

На правах рукописи



ФАМ Тхань Лиен

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БУРОВЫМ АГРЕГАТОМ С НЕЙРОСЕТЕВЫМ
КАНАЛОМ НАСТРОЙКИ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула, 2024

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: АКИМЕНКО Татьяна Алексеевна,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: ПРИВАЛОВ Александр Николаевич,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Тульский государственный педагогический уни-
верситет им. Л. Н. Толстого», г. Тула, директор
ИПИТ

ПАНАРИН Михаил Владимирович,
кандидат технических наук, ООО «СервисСофт»,
г. Тула, директор

Ведущее предприятие: ООО «Скуратовский опытно-экспериментальный
завод», г. Тула

Защита состоится « 5 » июня 2024 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.417.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, Тула, пр. Ленина, д. 92, 12-105

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу 300012, Тула, пр. Ленина, д. 92 и на сайте: <https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-02/fam-tkhan-liem-24-2-417-02>

Автореферат разослан « 04 » апреля 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Соколова
Марина Юрьевна

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

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 установку 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. Таким образом, схема включения линейного гидропривода в гидравлическую трансмиссию не является рациональной.

Это 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 полученным результатом, будут настраиваться параметры блоков системы управления, обеспечивающие обратные связи управления отдельными узлами бурового агрегата.

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

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.

В соответствии с поставленной целью автором решены следующие задачи:

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, полиспафта 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.

Методы исследования. 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.

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 воздей-

ствия 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.

Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика:

4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

7. Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем.

9. Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов.

10. Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах.

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 использованы 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

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

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.

Публикации. 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.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 53 рисунка, 4 таблицы, список использованной литературы из 180 наименований и приложений. Объем основного текста диссертации 152 страницы.

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 (рис. 1), в которую входят: 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.

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. Это приводит к неоптимальным режимам бурения, например при различных типов грунта в процессе проходки одной и той же скважины. Вследствие естественной перекрестной связи, существующей на физическом уровне между каналами регулирования угловой скорости и величины подачи бура, возможна потеря устойчивости системы.

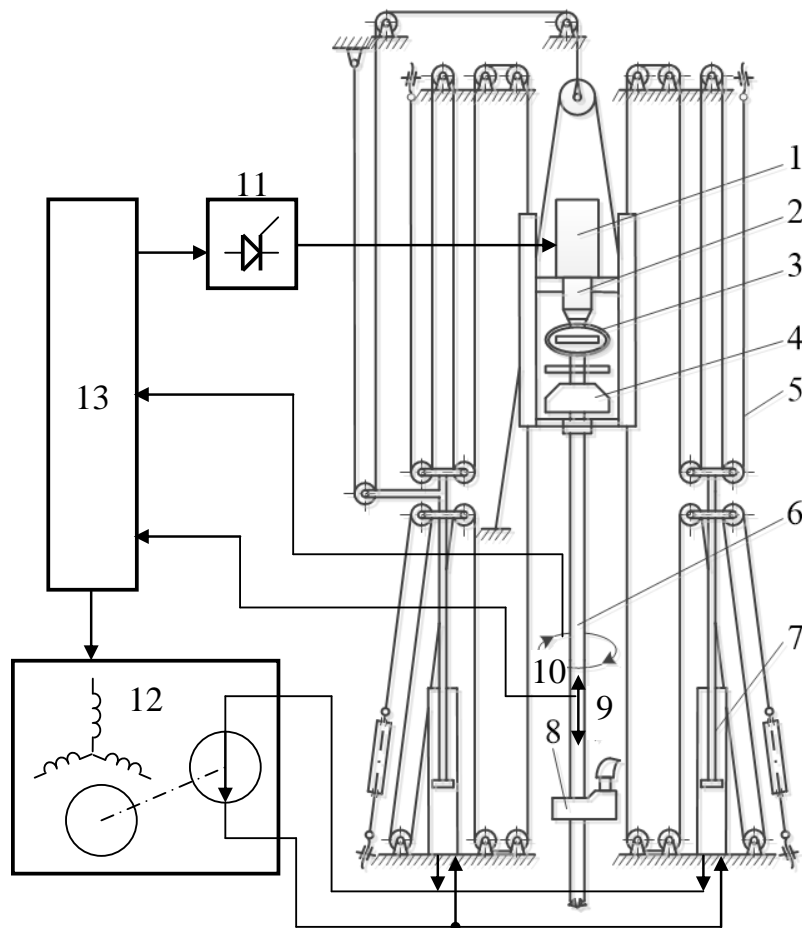


Рис. 1. Функциональная схема системы управления буровым агрегатом

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 (рис. 2), приводимая в движение линейным гидроприводом, гидравлическая трансмиссия подачи, включающая трехфазный асинхронный электродвигатель с частотным регулированием и гидронасос (рис. 3), нагруженный на линейный гидропривод, а также узел вращения бура с двигателем постоянного тока.

