

Транспортные системы Transport systems

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 62-82:669.013.5

doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-31-41

КОММУТАЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПО МЕТОДУ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ

Гульдана Кайрат Аканова¹, Ирина Петровна Гальчак², Анатолий Дмитриевич Кольга³,
Иван Никитович Столповских⁴, Виктор Алексеевич Александров⁵

^{1,4} Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

^{2,3,5} Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

¹ kairatguldana8@gmail.com; ORCID 0000-0002-7182-0386

² ira.gidravlika@mail.ru; ORCID 0000-0002-6557-4860

³ kad-55@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3194-2274

⁴ stolpovskih_i@mail.ru; ORCID 0000-0003-2893-5070

⁵ alexandrov_vikt@mail.ru; ORCID 0000-0001-6637-7917

Аннотация

Цель исследований. Обоснование возможности расширения сферы использования гидропривода в машинах и механизмах малой и средней мощности.

Задача, решению которой посвящена статья. Снижение массогабаритных параметров гидрофицированных машин.

Методы исследования. Решение поставленных задач проводилось на основе метода электрогидравлической аналогии.

Новизна работы. Заключается в установлении возможности замены сложных, крупногабаритных и массивных распределителей на простейшие гидравлические элементы - вентили (распределители 2/2).

Результаты исследования. Проведенные исследования подтверждают возможность значительного

упрощения гидравлических схем, снижения массогабаритных параметров и повышения надежности гидрофицированных машин.

Выводы. Учитывая общие принципы работы электроприводов и гидроприводов, пользуясь методом электрогидравлической аналогии, целесообразно построение систем управления гидроприводами осуществлять по аналогии с электроприводами, на базе простейших элементов типа вентиль (гидрораспределитель 2/2).

Ключевые слова: гидравлический привод, коммутация, вентиль, гидрораспределитель, клапан, схема, управление.

Ссылка для цитирования:

Аканова Г.К. Коммутация гидравлических линий по методу электрогидравлической аналогии / Г.К. Аканова, И. П. Гальчак, А. Д. Кольга, И. Н. Столповских, В. А. Александров // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 3. – С. 31 – 41. doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-31-41

Original article

Open Access Article

SWITCHING OF HYDRAULIC LINES BY THE METHOD OF ELECTROHYDRAULIC ANALOGY

Guldana Kairat Akanova¹, Irina Petrovna Galchak², Anatoliy Dmitrievich Kolga³, Ivan Nikitovich Stolpovskikh⁴, Viktor Alekseevich Alexandrov⁵

^{1,4} Satbayev University, Almaty The Republic of Kazakhstan

^{2,3,5} Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

¹ kairatguldana8@gmail.com; ORCID 0000-0002-7182-0386

² ira.gidravlika@mail.ru; ORCID 0000-0002-6557-4860

³ kad-55@yandex.ru; ORCID 0000-0002-3194-2274

⁴ stolpovskih_i@mail.ru; ORCID 0000-0003-2893-5070

⁵ alexandrov_vikt@mail.ru; ORCID 0000-0001-6637-7917

Abstract

The work objective is to prove the possibility of expanding the scope of using hydraulic drive in machines and mechanisms of small and medium power.

The problem to which the paper is devoted. Reduction of weight and size parameters of hydraulic machines.

Research methods. The problems were solved on the basis of the electrohydraulic analogy method.

The novelty of the work. It consists in finding the possibility of replacing complex, large-sized and massive distributors with the simplest hydraulic elements - valves (distributors 2/2)

Reference for citing:

Akanova G.K. Switching of hydraulic lines by the method of electrohydraulic analogy / G.K. Akanova, I. P. Galchak, A.D. Kolga, I. N. Stolpovskikh, V. A. Alexandrov // *Transport Engineering*. - 2022. - no. 3. - p. 4 – . doi: 10.30987/2782-5957-2022-3-31-41.

Введение

Широкое использование гидропривода практически во всех отраслях народного хозяйства обусловлено его преимуществами относительно других видов приводов. Одним из основных достоинств гидропривода является его высокая энергоёмкость, которая оценивается отношением массы к мощности. Для гидродвигателей она составляет порядка 0,2 кг/кВт. Для сравнения, у электродвигателей этот показатель примерно равен 10 кг/кВт, т.е. в 50 раз больше. Таким образом, при использовании гидроприводов можно получить высокие мощности при малых габаритах [1].

Вместе с тем, основные достоинства гидроприводов сводятся на нет в результате использования сложных, габаритных, массивных и недостаточно надежных элементов систем управления. Кроме того, достаточно высокая сложность коммутаций линий высокого давления; потери энергии в элементах коммуникаций, прихотливость в эксплуатации; высокие требования к персоналу, обслуживающему гидропривод, существенно ограничивают сферу его использования в маломощных технологических машинах и механизмах.

