

УДК 62-82: 669.013.5

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-391-02-150-158

Д.Е. Крамсаков¹
В.В. Сургаев² ✉
А.Д. Кольга²
И.Н. Столповских¹
В.А. Александров²

¹Университет Сатпаева, Алматы, Казахстан

²Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ vladurgaev@mail.ru

Поступила в редакцию: 01.10.2024
Одобрена после рецензирования: 24.01.2025
Принята к публикации: 27.01.2025

© Крамсаков Д.Е., Сургаев В.В., Кольга А.Д., Столповских И.Н., Александров В.А.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-391-02-150-158

Дамир Е. Крамсаков¹
Vladislav V. Surgaev² ✉
Anatoly D. Kolga²
Ivan N. Stolpovskikh¹
Viktor A. Alexandrov²

¹Satpayev University, Almaty, Kazakhstan

²Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

✉ vladurgaev@mail.ru

Received by the editorial office: 01.10.2024
Accepted in revised: 24.01.2025
Accepted for publication: 27.01.2025

© Kramakov D.E., Surgaev V.V., Kolga A.D., Stolpovskikh I.N., Alexandrov V.A.

Архитектура гидроприводов промышленного, сельскохозяйственного и мобильного оборудования с повышенными энергоэффективностью и функциональностью

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В статье рассмотрены вопросы влияния работы гидрораспределителей на эффективность всей системы гидропривода и возможность создания архитектуры гидропривода на основе двухлинейных, двухпозиционных гидрораспределителей (вентилей). Отмечено, что существующая на сегодняшний день архитектура гидропривода, построенная на основе золотниковых многолинейных, многопозиционных распределителей, обладает большими массогабаритными параметрами, а самое главное — не удовлетворяет требованиям энергоэффективности.

Решение проблемы повышения энергоэффективности гидропривода авторы видят в отказе от использования сложных, громоздких, массивных и энергетически неэффективных многолинейных и многопозиционных распределителей и создании архитектуры гидропривода на основе двухлинейных, двухпозиционных гидрораспределителей (вентилей 2/2). Однако для такого перехода необходима разработка новой конструкции гидрораспределителей, удовлетворяющей современным требованиям энергоэффективности.

Цель исследований — обоснование возможности создания архитектуры гидроприводов на основе простейших вентилей 2/2.

Задача. Снижение энергозатратности и массогабаритных параметров гидрофицированных машин.

Методы. Решение поставленных задач проводилось на основе использования метода электрогидравлической аналогии, интегрированного в «Компас-3D» как приложение программного комплекса FlowVision.

Новизна заключается в установлении причин высокой энергозатратности используемых в настоящее время гидрораспределителей и возможности повышения энергоэффективности гидросистем за счет более широкого использования простейших гидравлических элементов — вентилей (распределителей 2/2).

Результаты. Проведенные исследования подтверждают возможность повышения энергоэффективности гидравлических систем и снижения массогабаритных параметров гидрофицированных машин.

Ключевые слова: гидравлический привод, коммутация, вентиль, гидрораспределитель, клапан, электрогидравлические аналогии, гидравлическая схема, система управления

Для цитирования: Крамсаков Д.Е., Сургаев В.В., Кольга А.Д., Столповских И.Н., Александров В.А. Архитектура гидроприводов промышленного и мобильного оборудования с повышенными энергоэффективностью и функциональностью. *Аграрная наука*. 2025; 391(02): 150–158.

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-150-158>

The architecture of hydraulic drives for industrial, agricultural and mobile equipment with increased energy efficiency and functionality

ABSTRACT

Relevance. The article discusses the impact of hydraulic valves on the efficiency of the entire hydraulic drive system and the possibility of creating a hydraulic drive architecture based on two-line, two-position hydraulic valves (valves). It is noted that the current hydraulic drive architecture, built on the basis of spool multi-linear, multi-position valves, has large weight and size parameters, and most importantly, does not meet the requirements of energy efficiency. The authors see the solution to the problem of increasing the energy efficiency of a hydraulic drive in avoiding the use of complex, bulky, massive and energy-inefficient multi-line and multi-position valves and creating a hydraulic drive architecture based on two-line, two-position valves (valves 2/2). However, for such a transition, it is necessary to develop a new design of hydraulic valves that meets modern energy efficiency requirements.

The purpose of the research is to substantiate the possibility of creating a hydraulic device architecture based on the simplest 2/2 valves.

A task. Reduction of energy consumption and mass-dimensional parameters of hydrofected machines.

Methods. The tasks were solved using the electrohydraulic analogy method, integrated into “Kompas-3D” as an application of the FlowVision software package.

The novelty lies in establishing the reasons for the high energy consumption of currently used hydraulic valves and the possibility of increasing the energy efficiency of hydraulic systems through the wider use of the simplest hydraulic elements - valves (distributors 2/2).

Results. The conducted studies confirm the possibility of increasing the energy efficiency of hydraulic systems and reducing the weight and size parameters of hydraulic machines.

Key words: hydraulic drive, switching, valve, hydraulic distributor, valve, electrohydraulic analogies, hydraulic circuit, control system

For citation: Kramakov D.E., Surgaev V.V., Kolga A.D., Stolpovskikh I.N., Alexandrov V.A. Architecture of hydraulic drives of industrial and mobile equipment with increased energy efficiency and functionality. *Agrarian science*. 2025; 391(02): 150–158 (in Russian).

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-391-02-150-158>

Введение/Introduction

В соответствии с определением [1] архитектура — это искусство проектировать и строить объекты, организующие пространственную среду жизнедеятельности человека.

Таким образом, применительно к инженерной деятельности архитектуру системы понимают как принципиальную организацию системы, воплощенную в ее элементах, их взаимоотношениях друг с другом и со средой, а также принципы, направляющие ее проектирование и эволюцию.

Термин «архитектура» применительно к гидроприводу используется в работе В.К. Свешникова [2], где говорится о создании гидроприводов новой архитектуры.

Современное развитие таких основных отраслей народного хозяйства, как промышленность, сельское хозяйство и транспорт, в первую очередь определяет совершенствование компонентной базы в направлении оптимизации параметров [3, 4], удобства эксплуатации [5], встраивание в умные системы.

Благодаря таким технологиям (например, в сельском хозяйстве) намечается переход к роботизированному транспорту, и распространяется такое направление как «точное земледелие». Всё это становится возможным только на базе высокоинтеллектуальных электронных систем управления [6].

