. — <http://www.ifac-control.org>. — 84 p.

149. Li Y., Ang K.H, Chong G.C.Y. Patents, software, and hardware for PID control. An overview and analysis of the current art // *IEEE Control Systems Magazine*. Feb. 2006. P. 41-54.

150. Maass, Wolfgang, Thomas Natschläger, and Henry Markram. "Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations." *Neural computation* 14.11 (2002): 2531-2560.

151. Marc'Aurelio Ranzato, Christopher Poultney, Sumit Chopra, and Yann LeCun. "Efficient learning of sparse representations with an energy-based model." *Proceedings of NIPS*. 2007.

152. Nikolas D. New Permeability Plugging apparatus Procedure Addresses Safety and Technology / D.Nikolas, P.Mihalik, P.R.Lundie // *Journal of petroleum technology*. 1999. N 52815. P.14-16.

153. O'Dwyer A. PID compensation of time delayed processes 1998-2002: a survey // *Proceedings of the American Control Conference*, Denver, Colorado, 4-6 June 2003. P. 1494-1499.

154. Pessier R.S. Quantifying Common Drilling Problems with Mechanical Specific Energy and Bit – Specific Coefficient of Sliding Friction / R.S.Pessier, M.J.Fear // *Journal of petroleum technology*. 1992. N 245884. P.14-16.

155. Quevedo J., Escobet T. Digital control: past, present and future of PID control// *Proceedings of the IFAC Workshop*, Eds., Terrassa, Spain,5-7Apr. 2000.

156. Rosenblatt, Frank. "The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain." *Psychological review* 65.6 (1958): 386 p.

157. Sabour, Sara, Frosst, Nicholas, and Hinton, G. E. "Dynamic Routing Between Capsules." In *Advances in neural information processing systems* (2017): Pp. 3856-3866.

158. Saiful A., Omatu S. Neuromorphic self-tuning PID controller // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, San Francisco, USA, 1993 – Pp. 552 – 557
159. Schuster, Mike, and Kuldip K. Paliwal. “Bidirectional recurrent neural networks.” IEEE Transactions on Signal Processing 45.11 (1997): Pp. 2673-2681.
160. Smolensky, Paul. Information processing in dynamical systems: Foundations of harmony theory. No. CU-CS-321-86. COLORADO UNIV AT BOULDER DEPT OF COMPUTER SCIENCE, 1986.
161. Tan Y., De Keyser R. Auto-tuning PID control using neural predictor to compensate large time-delay // Proceedings of the Third IEEE Conference on Control Applications. – 1994 – Vol. 2 – P. 1429 – 1434
162. Teale R. The Concept of Special Energy in Rock Drilling // Intl. J. Rock Mech. Mining Ser. 1965. N 1. P.57-73.
163. Van Veen, F. & Leijnen, S. (2019). The Neural Network Zoo. Retrieved from <https://www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo>
164. Vincent, Pascal, et al. “Extracting and composing robust features with denoising autoencoders.” Proceedings of the 25th international conference on Machine learning. ACM, 2008.
165. Viskers S. New Methodology that Surpasses Current Bridging Theories to Efficiently Seal as Varied Pore Throat Distribution as Found in Natural Reservoir Formations / S.Viskers, M.Cowie, T.Jones // Wiertnictwo Nafta gas. 2006. Vol.23/1/. P.501-515.
166. Zeiler, Matthew D., et al. “Deconvolutional networks.” Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on. IEEE, 2010.
167. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers// Trans. ASME. 1942. Vol. 64. Pp. 759-768.
168. <https://almazgeobur.kz/catalog/bsa/rs-90d/> (дата обращения: 22.09.2023)
169. <https://gnb-locator.ru/product/ditch-witch-jt922/> (дата обращения: 22.09.2023)

170. <https://instrukciyaru.ru/rukovodstvo-po-ekspluataczii-burovogo-stanka-sbsh-250mna-32/> (дата обращения: 22.09.2023)

171. https://moto-pride.ru/motoblock_and_tractor/prohodceskij-kombajn-kp-21-p-110-ksp-32-61-1-gkps-ugolnyj-ocistnoj-ural-tehnicaskie-harakteristiki-dla-plastov-srednej-mosnosti-sahtnyj-dzozj-tipu-cena-otzyvy.html (дата обращения: 22.09.2023)

172. <https://netmechanics.ru/prohodcheskie-kombajny/> (дата обращения: 22.09.2023)

173. <https://rudgormash.ru/?mcat=1336> (дата обращения: 22.09.2023)

174. https://rudgormash.ru/load_files/345.PDF (дата обращения: 22.09.2023)

175. <https://rudgormashural.ru/produktsiya/burovye-oborudovanie/> (дата обращения: 22.09.2023)

176. https://sbsh-250.ru/sbsh250/performance_attributes (дата обращения: 22.09.2023)

177. <https://texno-sbt.com/> (дата обращения: 22.09.2023)