Большие габариты и, соответственно, масса элементов управления обусловлены значительными силами, действующими со стороны жидкости на подвижные элементы аппаратуры.

Очевидно, именно этим и объясняется тот факт, что в роботизированных транспортно-технологических машинах и

Study results. The conducted studies confirm the possibility to simplify hydraulic circuits significantly, to reduce weight and size parameters and increase the reliability of hydraulic machines.

Conclusions. Taking into account the general principles of electric and hydraulic drives operation and using the method of electrohydraulic analogy, it is advisable to make hydraulic drive control systems by analogy with electric drives, based on the simplest elements of the valve type (hydraulic distributor 2/2).

Keywords: hydraulic drive, switching, valve, hydraulic distributor, leaf, circuit, control.

механизмах средних и особенно малых мощностей, где не требуются большие давления и расходы, объемный гидропривод практически полностью сдает свои позиции электроприводу. Например, разработчики антропоморфных робототехнических комплексов полностью отказались от гидропривода и перешли на электропривод.

Поэтому в настоящее время применение объемного гидропривода ограничивается применением в машинах и оборудовании большой мощности: металлорежущих станках, прессах, в системах управления летательных аппаратов, судов, тяжёлых автомобилей, мобильной строительно-дорожной технике, в системах автоматического управления и регулирования тепловых двигателей, гидротурбин [2].

В гидроприводе в настоящее время для управления и коммутации (соединения и разъединения) линий используются различные регулирующие и направляющие элементы. В состав которых входят различного рода клапаны, распределители, а также устройства, изменяющие скорость потока жидкости. Наиболее распространенным элементом направляющей аппаратуры являются гидрораспределители.

Эти элементы имеют различную конструкцию, принцип работы и вид управления. Основными параметрами, характеризующими распределитель, являются диаметр условного прохода, число позиций

переключения, число линий присоединения и тип управления [3].

Кроме того, согласно существующему ГОСТу, распределители выпускаются по различным схемам соединения линий в каждой из позиции [4]. Таких схем не-

сколько десятков. В качестве примера на рис. 1,а показано обозначение гидрораспределителя, выполненного по схеме 24, и 3 возможных соединения каналов в его промежуточном положении, рис. 1,б.

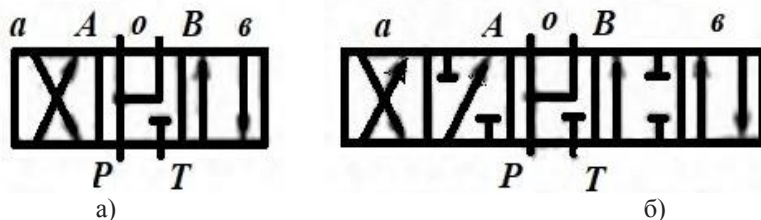


Рис. 1. Схема распределения потока рабочей жидкости в гидрораспределителе и его условное обозначение. а - обозначение гидрораспределителя, выполненного по схеме 24, б – соединение каналов в промежуточных положениях
 Fig. 1. Diagram of the distribution of the working fluid flow in the hydraulic distributor and its symbol. а – is the designation of the hydraulic distributor, made according to scheme 24, б – is the connection of channels in intermediate positions

Такое многообразие схем распределителей значительно усложняет схемы управления и снижает их надежность. Поскольку из теории надежности автоматизированных систем известно, что одна из основных проблем надежности связана с усложнением технических объектов и ростом количества элементов, используемых в системе. Этот рост требует повышения их качества. Исследования в этом направлении показали, что увеличение надежности элементов резко отстает от роста сложности системы.

Одним из основных методов повышения надежности является стандартизация и унификация элементов, которые

направлены в первую очередь на устранение излишнего многообразия изделий и их составных частей. Унифицированные и стандартизированные элементы всегда более надежны.

Поэтому замена сложных, крупногабаритных и массивных элементов управления простейшими и компактными вентилями (гидрораспределительными клапанами 2/2) расширит сферу их использования, упростит систему управления гидроприводами и повысит ее надежность [5].

О внешнем виде существующих золотниковых распределителей можно судить по рис. 2.

