



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.234.5
DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-31-39

ГИДРОПРИВОД БУРОВОЙ УСТАНОВКИ КАК ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Целищев В.А., Целищев Д.В.

Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Исследования направлены на понимание того, какие особенности теории структурно-параметрического синтеза применимы для исполнительного привода буровой установки, какие факторы многокритериальных сигналов управления и компенсации внешних воздействий комбинированного типа и каким образом влияют на формирование совокупных гидромеханических и электрогидравлических эффектов, осуществляющих коррекцию и регулирование статических и динамических характеристик гидродвигателей привода вращения и подачи бурового инструмента. **Цель работы.** Целью работы является определение направлений улучшения характеристик буровой установки с гидравлическим приводом бурового инструмента за счет внедрения гидромеханических регуляторов для повышения точности, устойчивости, управляемости. **Используемые методы.** Рассмотрены основные возмущающие, управляющие и регулирующие воздействия на гидравлический привод бурового инструмента. **Новизна.** Современные тенденции к цифровизации процессов бурения, обслуживания, планирования и регистрации работ определяют необходимость рассматривать в качестве объекта исследования схему гидропривода бурового инструмента с бортовой цифровой вычислительной машины. **Результат.** Предложены новые гидромеханические регуляторы системы адаптивного управления процессом бурения: регулятор давления, регулятор мощности, регулятор динамического давления и LS-регулятор. Результат достигается за счет сбора, обработки и использования данных о потребляемой мощности привода буровой установки на переходных режимах при случайной нагрузке и при работе в режиме «холодного хода». Данные используются в соответствующей задаче регулирования регулятора, который корректирует работу насоса за счет изменения его производительности. **Практическая значимость.** Исследования позволили сформировать структурную базу регуляторов гидропривода буровой установки для коррекции статических и динамических характеристик и подготовить основу для синтеза структуры регуляторов.

Ключевые слова: гидропривод, буровая установка, система регулирования, гидромеханический регулятор, синтез структуры, регулятор давления, регулятор мощности

© Целищев В.А., Целищев Д.В., 2026

Для цитирования

Целищев В.А., Целищев Д.В. Гидропривод буровой установки как объект регулирования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 31-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-31-39>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

HYDRAULIC DRIVE OF A DRILLING RIG AS A CONTROL OBJECT

Tselishchev V.A., Tselishchev D.V.

Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The studies are aimed at understanding which features of the theory of structural-parametric synthesis are applicable to the actuator drive of a drilling rig, which factors of multi-criteria control signals and compensation of combined external disturbances influence the formation of integrated hydromechanical and electro-hydraulic effects that provide correction and regulation of the static and dynamic characteristics of hydraulic motors for the rotation and feed drives of drilling tools. **Objectives.** The purpose of the study is to determine directions for improving the performance characteristics of a drilling rig with a hydraulic drilling tool drive through the implementation of hydromechanical regulators in order to increase accuracy, stability, and controllability. **Methods Applied.** The main disturbing, control, and regulating effects acting on the hydraulic drive of the drilling tool are considered. **Originality.** Current trends toward the digitalization of drilling processes, maintenance, planning, and operation recording determine the necessity of considering the hydraulic drive system of the drilling tool integrated with an on-board digital computer as the object of research. **Result.** New hydromechanical regulators for the adaptive drilling process control system are proposed: a pressure regulator, a power regulator, a dynamic pressure regulator, and an LS regulator. The result is achieved through the collection, processing, and utilization of data on the power consumption of the drilling rig drive during transient operating modes under random loading conditions and during idling. The obtained data are used in the corresponding control task of the regulator, which adjusts pump operation by changing its capacity. **Practical Relevance.** The studies have made it possible to form a structural basis for hydraulic drive regulators of drilling rigs aimed at correcting static and dynamic characteristics and to prepare the foundation for the synthesis of regulator structures.

Keywords: hydraulic drive, drilling rig, control system, hydromechanical regulator, structure synthesis, pressure regulator, power regulator

For citation

Tselishchev V.A., Tselishchev D.V. Hydraulic Drive of a Drilling Rig as a Control Object. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 31-39. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-31-39>

Введение

Широкое распространение получили буровые установки роторного типа разной мощности и производительности для различных областей применения. Применяют разные методы и принципы управления процессом бурения с различной степенью автоматизации и методами контроля. Показатели процесса бурения, наряду с физико-механическими свойствами породы, зависят от двух рабочих параметров: усилия (скорость) подачи и частоты вращения бурового инструмента. При этом наиболее характерными являются следующие способы их регулирования [1]:

1. Регулирование постоянной величины удельной подачи бурового инструмента. Скорость вращения и давление подачи регулируются.
2. Поддержание постоянной величины момента на буровом инструменте (в теории подачи без прерываний). Скорость вращения регулируется.
3. Поддержание стабильного значения скорости при регулировке усилия подачи.
4. Обеспечение максимальной производительности бурения за счет микропроцессорного управления усилием подачи и скоростью вращения бурового инструмента.
5. Поддержание рационального соотношения скорости вращения и усилия подачи бурового ин-

струмента в зависимости от прочности породы (адаптивное управление параметрами).

Все вышеперечисленные способы характеризуются определенными проблемами в управлении бурением при воздействии факторов, требующих участия оператора бурильной машины.

