

ЦИФРОВЫЕ ДВУХПОЗИЦИОННЫЕ ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛИ — КРАТКИЙ ОБЗОР

Тлеуленов Б.К., Кольга А.Д.

Уральский государственный аграрный университет,
Екатеринбург, Россия

ololo2016lol@yandex.ru kad-55@yandex.ru

Аннотация. В статье произведён краткий обзор существующих и перспективных способов применения двухпозиционных двухлинейных клапанов для управления потоками в гидравлических системах. Было проведено небольшое количество исследований по проектированию, разработке, моделированию и моделированию цифровых гидравлических клапанов для обеспечения высокой производительности и экономии энергии, особенно для низкоскоростных систем с высокой точностью. Многие исследователи сообщали об энергоэффективности, лучшем управлении положением и скоростью при помощи цифровых клапанов.

Ключевые слова: цифровой клапан, моделирование, внешний контур, давление, гидравлика, замкнутый контур, энергоэффективность.

DIGITAL TWO-POSITION HYDRAULIC VALVES – A BRIEF REVIEW

Tleulenov B.K., Kolga A.D.

Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

Annotation. This article provides a brief overview of current and future applications of on-off two-way valves for flow control in hydraulic systems. A small amount of research has been done on the design, development, modeling and simulation of digital hydraulic valves to ensure high performance and energy savings, especially for low speed systems with high accuracy. Many researchers have reported energy efficiency, better position and speed control with digital valves.

Keywords: digital valve, simulation, external circuit, pressure, hydraulics, closed circuit, energy efficiency.

В настоящее время гидравлический привод используется в очень широком диапазоне агрегатов. Но в том числе из-за габаритов управляющей аппаратуры невозможно применение этого вида привода в машинах малой и средней мощности, где габариты играют немаловажную роль при проектировании.

Цифровая гидравлика — недавно разработанная замена традиционному управлению с помощью сервоприводов или пропорциональных клапанов в

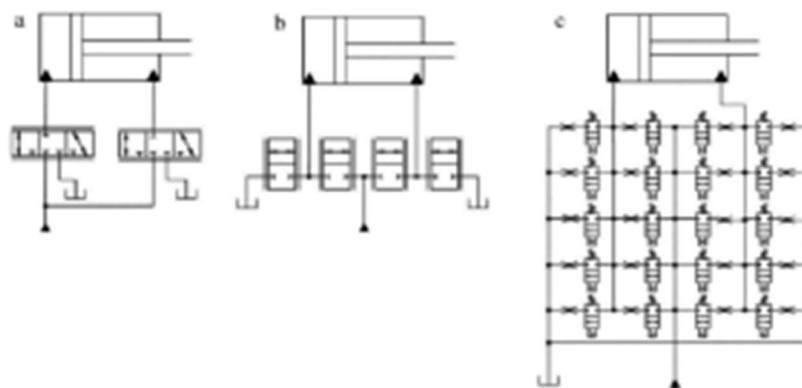
гидравлических системах управления. Развитие области цифровой гидравлики стало возможным благодаря технологическим достижениям в области электроники. В настоящее время цифровая гидравлика предлагает более простые устройства с менее жесткими требованиями, чем у сервоклапанов, с более высокой надежностью и энергоэффективностью. Цифровые гидравлические системы были разработаны в течение последнего десятилетия. Цифровые гидравлические системы используются в таких системах, как настраиваемое управление движением с внешним контуром и управление давлением с обратной связью. Цифровые гидравлические клапаны в этих системах могут обеспечить открытую архитектуру. С этими клапанными системами наблюдается высокая производительность управления с хорошей энергоэффективностью. Преимущество таких систем заключается в том, что мы можем использовать двухпозиционные клапаны вместо сервоклапанов или пропорциональных клапанов, где критически важны проблемы движения и управления. Цифровая гидравлика [1] определяется активным управлением выходами системы гидравлического компонента (распределитель, насос, исполнительный механизм). Цифровая гидравлика не ограничивается цифровым управлением аналоговыми компонентами, а основана на интеллектуальном управлении с использованием сигналов ШИМ (широтно-импульсная модуляция) и получения регулировок расхода и скорости с использованием двухпозиционного распределителя, закодированного либо ИЧМ (модуляция числа импульсов), либо ИКМ (импульсно-кодовая модуляция).