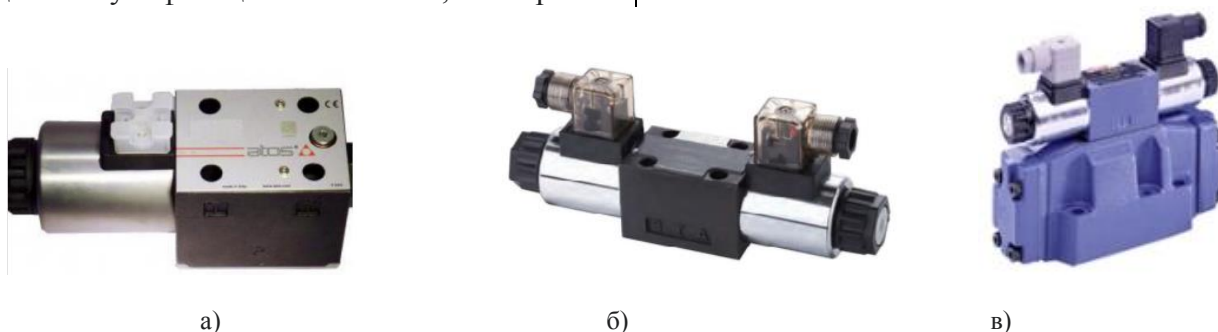


Рис. 2. Золотниковые гидрораспределители: а – двухпозиционный с электромагнитным управлением; б – трехпозиционный с электромагнитным управлением; в – трехпозиционный с электрогидравлическим управлением.
 Fig. 2. Slide valves: а - two-position with electromagnetic control; б - three-position with electromagnetic control; в - three-position with electrohydraulic control.

Что касается массогабаритных параметров этих распределителей, то можно сказать следующее. Габариты самого маленького распределителя выпускаемого

фирмой Rexroth – 4WE6 с диаметром условного прохода 6мм, показанного на рис 2,б, составляют: ширина – 45 мм; высота – 92 мм; длина – 264 мм; масса – 6,3

кг. А габариты распределителя этой же фирмы *Rexroth* – 4WEH32 с диаметром условного прохода 32мм, показанного на рис 2,в, составляют: ширина – 197 мм; высота 264; длина – 423 мм; масса – 54 кг.

Очевидно, что большие габариты и, соответственно, масса этих элементов обусловлены значительными силами, действующими со стороны жидкости на подвижные элементы аппаратуры. Причем с увеличением проходных сечений (расхода) и давления эти силы увеличиваются.

Несмотря на внешние отличия, принцип работы у них одинаковый, рис. 3.

В исходном положении золотник распределителя под действием пружин

находится в среднем положении (позиции), все четыре линии (две подводящие Р и Т и две отходящие А и В) перекрыты. При подаче электрического напряжения на правый электромагнит золотник сдвигается и сжимает правую пружину. В этом положении подводящая напорная линия Р соединяется с рабочей линией В, а сливная линия Т соединяется с линией А. При отключении электромагнита золотник под действием сжатой пружины возвращается в исходное положение. При подаче напряжения на левый электромагнит золотник соответственно смещается влево, сжимая левую пружину и соединяя между собой линии Т - В и линии Р — А.

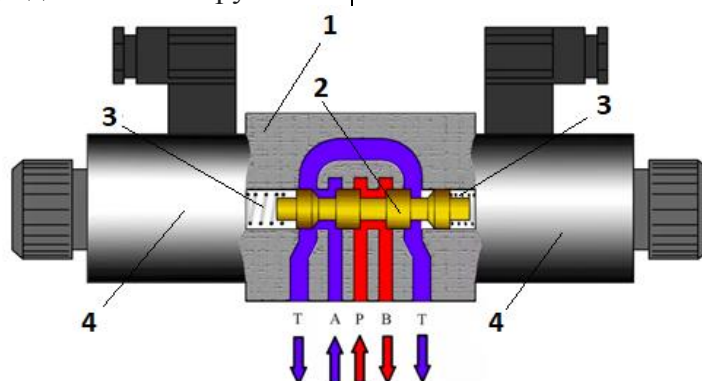


Рис. 3. Принцип работы трехпозиционного, четырехлинейного гидрораспределителя: 1 – корпус; 2 – золотник; 3 – пружина; 4 – электромагнит
 Fig. 3. The principle of operation of a three-position, four-line hydraulic distributor:
 1 - housing; 2 - spool; 3 - spring; 4 - electromagnet

Принцип работы двухлинейного, двухпозиционного распределителя с ручным управлением показан на рис. 4.