Принимая во внимание факты, известные из публикаций [2-9], и опыт использования аналогичного адаптивного привода, наиболее целесообразным с точки зрения простоты решения задачи при минимальных затратах является использование адаптивного гидропривода. В этом вопросе представляет интерес концепция управления процессом бурения без привлечения компьютерных технологий. Этот метод известен, он был разработан рядом исследователей и апробирован в промышленности [1, 3]. Адаптивный привод буровой установки автоматически регулирует скорость бурения и параметры для режимов работы, близких к рациональным, при изменении условий работы буровой установки. В данной статье рассматривается возможность автоматизации процесса бурения за счет использования гидравлического привода буровой установки с двумя рабочими движениями (вращение и подача бурового инструмента), который имеет адаптивную структуру. В работе использованы технологии, предложенные автором [10-12] при разработке авиационной техники.

Материалы и методы исследования

В качестве базовой схемы гидравлического привода бурового инструмента предлагается рассмотреть объемный гидропривод, содержащий насосную станцию с нерегулируемым насосом, гидрораспределители управления скоростью вращения и направлением движения инструмента (рис. 1).

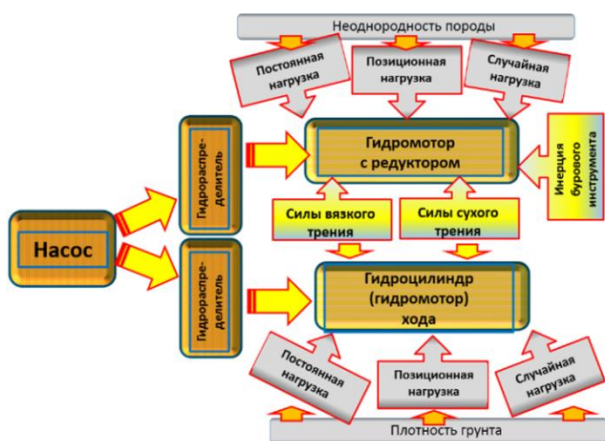


Рис. 1. Функциональная схема привода бурового инструмента
Fig. 1. Functional diagram of the drilling tool drive

Насосная станция содержит один или два насоса с приводом от двигателя внутреннего сгорания, специализированный бак хранения рабочей жидкости, фильтр, возможен теплообменник, предохранительные клапаны. Гидрораспределители могут быть как с ручным, так и с электрическим управлением, включая возможную многокаскадность конструкции. Но в данном контексте гидрораспределители не являются многопозиционными, исключая возможность регулирования величины подачи рабочей жидкости к гидродвигателям. Гидромотор привода вращения бура для повышения крутящего момента и, соответственно, снижения числа оборотов оснащается редуктором. Для осуществления подачи бурового инструмента может быть использован гидроцилиндр с односторонним штоком или гидромотор с редуктором.

Неоднородность породы сказывается прежде всего на нагружающем гидромотор привода бурового инструмента крутящем моменте. На работе гидроцилиндра (гидромотора) привода хода бурового инструмента оказывает влияние плотность перемолотого грунта. В процессе работы гидродвигатели привода бурового инструмента испытывают нагрузки постоянного и позиционного характера и зачастую случайного характера.

Современные тенденции к использованию цифровизации процессов бурения, обслуживания, планирования и регистрации работ определяют возможность рассмотреть в качестве основы объекта исследования схему гидропривода бурового инструмента с применением бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) (рис. 2).

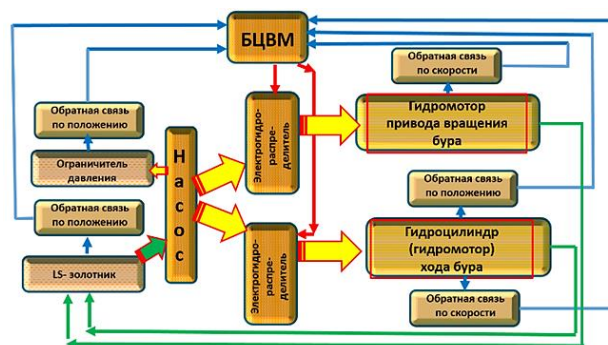


Рис. 2. Функциональная схема электрогидравлического привода бурового инструмента
Fig. 2. Functional diagram of the electrohydraulic drive of the drilling tool

Основной особенностью привода бурового инструмента при использовании БЦВМ является обеспечение информации для моделирования ситуации датчиками обратной связи. Датчики обратной связи устанавливаются на гидродвигатели вращения и подачи бурового инструмента. Они могут быть как электрические, так и гидромеханические или комбинированные. Информационный сигнал определяет действительное положение и скорость рабочего инструмента.

Электрогидрораспределители подачи рабочей жидкости к гидродвигателям могут быть как трехпозиционными, так и многопозиционными. В последнем случае за счет использования БЦВМ привод рабочего органа можно назвать следящим, обеспечивающим контроль управляющих сигналов на работу гидродвигателей. Насос (насосы) может быть регулируемым, как с электрогидравлическим (связанным с БЦВМ), так и гидромеханическим управлением. Насос может иметь датчики обратной связи и ограничитель давления.

