

УДК 626/423

ОСОБЕННОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОВОГО ГИДРОПРИВОДА СУДОХОДНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

© 2016 В.Н. Морозов¹, И.Л. Краснощеков¹, Д.Б. Красинский², Е.В. Мельников², В.В. Гнеденко³, И.Л. Павлович²

¹ ООО «Техтрансстрой», г. Самара

² Самарский университет

³ Самарский государственный экономический университет, г. Самара

Статья поступила в редакцию 27.11.2016

Разработан групповой гидропривод с автоматизированной системой частотно-дрессельного управления ворот шлюза судоходных гидротехнических сооружений при значительных массовых, гидродинамических и триботехнических нагрузках на штоки гидроцилиндров. Подтверждена работоспособность гидропривода с частотно-дрессельной системой управления по результатам успешных судопропусков в навигации 2013-2015 г. Предельные значения перекосов подъемно-опускных ворот при длине 30 метров составили не более 12 мм при допустимом значении 60 мм.

Ключевые слова: *групповой гидропривод; гидроцилиндр, автоматизированная система управления*

На судоходных гидротехнических сооружениях для перемещения ворот шлюзов шириной до 30 метров и массой до 300 тонн используются групповые объемные гидроприводы, содержащие два гидроцилиндра, подача и слив рабочей жидкости из которых осуществляется от самостоятельных насосных станций по гидролиниям большой длины [1]. На рис. 1 показан групповой гидропривод в составе верхних подъемно-опускных ворот судоходного шлюза. Это существенное отличие от известных групповых гидроприводов с централизованной насосной станцией, которые используются в гидротехнике, например, в устройствах маневровых затворов спиральных камер гидротурбины ГЭС и ГАЭС, при этом число гидроцилиндров в гидроприводе в различных конструкциях может варьироваться от 4 до 9, в разводных механизмах Санкт-Петербургских мостов, в специальных гидрофицированных мобильных и других машинах. Одно из общих современных направлений развития объемного группового гидропривода связано с бесступенчатым автоматизированным управлением скоростью движения выходного звена за счет изменения подачи рабочей жидкости в рабочие полости одного, нескольких или всех гидроцилиндров и достижением при этом синхронного движения штоков гидроцилиндров.

По результатам анализа патентных и технических материалов, проведенным экспериментальным исследованиям и полевым испытаниям применительно к групповому гидроприводе судоходных гидротехнических сооружений нами сделан вывод о целесообразном применении гидропривода с автоматизированным частотно-дрессельным управлением. Такой привод обладает повышенным диапазоном бесступенчатого регулирования скоростью движения выходного звена и лучшим быстродействием, обеспечивающих парирование различных по интенсивности внешних возмущений на гидросистему большой протяженности, исключение человеческого фактора. Однако при этом требуется специальный алгоритм управления, должна применяться автоматизированная система управления и соответствующие технические средства регулирования. Система должна реализовывать обратные связи по скорости и ускорению движения штоков гидроцилиндров, по давлению рабочей жидкости в напорных гидролиниях. Элементы, реализующие обратные связи, должны иметь быстродействие на несколько порядков большее, чем динамическая гидравлическая система. Проблемными вопросами остаются ресурс и живучесть группового гидропривода в штатных условиях эксплуатации.

Вывод о целесообразности применения группового гидропривода ворот с частотно-дрессельным управлением судоходных гидротехнических сооружений сделан исходя из следующих соображений. На ворота действуют значительные переменные гидродинамические нагрузки от воды и ветра, причем в разных ветровых районах России скорость ветра различна от 9,2 м/с для 1-го класса до 25,8 м/с для 6-го класса и более 25,8 м/с для 7-го класса. При этом может изменяться направление и величина воздействия на ворота и соответственно на привод ворот. Например, в направляющих опорах при перемещении подъемно-опускных ворот на разных их сторонах могут реализоваться

Морозов Виктор Николаевич, кандидат технических наук, доцент, генеральный директор. E-mail: ttstroy@tts63.ru
Краснощеков Игорь Леонидович, кандидат технических наук, главный инженер
Красинский Дмитрий Борисович, кандидат технических наук, заведующий НИЛ-57. E-mail: sstend@mail.ru
Мельников Евгений Владиславович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Гнеденко Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: gnedenko@mail.ru
Павлович Игорь Львович, ведущий инженер технолог