178. https://www.s-b-t.ru/burovye_ustanovki/legkaya_seriya/ubg_1_20_mangust/ (дата обращения: 22.09.2023)

179. <https://www.xcmghddrig.com/ru/xcmg-xz230e-hdd.html> (дата обращения: 22.09.2023)

180. <https://xn--80abmapmtniknh6al.xn--p1ai/> (дата обращения: 22.09.2023)



IMSAT

VINACOMIN-INSTITUTE OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

3 Phan Dinh Giot Str., Phuong Liet, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

Phone: 84.4.3864.5156/ 84.4.3864.2024 - Fax: 84.4.3864.1564

Email: bhtqt@hn.vnn.vn

Hà Nội, ngày 24 tháng 10 năm 2023

GIẤY XÁC NHẬN

về việc sử dụng kết quả nghiên cứu luận án Tiến sĩ của Phạm Thanh Liêm

Viện Khoa học Công nghệ Mỏ - Vinacomin xác nhận kết quả luận án Tiến sĩ của Phạm Thanh Liêm, thực hiện tại Khoa Công nghiệp Tự động hóa và Rôbốt, Trường Đại học Tổng hợp Tula (LB Nga) bao gồm các nội dung sau:

- Mô hình truyền động thủy lực, trong đó bao gồm bộ truyền động không đồng bộ ba pha có điều khiển bằng tần số, bơm thủy lực và bộ truyền động thủy lực hai chiều tuyến tính;
- Phương pháp mà dựa trên cơ sở của nó tiến hành việc hiệu chỉnh việc cài đặt các bộ điều chỉnh của các cụm và khối riêng biệt, từ đó cho phép thực hiện các phương pháp cài đặt hợp lý trong hệ thống điều khiển;
- Sơ đồ khối của bộ điều khiển kỹ thuật số với các phần tử trí tuệ nhân tạo, cho phép xử lý lượng thông tin đáng kể bằng các thuật toán khá phức tạp và thực hiện các chế độ khoan tối ưu.

Các kết quả nghiên cứu được thực hiện có giá trị khoa học, thực tế và được chấp nhận sử dụng tại Viện Khoa học Công nghệ Mỏ - Vinacomin khi tiến hành nghiên cứu thiết kế hệ thống điều khiển cho các bộ truyền động điện của các thiết bị mỏ.



Viện trưởng

Đào Hồng Quảng



IMSAT

VINACOMIN-INSTITUTE OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

3 Phan Dinh Giot Str., Phuong Liet, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

Phone: 84.4.3864.5156/ 84.4.3864.2024 - Fax: 84.4.3864.1564

Email: bhqt@hn.vnn.vn

г. Ханой, 24 октября 2023 г.

СПРАВКА

об использовании результатов исследования кандидатской диссертации Фам Тхань Лиет

Настоящая дана Институтом горной науки и технологии с подтверждением, что результаты кандидатской диссертации Фам Тхань Лиет, выполненной на кафедре Промышленной автоматике и робототехники (ПАиР) Тульского государственного университета (Россия) включают следующие содержания:

- модель гидравлической трансмиссии, в которую входят трехфазный асинхронный привод с частотным управлением, гидронасос и линейный двухсторонний гидропривод;
- метод, на основании которого производится коррекция настройки регуляторов отдельных узлов и блоков, что позволяет реализовывать рациональные методики настройки в системе управления;
- структурная схема регулятора цифрового контроллера с элементами искусственного интеллекта, которая позволит производить обработку значительных объемов информации по достаточно сложным алгоритмам и реализовать оптимальные режимы бурения.

Результаты диссертации имеют научное, практическое значение и будут использоваться в Институте горной науки и технологии при разработке в дальнейшем системы управления электрических приводов горного оборудования.

Директор

Dao Hong Quanг



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
Котов В. В.
« 28 » сентября 2023 г.

АКТ

использования научных результатов диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук в учебном процессе

Комиссия Тульского государственного университета в составе: председатель – канд. техн. наук, и.о. зав. кафедрой Ерзин О.А., члены – канд. техн. наук, доцент, доцент Пантюхина Е.В., канд. техн. наук, доцент Кузнецова Т.Р. рассмотрела материалы диссертации Фам Тхань Лиём на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Комиссия констатирует, что в учебном процессе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» используются следующие научные результаты кандидатской диссертации Фам Т.Л.:

в дисциплине «Проводы роботов и робототехнических систем» направления 15.03.06 Мехатроника и робототехника - модели гидравлической трансмиссии на основе аналитической модели функционирования насоса с учетом воздействия частотного управляющего фактора;

в дисциплине «Управление роботами и робототехническими системами» направления 15.03.06 Мехатроника и робототехника - цифровая система управления с учетом времени, затрачиваемого контроллером Фон Неймановского типа на обработку данных.

Председатель комиссии

О.А. Ерзин

Члены комиссии

Е.В. Пантюхина
Т. Р. Кузнецова