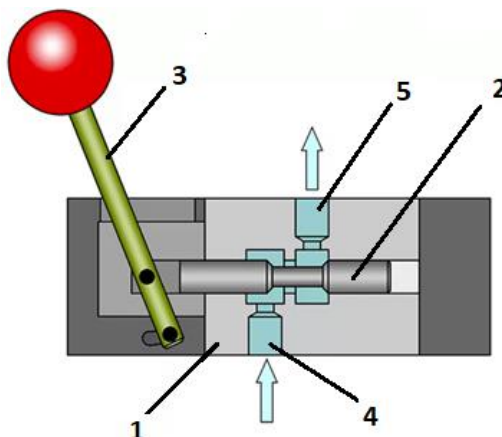


Рис. 4. Гидрораспределитель 2/2. 1 – корпус; 2 – золотник; 3 – рукоятка управления; 4 – канал подвода жидкости; 5 – канал отвода жидкости
 Fig. 4. Hydraulic distributor 2/2. 1 - housing; 2 - spool; 3 - control handle; 4 - liquid supply channel; 5 - liquid discharge channel

Двухлинейные двухпозиционные гидрораспределители в настоящее время

широкого распространения не получили и используются в основном для блокировки

(запирания) потока жидкости в системах автоматики.

В связи с растущим спросом на энергоэффективность, с целью устранения вышеуказанных недостатков гидроприводов, исследователями рассматриваются различные варианты решений. Среди которых можно выделить такие, как: уменьшение до минимума элементов коммутации (клапаны, распределители) и улучшение характеристик элементов коммутации. Например, некоторые авторы считают, что системы управления, с регулируемым приводом представляют интерес для применения в таких областях, как строительная техника и внедорожные транспортные средства.

В работе [6] показано, как системы с насосным управлением могут быть реализованы в виде электрогидравлических зон, которые расположены рядом с концевым приводом в качестве замены традиционных гидравлических систем, управляемых с помощью клапанов и распределителей на примере строительного экскаватора. Результаты анализа основаны на моделировании, проведенном с использованием проверенной математической модели экскаватора, основанной на стандартной системе, принятой в качестве эталонной. Были рассмотрены две конфигурации: первая - с трубами, предполагающая установку насосов на платформе, и вторая - без труб, предполагающая размещение насосов в непосредственной близости у силовых цилиндров. Математическая модель позволи-

Методы

Выбор методов анализа гидравлических схем управления выполнен с учетом особенностей их работы с точки зрения электрогидравлической аналогии.

Несмотря на, казалось бы, существенные различия электрического и гидравлического приводов, между ними существует много общего. Некоторые понятия и работу электропривода иногда поясняют с помощью аналогии с гидроприводом, а гидропривода с помощью аналогии с электрическими сетями и приводами. Такой метод впервые был предложен Д. Максвеллом [10]. Суть его заключается в

ла количественно оценить экономию энергии для каждого исследованного решения и определить источники потерь. Результаты моделирования показали, что отсутствие направляющих клапанов и распределителей значительно снижает гидравлические потери.

Использование встраиваемых клапанов также позволяет несколько уменьшить габариты привода и широко используется в мобильных машинах. Эти клапаны довольно просты в эксплуатации, но процесс их проектирования весьма сложен и требуют усложнения конструкции, чтобы соответствовать всем требованиям, предъявляемым к мобильным машинам.

В работе [7] авторы показывают, что в настоящее время процесс проектирования таких клапанов осуществляется с учетом концепции дизайна и некоторых прототипов и их экспериментальной проверки, после чего проектировщик выявляет оптимальные характеристики, требуемые для клапана, методом проб и ошибок на прототипах. Все это требует больших временных и финансовых затрат.

Разработка гидрораспределительных клапанов с возможностью регулирования потока отличается наибольшей сложностью и занимает много времени. Из-за высоких нелинейностей на практике невозможно спроектировать такой клапан, где на расход полностью не влияет перепад давления, как это отмечается в работах [8, 9], через клапан.

том, что в общем случае электрическое напряжение эквивалентно гидравлическому напору (давлению), а электрический ток эквивалентен гидравлическому объемному расходу (подаче), то есть объемному количеству текущей жидкости во времени. Поэтому гидравлическую схему можно представить в виде электрической цепи, заменив гидравлические компоненты на электрические эквиваленты (аналоги). Так, например гидравлическим аналогом электрического диода является обратный гидравлический клапан, который пропускает жидкость в прямом направлении и не поз-

воляет ей течь в обратном. Аналогом электрического резистора в гидроприводе является дроссель, который оказывает сопротивление движению жидкости. А гидравлическим аналогом электрического контакта или тиристора (управляемого полупроводникового вентиля) может служить двухпозиционный, двухлинейный гидравлический вентиль (распределитель), который под действием управляющего сигнала (механического или электрического) соединяет или разъединяет две линии, позволяя или предотвращая движение жидкости. Аналогичность гидравлической и электрической схем управления представлены на рис. 5.