Цифровые клапаны позволяют потоку гидравлической жидкости перемещать элементы машины в правильное положение, а затем контролировать давление, применяемое для точного управления конкретным процессом. Цифровые клапаны упрощают архитектуру системы, объединяя функции, обычно выполняемые пропорциональными или сервоклапанами, в группу двухпозиционных клапанов. Простые двухпозиционные клапаны произвели революцию в мире гидравлики. Согласно источникам [2], интеллектуальные цифровые системы на основе этих клапанов обеспечивают значительно улучшенное время отклика и надежность по сравнению с традиционной технологией измерения нагрузки, а также значительную экономию энергии.

Новшеством в применении цифровых принципов к гидравлике является использование двухпозиционных клапанов, управляемых с помощью программного обеспечения, а не пропорциональных распределителей или сервоклапанов. В результате этой новаторской работы параллельно соединенные двухпозиционные клапаны могут заменить обычные сервоклапаны и пропорциональные клапаны. Примером продукта, демонстрирующего вышеперечисленные принципы, является погрузчик, разработанный в ИНА,

работающий на цифровой гидравлике. У них есть и другие преимущества, такие как скорость, долговечность и возможность работы в грязных средах по сравнению с обычной гидравликой. Техническое обслуживание и поломки минимальны из-за параллельного подключения большого количества клапанов. Несмотря на увеличение вычислительной мощности из-за увеличения количества клапанов, такие системы могут быть актуальны для повышения производительности, экономии энергии и сокращения затрат за счет использования более дешевых клапанов. Это может привести к сокращению потерь почти на 70%.

Концепция, используемая в технологии цифровых клапанов, заключается в том, что используются не только двухпозиционные клапаны, но они миниатюризированы и имеют одинаковый размер [2]. Авторы этой работы разработали клапан небольшого размера с отверстием или внутренним каналом диаметром 0,7 мм. Поскольку клапанов может быть много в блоке цифровых клапанов, вышеупомянутые исследователи разработали подходящий коллектор для размещения 16 прототипов клапанов. Чтобы создать цифровую систему кодирования, основанную на количестве клапанов, авторы работы разработали числоимпульсную модуляцию, выходной сигнал которой пропорционален количеству клапанов [3]. Ниже представлены три этапа эволюции системы цифровых клапанов.



а) система с трёхходовым пропорциональным распределителем; б) система с четырьмя двухпозиционными клапанами; в) система с цифровыми двухходовыми клапанами

Рисунок 12 – Три этапа эволюции системы цифровых клапанов

Рисунок 1-а и рисунок 1-б представляют собой клапаны традиционного типа (пропорционального управления), которые обычно используются для управления срабатыванием. На рисунке 1-с показано решение с цифровым клапаном, которое является энергосберегающей и быстродействующей системой.

Карвонен [4] поддержал философию цифровой системы управления гидравлической мощностью, чтобы минимизировать потери, возникающие в традиционных гидравлических системах. Авторы разработали такую систему, способную обслуживать множество приводов при оптимальном давлении подачи и управлять входами, чтобы обеспечить подходящие выходные потоки с минимальными потерями. Параллельно разработал двухпозиционные клапаны, обладающие хорошими характеристиками и обеспечивающие экономию энергии. Также в своей последней работе он пришёл к выводу, что уменьшение размеров таких клапанов помогает реализовать клапаны одинакового размера, что приводит к цифровым блокам управления потоком. Ещё одно важное открытие заключается в том, что метод широтно-импульсной модуляции для управления клапанами использует меньшее количество клапанов по сравнению с импульсно-кодовой модуляцией. Но авторы [5,6] также обнаружили, что этот метод, хотя и экономически выгодный, создает шум из-за быстрого переключения. Авторы предложили использовать насечки на корпусе клапана, чтобы уменьшить это возмущение.