При разработке модели полиспастной системы использовались следующие допущения: все шкивы считаются одинаковыми, имеют радиус r и момент инерции J ; диссипативные силы в шкивах создаются вязким трением с коэффициентом, равным η_1 ; канат считается однородной вязкоупругой нитью, с коэф-

коэффициентом упругости c , и коэффициентом вязкого трения η ; i -й шкив вращается с угловой скоростью ω_i ; давление бура на грунт с силой R , осуществляется за счет усилия F_S , создаваемого на штоке линейного гидропривода; усилие F_S создается разностью давлений p_1 и p_2 в рабочих полостях линейного гидропривода; давления p_1 и p_2 создаются за счет изменения проходных сечений регулируемых клапанов f_1 и f_2 , соединяющих линейный гидропривод с напорной магистралью гидравлической трансмиссии; все канаты предварительно растянуты силами F_{ij} , действующими между i -м и j -м шкивами.

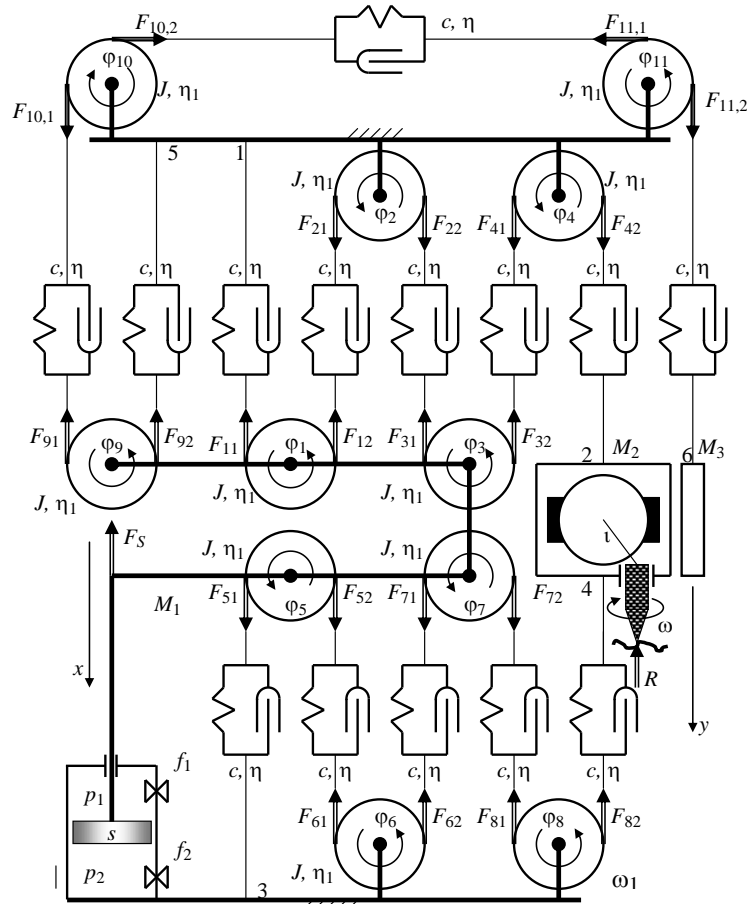


Рис. 2. Кинематическая схема полиспастной системы

Узлы подвижных шкивов, вращения и наклона мачты имеют массы M_1 , M_2 и M_3 , соответственно. Бур вращается с угловой скоростью ω , создаваемой двигателем постоянного тока узла вращения.

Канаты (1-2) и (3-4) предварительно растянуты силами, действующими между шкивами. Получена система уравнения в отклонениях, имеющая вид:

$$A(s)Z(s) = F(s), \quad (1)$$

где s - 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; $a_{ij}(s)$ - комплексные коэффициенты, формулы для определения которых приводятся в работе.