Работу этих схем можно описать следующим образом. При соединении линий (гидравлической или электрической) рас-

пределителем или контактом 4 электрическая энергия (рис. 5,б) за счет разности потенциалов движется от точки В, положительного контакта аккумулятора, к точке А, отрицательного контакта, а гидравлическая энергия (рис. 5,а) движется от точки В повышенного давления жидкости к точке А пониженного давления жидкости. Гидронасос и электрический аккумулятор 1 обеспечивают соответственно разность давлений и разность потенциалов в точках А и В. Под действием разности давлений или разности потенциалов приводится в движение гидродвигатель в гидравлической схеме или загорается лампочка 2 в электрической схеме. Сопротивления (дроссель/резистор) 3 ограничивают величину расхода жидкости или электрического тока.

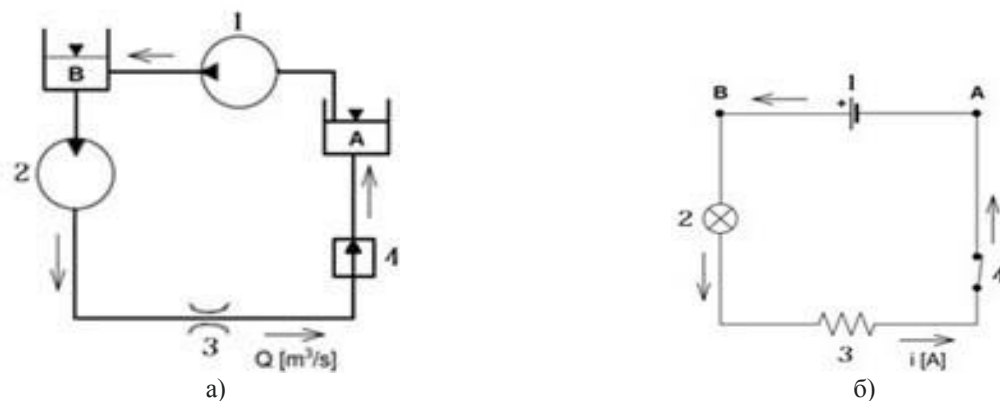


Рис. 5. Схемы управления, а – гидравлическая и б – электрическая: 1 – источник энергии (гидронасос, аккумулятор); 2 – потребитель энергии (гидродвигатель, электрическая лампочка); 3 – сопротивления (дроссель, резистор); 4 – выключатели (контакт, вентиль).

Fig. 5. Control circuits, a – hydraulic and b – electrical: 1 – energy source (hydraulic pump, battery); 2 – energy consumer (hydraulic motor, light bulb); 3 – resistance (throttle, resistor); 4 – switches (contact, valve).

Несмотря на то, что гидравлика как наука сформировалась намного раньше, чем электрика (принципы гидростатики были установлены ещё Архимедом, жившим в 287—212 годы до н. э.), гидропривод в сегодняшнем понимании сформировался относительно недавно, в начале 20 века. А электропривод, несмотря на относительно молодость (первые электрические машины появились только в 19 веке) развивался стремительно и с точки зрения теории, машин и элементной базы в настоящее время намного опережает гидропривод.

Доказательством этого служит широкое распространение электропривода и микроэлектроники практически во всех отраслях народного хозяйства.

Основным элементом систем управления в электроприводе и электронике является контакт (вентиль) или логический элемент, которые в определенный момент при выполнении каких-либо условий или под воздействием внешнего управляющего сигнала (электрического, механического, пневматического и т.п.), соединяют или разъединяют отдельные участки цепи.

Благодаря развитию и совершенствованию этих элементов и происходит разви-

тие и совершенствование электропривода и электроники в целом.

Например, массивные и габаритные контакты в контактно-релейном приводе

сменил тиристорный привод на основе компактных тиристоров.

О внешнем виде и размерах этих элементов можно судить по рис. 6.



а)

б)

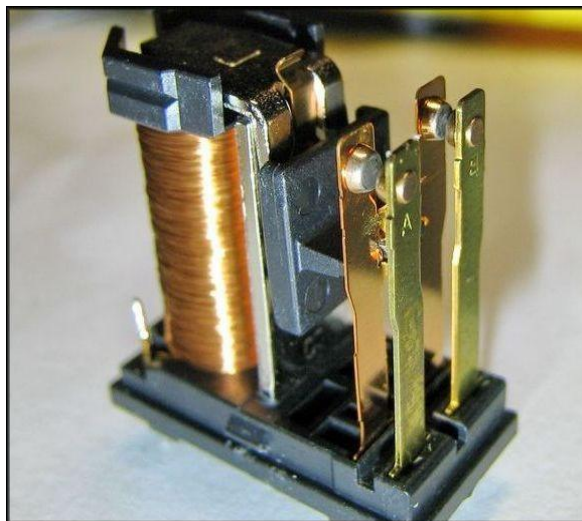
Рис. 6. Компоненты управления электрических схем:

а – механический контакт, б – тиристоры

Fig. 6. Control components of electrical circuits: a - mechanical contact, b - thyristors

Принцип работы механического контакта и тиристора одинаков: при воздействии управляющего сигнала (для контактов — механического; для тиристоров — электрического) происходит либо соединение, либо разъединение коммутируемых линий. Один контакт соединяет/разъединяет две линии. Для управления

большим количеством линий используют реле, в котором объединены несколько контактов, срабатывающих от одного управляющего сигнала (электромагнита). В качестве примера на рис. 7 представлены общие виды промежуточного реле РК-4Р и электромагнитного реле МКУ-48.