Команда от БЦВМ в виде управляющего воздействия поступает на насос, обеспечивая заданный режим работы, и на электрогидрораспределители, обеспечивая в соответствии с неоднородностью и плотностью породы различную скорость работы гидродвигателей привода бурового инструмента. Регулирующие воздействия, отслеживая информацию с датчиков гидродвигателей, включая гидромеханические параметры регулятора чувствительности к нагрузке (LS-регулятор), обеспечивают стабилизацию отработки управляющих сигналов.

В конечном итоге автоматизация работы гидропривода бурового инструмента с использованием БЦВМ приводит к организации работы системы автоматического управления и регулирования (рис. 3).

В качестве первого приближения к пониманию силовой части гидропривода буровой установки как объекта управления и регулирования может послужить схема, приведенная на рис. 4. К исполнительным органам буровой установки прилагаются управляющие, регулирующие и возмущающие воздействия. Управляющие воздействия, исходя из особен-

ностей разрабатываемой породы, определяются оператором установки или БЦВМ. Управляющий сигнал, обеспечивающий установку величины расхода рабочей жидкости, определяющей скорость работы исполнительных гидродвигателей в контурах бурения и подачи бурового инструмента, поступает на многопозиционные гидрораспределители (при дроссельном способе управления) или на регулятор изменения характерного рабочего объема насоса (насосов) (при объемном способе управления). Режим работы буровой установки выбирается на основе условий геологического характера, проектных параметров будущей скважины, обеспечения желательных экономических показателей.



Рис. 3. Схема системы регулирования гидропривода бурового инструмента

Fig. 3. Regulation system scheme of the drilling tool hydraulic drive



Рис. 4. Схема объекта регулирования – гидропривода буровой установки

Fig. 4. Scheme of a regulation object – the hydraulic drive of a drilling rig

Регулирующие воздействия, определяющие режим адаптации к постоянным и случайным нагружающим буровой инструмент воздействиям, могут быть реализованы как на базе насоса, так и на базе гидромоторов привода бурового устройства. Регулятор топливоподачи двигателя внутреннего сгорания (ДВС) обеспечивает поддержание постоянных оборотов двигателя независимо от потребляемой насосом мощности.

По большому счету, в объекте регулирования могут быть использованы датчики, формирующие различные информационные сигналы и подаваемые как

на регуляторы, так и на БЦВМ. Это могут быть гидромеханические датчики, определяющие величину давления в полостях гидродвигателей, а значит, и величину нагрузки. Датчики перемещения штока гидродвигателя подачи бурового инструмента, датчики перемещения гидроцилиндров управления характерным рабочим объемом насоса, датчики скорости вращения вала гидромоторов, датчики перемещения золотников электрогидрораспределителей, датчик скорости оборотов приводного ДВС. Кроме того, возможно использование датчиков гидродинамики и утечек рабочей жидкости.

Возмущающие воздействия определяют нагрузку на гидропривод бурового инструмента. Нагрузки можно разделить на три вида: статические, динамические и трения.

Статическая нагрузка возникает как при вращении бурового инструмента, так и при его возвратно-поступательном движении. В определенной степени эту нагрузку можно назвать и позиционной, определяемой положением бурового инструмента в грунте.

Динамическая нагрузка определяется особенностью работы буровой установки, пласты породы всегда имеют разную плотность и физико-механические свойства. Случайный характер мгновенной нагрузки определить затруднительно даже при подробном анализе структуры породы. Неравномерная мгновенная нагрузка при бурении горной породы с чередующимися слоями разной плотности существенно сказывается на работе гидропривода. Необходимо учесть и возможные вибрации бурового инструмента как в процессе работы, так и в период заклинивания с последующим резким освобождением.

Нагрузки, вызванные трением в устройствах привода бурового инструмента, трением инструмента в породе, являются сложными для определения и моделирования. Тем не менее следует учесть наличие как сухого, так и вязкого трения, приводящего к погрешностям и неустойчивости в работе буровой установки.

Анализ сложного характера действующих на буровой инструмент нагрузок статического и динамического характера требует разработки теории системы автоматического регулирования буровых установок, разработки регуляторов адаптации к проблемам бурения скважин. Определенными преимуществами в системах автоматического регулирования обладают гидромеханические регуляторы, прежде всего благодаря высокой надежности и независимости от работы БЦВМ. Ниже будут рассмотрены варианты организации гидромеханических регуляторов привода бурового инструмента, в основу которых положены технологии организации систем регулирования авиационной техники [10-12].

Полученные результаты и их обсуждение

Гидропривод буровой установки с регулятором давления. В данной схеме гидропривода обеспечивается поддержание постоянного давления в гидроси-

стеме вне зависимости от однородности грунта и воздействия случайных нагрузок. В режиме «холостого хода» гидросистема обеспечивает минимальное потребление энергии за счет вывода насоса на минимальную производительность. При бурении жидкость подается в гидроцилиндры гидромеханического регулятора давления, который путем изменения характерного рабочего объема насоса подстраивает насос под режим бурения и обеспечивает заданный постоянный уровень давления в системе.