разные значения сил трения. Из-за ударных и пульсационных нагрузок на ворота шлюза, а затем и на штоки гидроцилиндров гидропривода при различных режимах эксплуатации в рабочей жидкости может измениться содержание свободного газа, что приведет к изменению ее модуля упругости и соответственно жесткости системы. Из-за пульсационных и вибрационных нагрузок изменяется гидравлическое сопротивление напорных и сливных гидролиний и т.д. Все это приводит к увеличению времени перемещения ворот из-за

возникающих перекосов и угловых смещений, снижению надежности элементов гидропривода, например, подвижных и неподвижных уплотнений, росту затрат на техническое обслуживание и ремонт. Увеличение времени перемещения ворот при выполнении технологических операций судопропуска приводит также к значительным экономическим потерям транспортного флота. Обмеление рек усложняет эти проблемы, так как из-за недогруза судов может увеличиться необходимое количество судопропусков.



Рис. 1. Групповой гидропривод в составе верхних подъемно-опускных ворот судоходного шлюза

При эксплуатации гидроприводов гидротехнических сооружений необходимо обеспечить также заданные динамические характеристики по давлению рабочей жидкости в напорных гидролиниях при различных скоростях перемещения подъемно-опускных ворот в диапазоне $0,1 \div 4,0$ м/мин, и синхронности перемещения их сторон (перекос не более 60 мм при длине ворот 30 м). Для нижних двустворчатых ворот необходимо обеспечить синхронность перемещения створок с их угловым перекосом не более 0,2 градуса.

Другая особенность гидропривода ворот судоходного шлюза – индивидуальное производство крупногабаритного оборудования большой массы, окончательная сборка, монтаж, обкатка, предварительные и приемочные испытания которого проводятся в полевых условиях на шлюзе. При этом величина нагрузки и ее характер не контролируются. Отсутствуют статистические данные для расчета показателей надежности. По среднестатистическим данным диапазон разброса интенсивности отказов элементов, приведенных в справочной и технической документации, достаточно большой. Например, интенсивность отказа подвижных уплотнений при различных режимах работы от $0,11 \times 10^{-6}$ 1/час до $0,92 \times 10^{-6}$ 1/час, применительно к гидроприводу мобильных строительно-дорожных машин именно из-за подвижных

уплотнений происходит до 60% всех отказов гидропривода, причем большая часть отказов связана с процессом изнашивания. Оработка конструкции гидропривода судоходного шлюза, в том числе его системы управления выполняется в процессе эксплуатации экспериментальных и опытных образцов на шлюзе с существенными дополнительными финансовыми затратами. При эксплуатации применяется сложная и затратная система планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта. Нелинейные математические модели в задачах динамического расчета привода, которые включают уравнения неразрывности потоков жидкости, расходов через управляющие элементы, уравнения сил, приложенных к штоку, уравнения обратных связей и др., после линеаризации для исследования устойчивости системы и определения оптимальных сочетаний и числовых значений коэффициентов обратных связей мало достоверны. Так, уравнение неразрывности потока жидкости для напорной гидролинии должно включать подачу насоса с учетом переменных утечек из-за износа уплотнений, изменения давления и частоты вращения вала объемного насоса, расход через рабочее окно золотника регулируемого дросселя, утечки в гидроцилиндрах из-за износа уплотнений. Уравнение сил должно учитывать изменение потерь давления в гидролиниях и другие потери.

Конструктивное исполнение гидропривода с частотно-дроссельным управлением многовариантное. Например, применительно к требованию автоматизированного управления может быть использована система, содержащая несколько нерегулируемых насосов типа НШ, приводные электродвигатели которых каждый питается от собственного частотного регулятора. В гидравлической системе могут быть установлены несколько дросселей, работающих в релейном режиме или электроуправляемый пропорциональный регулятор расхода. Гидропривод может быть выполнен с параметрической, комбинированной или другой надстройками и т.д. Возможны другие конструктивные исполнения. Однако на этапе проектирования всегда существует конструкционный риск, который потребует дополнительного времени и затрат на достижение требуемых показателей.