а)

б)

Рис. 7 Электромагнитные реле: а - РК-4Р, б - МКУ-48

Fig. 7 Electromagnetic relays: a – PK-4P, b– MKY-48

В соответствии со схемой, приведенной на корпусе, реле РК-4Р содержит четыре переключающихся контакта, обозна-

ченных цифрами 3, 6, 8, 11. Каждый контакт имеет два положения. В исходном положении (при отсутствии управляющего

сигнала) подвижные контакты 3, 6, 8 и 11 соединяются с линиями 13, 14, 7, 12 соответственно. При подаче управляющего сигнала на контакты 1, 2 срабатывает электромагнит, в результате чего переключающиеся контакты 3, 6, 8, 11 разъединяются с линиями 13, 14, 7, 12 и соединяются с линиями 4, 5, 9, 10 соответственно.

Результаты

Очевидно, что для повышения надежности работы гидравлической распределительной аппаратуры управления, в частности гидрораспределителя, в соответствии с электрогидравлической аналогией необходима конструктивная разработка малогабаритного двухлинейного контакта/вентиля. На основании которой можно будет составлять компактные ре-

С точки зрения электрогидравлической аналогии можно сказать, что реле РК-4Р это двухпозиционный 12-ти линейный электрический распределитель, а реле МКУ-48 – двухпозиционный 4-х линейный электрический распределитель.

ле/распределители для коммутации большого числа гидравлических линий.

В качестве примера можно рассмотреть замену типовой схемы управления гидроцилиндром при помощи 4/3 золотникового гидрораспределителя (рис. 8,а) на схему управления с помощью двухлинейных вентилей/распределителей (рис. 8,б) [11].

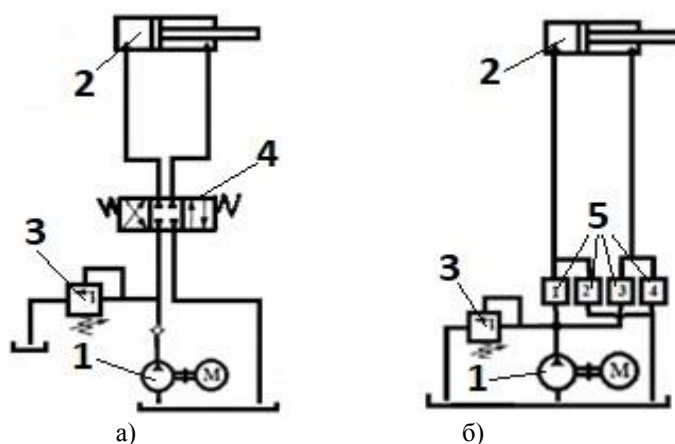


Рис. 8. Схема управления гидроцилиндром: а - при помощи 4/3 золотникового распределителя; б — при помощи двухлинейных вентилей: 1 – насос; 2 – гидроцилиндр; 3 – предохранительный клапан; 4 – распределитель 4/3; 5 – вентили/распределители 2/2

Fig. 8. Hydraulic cylinder control scheme: a – using a 4/3 spool distributor; b – using two-line valves: 1 - pump; 2 – hydraulic cylinder; 3 – safety valve; 4 – distributor 4/3; 5 – valves/distributors 2/2

Как видим, представленная схема (рис. 8,б) значительно проще схемы, показанной на рис. 8а. Вместо достаточно сложного и громоздкого гидрораспределителя 4 (рис. 8,а) в ней использованы простейшие элементы – вентили 5 (рис. 8,б).

Вентили можно сгруппировать вместе, тогда они будут работать как один распределитель 4/3 с управлением от одного силового элемента управления (электромагнита). Также их можно располагать раздельно в различных (более удобных)

местах схемы, например, непосредственно у гидроцилиндра.