Гидропривод буровой установки работает следующим образом. Рабочая жидкость из линии бака 6 подается насосом 1 к гидромотору вращения бура 3 и гидроцилиндру подачи бура 4 (рис. 5, а). При подаче соответствующего электронного управляющего сигнала на многопозиционные электрогидрораспределители 8 осуществляется подключение гидромотора 3 и гидроцилиндра 4 к линии нагнетания насоса 1 и определяет режим работы. Рабочий ход гидродвигателей осуществляется со скоростью, определяемой величиной управляющих сигналов. При реверсе гид-

рораспределителей 8 осуществляется реверс гидродвигателей (гидромотора и гидроцилиндра) буровой установки. Предохранительные клапаны 5 предотвращают поломку гидропривода вследствие перегрузки или засорения фильтра. Всасывая жидкость из бака 6, насос 1 компенсирует в том числе и объемные утечки в гидродвигателях.

Принцип работы регулятора давления следующий: при отсутствии управляющего сигнала на электрогидрораспределителях 8 насос 1 выходит на минимальную производительность, при этом с помощью гидроцилиндра 11 обеспечивается минимальный характерный рабочий объем насоса. Поршень цилиндра 12 смещается в крайнее левое положение. Давление в системе поддерживается на постоянном уровне, соответствующем номинальному значению подачи насоса. При подаче управляющего сигнала на электрогидрораспределители 8 вал гидромотора 3 начинает вращать буровой инструмент через редуктор. За подачу бурового инструмента отвечает гидроцилиндр 4.

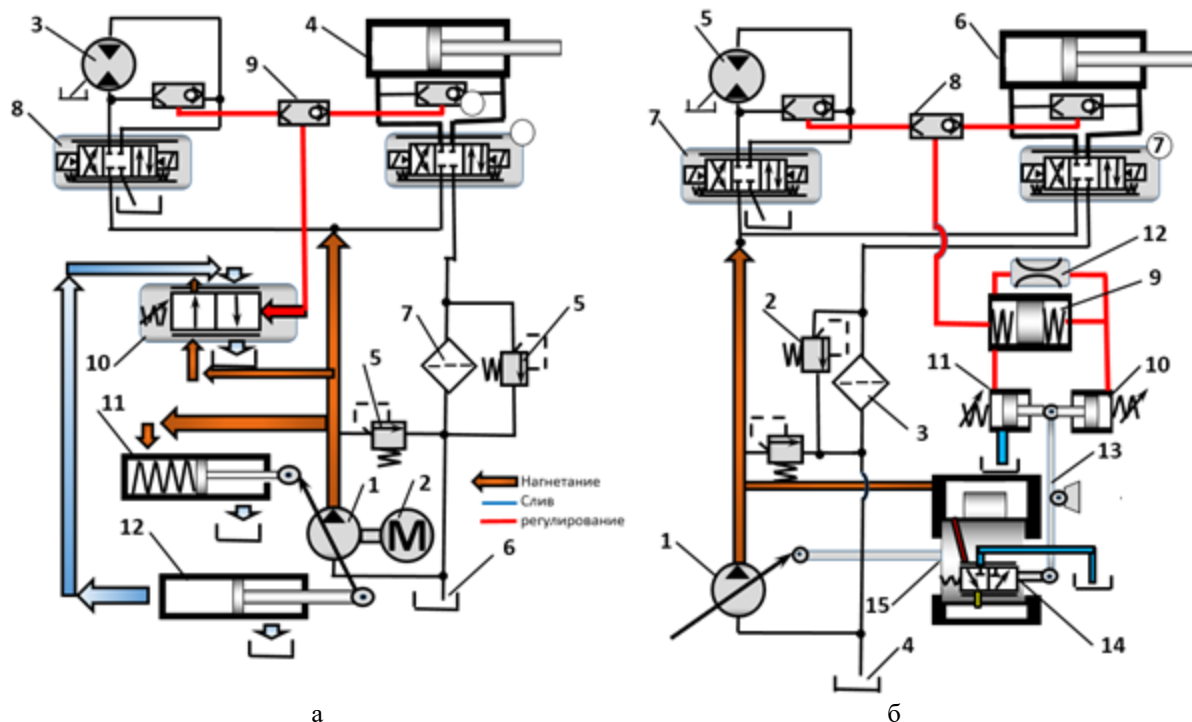


Рис. 5. Гидропривод буровой установки: а – с регулятором давления: 1 – насос; 2 – ДВС; 3 – гидромотор; 4 – гидроцилиндр; 5 – клапан предохранительный; 6 – бак; 7 – фильтр; 8 – электрогидрораспределитель; 9 – клапан «или»; 10 – гидрораспределитель; 11, 12 – гидроцилиндры; б – с регулятором обратной связи по динамическому давлению: 1 – насос; 2 – клапан предохранительный; 3 – фильтр; 4 – бак; 5 – гидромотор; 6 – гидроцилиндр; 7 – электрогидрораспределитель; 8 – клапан «или»; 9-11 – плунжеры; 12 – дроссель; 13 – коромысло; 14 – гидрораспределитель; 15 – толкатель-золотник