Ещё одним аспектом является система управления, которая считается оптимальной для работы с цифровыми гидравлическими системами. Исследователи [6] изучили различные методы управления, которые использовались в цифровом управлении гидравликой в прошлом, и в результате своих исследований предложили применение системы частотно-импульсного управления для гидравлического привода вместо обычной системы широтно-импульсной модуляции. Они смоделировали поведение динамического отклика таких систем, чтобы изучить систему, поскольку управляющий отклик для системы управления частотой импульсов ограничен из-за фиксированного количества импульсов и максимальной частоты повторения.

Хотя использование двухпозиционных клапанов обычно считается цифровой гидравликой, но исследователи [7] показали, что цифровой привод со встроенным многокамерным гидравлическим цилиндром с шестнадцатью поршневыми зонами (регулируемыми поршневыми зонами) не приводит к потерям потока при использовании постоянного давления подачи. Также изучили перспективы цифровой системы управления гидравлической передачи на основе цифровой системы насос-двигатель с несколькими выходами для повышения энергоэффективности. Они вышли за рамки технологии цифровых клапанов в гидравлике. Также они работали над гибридной насосной системой, содержащей тарельчатые клапаны, активно управляющие каждым цилиндром. Это включает или отключает приводы в зависимости от последовательности ходов. Они смоделировали систему при различных требованиях и различной скорости для различных управляющих воздействий. Итак, в связи с этим авторы

разработали гидрпереключающий преобразователь и сравнили его с пропорциональным гидрораспределителем для схемы на основе аккумулятора по потреблению энергии.

Характеристики двухпозиционного цифрового клапана

Другие исследователи обнаружили, что проблема цифрового управления клапанами заключается в том, что при низких скоростях системы точное управление затруднено, поскольку используются клапаны двухпозиционного типа и подаются сигналы импульсного типа. Их результаты показали, что числоимпульсная модуляция является лучшим решением для отслеживания количества клапанов на низких скоростях, одним из методов является увеличение количества клапанов. Недостаток, наблюдаемый в их работе, заключается в том, что уменьшается ошибка позиционирования при низких скоростях, но с колебаниями, приводящими к резонансу в системе.

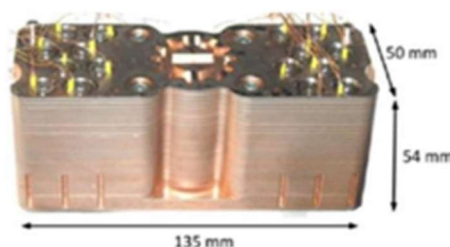


Рисунок 13 – Прототип цифрового клапана

В свою очередь учёные разработали прототип клапана для компактной системы клапанов с одинаковым ходом. Разработанный ими прототип содержит 16 двухпозиционных клапанов. Клапаны этого типа, расположенные вместе, помогают создавать управляемые потоки и могут управлять приводами с быстрым переключением, используя клапаны двухпозиционного типа, которые соединены параллельно. Это обеспечивает возможность подачи большого количества потоков, а также быстрое переключение с разрешения на запрещение потока в конкретный исполнительный механизм.

В своей системе отслеживания положения авторы [8], используя параллельные двухпозиционные клапаны, добились ступенчатого управления потоком с помощью серии из четырех клапанов с импульсно-кодовой модуляцией. Они продемонстрировали, что управляемость может быть улучшена при низких скоростях, позволяя трем или четырем сериям клапанов быть открытыми одновременно, а не течь от входа к выходу и обратно несколько раз.

Другие исследователи [9] в последних разработках в области цифровых технологий управления клапанами показали, что вместо метода широко-

импульсной модуляции (который использует ширину импульса в качестве управления) они применили частотно-импульсное управление (повторение импульсов). частоты) в качестве входа в гидропривод. Работа, сделанная учёными, выражает тот факт, что поведение двухпозиционных клапанов известно как полностью открытое или полностью закрытое, поэтому не может быть «нечеткости» в отношении характера выхода таких клапанов. Также переключение с открытого на закрытое или закрытое положение происходит быстро. Этот тип управления используется для управления гидравлическими приводами с параллельно подключенными системами клапанов. Если индивидуальные характеристики клапанов предсказуемы, управление такими клапанами упрощается, поскольку пропускная способность калибруется экспоненциально от двух.