В рамках выполнения государственного контракта по шлюзу №26 Балаковского РГСиС ФБУ «Администрация Волжского бассейна» в ООО «Техтрансстрой» разработан при максимальном использовании гидроагрегатов действующего гидропривода инновационный проект группового гидропривода, реализующий автоматизированную частотно-дроссельную систему управления с обратной связью по скорости и синхронизации гидроцилиндров (патент РФ на изобретение №2503858, 2014 [2]), при этом управляющий сигнал от контроллера поступает на частотный преобразователь приводного асинхронного электродвигателя объемного нерегулируемого насоса или электропривод пропорционального регулятора расхода (пропорциональный дроссель), либо на оба сразу в зависимости от сигнала обратной связи. По программе автоматически изменяется также скорость движения ворот. Изготовленный экспериментальный образец этого гидропривода прошел успешно полевые испытания в составе шлюза № 26 в навигации 2013-2016 гг. Установлено, что перекоп ворот при таком способе управления уменьшается по сравнению с действующей дроссельной системой управления в 5-6 раз, а величина амплитуды давления рабочей жидкости в напорной гидролинии снижается на величину от 2 до 3 раз.

Конструкция гидропривода предусматривает возможность перехода к прогрессивной системе обслуживания по техническому состоянию, позволяющей повысить эффективность эксплуатации за счет снижения затрат на монтаж и демонтаж крупногабаритных агрегатов большой массы, их дефектацию и диагностику. С этой целью в системе управления предусмотрены такие функции, как контроль и математическая обработка статистических данных по времени хода штоков, отклонений от номинальных значений частоты питающего напряжения, величины управляющих сигналов на регуляторы расхода и других при каждой технологической операции судопропуска, анализ их состояния и прогнозирование. При этом до предотказного состояния в качестве критерия предлагается использовать время прохождения рабочей хода поршня гидроцилиндра под нагрузкой. Этот критерий при заданных геометрических

размерах и функциональных показателях (давление и температура рабочей жидкости) определяет объемный КПД гидропривода. Система такой оценки входит в комплексную систему встроенной диагностики по вибрационным показателям, давлению и температуре рабочей жидкости и др. Лабораторные исследования надежности гидропривода с частотно-дроссельной системой управления при переменных циклических нагрузках на шток гидроцилиндра по предлагаемому критерию были выполнены на моделирующем комплексе 100-КЭ Самарского государственного национального исследовательского университета. Комплекс обеспечивает решение сложной технической задачи получения внешних переменных нагрузок большой мощности на штоке рабочего гидроцилиндра за счет его поворота относительно нагрузочного цилиндра. Конструкция комплекса защищена патентами на полезную модель РФ №117541 [3] и №165044 [4]. Патентами РФ на изобретение защищена система поддержания параметров рабочей жидкости по содержанию в ней свободного газа (Патент РФ на изобретение, №2570668, 2015 г.), а так же способ ее контроля (Заявка РФ на изобретение №2015 119305, от 21.05.2015 г.).

При синтезе передаточной функции регулятора замкнутого контура стабилизации скорости для каждой из сторон верхних рабочих подъемно-опускных ворот был предварительно проведен спектральный анализ сигнала положения контролируемого края ворот. Из полученных значений хорошо виден колебательный характер движения.

Для точного анализа частоты гармонической составляющей сигнала перемещения спектр сигнала был построен после вычета из него постоянно возрастающей компоненты. Амплитуда сигнала измерялась в импульсах энкодера; один импульс соответствует 0,1 мм. Сигналу присущи гармонические составляющие на частотах 2,5 и 5 Гц, обусловленные свойствами гидросистемы, конструкцией насоса и частотой вращения электродвигателя $n=980$ мин⁻¹. Если сигнал с такой спектральной характеристикой использовать для формирования управляющего воздействия, то преобразователь частоты, отрабатывая помеху, будет постоянно изменять частоту вращения насоса. Частые резкие изменения частот вращения приводят к снижению ресурса электродвигателя и насоса, поэтому при выборе структуры регулятора с передаточной функцией и его последующей настройке был применен подход, позволяющий исключить или максимально уменьшить влияние гармонических составляющих помехи на управляющее воздействие.

По результатам анализа передаточная функция регулятора была рассчитана таким образом, чтобы обеспечить минимум дисперсии ошибки. Это позволило существенно снизить влияние гармонической составляющей. Согласно спектру сигнала управляющего воздействия на выходе преобразователя частоты (мин⁻¹) при подъеме ВРВ с постоянной скоростью в состав сигнала не входят гармонические составляющие с частотами 2,5 и 5 Гц, что подтверждает правильность синтеза регулятора.