Fig. 5. Hydraulic drive of the drilling rig: а is with pressure regulator: 1 is pump; 2 is internal combustion engine; 3 is hydraulic motor; 4 is hydraulic cylinder; 5 is safety valve; 6 is tank; 7 is filter; 8 is electrohydraulic distributor; 9 is shuttle valve; 10 is hydraulic distributor; 11, 12 are hydraulic cylinders; б is with dynamic pressure feedback regulator: 1 is pump; 2 is safety valve; 3 is filter; 4 is tank; 5 is hydraulic motor; 6 is hydraulic cylinder; 7 is electrohydraulic distributor; 8 is shuttle valve; 9-11 are plungers; 12 is throttle; 13 is rocker arm, 14 is hydraulic distributor, 15 is spool plunger

Потребный расход рабочей жидкости от насоса растет, давление падает. Для компенсации снижения давления регулятор давления, а именно пружина пропорционального гидрораспределителя 10, смещает управляющий золотник на величину, пропорциональную снижению давления в системе. При этом через пропорциональный гидрораспределитель 10 в поршневую полость гидроцилиндра 12 подается жидкость, что приводит к увеличению характерного рабочего объема насоса 1 и увеличению его подачи, что компенсирует снижение давления в системе вплоть до номинального значения. Регулятор обеспечивает создание оптимального давления для преодоления нагрузки на валу гидромотора и гидроцилиндра подачи бурового инструмента, тем самым обеспечивая энергоэффективность гидропривода. При превышении нагрузки на буровом инструменте вследствие изменения состава грунта давление в системе закономерно возрастает и регулятор, чувствительный к давлению, с помощью клапанов «или» уменьшает подачу насоса и поддерживает в системе постоянное давление. Таким образом, регулятор обеспечивает постоянный момент на буровом инструменте, но с меньшей частотой вращения и скоростью подачи. В обратной ситуации – в случае уменьшения величины нагрузки на буровом инструменте – регулятор увеличивает подачу насоса 1, что приводит к увеличению скорости вращения и подачи бурового инструмента. Регулятор давления обеспечивает автоматическое регулирование работы бурового инструмента с учетом неоднородности грунта и глубины бурения.

Гидропривод буровой установки с регулятором обратной связи по динамическому давлению. Неустойчивость при работе буровой установки на резонансных частотах при случайном динамическом воздействии на рабочие органы со стороны породы приводит к неконтролируемому изменению давления рабочей жидкости в гидросистеме как на гидромоторе привода вращения бура, так и на выходе гидроцилиндра подачи бура. Для компенсации динамического воздействия на гидродвигатели буровой установки пульсаций позиционной и инерционной нагрузок необходимо использовать скорость изменения давления в гидросистеме.

Задача повышения надежности работы гидропривода рабочего органа буровой машины, увеличение точности и устойчивости при работе на резонансных частотах при воздействии позиционных и инерционных нагрузок случайного характера вследствие изменения структуры породы решается за счет использования дополнительной обратной связи. В зависимости от действительной величины колебаний давления перед гидродвигателями дополнительная гидромеханическая обратная связь по динамическому давлению изменяет характерный рабочий объем насоса.

Гидропривод с регулятором обратной связи по динамическому давлению (рис. 5, б) задействуется на высоких частотах вращения бурового инструмента, при случайном резком изменении позиционной и инерционной нагрузок на рабочих органах. Опережающий сигнал гибкой обратной связи, формируемой гидравлическим конденсатором в виде подпружиненного плунжера 9 и

сопротивлением 12, приводит с помощью перемещения плунжеров 10 и 11 к повороту коромысла 13 и соответствующему смещению распределителя 14 и толкателя-золотника 15. Точность работы при больших частотах вращения обеспечивается за счет перемещения толкателя-золотника 15, механически связанного с насосом 1, что приводит к изменению характерного рабочего объема насоса 1 в соответствии с корректирующим сигналом гидромеханического устройства обратной связи.

Гидропривод буровой установки с регулятором мощности. Для устранения неустойчивой работы буровой установки при случайной и попутной нагрузке, значительного потребления мощности при работе на малых режимах, статической ошибки, обусловленной взаимным влиянием контуров вращения и подачи бурового инструмента друг на друга при различной нагрузке на исполнительных гидродвигателях рекомендуется к применению гидромеханический регулятор мощности (рис. 6, а).

Регулятор мощности работает следующим образом: при отсутствии сигналов управления на электрогидрораспределителя 8 насос 1 выходит на минимальную производительность, контролируя с помощью гидроцилиндра 10 минимальный характерный рабочий объем насоса 1. Поршень цилиндра 11 при этом смещается в крайнее левое положение. Давление в системе поддерживается постоянным, на номинальном значении. При подаче сигналов управления на электрогидрораспределителя 8 вал гидромотора 3 через редуктор начинает вращать бур установки, а гидроцилиндр 4 осуществляет подачу бура. Потребление рабочей жидкости от насоса возрастает.