Клапаны этого типа, расположенные вместе, помогают создавать управляемые потоки и могут управлять приводами с быстрым переключением, используя клапаны двухпозиционного типа, которые соединены параллельно. Это обеспечивает большое количество потоков, а также быстрое переключение с разрешения на запрет потока в конкретный привод. Авторы подчеркнули тот факт, что цифровая гидравлика постепенно приходит к технологии цифровых клапанов, которая способна работать как с большими расходами, так и с высокой скоростью переключения. Стратегия управления была хорошо рассмотрена для цифрового клапана. Авторы в своей исследовательской работе указали, что практически возможно переключение цифрового гидравлического клапана с большим расходом на частоте 100 Гц. Таким образом, чтобы последовательно проверить концепцию, авторы создали модель клапана с ПИД-регулятором (пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор), настроенным на эмпирическую стабилизацию клапана, и сравнили смоделированные и измеренные результаты. Предлагаемая модель клапана указана ниже в виде блок-схемы. Пример графика показан на рис. 4 [10].

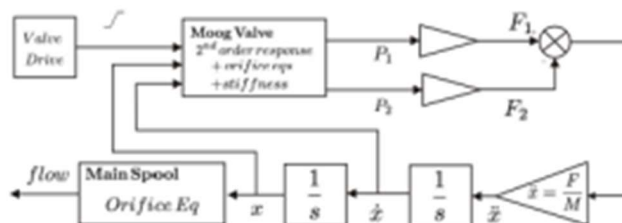


Рисунок 3 – Модель цифрового золотника клапана

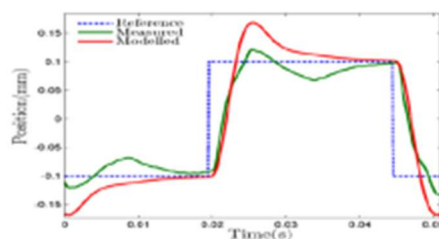


Рисунок 4 – Отклонение между смоделированным и измеренным выходом ПИД-регулятора

На рис.3 показано отклонение между смоделированным и измеренным выходом системы на частоте 20 Гц с ПИД-регулированием.

Исследования характеристик двухпозиционных клапанов показывают, что при малых скоростях возможно точное управление импульсными сигналами. Также они предположили, что при низких скоростях путем последовательного объединения клапанов достигается лучшее управление. Другим важным вкладом некоторых исследователей было то, что, зная характеристики таких двухпозиционных клапанов, лучшее управление клапанами достигается за счет резкого изменения положения с включенного на закрытое или наоборот.

Авторы [11] в своей исследовательской работе по цифровым гидравлическим системам установили тот факт, что в цифровых гидравлических системах время переключения клапанов изменяется обратно пропорционально скорости вращения систем мотор-насос. Они разработали рабочую модель вышеперечисленного с временем переключения 3 мс для закрытия и 4,5 мс для срабатывания двухпозиционных клапанов. Время 4,5 мс является входом, обеспечивающим рабочие силы для перемещения груза.

Моделирование двухпозиционного клапана

В своей статье [3] исследователи разработали модель потока, которая представляет характеристики потока при различной геометрии отверстия клапана. Обычно при моделировании любой системы следует учитывать все входные данные и характеристики компонентов. Но авторы не рассматривали влияние вязкости на расход, изменение критического отношения давлений, разность притока и оттока, число Рейнольдса и массовый расход. Следовательно, модель, разработанная ими как модель клапана, не очень хорошо подходит.

Другие исследователи [12] в своей статье смоделировали переключающие клапаны для изучения и анализа поведения. В статье обсуждается технология, разработанная для характеристики таких клапанов, исследования их динамического поведения и анализа клапана. Описаны и обсуждены различные режимы работы, когда применяются сигналы управления быстрым

переключением. Сравнительное исследование модели при моделировании с обратной связью проводится с современными моделями. Авторы сообщили в своей статье, что получить разумную точность модели сложно из-за быстрого переключения клапанов. Следовательно, они предложили модель поведения клапана с оптимальной точностью.

Другие авторы [10] в своей статье о высокоскоростном двухпозиционном клапане говорили о ротационном одноступенчатом быстродействующем цифровом клапане. Обычно клапаны поворотного типа редко используются в гидравлических системах. Но в некоторых системах при использовании управления такими клапанами дает переходные характеристики. Это может создать пиковые давления и выбросы, приводящие к резонансу, который необходимо демпфировать.