Решение (1) дает следующие значения изображений координат $x(s)$, $y_2(s)$, $y_3(s)$ по Лапласу:

$$\begin{pmatrix} x(s) \\ y_2(s) \\ y_3(s) \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta_P(s)} \begin{pmatrix} \Delta_{12}(s) \\ \Delta_{13}(s) \\ \Delta_{14}(s) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

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 $F(s) = [0, \dots, 0, F_S(s), R(s), 0]^T$ заменены двенадцатый, тринадцатый и четырнадцатый столбцы, соответственно.

По функциональной схеме гидронасоса с трехфазным асинхронным приводом (рис. 3) построена модель гидравлической трансмиссии.

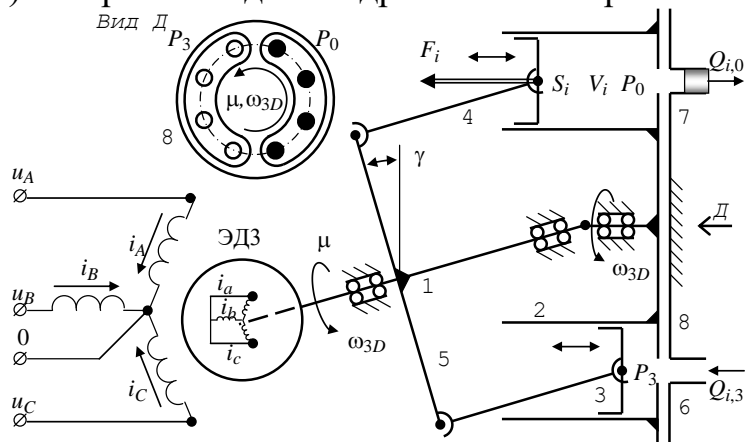


Рис. 3. Трехфазный двигатель с гидронасосом

Показано, что угловая скорость вращения вала двигателя ω_{3D} , приводящего в движение насос, определяется частотой питающего напряжения f_{3D} величиной скольжения $\dot{\Theta}$, и количеством n триад обмоток статора, создающих вращающееся магнитное поле $\omega_{3D} = \frac{2\pi}{n} f_{3D} - \dot{\Theta}$. При оценке величины скольжения использовалось уравнение, описывающее баланс моментов на валу двигателя $J\ddot{\Theta} + \eta_m \dot{\Theta} = \kappa_{3D} U_{3D} + \kappa_\mu \mu$, где J - момент инерции подвижных частей маслостанции, приведенный к валу двигателя; η_m - коэффициент вязкого трения; κ_{3D} - коэффициент передачи по напряжению питания U_{3D} ; κ_μ - коэффициент передачи по полезному моменту μ . Токи в фазных обмотках двигателя (i_A, i_B, i_C) определяются напряжением питания $U_{3D} = (u_A, u_B, u_C)$ и моментом нагрузки μ , который в свою очередь, определяется количеством цилиндров насоса с объемом V_i , площадью поршня S_i , одновременно подключенных к напорной магистрали, в которой создается давление P_0 . При этом считается, что угол наклона платы с цилиндрами относительно оси вращения вала двигателя равен γ .

Из выражений для расчета полезного момента, создаваемого давлением P_0 в напорной магистрали, в зависимости от конструктивных особенностей насоса: угла γ наклона платы с цилиндрами относительно оси вращения вала двигателя, площади S_i и объема V_i цилиндров одновременно подключенных к напорной магистрали, и выражений для определения силы, действующей на шток линейного двигателя, получено уравнения в отклонениях, описывающие кинематику и динамику гидротрансмиссии:

$$\begin{aligned} S\dot{x}(t) &= a_{f,1,3}f_1(t) + a_{f,2,3}f_2(t) + a_{P,1,3}P_1(t) + a_{P,2,3}P_2(t) + a_{P,0,3}P_0(t); \\ M_1\ddot{x}(t) + S^2 \left[\left(\frac{1}{a_{P,1,2}} + \frac{1}{a_{P,2,2}} \right) + \eta_2 \right] \dot{x}(t) &= \frac{a_{f,1,2}S}{a_{P,1,2}} f_1(t) - \frac{a_{f,2,2}S}{a_{P,2,2}} f_2(t) + \\ &+ \left[\frac{a_{P,0,1,2}}{a_{P,1,2}} - \frac{a_{P,0,2,2}}{a_{P,2,2}} \right] SP_0(t) + F_S(t). \end{aligned} \quad (3)$$