Регулирование мощности насоса 1 осуществляется бесступенчатым изменением его производительности пропорционально давлению нагрузки случайного или нестационарного характера на исполнительных гидродвигателях 3 и 4, подаваемого к гидроцилиндрам 10 и 11 механизма управления характерным рабочим объемом насоса. Рабочее давление, соответствующее действительным нагрузкам на гидромотор привода бура 3 и гидроцилиндр подачи 4, передается через гидроцилиндр 10 на коромысло 12 и на насос 1. Противодействующей силой пружины многопозиционного гидрораспределителя 13, настраиваемой извне, задается уровень мощности. Если сила действия давления превышает силу пружины, то поршень гидроцилиндра 10 плавно смещается в сторону уменьшения рабочего объема насоса. При этом увеличивается действующая длина рычага на коромысло 12, способствующего перемещению многопозиционного распределителя 13 и соединению поршневой полости гидроцилиндра 11 с линией слива. Это, в свою очередь, позволяет бесступенчато изменять рабочий объем насоса пропорционально давлению нагрузки случайного или нестационарного характера на исполнительных гидродвигателях 3 и 4, контролируя произведение величин давления за насосом и характерного объема насоса величиной постоянной, что позволяет регулятору обеспечивать постоянство потребляемого момента и потребляемой мощности.

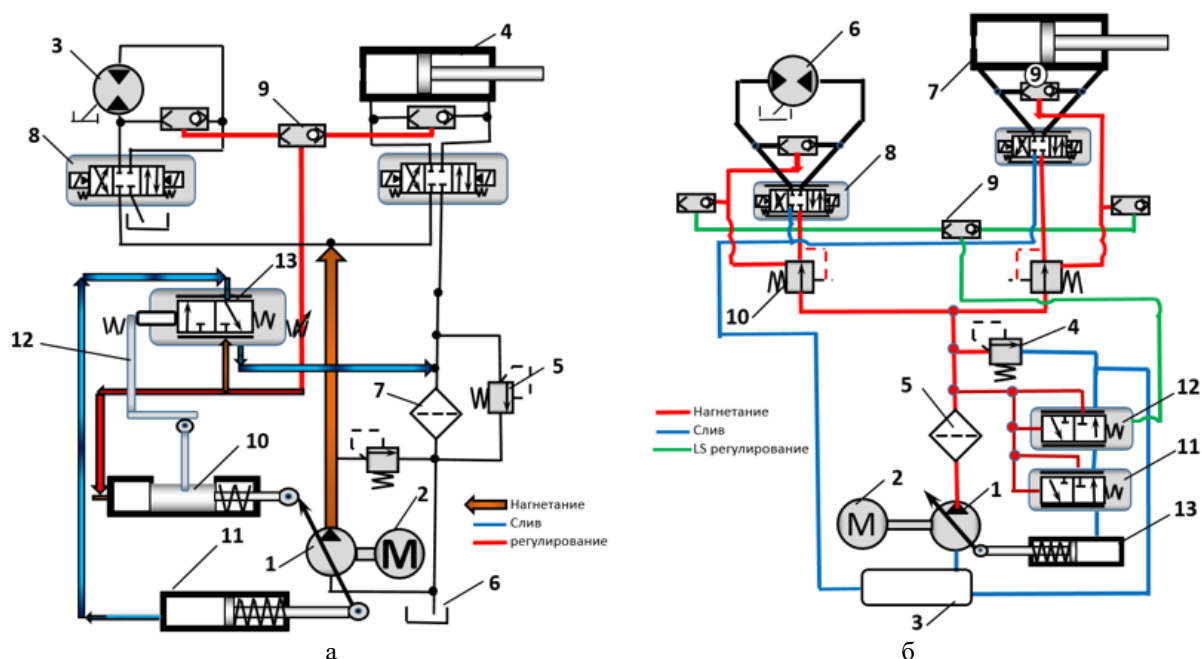


Рис. 6. Гидропривод буровой установки: а – с регулятором мощности: 1 – насос; 2 – ДВС; 3 – гидромотор; 4 – гидроцилиндр; 5 – клапан предохранительный; 6 – бак; 7 – фильтр; 8 – электрогидрораспределитель; 9 – клапан «или»; 10, 11 – гидроцилиндры; 12 – коромысло, 13 – гидрораспределитель; б – с LS-регулятором: 1 – насос; 2 – ДВС; 3 – бак; 4 – клапан предохранительный; 5 – фильтр; 6 – гидромотор; 7 – гидроцилиндр; 8 – электрогидрораспределитель; 9 – клапан «или»; 10 – клапан предохранительный; 11 – клапан; 12 – клапан компенсации давления; 13 – гидроцилиндр

Fig. 6. Hydraulic drive of the drilling rig: а is with power regulator: 1 is pump; 2 is ICE; 3 is hydraulic motor; 4 is hydraulic cylinder; 5 is safety valve; 6 is tank; 7 is filter; 8 is electrohydraulic distributor; 9 is shuttle valve; 10, 11 are hydraulic cylinders; 12 is rocker arm, 13 is hydraulic distributor; б is with LS - regulation: 1 is pump; 2 is ICE; 3 is tank; 4 is safety valve; 5 is filter; 6 is hydraulic motor; 7 is hydraulic cylinder; 8 is electrohydraulic distributor; 9 is shuttle valve; 10 is safety valve; 11 is valve; 12 is pressure compensation valve; 13 is hydraulic cylinder

В системе обеспечивается оптимальное потребление мощности на переходных режимах при случайной нагрузке и при работе в режиме «холостого хода» на минимальном потреблении мощности за счет регулирования насоса. Изменение давления в системе, вызванное неоднородностью грунта и, как следствие, изменением нагрузки запланированного или случайного характера, передается на гидроцилиндры гидромеханического регулятора мощности, которые изменяют характерный рабочий объем насоса, подстраиваясь под ситуацию и обеспечивая потребление мощности по оптимальной гиперболической зависимости.