Такие новые решения в области гидравлики обеспечивают прогресс и в привычных направлениях техники, и расширяют сферу применения в различных отраслях [7, 8].

Сельскохозяйственная машина (впрочем, как и любая другая) может быть представлена последовательной совокупностью таких трех составляющих элементов, как приводной двигатель, исполнительный механизм и привод. Поэтому эффективность работы всей машины может быть обеспечена только при условии, что каждый из этих элементов работает максимально эффективно [9, 10].

В сельскохозяйственном и промышленном оборудовании, а также в мобильных машинах, как правило, используются две основные приводные технологии — электрическая (если быть более точным — электромеханическая) и гидравлическая. Каждая из этих технологий имеет свои достоинства и недостатки.

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

Благодаря развитию и совершенствованию этих элементов происходят развитие и совершенствование электропривода и электроники в

целом. В процессе развития массивные и габаритные контакты в контактно-релейном приводе сменил тиристорный привод на основе компактных тиристоров.

Вместе с тем, несмотря на то что между электрическим и гидравлическим приводами имеются существенные различия, они имеют много общего. Например, некоторые понятия и работу электропривода часто поясняют с помощью аналогии с гидроприводом, а гидропривода — с помощью аналогии с электрическими приводами. Такой метод «электрогидравлической аналогии» предложил Д. Максвелл^{1, 2}. Сущность данного метода в том, что электрическое напряжение эквивалентно гидравлическому напору, а электрический ток эквивалентен объемному расходу. Поэтому любую гидравлическую схему в соответствии с методом «электрогидравлической аналогии» можно представить в виде электрической цепи, где гидравлические компоненты заменяются на электрические эквиваленты [11–13].

Однако, несмотря на аналогичность работы элементов, эффективность электропривода и гидропривода весьма существенно отличается.

Все основные достоинства гидроприводов сводятся на нет в результате использования сложных, габаритных, массивных и недостаточно надежных элементов систем управления. Именно этим и объясняется тот факт, что в роботизированных транспортно-технологических машинах и механизмах средних (и особенно малых) мощностей, где не требуются большое давление и расходы, объемный гидропривод полностью сдает свои позиции электроприводе. Разработчики антропоморфных робототехнических комплексов полностью отказались от гидропривода и перешли на электропривод. Применение объемного гидропривода в настоящее время ограничивается применением в машинах и оборудовании большой мощности [14].

Более того, если рассматривать с точки зрения энергоэффективности, то общий (полный) КПД гидросистемы обычно находится в пределах 0,65–0,75, в то время как у электропривода величина КПД 80–90%. Для специальных машин современные технологии позволяют увеличивать это значение до 96% [15, 16].

Результаты исследований [17] показали, что при работе гидрофицированных машин наибольшие потери возникают в гидрораспределителях, в процессе дроссельного регулирования скоростей рабочего движения (20%) и в первичных предохранительных клапанах (17,2%). Значительно меньше потери в сливных гидролиниях (7,5%), в исполнительных механизмах и вторичных предохранительных клапанах (4,3%).

Анализ ранее проведенных исследований [15–19] показывает, что модернизация конструкции гидронасосов, гидроцилиндров, гидромоторов и

¹ Гидравлическая аналогия. — URL: <http://ru.abcdef.wiki/wiki>

² Метод электрогидравлических аналогий. Википедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_электрогидравлических_аналогий.

гидролиний не дает ощутимого положительного результата по снижению энергетических потерь, хотя и приводит к некоторым полезным усовершенствованиям.

Очевидно, что проблемы повышения КПД гидропривода в настоящее время достаточно актуальны, особенно необходимо отметить повышение эффективности работы гидрораспределителей, поскольку они являются самым слабым звеном во всей цепочке гидропривода.

Некоторые авторы отмечают, что разработка распределительных клапанов отличается сложностью и занимает много времени. Ввиду высоких нелинейностей невозможно спроектировать клапан, исключая влияние перепада давления рабочей среды на расход [20, 21].

Считают, что процесс проектирования клапанов осуществляется методом проб и ошибок на прототипах с учетом концепции дизайна и их экспериментальной проверки для выявления оптимальных характеристик для требуемого клапана. Всё это требует больших затрат — и финансовых, и временных [22].

Кроме того, практика показывает, что увеличение надежности отдельных элементов отстает от роста сложности всей системы. Поэтому большое разнообразие элементов снижает надежность системы и усложняет схемы управления.

Цели исследований — установление причин высокой энергозатратности существующих гидрораспределителей и обоснование возможности создания энергоэффективной архитектуры гидроприводов на основе простейших вентилей 2/2.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

В Уральском государственном аграрном университете (в лаборатории гидравлики кафедры технологии металлов и ремонта машин) совместно с Казахским национальным исследовательским техническим университетом им. К.И. Сатпаева (в лаборатории гидропривода кафедры технологических машин и оборудования) ведутся работы по созданию гидравлических вентилей для коммутации гидравлических линий.

Для анализа архитектуры гидроприводов и поиска путей ее совершенствования авторами был разработан электрогидравлический аналог, а для определения путей совершенствования компонентной базы в направлении оптимизации параметров — метод расчетного моделирования на основе геометрии, созданной в системе трехмерного моделирования «Компас-3D» (ООО «АСКОН-Системы проектирования»), а также визуализация и анализ течения жидкости в проточных каналах устройства посредством программы KompasFlow, которая представляет собой версию программного комплекса FlowVision, интегрированного в

«Компас-3D» как приложение³ для численного и визуального подтверждения аналитических зависимостей.

Для повышения надежности работы гидравлической распределительной аппаратуры в соответствии с электрогидравлической аналогией необходима конструктивная разработка простых, малогабаритных и надежных вентилей (контактов). В качестве такого вентиля может стать двухлинейный, двухпозиционный распределитель. На базе таких распределителей можно составлять компактные коммутации большого числа гидравлических линий.

В качестве примера в работе [11] рассмотрена замена типовой схемы управления гидроцилиндром при помощи 4/3 золотникового гидрораспределителя (рис. 1а) на схему управления с помощью двухлинейных вентилей (распределителей) (рис. 1б).