Такая схема работает следующим образом (рис 8, б). В исходном положении все четыре линии перекрыты и, соответственно, все вентили 5 закрыты. Жидкость, подаваемая насосом, через предохранительный клапан 3 сливается в бак. При открытых вентиле 5-1 и 5-4 и закрытых вентиле 5-2, 5-3 жидкость от насоса через вентиль 5-1 поступает в поршневую полость гидроцилиндра, и поршень цилиндра

2 перемещается вправо, вытесняя жидкость из штоковой полости через открытый ventиль 5-4 в бак. Такое включение ventилей будет соответствовать перемещению золотника гидрораспределителя 4/3 на рис. 3 и 8,а в правое положение. При открытии ventилей 5-2 и 5-3 и закрытии ventилей 5-1 и 5-4 жидкость от насоса через ventиль 5-3 поступает в штоковую полость гидроцилиндра 2 и перемещает поршень влево, вытесняя жидкость из поршневой полости через открытый ventиль 5-2 в бак. Такое включение ventилей будет соответствовать перемещению золотника гидрораспределителя 4/3 на рис. 3 и 8,а в левое положение.

Заключение

В заключение можно отметить, что существующие схемы управления гидроприводами позволяют с высокой эффективностью управлять гидроприводами большой мощности, где габариты и массы систем управления не имеют большого значения. Но учитывая общие принципы работы электроприводов и гидроприводов, пользуясь методом электрогидравлической аналогии, целесообразно построение си-

Следует отметить, что в отличие от используемого на схеме рис. 8,а распределителя 4/3, выполненного в соответствии с ГОСТ 24679-81 по схеме 44, из четырех ventилей 2/2 можно собрать распределитель 4/3 по любой из нескольких десятков схем, представленных в ГОСТ 24679-81. Причем необходимо также отметить тот факт, что все ventили 2/2 взаимозаменяемы. Кроме того, ventили 2/2 имеют простую конструкцию и, соответственно, более высокую надежность, а при массовом производстве себестоимость их изготовления минимальна.

стем управления гидроприводами осуществлять по аналогии с электроприводами на базе простейших элементов типа ventиль (гидрораспределитель 2/2). Кроме того, для более успешного применения таких систем управления необходима доработка конструкции простейших элементов (ventиль/гидрораспределитель 2/2) с целью обеспечения компактности, простоты и надежности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Hydraulics&Pneumatics. URL: <https://www.hydraulicspneumatics.com> (дата обращения: 15.11.2021).
2. Ащеулов А.В. Экспансия электропривода на объемный гидропривод. *Гидравлика-Пневматика-Приводы (HPD)*. 2014. № 3/14. С. 8-9.
3. Схиртладзе А.Г., Иванов В.И., Кареев В.Н. Гидравлические и пневматические системы. М.: ИЦ МГТУ «Станкин», 2003. 544 с.
4. ГОСТ 24679-81. Гидрораспределители золотниковые четырехлинейные на Рном до 32 МПа. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1991. 56 с.
5. Белоглазов И.Н., Кривцов А.Н., Куценко Б.Н., Сулова О.В. Диагностика и надежность автоматизированных систем. СПб.: Руда и металлы, 2004. 167 с.
6. Casoli P., Scolari F., Minav T., Rundo M. Comparative Energy Analysis of a Load Sensing System and a Zonal Hydraulics for a 9-Tonne Excavator. *Actuators*. 2020. Vol. 9(2):39. doi: 10.3390/act9020039.
7. Zardin B., Borghi M., Cillo G., Rinaldini C., Mattarelli E. Design of Two-Stage On/Off Cartridge Valves for Mobile Applications. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 126. P. 1123-1130. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.275
8. Frosina E., Marinaro G., Senatore A., Pavanetto M. Numerical and experimental investigation for the design of a directional spool valve. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 148. P. 274-280. doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.078
9. Wu D., Burton R., Schoenau G., Bitner D. Analysis of a Pressure - Compensated Flow Control Valve. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. 2007. Vol. 129(2). P. 203-211. <https://doi.org/10.1115/1.1870037>.
10. Гидравлическая аналогия. URL: <https://mashxxl.info/info/201609> (дата обращения: 16.11.2021).
11. Пестряков А.Н., Кольга А.Д., Филатов А.М. Возможности использования гидроклапанов 2/2. *Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности*: сб. трудов XVIII Междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В.П. Кубачека». Екатеринбург: УГГУ, 2020. С. 63-66.