Гидропривод буровой установки с LS-регулятором. Обеспечение нечувствительности к нагрузке гидропривода рабочего органа буровой машины, исключение взаимного влияния контуров гидропривода друг на друга, повышение КПД и устойчивости с сохранением массогабаритных характеристик достигается путём внедрения в гидропривод чувствительной к нагрузке системы регулирования (LS-регулятор).

Регулятор чувствительности по нагрузке (LS-регулятор) (рис. 6, б) способен корректировать рабо-

ту гидропривода рабочего органа буровой машины (скорость перемещения штока гидроцилиндра хода и частоту вращения гидромотора привода бура) в зависимости от различных видов нагрузок разной величины, действующих извне на рабочие органы буровой установки со стороны породы. В начальный момент времени при отсутствии сигналов управления на многопозиционные электрогидрораспределители 8 пружины выставляют золотники многопозиционных электрогидрораспределителей 8 в нейтральное положение. Но так как проходные сечения золотников закрыты, то связанное с этим повышение давления посредством воздействия на золотник клапана 11 перемещает его, подавая давление к поршню управляющего цилиндра 13 насоса 1 и выводит насос на минимальную производительность, а исполнительные гидродвигатели 6 и 7 не перемещаются.

Клапан компенсации давления 12 встроен в LS-систему управления. Когда давление на выходе насоса достигает значения, установленного клапаном компенсации давления 12, происходит уменьшение подачи насоса для ограничения давления в системе.

При подаче управляющего сигнала на многопозиционные электрогидрораспределители 8 их золотники перемещаются пропорционально входному сигналу и рабочая жидкость поступает в рабочие полости гидромотора привода бура 6 и гидроцилиндра подачи бура 7. При этом другие полости гидродвигателей соединяются со сливом. Давление после многопозиционных электрогидрораспределителей 8 определяется действующими на гидродвигатели (механически связанных с устройством бурения) нагрузками. Клапан постоянного перепада давления 10 фиксирует это изменение давления и открывается, пропуская расход и создавая давление, достаточное для преодоления внешней нагрузки. В результате открытия клапана 10 давление до него падает и поршень управляющего цилиндра регулятора 13 основного насоса 1 перемещается под действием пружины, рабочий объём насоса 1 увеличивается. Это приводит к увеличению перепада давлений на исполнительных гидродвигателях 6 и 7 и, соответственно, к увеличению частоты вращения гидромотора привода бура 6, а также скорости перемещения поршня гидроцилиндра подачи бура 7, что соответствует управляющему сигналу согласно программе управления. Номинальное давление в системе регулирования устанавливается в соответствии с текущей нагрузкой, для чего с помощью клапанов «или» 9 отбирается давление из наиболее нагруженного контура и сообщается на клапан компенсации давления 12 регулятора насоса 1. Регулятор выставляет давление питания гидродвигателей, достаточное для преодоления внешней нагрузки и обеспечивающее наилучшие энергетические характеристики.

Таким образом, предлагаемый гидромеханический регулятор с LS-регулированием позволяет улучшить устойчивость хода и энергетическую эффективность управления устройствами гидропривода рабочего органа буровой машины за счет исключения взаимного влияния гидравлических контуров друг на друга путем использования в гидроприводе чувствительной к нагрузке системы регулирования. Это позволяет обеспечить независимость работы привода при изменении нагрузки на гидродвигателях привода, необходимый индивидуальный расход и давление в гидроприводе.

Заключение

Совершенствование гидропривода рабочего органа буровой машины целесообразно направлять в развитие электрогидравлических систем управления приводом подачи и частотой вращения бурового инструмента. Для повышения точности, устойчивости, управляемости системы автоматического управления и регулирования гидропривода рабочего органа буровой машины желательно использовать гидромеханические регуляторы.

В качестве гидромеханических регуляторов, обладающих высокой надежностью и полностью авто-

матизированной работой, можно предложить регулятор давления, регулятор динамического давления, регулятор мощности и LS-регулятор. Это позволило сформировать структурную базу регуляторов гидропривода буровой установки для коррекции статических и динамических характеристик и подготовить основу для синтеза структуры регуляторов.

Определены факторы многокритериальных сигналов управления и компенсации внешних воздействий комбинированного типа и характер их влияния на формирование совокупных гидромеханических и электрогидравлических эффектов, осуществляющих коррекцию и регулирование статических и динамических характеристик гидропривода буровой машины.