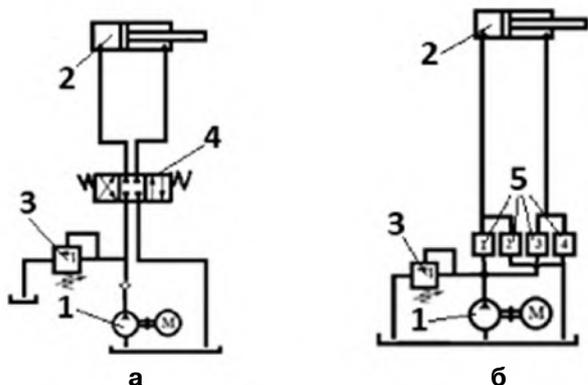
Представленная схема (рис. 1б) значительно проще и надежнее схемы, показанной на рисунке 1а. Вместо достаточно сложного гидрораспределителя (рис. 1а) в ней использованы простейшие элементы — вентили (рис. 1б).

Возможна различная компоновка таких вентилей. Их можно сгруппировать вместе, тогда они будут работать как один распределитель 4/3 с управлением от одного силового элемента управления (электромагнита). Вентили можно располагать отдельно в различных (более удобных) местах схемы (например, непосредственно у гидроцилиндра).

Компания Mannesman Rexroth (Bosch Rexroth, Германия) в качестве альтернативы существующим элементам управления гидроприводами рассматривает двухлинейный встроенный

Рис. 1. 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 [11]

Fig. 1. 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



³ Официальный сайт «Компас-3D». <http://kompas.ru/Web> — документация по KompasFlow (v.20). — URL: <https://flowvision.ru/webhelp/kf-v20-ru/>

клапан [23] (обозначения такого клапана по DIN 24 342 и по DIN ISO 1219 показаны на рис. 2а, 2б).

При соответствующем исполнении схемы управления и соединения такой клапан может взять на себя функции как соединения, так и изменения направления, расхода и давления рабочей жидкости.

Однако, как отмечают в компании, при большой мощности потока для управления такими клапанами потребуются значительные усилия. Поэтому управление представленными клапанами фирмы Mannesman Rexroth реализовано гидравлически с помощью пилотных клапанов.

Типовая схема управления гидроцилиндром (рис. 3), реализуемая с помощью четырехлинейного, трехпозиционного распределителя в соответствии с предложением фирмы Mannesman Rexroth⁴, может быть организована с использованием двухлинейных встроенных клапанов. Схема использования таких клапанов представлена на рисунке 4 (пунктиром показаны линии управления).

В данном случае (как и на рис. 2) схему управления гидроцилиндром с помощью распределителя 4/3 (рис. 3) Mannesman Rexroth заменяют четырьмя распределителями 2/2 (рис. 4).

В.К. Свешникова [2, 24] рассматривает золотниковые гидрораспределители с точки зрения энергоэффективности. При движении рабочего органа (золотника распределителя) неизбежен перепад давлений $\Delta p_{вх}$ на входной кромке, который определяет расход и скорость движения рабочей жидкости через эту кромку. Максимум отдаваемой мощности в гидрораспределителе достигается при потере 1/3 подводимого давления на дросселирующих рабочих кромках золотника. Установлено [24], что зависимость суммарных потерь давления

$$p = \Delta p_{вх} + \Delta p_{вых}$$

на дросселирующих кромках имеет вид, показанный на рисунке 5.

Идея отдельного открытия (закрытия) и регулирования потока была высказана Giacomo Kolks и Jürgen Weber (Технический университет Дрездена) [25]. Авторы предлагают замену классического четырехлинейного распределителя четырьмя двухлинейными аппаратами (рис. 6), что, несмотря на усложнение конструкции, обеспечит, по их мнению, экономию до 63% энергии и одновременно гибкую индивидуализацию под конкретную задачу потребителя. Такое решение получило название IM-технологии (IM — individual metering).

В работе [25] исследован гидропривод машины для испытаний на усталостную прочность консольно закрепленной балки (рис. 7), которая содержит гидроцилиндр с управлением от пяти двухлинейных гидрораспределителей — 1–5.

Рис. 2. Обозначение клапана: а — по DIN 24 342; б — по DIN ISO 1219 [23]

Fig. 2. Valve designation: a — according to DIN 24 342; b — according to DIN ISO 1219 [23]

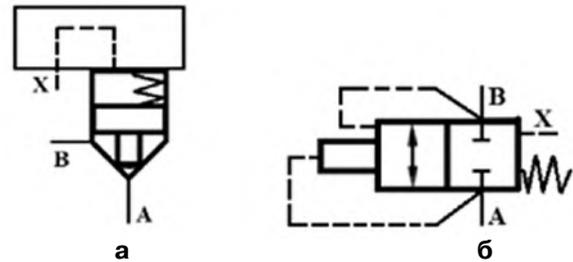


Рис. 3. Схема управления цилиндром при помощи 4/3 распределителя [23]

Fig. 3. Cylinder control scheme using a 4/3 distributor [23]

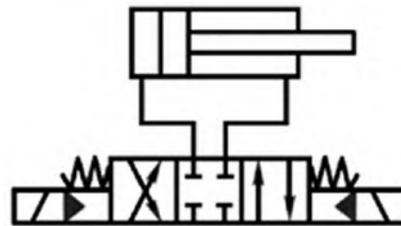


Рис. 4. Схема управления цилиндром при помощи двухлинейных клапанов [23]

Fig. 4. Cylinder control scheme using 2-line valves [23]

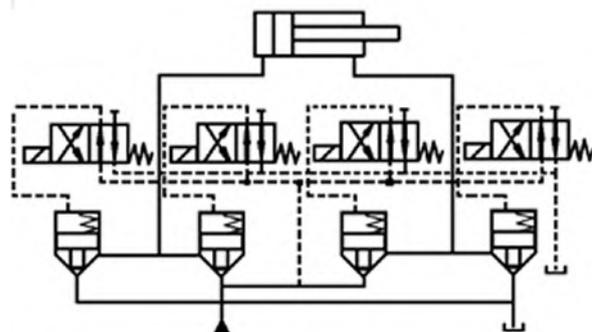
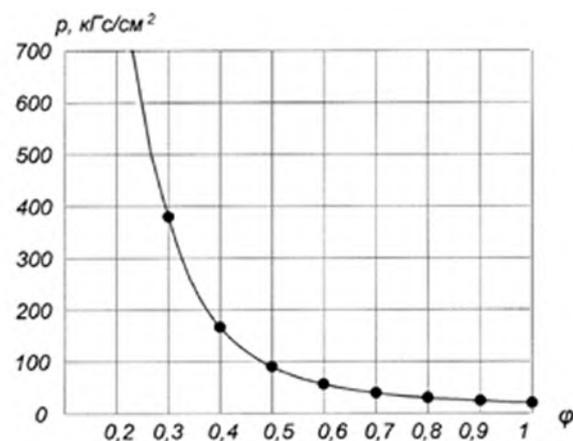


Рис. 5. Зависимость суммарных потерь давления p от коэффициента соотношения площадей штоковой и поршневой камер гидроцилиндра ϕ [24]

Fig. 5. The dependence of the total pressure loss p on the ratio of the areas of the rod and piston chambers of the hydraulic cylinder ϕ



⁴ А. Шмидт. Учебный курс по гидравлике. Т. 4. Двухлинейные встроенные клапаны. Mannesman Rexroth ГмБХ. Лор-на-Майне. ФРГ. 1989.