Работа некоторых других авторов [13] по моделированию электромагнитных приводов выполнена как сравнение аналитического и конечно-элементного моделирования. Широко известно, что клапаны постоянного тока имеют ступенчатые входы двухпозиционного типа и приводятся в действие электромагнитным способом. Хотя исследователи разработали математические модели, основанные на аналитическом и численном конечном методе, считается, что должна быть разработана полная мультифизическая модель электромагнитного привода, состоящая из электрического, магнитного и механического доменов. Это даст полные характеристики электромагнитного золотника или исполнительного механизма, включая переходную реакцию золотника клапана на входной сигнал из-за быстрого открытия и закрытия клапана.

В еще одной работе [14], исследователями двухпозиционного цифрового клапана приоритетного типа была разработана модель с использованием программного обеспечения AMESIM для изучения характеристик пропорциональных регулирующих клапанов, использующих ШИМ-управление (Широтно-импульсная модуляция). Результаты показали, что открытие клапана, т. е. время, необходимое для открытия золотника клапана, имеет тенденцию к увеличению с коэффициентом заполнения сигнала входного напряжения на золотник. Другими словами, это означает, что смещение основного золотника прямо пропорционально числу циклов ШИМ-сигнала. Но для изучения работы клапана смещение золотника было аппроксимировано линейным движением во времени, пропорциональным входному сигналу. Но в практической ситуации это может быть не совсем так, поэтому для более четкого понимания характеристик

клапана необходимо будет смоделировать реальную ситуацию мультифизики с такими эффектами, как заклинивание, гистерезис и т. д.

Оптимизация управления цифрового клапана

Авторы [15] в своей работе над оптимальными системами управления разработали отказоустойчивую систему для тестирования контроллера, используемого для набора клапанов, параллельно управляющих исполнительным механизмом. Идея состоит в том, чтобы протестировать контроллер, известный как оптимальный контроллер, который в случае неисправности может использовать альтернативный безопасный контроллер для тестирования системы. Такие оптимальные контроллеры предназначены для минимизации мощности и ошибки слежения. На макете ниже показана схема контроллеров. Учёные утверждают, что переключение между оптимальным и безопасным регулятором при движении исполнительного механизма не дает резкого изменения ступенчатых входных командных сигналов. Но при реализации в реальной экспериментальной установке могут произойти изменения в командных сигналах и желаемом ответе.

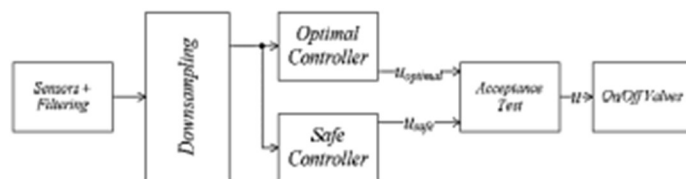


Рисунок 5 – Блок-схема стратегии управления отказоустойчивостью

Другие исследователи [3] со своей мехатронной конструкцией микроцифровых гидравлических клапанов смоделировали двухпозиционные клапаны для прогнозирования их работы. Сложность прогнозирования их работы связана с быстрым переключением с полностью открытого на полностью закрытое. Промежуточного положения нет. Также поток из-за большого объема жидкости внезапно останавливается. Это может привести к эффекту гидравлического удара, который будет сложно реализовать в модели. Авторы добились достаточной точности в прогнозировании характеристик потока различных двухпозиционных клапанов с различными комбинациями клапанов и отверстий. Также при моделировании нужно учитывать число Рейнольдса, объемные скорости потока, чтобы включить вязкость, изменение отношения критического давления и т. д.

Выводы

Текущие исследования в области цифровой гидравлики сосредоточены на системах управления, характеристиках двухпозиционных клапанов и

оптимизации контроллеров двухпозиционных клапанов. Результаты, полученные из обзоров, расходятся:

а) Важный вывод, сделанный из вышеупомянутых обзорных документов, заключается в том, что при низких скоростях, поскольку управление клапанами двухпозиционного типа затруднено, РНМ (импульсно-числовая модуляция) является лучшим вариантом управления, чем тип управления ШИМ (широтно-импульсная модуляция). Это также означает, что если характеристики клапана правильно спрогнозированы, то можно получить контролируемую производительность.