Синтезированный регулятор обеспечивает минимальное влияние неравномерности перемещения ворот на изменение режима работы электропривода, что способствует увеличению ресурса электрогидравлического оборудования. Работа системы регулирования может быть улучшена, если применить комбинированный частотно-дроссельный способ управления гидроприводами ВРВ. Для синхронизации перемещения ВРВ при опускании используются пропорциональные дроссели, обладающие высокими динамическими характеристиками, что позволяет использовать их для отработки гармонических помех, снижая тем самым нагрузку на электропривод насосов.

Разработанная система гидроприводов крупногабаритных подвижных объектов совместима с существующей штатной системой гидроприводов шлюза, что дало возможность оценить показатели качества и его уровень. При этом проводятся одновременно контроль и управление скоростью и перекосом ВРВ, уровнем пульсации давления рабочей жидкости в гидросистеме, величиной гидроудара и др., с возможностью перевода их в относительные величины т.е. перевода этих показателей качества в показатели уровня качества [5]. Это позволяет прогнозировать: технический уровень гидропривода; направления повышения качества существующих и новых видов гидроприводов; проводить оптимизацию конструкции лучших образцов.

Выводы: разработан групповой гидропривод с автоматизированной системой частотно-дроссельного управления ворот шлюза судоходных

гидротехнических сооружений при значительных массовых, гидродинамических и триботехнических нагрузках на штоки гидроцилиндров. Подтверждена работоспособность гидропривода с частотно-дроссельной системой управления по результатам успешных судопропусков в навигации 2013-2015г. Предельные значения перекосов подъемно-опускных ворот при длине 30 метров составили не более 12 мм при допустимом значении 60 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Морозов, В.Н. Особенности технологических испытаний гидроприводов судоходных гидротехнических сооружений / В.Н. Морозов, И.Л. Краснощекоев, Л.А. Павлович и др. // Вестник машиностроения. 2014. №4. С. 10-13.
2. Пат. 2503858 Рос. Федерация: МПК F15 B9/09. Способ регулирования скорости объемного гидропривода с комбинированной частотно-дроссельной системой управления при пуске под нагрузкой.
3. Пат. на полезную модель 117541 Рос. Федерация: МПК F15 B19/00. Стенд для динамических испытаний цилиндров.
4. Пат. на полезную модель 165044 Рос. Федерация: МПК F15 B19/00. Стенд для динамических испытаний цилиндров
5. Морозов, В.Н. О некоторых итогах опытной эксплуатации электрогидравлического привода подъемно-опускных ворот с комбинированной системой управления на Балаковском шлюзе №25-26 Саратовского гидроузла / В.Н. Морозов, И.Л. Краснощекоев, Д.Б. Красинский // Гидротехника. XXI век. 2013. №4(16). С. 56-61.

FEATURES OF CONTROL SYSTEM UPGRADE OF THE GROUP HYDRAULIC DRIVE OF NAVIGABLE HYDROTECHNICAL FACILITIES

© 2016 V.N. Morozov¹, I.L. Krasnoshchekov¹, D.B. Krasinskiy², E.V. Melnikov², V.V. Gnedenko³, I.L. Pavlovich²

¹JSC "Tehtransstroy", Samara

²Samara University

³Samara State Economic University, Samara

The group hydraulic drive with automated system of frequency-throttle control of gateway of navigable hydrotechnical facilities in case of considerable mass, hydrodynamic and tribotechnical loads of rods of hydraulic cylinders is developed. Operability of hydraulic drive with frequency and throttle control system by results of successful code proposed navigation in 2013-2015 is confirmed. Extreme values of distortions of lifting and lowering gate with a length of 30 meters made no more than 12 mm in case of admissible value of 60 mm.

Key words: group hydraulic drive, hydraulic cylinder, automated control system

Viktor Morozov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, General Director. E-mail: ttstroy@tts63.ru

Igor Krasnoshchekov, Candidate of Technical Sciences, Chief Engineer

Dmitriy Krasinskiy, Candidate of Technical Sciences, Chief of the SRL-57. E-mail: sstend@mail.ru

Evgeniy Melnikov, Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow

Vladimir Gnedenko, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: gnedenko@mail.ru

Igor Pavlovich, Leading Engineer-Technologist