Рис. 6. Схема замены классического четырехлинейного распределителя четырьмя двухлинейными аппаратами [24]

Fig. 6. The scheme of replacing the classic four-line distributor with four two-line devices [24]

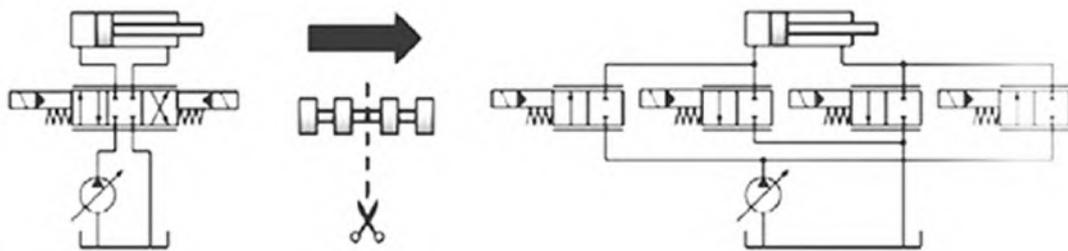
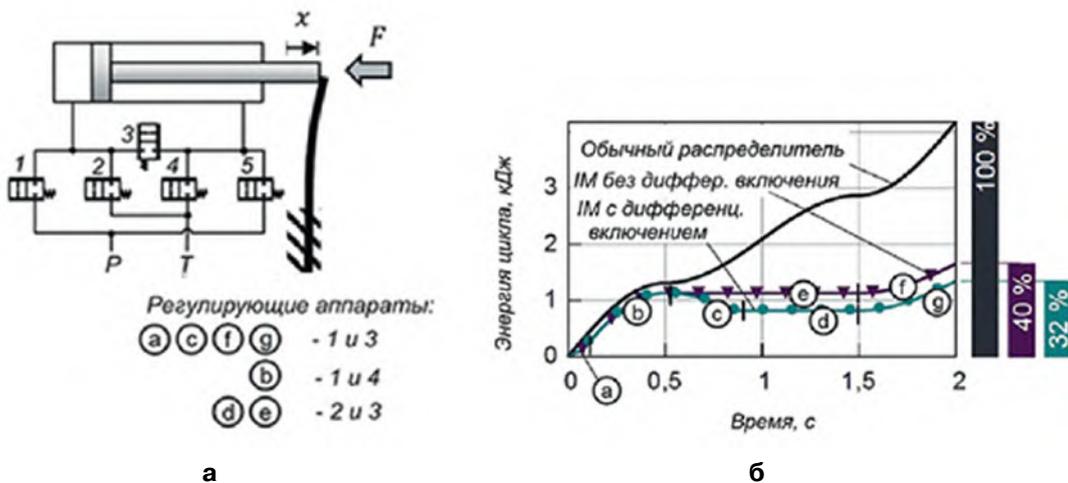


Рис. 7. Схема гидропривода машины (а), зависимость энергопотребления (б) [24]

Fig. 7. Hydraulic drive scheme of the machine (a), energy consumption dependence (b) [24]



Пары аппаратов 1–2 и 4–5 соединяют камеры цилиндра с напорной Р или сливной Т линией, а аппарат 3 реализует дифференциальное включение. В процессе движения в точках а, с, f и g цикла потоки регулируются аппаратами 1 и 3, в точке b — аппаратами 1 и 4, в точках d и e — аппаратами 2 и 3.

Анализ энергопотребления в цикле показал, что при использовании ИМ-технологии оно снижается на 60% или на 68% с применением дифференциального включения.

Конечно же, глядя на эти примеры, в глаза сразу бросается объем. Действительно, нецелесообразно менять один 4/3 распределитель на четыре, пять — 2/2 распределителя (рис. 1, 6, 7), а при большой мощности требуются еще четыре распределителя для управления первыми распределителями (рис. 4).

Но в этих примерах идет речь не о техническом или экономическом преимуществе, а о понимании места двухлинейных клапанов в общем контуре и об их функциональном назначении, поэтому рассматривалась простая замена существующих 4/3 распределителей на существующие распределители 2/2.

Развитие техники ставит перед гидравликами новые масштабные задачи. Для перехода на ИМ-технологии разработчикам систем управления гидроприводами необходимо переходить на

более простые, надежные и энергоэффективные двухпозиционные гидрораспределители. Просто переход на существующие двухпозиционные распределители проблему не решит, поскольку они не отвечают заявленным требованиям ни по габаритам, ни по массе, ни по энергоэффективности.

Для реализации технических и экономических преимуществ предлагаемого перехода требуется создание новой конструкции распределителя 2/2, работающего на других принципах, отличных от существующих и обеспечивающих небольшие габаритные размеры, массу и высокую энергоэффективность, независимо от передаваемой мощности.

Постоянно развивающиеся программные продукты моделирования в настоящее время позволяют визуализировать процессы движения жидкости в любом элементе гидропривода, в том числе и в гидрораспределителях. С помощью таких программ конструктор может визуально определять конкретные зоны в гидрораспределителе, где происходят какие-либо явления, которые оказывают влияние на те или иные параметры (например, приводят к потере энергии), и принимать конструктивные решения для их устранения или снижения величины этих явлений.

Расчет ведется на основе уравнения движения Навье-Стокса (аппроксимация расчетного пространства конечными объемами — расчетными ячейками. Весь расчетный объем разбивается

на параллелепипеды и многогранные ячейки у граничных условий. Затем производится вычисление потоков физических величин, входящих и исходящих через каждую грань ячейки).