где S - площадь поршня линейного гидропривода; $\dot{x}(t)$ и $\ddot{x}(t)$ - скорость и ускорение штока с подвижной частью полиспастной системы; $a_{f,1,3}$, $a_{f,2,3}$, $a_{P,1,3}$, $a_{P,2,3}$, $a_{P,0,3}$; $a_{P,1,2}$, $a_{P,2,2}$, $a_{f,1,2}$, $a_{f,2,2}$, $a_{P,0,1,2}$, $a_{P,0,2,2}$ - коэффициенты, определяемые по физическим параметрам узлов гидротрансмиссии; $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$ - давление рабочей жидкости в напорной магистрали и полостях гидроцилиндра; $f_1(t)$, $f_2(t)$ - сечения регулируемых клапанов; M_1 - суммарная масса поршня, штока и узла с подвижными шкивами; η_2 - коэффициент вязкого трения; $F_S(t)$ - сила, приложенная штоку со стороны полиспаста.

Получено уравнение, описывающее узел вращения при бурении скважины в грунте с заданными механическими параметрами.

$$i^2 \mu_D(t) + i k_{\mu y} \dot{y}_2(t) = (k_{\mu \omega} + k_{\mu y} k_{y \omega}) \omega_D(t) + i (k_{\mu R} + k_{\mu y} k_{y R}) R(t), \quad (4)$$

где $\mu_D(t)$ и $\omega_D(t)$ - угловая скорость вращения вала двигателя постоянного тока и приведенный момент полезной нагрузки; $\mu_B(t) = i \mu_D(t)$ - момент сопротивления грунта бурению; i коэффициент редукции: $\omega_B(t) = \frac{\omega_D(t)}{i}$ - угловая скорость вращения бура; $\dot{y}_2(t)$ - величина подачи; $R(t)$ - сила продольного сопротивления процессу бурения; $k_{\mu y}$, $k_{\mu \omega}$, $k_{y \omega}$, $k_{\mu R}$, $k_{y R}$: - коэффициенты передачи, зависящие от механических свойств проходимого грунта.

В третьем разделе разработаны структурные схемы бурового агрегата СБШ-250МН-32Т как объекта управления.

Структурная схема бурового агрегата, функционирующего в режиме бурения, приведена на рис. 4. Передаточные функции, входящие в структуру, были получены путем разрешения математической модели относительно соответствующих параметров, и имеют следующий физический смысл.