б) Так как происходит внезапное закрытие и открытие клапанов, возникают переходные давления, приводящие к резонансу, который может нуждаться в демпфировании.

в) Многофазное моделирование зоны нечувствительности, гистерезиса и т. д. в клапанах необходимо для обеспечения надлежащей работы клапана.

г) Для разработки отказоустойчивых контроллеров необходимы экспериментальные установки для проверки идеи минимизации мощности и ошибок отслеживания.

д) Наконец, при моделировании характеристик двухпозиционных клапанов необходимо учитывать число Рейнольдса, объемные скорости притока и оттока с точки зрения влияния вязкости и изменения отношения критического давления.

Библиографический список

1. Друмеа, Петрин, Раду Рэдой, Богдан Тудор и Иларе Бордяшу. Цифровые гидравлические решения // Материалы международной конференции Hervex 2016 по гидравлике и пневматике – Румыния, 2016. С.16 - 19.
2. Ehsan Md, Rampen HS, Salter SH, Modeling of Digital-Displacement Pump-Motors and Their Application as Hydraulic Drives for None uniform Loads, Transactions of the ASME, 2000, 122.
3. Paloniitty M, Linjama M, Huhtala K, Equal Coded Digital Hydraulic Valve System – Improving Tracking Control with Pulse Frequency Modulation, Procedia Engineering, 106, 2015, 83 – 91.
4. Linjama M, Huova M and Karvonen M, Modelling of Flow Characteristics of On/Off Valves, Proceedings of the Fifth Workshop on Digital Fluid Power, 2012.
5. Karvonen M, Mikko Heikkila, Mikko Huova, Matti Linjama, Analysis by simulation of Different control algorithms of a digital hydraulic two actuator system, International Journal of Fluid Power, 1 (15), 2014, 33-44.

6. Plockinger M, Huova and Scheid R, Simulation and Experimental Results of PWM Control for Digital Hydraulics, in Proceedings of The Fifth Workshop on Digital Fluid Power, Tampere, 2012
7. Linjama M, Huova M, Bostrom P, Laamanen A, Siivonen L, Morel L, Waldén M and Vilenius M, Design and Implementation of Energy Saving Digital Hydraulic Control System, Proceedings of 10th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP, 2007.
8. Heikkila M, Matti Linjama, Displacement control of a mobile crane using a digital hydraulic power management system, *Mechatronics*, 23, 2013, 452–461.
9. Linjama M, Matti Vilenius, Digital Hydraulics-Towards Perfect Valve Technology, *Digitalna Hidravlika, Ventil*, 14 (2), 2008.
10. Gradl and Scheidl R, A pulse-frequency controlled hydraulic drive for the elastic deformation of a structure, in 9th IFK Conference proceedings, Aachen, 2014.
11. Linjama M, Vihtanen HP, Sipola A, Vilenius M, Secondary controlled multi-chamber hydraulic cylinder, The 11th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP, 2009.
12. Cui P, Burton R, and Ukrainetz P, Development of a High Speed On/Off Valve, SAE Technical Paper, 1991.
13. Schepers D Weiler and Weber J, Comparison and Evaluation of Digital Control Methods for On/Off Valves, in Proceedings of the Fifth Workshop on Digital Fluid Power, Tampere, 2012.
14. Norgard C, Daniel Beck Roemer, Michael Møller Bech, Modelling of Moving Coil Actuators in Fast Switching Valves Suitable for Digital Hydraulic Machines, American Society of Mechanical Engineers, FPMC, 2015, 1-10.
15. Zeng Y, Daoming Wang, Bin Zi and Qi Zeng, Dynamic characteristics of priority control system for high-speed on– off digital valve, *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 1-8.
16. Huova M, Miikka Ketonen, Petr Alexeev, Pontus Bostrom, Matti Linjama, Marina Walden, Kaisa Sere, Simulations with fault-tolerant controller software of a digital valve, Proceedings of the Fifth Workshop on Digital Fluid Power, 2010.