В векторном виде это уравнение записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \times \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$

где: ∇ — оператор набла; Δ — векторный оператор Лапласа; t — время; ν — коэффициент кинематической вязкости; ρ — плотность; p — давление; $\vec{v} = (\vec{v}^1 \dots \vec{v}^n)$ — векторное поле скорости; \vec{f} — векторное поле массовых сил.

Неизвестные p и \vec{v} являются функциями времени t и координаты $x \in \Omega$ трехмерная область, в которой движется жидкость.

Для несжимаемой жидкости уравнение Навье-Стокса дополняется уравнением несжимаемости:

$$\nabla \times \vec{v} = 0$$

В качестве примера представлено использование программы KompasFlow применительно к гидрораспределителю 2/2, принцип работы которого представлен на рисунке 3 [26].

При положении рычага управления (рис. 3) напорная линия соединена с рабочей линией. При перемещении рычага управления вправо золотник перемещается и разъединяет каналы.

Общий вид визуализационного слоя давления потока, проходящего через гидрораспределитель, в плоскости симметрии с расцветкой имеет вид, показанный на рисунке 9. Расчет проведен для массового расхода 1,42 кг/с (100 л/мин) и давления 1 МПа на выходе гидрораспределителя с диаметром условного прохода (ДУ) 10 мм.

На иллюстрации видны места сужения, расширения и поворотов потока, наличие застойных зон, а также характер изменения давления в потоке от максимального (красный) к минимальному (синий). Преодоление этих участков приводит к потерям энергии и снижению КПД.

Конструкция гидрораспределителя, имеющего минимальные потери энергии (давления), должна исключать крутые повороты потока, застойные зоны и иметь минимальное количество участков сужения и расширения потока. Конструкция существующих золотниковых распределителей этого обеспечить не в состоянии.

Очевидно, что конструкция гидрораспределителя, исключая вышеприведенные недостатки, должна иметь новый принцип работы, отличающийся от существующего.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

В качестве одного из вариантов гидравлических вентилей для коммутации гидравлических линий по методу электрогидравлической аналогии рассматривается конструкция вентиля, разрабатываемая авторами (рис. 10).

Рис. 8. Принцип работы двухпозиционного, двухлинейного гидрораспределителя: 1 — корпус; 2 — золотник; 3 — рычаг управления [26]

Fig. 8. The principle of operation of a two-position, two-line hydraulic distributor: 1 — housing; 2 — spool; 3 — control lever [26]

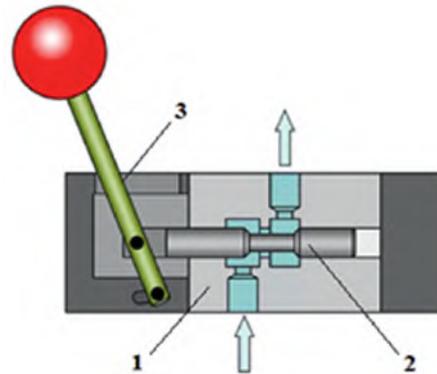


Рис. 9. Движение потока с линиями тока и векторами через гидрораспределитель в плоскости симметрии — визуализационный слой давления

Fig. 9. Flow movement with current lines and vectors through a hydraulic distributor in the plane of symmetry — visualization layer of pressure

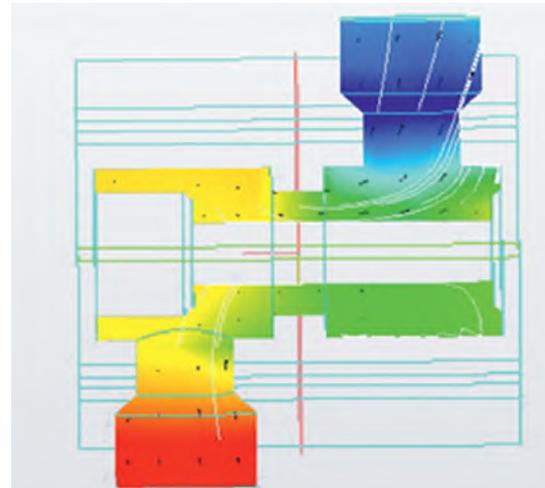
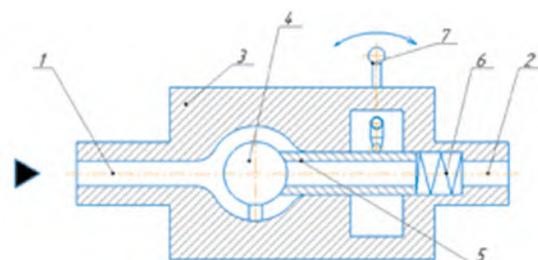


Рис. 10. Принцип работы вентиля: 1 — входная линия; 2 — выходная линия; 3 — корпус; 4 — запорный элемент; 5 — золотник; 6 — пружина; 7 — механизм управления

Fig. 10. The principle of operation of the valve: 1 — input line; 2 — output line; 3 — housing; 4 — shut-off element; 5 — spool; 6 — spring; 7 — control mechanism



Подвижный золотник в исходном положении пружиной прижат к запорному элементу и разъединяет входной и выходной каналы. Под действием механизма управления золотник отводится от запорного элемента, смещаясь в осевом направлении, сжимает пружину и соединяет входной и выходной каналы между собой.

Поскольку пустотелый золотник находится в гидравлически уравновешенном состоянии (независимо от мощности потока), усилие управления золотником невелико, поэтому механизм управления может быть ручным, электромагнитным, электромеханическим и т. п.

Запорный элемент имеет обтекаемую форму с минимальным коэффициентом лобового сопротивления движению потока. Отсутствие поворотов и наличие одной кромки с перепадом давления обеспечивают такому распределителю минимальные потери энергии и высокий КПД.

Общий вид визуализационного слоя давления, проходящего через ventиль, потока в плоскости симметрии с раскраской представлен на рисунке 11.

Расчет в программе KompasFlow был проведен с такими же данными, что и у предыдущего золотникового гидрораспределителя (рис. 8).

Необходимо отметить тот факт, что в варианте конструкции ventиля рассматривается запорный элемент, выполненный в форме сферы. Но форма сферы не является идеальной, существуют формы, имеющие меньший, чем у сферы, коэффициент сопротивления.