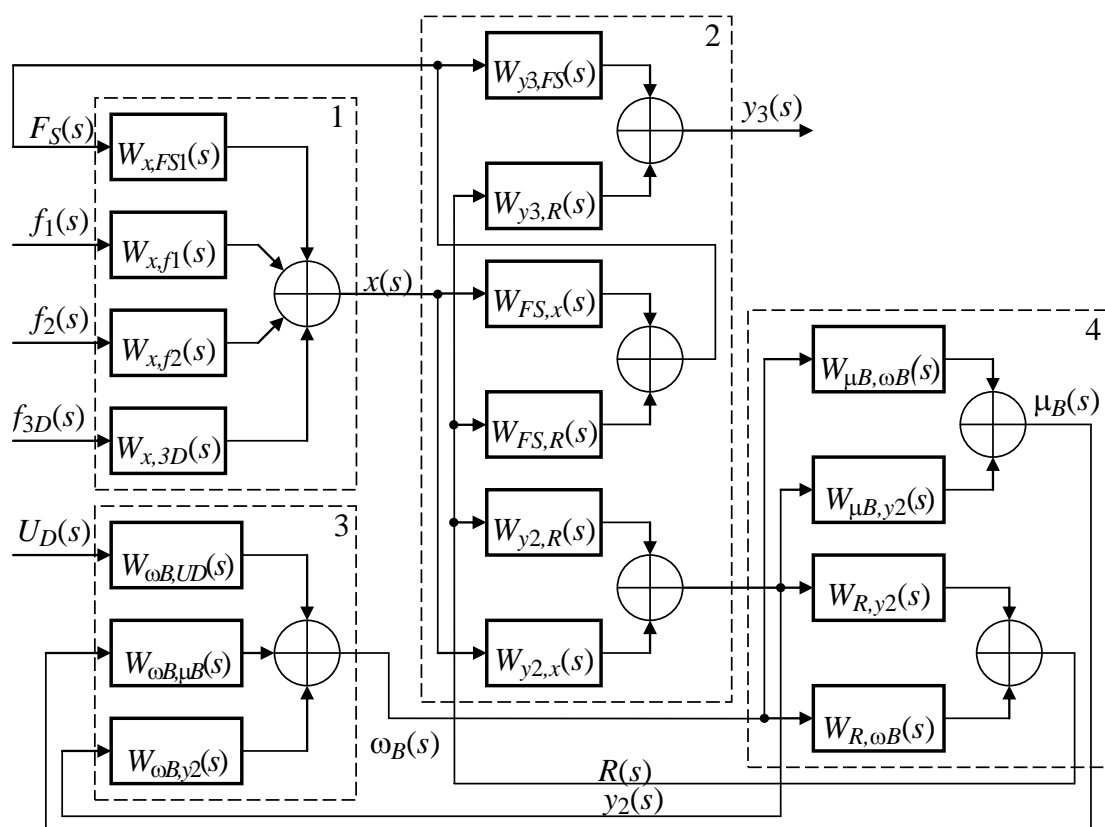


Рис. 4. Структура СБШ-250МН-32Т, функционирующего в режиме бурения

Блок 1 описывает динамику гидротрансмиссии, а передаточные функции $W_{x,FS1}(s)$, $W_{x,f1}(s)$, $W_{x,f2}(s)$, $W_{x,3D}(s)$, входящие в блок описывают реакцию трансмиссии на изменение силы на штоке $F_S(s)$ линейного гидропривода, сечений управляемых клапанов $f_1(s)$. Блок 2 описывает динамику полиспаста, а передаточные функции $W_{x,FS1}(s)$, $W_{x,f1}(s)$, входящие в блок, описывают реакцию канала установления угла наклона мачты y_3 на усилие на штоке $F_S(s)$ и сопротивление грунта $R(s)$; передаточные функции $W_{FS,x}(s)$, $W_{FS,R}(s)$ - реакцию канала установления усилия на штоке $F_S(s)$ на ход штока $x(s)$ и сопротивление грунта $R(s)$, соответственно; передаточные функции $W_{y2,x}(s)$, $W_{y2,R}(s)$ - реакцию канала установления подачи на штоке $F_S(s)$ на ход штока $x(s)$ и сопротивление грунта $R(s)$, соответственно. Блок 3 описывает динамику узла вращения бура, а передаточные функции $W_{\omega B,UD}(s)$, $W_{\omega B,\mu B}(s)$, $W_{\omega B,y2}(s)$, входящие в блок, описывают: изменение угловой скорости $\omega_B(s)$ при изменении управляющего напряжения $U_D(s)$, продольной силы реакции грунта $R(s)$ и момента сопротивления $\mu_B(s)$. Блок 4 описывает перекрестные связи между каналами продольной подачи и вращения бура, а передаточные функции $W_{\mu B,\omega B}(s)$, $W_{\mu B,y2}(s)$ - реакцию канала установления момента на буре $\mu_B(s)$ на угловую скорость вращения $\omega_B(s)$ и подачу инструмента $y_2(s)$, соответственно; передаточные функции $W_{R,\omega B}(s)$, $W_{R,y2}(s)$ описывают реакцию канала установления продольной силы, действующей на инструмент $R(s)$, на уг-

ловую скорость вращения $\omega_B(s)$ и на подачу инструмента $y_2(s)$, соответственно.

Определено, что в режиме поднятия/опусканию бура из структуры агрегата удаляются передаточные функции, обеспечивающие перекрестные связи через грунт между каналами вращения и подачи бура, и как объект управления агрегат может быть представлен тремя независимыми друг от друга структурными блоками: 1, 2, 3. Показано, что вследствие наличия полиспада с вязкоупругими связями между шкивами, а также перекрестной связи, возникающей при взаимодействии каналов через грунт, объект является многосвязным. В общем случае подобный объект может быть представлена в матричной форме $X(s) = W(s) \cdot \varepsilon(s)$, где $X(s)$ - обобщенный K -элементный вектор состояния; $\varepsilon(s)$ - обобщенный K -элементный вектор воздействия на объект; $W(s)$ - $K \times K$ матрица передаточных функций, элементы которой равны $W_{k,l}(s) = \frac{B_{k,l}(s)}{C_{k,l}(s)}$; $B_{k,l}(s)$ и $C_{k,l}(s)$ - полиномы. Измерение состояния объекта