1. Hydraulics&Pneumatics. URL: <https://www.hydraulicspneumatics.com> (accessed: 15.11.2021).
2. Ascheulov A.V. Expansion of electric drive to positive displacement hydraulic drive. *Hydraulics-Pneumatics-Drives (HPD)*. 2014. no. 3/14. pp. 8-9.
3. Skhirtladze A.G., Ivanov V.I., Kareev V.N. Hydraulic and pneumatic systems. Moscow: RC MSTU "Stankin", 2003. 544 p.
4. GOST 24679-81. Slide hydraulic valves with four lines up to 32 MPa. Technical conditions. Moscow: Publishing House of Standards, 1991. 56 p.
5. Beloglazov I.N., Krivtsov A.N., Kutsenko B.N., Suslova O.V. Diagnostics and reliability of automated systems. St. Petersburg: Ore and Metals, 2004. 167 p.
6. Casoli P., Scolari F., Minav T., Rundo M. Comparative Energy Analysis of a Load Sensing System and a Zonal Hydraulics for a 9-Tonne Excavator. *Actuators*. 2020. Vol. 9(2):39. DOI: 10.3390/act9020039.
7. Zardin B., Borghi M., Cillo G., Rinaldini C., Mattarelli E. Design of Two-Stage On/Off Cartridge Valves for Mobile Applications. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 126. P. 1123-1130. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.08.275
8. Frosina E., Marinaro G., Senatore A., Pavanetto M. Numerical and experimental investigation for the design of a directional spool valve. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 148. P. 274-280. doi: 10.1016/j.egypro.2018.08.078
9. Wu D., Burton R., Schoenau G., Bitner D. Analysis of a Pressure - Compensated Flow Control Valve. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*. 2007. Vol. 129(2). P. 203-211. <https://doi.org/10.1115/1.1870037>.
10. Hydraulic analogy. URL: <https://mash-xxl.info/info/info/201609> (accessed: 11.16.2021).
11. Pestryakov A.N., Kolga A.D., Filatov A.M. Possibilities of using hydraulic valves 2/2. Technological equipment for mining, oil and gas industry: Proceedings of the XVIII International Scientific and Technical Conference. "Readings in memory of V.R. Kubachek". Yekaterinburg: UGSU, 2020. pp. 63-66.

Информация об авторах:

Аканова Гульдана Кайрат, докторант кафедры «Технологические машины и транспорт», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, тел.: 8-747-287-58-56, e-mail: guldana_akanova@mail.ru.

Гальчак Ирина Петровна, аспирант кафедры «Технология металлов и ремонт машин» Уральского государственного аграрного университета, тел.: +7-982-722-64-96, e-mail: ira.gidravlika@mail.ru; Author-ID-РИНЦ 649392.

Кольга Анатолий Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология металлов и ремонт машин» Уральского государственного аграрного университета, тел.: +7-908-080-98-69, e-mail: kad-55@yandex.ru; Scopus-Author ID 7801323557, Research- ID-Web of Science AAG-5462-2019, Author-ID-РИНЦ 348434.

Akanova Guldana Kairat, Doctoral student of the Department of Technological Machines and Transport at Satbayev University, phone: 8-747-287-58-56, e-mail: guldana_akanova@mail.ru.

Galchak Irina Petrovna, Post-graduate student of the Department of Metal Technology and Machine Repair at *Ural State Agrarian University*, phone: +7-982-722-64-96, e-mail: ira.gidravlika@mail.ru; Author-ID-RSCI 649392.

Kolga Anatoliy Dmitrievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Technology and Machine Repair at *Ural State Agrarian University*, phone: +7-908-080-98-69, e-mail: kad-55@yandex.ru; Scopus-Author ID 7801323557, Research- ID-Web of Science AAG-5462-2019, Author-ID- RSCI 348434.

Столповских Иван Никитович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические машины и транспорт», Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, тел.: 8-777-277-75-22, e-mail: stolpovskih_i@mail.ru; Scopus-Author ID 55633677000, Research- ID-Web of Science AAG-8497-2020, Author-ID-РИНЦ 565560.

Александров Виктор Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология металлов и ремонт машин» Уральского государственного аграрного университета, тел.: +7-902-872-52-84, e-mail: alexandrov_vikt@mail.ru; Scopus-Author ID 57192382011, Research- ID-Web of Science ABE-3362-2021, Author-ID-РИНЦ 649295.

Stolpovskikh Ivan Nikitovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department Technological Machines and Transport at Satbayev University, phone: 8-777-277-75-22, e-mail: stolpovskih_i@mail.ru; Scopus-Author ID 55633677000, Research- ID-Web of Science AAG-8497-2020, Author-ID-RSCI 565560.

Alexandrov Viktor Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Technology and Machine Repair at *Ural State Agrarian University*, phone: +7-902-872-52-84, e-mail: alexandrov_vikt@mail.ru; Scopus-Author ID 57192382011, Research- ID-Web of Science ABE-3362-2021, Author-ID-RSCI 649295.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.**

Статья поступила в редакцию 23.11.2021; одобрена после рецензирования 10.12.2021; принята к публикации 18.02.2022. Рецензент – Пугачев А.А., доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Промышленная электротехника и электроника» Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 23.11.2021; approved after review on 10.12.2021; accepted for publication on 18.02.2022. The reviewer is Pugachev A.A., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Industrial Electrical Engineering and Electronics at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.