Изменяя расход, в программе KompasFlow для распределителей 8 и 10 были найдены потери давления и построены графические зависимости потерь давления в зависимости от расхода (рис. 12а, 12б).

Полученная расчетным путем графическая зависимость золотникового распределителя (рис. 12а) практически совпадает с экспериментальными зависимостями, представленными в каталоге компании Ponar Wadowice для золотниковых распределителей типа WE10⁵.

Графическая зависимость (рис. 12б) распределителя предлагаемой конструкции выгодно отличается от предшествующей. При равных условиях (расходе, давлении и проходном сечении) потери давления на данном ventиле ниже, чем в рассмотренном выше золотниковом распределителе, более чем в два раза.

Необходимо отметить, что в настоящих условиях невозможно обеспечить высокую надежность и энергоэффективность систем гидропривода при использовании существующих элементов управления, характеризующихся большими массогабаритными параметрами, сложностью, малой надежностью и, главное, низкой энергоэффективностью.

Модернизация гидравлических насосов, цилиндров, моторов и линий не в состоянии дать существенного положительного результата для снижения энергетических потерь. Такая модернизация может привести только к некоторым полезным усовершенствованиям, поскольку наибольшие потери возникают именно в элементах управления — распределителях и первичных предохранительных клапанах.

Рис. 11. Движение потока с линиями тока и векторами через ventиль в плоскости симметрии — визуализационный слой давления

Fig. 11. The flow movement with current lines and vectors through the valve in the plane of symmetry is a visualization layer of pressure

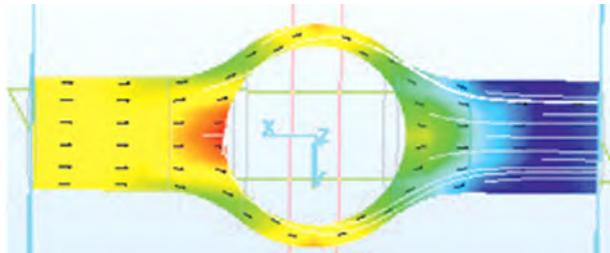
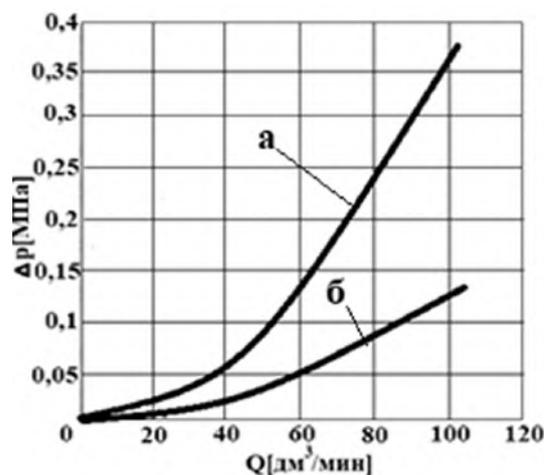


Рис. 12. Расчетные зависимости потерь давления Δp в золотниковом распределителе (а) и ventиле предлагаемой конструкции (б)

Fig. 12. The calculated dependences of the pressure losses of the Δp in the spool distributor (а) and the valve of the proposed design (б)



Выводы/Conclusions

Для повышения энергоэффективности архитектуру гидропривода целесообразно создавать на основе простейших ventилей 2/2, обеспечивающих минимальные потери энергии при прохождении потока. Используемые в настоящее время ventили для таких целей не годятся, поскольку они обладают большим сопротивлением.

Для этих целей необходима разработка новых конструкций ventилей, которые обеспечат потоку жидкости, проходящему через ventиль, более благоприятные условия движения с плавным обтеканием поворотных участков, исключением участков возникновения застойных зон и минимальным количеством зон расширения и сужения потока.

Аналитические расчеты, выполненные в программе KompasFlow, разрабатываемой авторами конструкции ventиля, подтверждают возможность создания конструкции ventиля, который обеспечит значительное (более чем в два раза) снижение потерь давления (в сравнении с существующими золотниковыми, двухпозиционными, двухлинейными распределителями).

⁵ Распределитель золотниковый с электрическим управлением типа WE10. — URL: WK499495_WE10s12 rus.dft (hydropart.ru)

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в работу.

Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат.

Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors made an equal contribution to the work.

The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism.

The authors declare no conflict of interest.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ткачев В.Н. Архитектура всего. Монография. М.: МИСИ – МГСУ. 2021; 260. ISBN 978-5-7264-2820-8 <https://elibrary.ru/gzudld>
2. Свешников В.К. Индивидуализация — новое слово в гидравлике. *РИТМ машиностроения*. 2017; (2): 38–43.
3. Прохасько Л.С. Расчет кавитационного устройства для очистки промышленных вод. *Аграрная наука*. 2023; (11): 117–121. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-117-121>
4. Prokhasko L. et al. Development of a mathematical model of the movement of uncompressed plunger with consideration of the non-isothermal fluid flow in the ring gap. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020; 29(S6): 2668–2676. <https://elibrary.ru/ragzgj>
5. Аксаян Г.С. и др. Концепция автоматизированной системы биологической защиты агропромышленных предприятий на базе новых плазменно-оптических технологий. *Аграрная наука*. 2022; (7–8): 193–198. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-193-198>
6. Шалумов А.С., Шалумов М.А. Опыт применения автоматизированной системы АСОНИКА в промышленности Российской Федерации. Монография. Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС. 2017; 422. ISBN 978-5-906773-57-9 <https://elibrary.ru/zrsgvh>
7. Бельчик Л.Д., Жилевич М.И., Ананчиков А.А., Козловский В.А., Шабунко В.А. Анализ эффективности применения цифровой гидравлики. *Автотракторостроение и автомобильный транспорт. Сборник научных*. Минск: Белорусский национальный технический университет. 2023; 1: 268–271. <https://elibrary.ru/ngldgu>
8. Узунов В.О., Денежко Л.В. Анализ программных комплексов машиностроительной гидравлики в России. *Технические и технологические решения для АПК. Сборник статей Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Екатеринбург: Уральский государственный аграрный университет. 2022; 83–87. <https://elibrary.ru/hupfhc>
9. Ереско А.С. Совершенствование гидропривода грузоподъемных механизмов подъемно-транспортных и строительно-дорожных машин. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Красноярск. 2004; 189. <https://elibrary.ru/nmsvbj>
10. Буриев Б.А., Акулов Д.В. Гидроприводы: обзор современного состояния и технического приложения в машинах и аппаратах. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, посвященной Дню космонавтики*. Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева. 2022; 1: 258–260. <https://elibrary.ru/dzoxce>
11. Аканова Г.К., Гальчак И.П., Кольга А.Д., Столповских И.Н., Александров В.А. Коммутация гидравлических линий по методу электрогидравлической аналогии. *Транспортное машиностроение*. 2022; (3): 31–41. <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-3-31-41>
12. Лемешко М.А., Волков Р.Ю. Использование метода электрогидравлической аналогии для моделирования работы адаптивной бурильной машины. *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2014; (3): 62–65. <https://elibrary.ru/swncbd>
13. Терехов В.В., Савицкий Ю.А., Выскубов Е.В., Чабров С.Е. Принципиальные гидравлические схемы агрегированных инерционных устройств очистки жидкости на основе спирали Архимеда. *XIV Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 63-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос*. Краснодар: Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. Героя Советского Союза А.К. Серова Министерства обороны Российской Федерации. 2024; 174–180. <https://elibrary.ru/ahdovu>
14. Круглов В.Ю. От экспансии электропривода к «симбиозу» электро- и объемного гидропривода. *Вооружение. Технология. Безопасность. Управление. Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции*. Ковров: Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева. 2018; 281–288. <https://elibrary.ru/uzijis>