Список источников

1. Yuanling Shi, Pingsong Zhang Modeling and Dynamic Performance Analysis of Hydraulic Top Drive Main Transmission System with Long Hydraulic Pipelines // Hindawi Geofluids Volume 2022, Article ID 1304176, 15 pages. DOI:10.1155/2022/1304176.
2. Mikhail Lemesko, Inessa Deyneka, Aleksey Iliev. Providing adaptive properties of the drive of a rotary drilling machine// MATEC Web of Conferences, 2020, 329, 03001, ICMTE 2020.
3. Vardhan, A. Comparison of the steady-state performance of hydrostatic drives used in the rotary head of the drill machine / A. Vardhan, K. Dasgupta, N. Kumar // J Braz Soc Mech Sci Eng 39:4403–4419.
4. Савченков К.А., Вербицкий С.В., Лобанов А.В. Мобильные ледостойкие буровые установки. Обзор мирового опыта // Труды Крыловского государственного НЦ. 2024. Т. 2, № 408. С. 157-168.
5. Ракуленко С.В., Дергачева Л.В., Грищенко В.И. Гидропривод рабочих движений мобильной буровой установки с функцией мониторинга технологического процесса бурения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. №1. С. 427-435.
6. Pershin V.A., Khinikadze T.A. Technique of functional unification of adaptive hydraulic drive module capable of load stabilization on the working body of mobile machines // Vestnik Don State Tech Univer. 2018, 18(3), pp. 318–325. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-3-318-325>.
7. Lemesshko M.A., Stradanchenko S.G., Iliev A.G. Study of adaptive hydraulic drive of rotary drilling machine// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2019, 680, 012006, DTS-2019.
8. Васильев В.Б., Муслимов А.П., Васильев В.А. Экспериментальное исследование автоматического регулятора расхода жидкости для гидравлической буровой машины // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2020. Т. 7. № 2. С. 130-133.
9. Адаптивный гидропривод с объемным регулированием подачи инструмента технологической машины / Сидоренко В.С., Грищенко В.И., Ракуленко С.В., Полешкин М.С. // Вестник Донского государственного технического университета. 2017. №2(89). С. 88-98.

10. Целищев В.А. Гидропривод квадрокоптера как объект регулирования // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2025. № 2. С. 6-25.
11. Petrov P.V., Tselishchev V.A., Kuderko D.A. Numerical study of nonlinear hydromechanical aircraft systems // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024. Т. 58. № 3. С. 917-922.
12. Петров П.В., Целищев В.А., Кудерко Д.А. Основные подходы и особенности проектирования гидромеханических систем управления самолёта // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2024. Т. 23. № 1. С. 67-79.
6. Pershin V.A., Khinikadze T.A. Technique of functional unification of adaptive hydraulic drive module capable of load stabilization on the working body of mobile machines. *Vestnik Don State Technical University*. 2018;18(3):318-325. doi:10.23947/1992-5980-2018-18-3-318-325
7. Lemeshko M.A., Stradanchenko S.G., Iliev A.G. Study of adaptive hydraulic drive of rotary drilling machine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;680. article 012006, DTS-2019.
8. Vasilev V.B., Muslimov A.P., Vasilev V.A. Experimental study of an automatic fluid flow regulator for a hydraulic drilling machine. *Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornykh nauk* [Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences]. 2020;7(2):130-133. (In Russ.)
9. Sidorenko V.S., Grishchenko V.I., Rakulenko S.V., Poleshkin M.S. Adaptive hydraulic drive with volumetric regulation of tool feed in a process machine. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Don State Technical University]. 2017;(2(89)):88-98. (In Russ.)
10. Tselishchev V.A. Hydraulic drive of a quadcopter as a control object. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk* [Crede Experto: Transport, Society, Education, Language]. 2025;(2):6-25. (In Russ.)
11. Petrov P.V., Tselishchev V.A., Kuderko D.A. Numerical study of nonlinear hydromechanical aircraft systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024;58(3):917-922.
12. Petrov P.V., Tselishchev V.A., Kuderko D.A. Main approaches and features of aircraft hydromechanical control system design. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aero-kosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering]. 2024;23(1):67-79. (In Russ.)

References

1. Shi Y., Zhang P. Modeling and dynamic performance analysis of hydraulic top drive main transmission system with long hydraulic pipelines. *Geofluids*. 2022;15. article ID 1304176 doi:10.1155/2022/1304176
2. Lemesko M., Deyneka I., Iliev A. Providing adaptive properties of the drive of a rotary drilling machine. *MATEC Web of Conferences*. 2020;329. article 03001, ICMTME.
3. Vardhan A., Dasgupta K., Kumar N. Comparison of the steady-state performance of hydrostatic drives used in the rotary head of the drill machine. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 2017;39:4403-4419.
4. Savchenkov K.A., Verbitskii S.V., Lobanov A.V. Mobile ice-resistant drilling rigs. Review of global experience. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Transactions of the Krylov State Research Centre]. 2024;2(408):157-168. (In Russ.)
5. Rakulenko S.V., Dergacheva L.V., Grishchenko V.I. Hydraulic drive of working motions of a mobile drilling rig with drilling process monitoring function. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Engineering Sciences]. 2024;(1):427-435. (In Russ.)

Поступила 25.11.2025; принята к публикации 16.04.2026; опубликована 30.06.2026
Submitted 25/11/2025; revised 16/04/2026; published 30/06/2026

Целищев Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор,
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: pgl.ugatu@mail.ru. ORCID 0009-0002-1329-0732

Целищев Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент,
Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.
Email: nuked@mail.ru. ORCID 0000-0001-5141-7904

Vladimir A. Tselishchev – DrSc (Eng.), Professor,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: pgl.ugatu@mail.ru. ORCID 0009-0002-1329-0732

Dmitry V. Tselishchev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia.
Email: nuked@mail.ru. ORCID 0000-0001-5141-7904