осуществляется с помощью сенсорной подсистемы, в результате чего формируется вектор сигналов обратной связи $X_0(s) = W(s) \cdot \Phi_0(s) \cdot \varepsilon(s)$, где $\Phi_0(s)$ - $K \times K$ диагональная матрица передаточных функций $\Phi_{0,k}(s)$ сенсоров. При цифровом замыкании обратных связей в контурах управления между вводом элементов $X_0(s)$ и выводом элементов $\varepsilon(s)$ существуют задержки по времени, которые формируют перекося данных в пределах ввода отдельных векторов, или чистое запаздывание между вводом элементов вектора $X_0(s)$ и выводом элементов вектора $\varepsilon(s)$. Определено, что задержка по времени, $\tau_{\Sigma,k,l} = \tau_{in,k} + \tau_{calc,k,l} + \tau_{out,l}$, складывается из времени $\tau_{in,k}$ ввода $x_k(s)$, $\tau_{out,k}$ вывода $\varepsilon_l(s)$ и $\tau_{calc,k,l}$ расчета $\varepsilon_l(s)$ после ввода $x_k(s)$

Для случая линейного закона управления, реализованного в контроллере, получено выражение, определяющее состояние многосвязной системы

$$X(s) = W(s) [E + \hat{V}(s) \cdot W(s) \cdot \Phi_0(s)]^{-1} N_{out}(s) \tilde{V}(s) \chi(s), \quad (5)$$

где E - единичная диагональная $K \times K$ матрица; $\hat{V}(s) = [V_{k,l}(s) \exp(-\tau_{\Sigma,k,l}s)]$ - матрица, определяющая алгоритм линейной обработки данных в контроллере с учетом времени задержки; $N_{out}(s)$ - диагональная матрица задержки на $\tau_{out,l}$ сигналов управления при выводе данных; $\tilde{V}(s) = [V_{k,l}(s) \exp(-\tau_{calc,k,l}s)]$ - матричная модель алгоритма линейной обработки данных с учетом времени на обработку; $V(s) = [V_{k,l}(s)]$ - модель алгоритма без учета времени на обработку; $\chi(s)$ - $K \times 1$ вектор входных воздействий в систему.

Разработана методика оценки устойчивости замкнутой цифровой системы управления по критерию Рауса-Гурвица, которая предполагает получение инверсного характеристического уравнения системы (3), 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.

Структура контроллера с нейронной сетью и нейронной сети приведена на рис. 5. Контроллер подключается к объекту управления через интерфейс, на котором: сигнал f_{3D} представляет собой трехфазное силовое напряжение с выбранной частотой, обеспечивающей вращение вала двигателя со скоростью 750, 1500 или 300 об/мин); U_{f1} , U_{f2} , представляют собой цифровые коды, пропорциональные величинам проходных сечений клапанов линейного гидропривода; U_D сигнал управления на двигателе постоянного тока узла вращения.

В регулятор входят: контактор 1 переключения частот силового трехфазного напряжения; ПИД регуляторы 2 и 3 f_1 и f_2 , соответственно; ПИД регулятор 4 управления скоростью вращения ω_D бура с регулируемым от нейронной сети коэффициентом передачи. На выходе нейронной сети формируются сигналы $f_{f3D,d}$ - выбора частоты трехфазного силового питающего напряжения; $f_{1,d}$, $f_{2,d}$ - желаемых значений проходных сечений клапанов линейного гидропривода; $k_{p,D,d}$ - желаемого коэффициента передачи регулятора угловой скорости; $\omega_{D,d}$ - желаемой угловой скорости вращения вала двигателя постоянного тока.