REFERENCES

1. Tkachev V.N. Architecture of everything. Monograph Moscow: *Moscow State University of Civil Engineering*. 2021; 260 (in Russian). ISBN 978-5-7264-2820-8 <https://elibrary.ru/gzudld>
2. Sveshnikov V.K. Individualization — a new word in hydraulics. *RHYTHM of machinery*. 2017; (2): 38–43 (in Russian).
3. Prokhasko L.S. Calculation of a cavitation device for industrial water treatment. *Agrarian science*. 2023; (11): 117–121 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-376-11-117-121>
4. Prokhasko L. et al. Development of a mathematical model of the movement of uncompressed plunger with consideration of the non-isothermal fluid flow in the ring gap. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020; 29(S6): 2668–2676. <https://elibrary.ru/ragzgj>
5. Axanyan G.S. et al. The concept of an automated biological protection system for agro-industrial enterprises based on new plasma-optical technologies. *Agrarian science*. 2022; (7–8): 193–198 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-361-7-8-193-198>
6. Shalumov A.S., Shalumov M.A. Experience of using an automated system ASONIKA in the industry of the Russian Federation. Monograph. Vladimir: *Vladimir branch of RANEP*. 2017; 422 (in Russian). ISBN: 978-5-906773-57-9 <https://elibrary.ru/zrsgvh>
7. Belchik L.D., Zhylevich M.I., Ananchikov A.A., Kozlovsky V.A., Shabunko V.A. Analysis of the efficiency of digital hydraulics. *Automotive and tractor manufacturing and automobile transport. Collection of scientific papers*. Minsk: Belarusian National Technical University. 2023; 1: 268–271 (in Russian). <https://elibrary.ru/ngldgu>
8. Uzunov V.O., Denezhko L.V. Analysis of software complexes of machine-building hydraulics in Russia. *Technical and technological solutions for the agro-industrial complex. Collection of articles of the International scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists*. Yekaterinburg: Ural State Agrarian University. 2022; 83–87 (in Russian). <https://elibrary.ru/hupfhc>
9. Yeresko A.S. Improvement of hydraulic drive of lifting mechanisms of lifting and transport and road construction machines. PhD (Engineering) Thesis. Krasnoyarsk. 2004; 189 (in Russian). <https://elibrary.ru/nmsvbj>
10. Buriev B.A., Akulov D.V. Hydraulic drives: an overview of the current state and technical application in machines and apparatus. *Actual problems of aviation and cosmonautics. Collection of materials of the VIII International scientific and practical conference dedicated to Cosmonautics Day*. Krasnoyarsk: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. 2022; 1: 258–260 (in Russian). <https://elibrary.ru/dzoxce>
11. Akanova G.K., Galchak I.P., Kolga A.D., Stolpovskikh I.N., Alexandrov V.A. Switching of hydraulic lines by the method of electrohydraulic analogy. *Transport engineering*. 2022; (3): 31–41 (in Russian). <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2022-3-31-41>
12. Lemeshko M.A., Volkov R.Yu. The use of the method electrohydraulically analogy for simulation of adaptive drilling machines. *Technico-tehnologicheskie problemy servisa*. 2014; (3): 62–65 (in Russian). <https://elibrary.ru/swncbd>
13. Terekhov V.V., Savitsky Yu.A., Vyskubov E.V., Chabrov S.E. Basic hydraulic diagrams of aggregated inertial liquid purification devices based on the spirals of Archimedes. *XIV International Scientific and Practical Conference of Young Scientists dedicated to the 63rd anniversary of Yu. A. Gagarin's flight into space*. Krasnodar: Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after Hero of the Soviet Union A.K. Serov, Ministry of Defense of the Russian Federation. 2024; 174–180 (in Russian). <https://elibrary.ru/ahdovu>
14. Kруглов В.Ю. From the expansion of the electric drive to the «symbiosis» of the electric and volumetric hydraulic drive. *Armament. Technology. Safety. Management. Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference*. Kovrov: Kovrov State Technological Academy named after V.A. Degtyarev. 2018; 281–288 (in Russian). <https://elibrary.ru/uzijis>

15. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Построение характеристик гидравлической системы с центробежными насосами. *Научное обозрение. Технические науки*. 2021; (3): 27–31. <https://elibrary.ru/gojtns>
16. Щагин А.В., Нгуен Т.З., Чжо С.В. Сравнительный анализ электроприводов производственных станков. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2022; 27(2): 193–204. <https://elibrary.ru/bzzgav>
17. Якушев А.Е. Исследование энергетических параметров одноковшовых гидравлических экскаваторов. *Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Москва. 2004; 179. <https://elibrary.ru/nmtwzх>
18. Побегайло П.А. Одноковшовые гидравлические экскаваторы: локальные показатели качества рабочего оборудования при проектировании на этапе анализа нагруженности. *Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности. Сборник трудов XIX Международной научно-технической конференции, проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады*. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет. 2021; 263–267. <https://elibrary.ru/ceahao>
19. Бекбоев А.Р., Жылкычиев М.К. Математическое моделирование преобразователя скорости перемещения штока гидроцилиндра с цилиндрическим мембранным запорно-регулирующим элементом. *Универсум: технические науки*. 2016; (5): 2. <https://elibrary.ru/vzjnav>
20. Zardin B., Borghi M., Cillo G., Rinaldini C.A., Mattarelli E. Design Of Two-Stage On/Off Cartridge Valves For Mobile Applications. *Energy Procedia*. 2017; 126: 1123–1130. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.275>
21. Frosina E., Marinaro G., Senatore A., Pavanetto M. Numerical and experimental investigation for the design of a directional spool valve. *Energy Procedia*. 2018; 148: 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.078>
22. 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; 9(2): 39. <https://doi.org/10.3390/act9020039>
23. Галиахметов Р.Т., Кольга А.Д., Александров В.А., Салихова М.Н., Гальчак И.П. Использование вентилей (клапанов 2/2) в системах управления гидроприводами машин. *Известия Международной академии аграрного образования*. 2023; 69: 27–34. <https://elibrary.ru/wditbm>
24. Свешников В.К. Повышение энергоэффективности приводов с дроселирующими гидрораспределителями. *Гидравлика. Пневматика. Приводы*. 2016; (1): 17–19.
25. Kolks G., Weber J. Modiciency — Efficient industrial hydraulic drives through independent metering using optimal operating modes. *10th International Fluid Power Conference (10. IFK)*. Dresden. 2016; 1: 105–120.
26. Merkle D., Schrader B., Thomes B. *Hydraulik. Grundstufe*. 2. Aufl. Berlin; Heidelberg: Springer. 2004; IV, 233. ISBN 978-3-540-35008-8 <https://doi.org/10.1007/3-540-35008-X>

ОБ АВТОРАХ

Дамир Едыгеулы Крамсаков¹
докторант PhD кафедры технологических машин и транспорта
kramsakov.d@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4504-3392>

Владислав Владимирович Сургаев²
аспирант кафедры технологии металлов и ремонта машин
vladsurgaev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6861-295X>

Анатолий Дмитриевич Кольга²
доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонта машин
kad-55@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3194-2274>

Иван Никитович Столповских¹
доктор технических наук, профессор кафедры технологических машин и транспорта
stolpovskih_i@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2893-5070>

Виктор Алексеевич Александров²
кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и ремонта машин
alexandrov_vikt@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6637-7917>

¹Университет Сатпаева, ул. им. Сатпаева, 22А, Алматы, 050013, Казахстан

²Уральский государственный аграрный университет, ул. им. Карла Либкнехта, 42, Екатеринбург, 620075, Россия

15. Ilichev V.Yu., Yurik E.A. Creation of characteristics of hydraulic system with centrifugal pumps. *Scientific Review. Technical science*. 2021; (3): 27–31 (in Russian). <https://elibrary.ru/gojtns>

16. Shchagin A.V., Nguyen T.Z., Zhuo S.V. Comparative analysis of electric drives of processing equipment. *Proceedings of Universities. Electronics*. 2022; 27(2): 193–204 (in Russian). <https://elibrary.ru/bzzgav>

17. Yakushev A.E. Investigation of the energy parameters of single-bucket hydraulic excavators. PhD (Engineering) Thesis. Moscow. 2004; 179 (in Russian). <https://elibrary.ru/nmtwzх>

18. Pobegailo P.A. Hydraulic excavators: local indicators of quality of working equipment during the design stage analysis of loading. *Technological equipment for the mining and oil and gas industries. Collection of works of the XIX International scientific and technical conference held within the framework of the Ural Mining Decade*. Yekaterinburg: Ural State Mining University. 2021; 263–267 (in Russian). <https://elibrary.ru/ceahao>

19. Bekboev A.R., Zhylykchiev M.K. Mathematical modeling of moving hydraulic-cylinder rod reductor with the cylindrical membrane shut-off-and-regulating element. *Universum: tekhnicheskkiye nauki*. 2016; (5): 2 (in Russian). <https://elibrary.ru/vzjnav>

20. Zardin B., Borghi M., Cillo G., Rinaldini C.A., Mattarelli E. Design Of Two-Stage On/Off Cartridge Valves For Mobile Applications. *Energy Procedia*. 2017; 126: 1123–1130. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.275>

21. Frosina E., Marinaro G., Senatore A., Pavanetto M. Numerical and experimental investigation for the design of a directional spool valve. *Energy Procedia*. 2018; 148: 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.078>

22. 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; 9(2): 39. <https://doi.org/10.3390/act9020039>

23. Galiakhmetov R.T., Kolga A.D., Alexandrov V.A., Salikhova M.N., Galchak I.P. Use of valves (valves 2/2) in machinery hydraulic drive control systems. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya*. 2023; 69: 27–34 (in Russian). <https://elibrary.ru/wditbm>

24. Sveshnikov V.K. Increasing the energy efficiency of drives with throttling hydraulic distributors. *HPD*. 2016; (1): 17–19 (in Russian).

25. Kolks G., Weber J. Modiciency — Efficient industrial hydraulic drives through independent metering using optimal operating modes. *10th International Fluid Power Conference (10. IFK)*. Dresden. 2016; 1: 105–120.

26. Merkle D., Schrader B., Thomes B. *Hydraulik. Grundstufe*. 2nd ed. Berlin; Heidelberg: Springer. 2004; IV, 233 (in German). ISBN 978-3-540-35008-8 <https://doi.org/10.1007/3-540-35008-X>

ABOUT THE AUTHORS

Damir Edygeuly Kramsakov¹
PhD student of the Department of Technological Machines and Transport
kramsakov.d@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-4504-3392>

Vladislav Vladimirovich Surgaev²
Postgraduate Student of the Department of Metal Technology and Machine Repair
vladsurgaev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6861-295X>

Anatoly Dmitrievich Kolga²
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metal Technology and Machine Repair
kad-55@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3194-2274>

Ivan Nikitovich Stolpovskikh¹
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technological Machines and Transport
stolpovskih_i@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2893-5070>

Viktor Alekseevich Alexandrov²
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metal Technology and Machine Repair
alexandrov_vikt@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6637-7917>

¹Satpayev University, 22A Satpayev Str. Almaty city, 050013, Kazakhstan

²Ural State Agrarian University, 42 Karl Liebknecht Str., Yekaterinburg, 620075, Russia