В состав нейронной сети входят нейроны $1, \dots, v, \dots, V$, определяющие плоскости, разбивающие пространство параметров (ω_D, \dots, f_2) , на области, в которых устанавливается набор желаемых значений параметров $f_{f3D,d}$, $f_{1,d}$, $f_{2,d}$, $k_{p,D,d}$, $\omega_{D,d}$. логические аналоги сигмоидов $N_{1,1}, \dots, N_{1,v}, \dots, N_{1,V}$, устанавливающиеся в состояния $\zeta(\lambda_v)$, определяемые выражением

$$\zeta_{\dots}(\lambda_v) = \begin{cases} 0, & \text{если рассматривается область над } v\text{-й плоскостью;} \\ 1, & \text{если рассматривается область под } v\text{-й плоскостью} \end{cases} \quad (6)$$

Области пространства, в которых устанавливаются желаемые оптимальные значения параметров определяются дизъюнктивными нормальными формами, $\xi_J = \bigvee_i [\zeta_J(\lambda_{1,i}) \wedge \dots \wedge \zeta_J(\lambda_{v,i}) \wedge \dots \wedge \zeta_J(\lambda_{V,i})]$, где $J \in \{f_{3D}, f_1, f_2, U, \omega_D\}$.

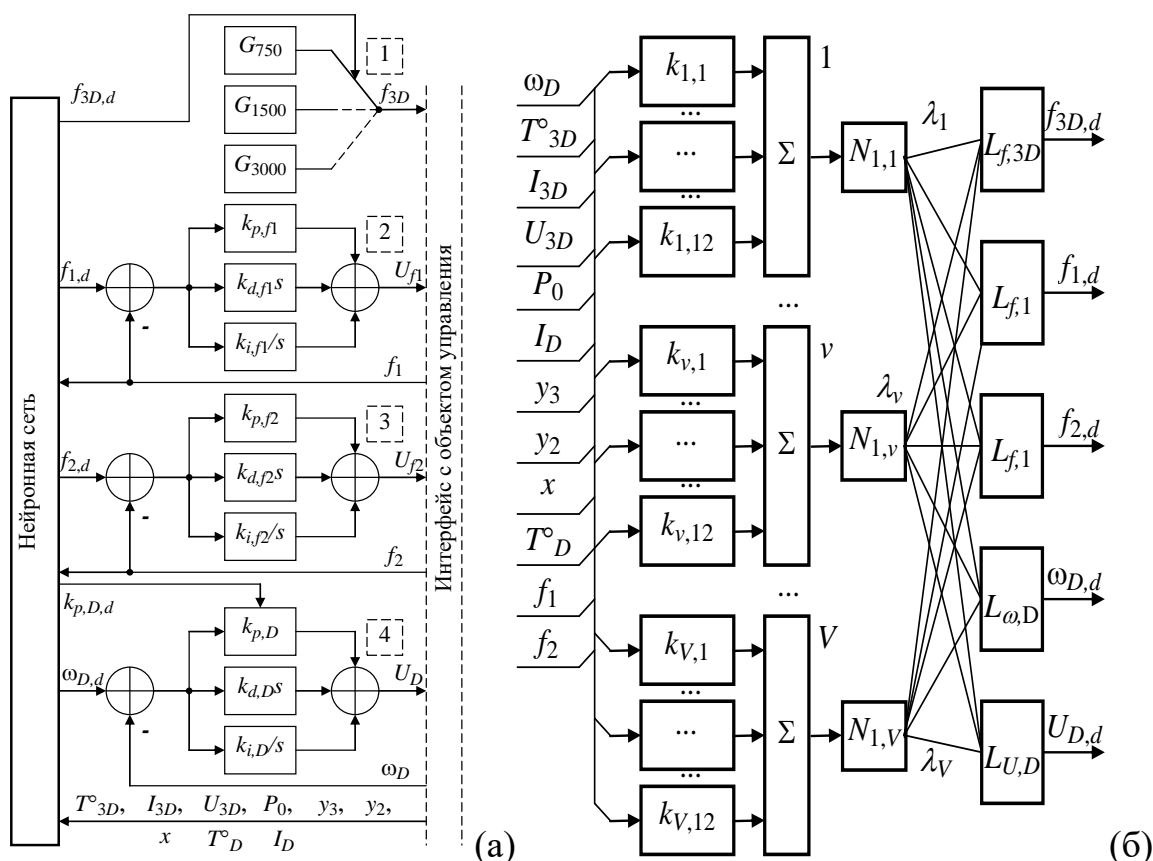


Рис. 5. Контроллер с нейронной сетью (а) и нейронная сеть (б)

Обучение нейронной сети сводится к определению коэффициентов $k_{v,1}, \dots, k_{v,12}$ $\gamma_{j,i}$, $1 \leq v \leq V$, линейной формы, и дизъюнктивных нормальных форм ξ_j которое проводится по комплексу математических динамических моделей функционирования СБШ-250МН-32Т при различных условиях эксплуатации. Настройка системы управления бурового агрегата с использованием нейронного регулятора представлена на рис.6.

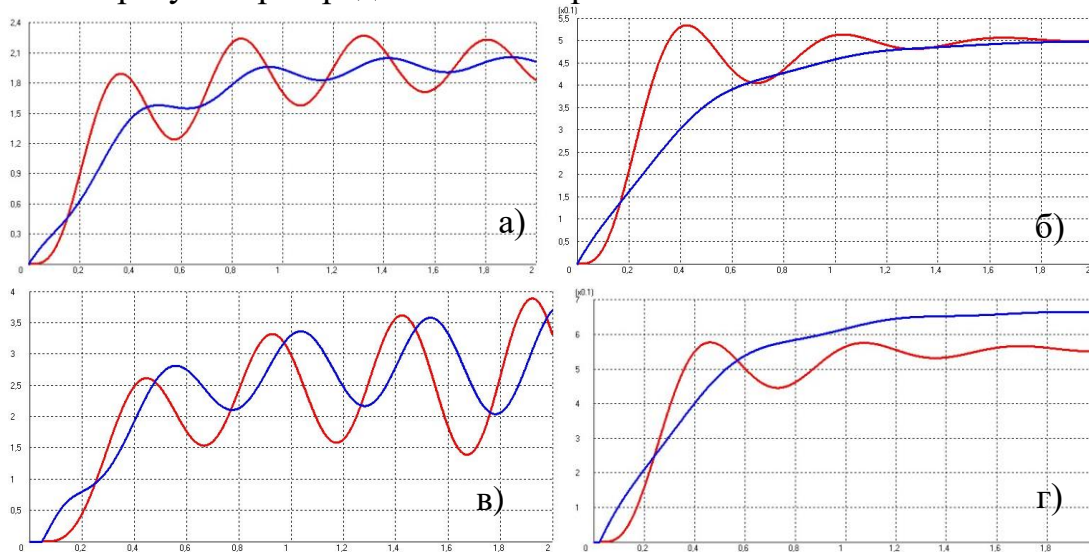


Рис. 6. Настройка системы управления

На графиках показаны: а) переходные процессы до настройки ПИД регулятора/ б) переходные процессы после нейронной настройки ПИД регулятора; в) переходные процессы с учетом задержки по времени на обработку дан-

ных контроллером до настройки ПИД регулятора/ г) переходные процессы с учетом задержки по времени на обработку данных контроллером до настройки ПИД регулятора. В некоторых случаях из-за перекрестных связей через грунт бурение становится неустойчивым (рис. 6, а). Это приводит к повышенному износу инструмента и уменьшению ресурса самого бурового агрегата. Применение нейронного регулятора позволяет повысить устойчивость поддержания режимов бурения (рис. 6, б). При использовании контроллера с невысоким быстродействием неустойчивые режимы возникают в следствие времени задержки, реакции контроллера на изменение состояния бурового агрегата (рис.6, в). Время задержки также может быть скомпенсировано нейронным регулятором (рис.6, г).

В целом по работе можно сделать 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, 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 с линейной системой 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 бурового агрегата.

10. Разработана упрощенная модель бурения при работе линейного гидропривода.

11. Разработана система управления буровым агрегатом СБШ-250МН-32Т на основе структуры гидравлической трансмиссии, структуры полиспасть, 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 технологи (г. Ханой, Социалистическая республика Вьетнам) при разработке системы управления буровых агрегатов и системы управления приводах горного оборудования.

В приложении представлены акты внедрения.

По теме диссертации опубликован 13 печатных работ, основными из которых являются: публикации в журналах из списка ВАК

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

2. Фам Т.Л. Исследование информационно-измерительной и управляющей системы проходческого комбайна// Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 46-52.

3. Фам Т.Л. Модель гидравлической трансмиссии// Акименко Т.А., Ларкин Е.В., Фам Т.Л. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 11. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. С. 54-59.

4. Фам Т.Л. Модель процесса бурения установки СБШ-250МН-32Т// Акименко Т.А., Фам Т.Л. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 11. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. С. 100-102.

Авторское редактирование

Подписано в печать 28.03.2024

Формат бумаги 70x100 ^{1/16}. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ 051к
Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95