

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОБЪЕМНОГО ГИДРОПРИВОДА

TRENDS OF VOLUME HYDRAULIC DRIVE DEVELOPMENT

Приведен аналитический обзор технического уровня продукции, выпускаемой ведущими мировыми фирмами производителями гидрооборудования, для установления перспективных конструктивных и схемных решений, а также параметров элементов и устройств объемного гидропривода, на которые следует ориентироваться при проектировании новых гидрофицированных машин. Установлено, что стратегическим направлением в развитии объемного гидропривода и его компонентов является энергосбережение за счет использования компенсаторов давления и рекуператоров энергии, многопоточных насосов, применения электрической обратной связи и принципа частотного регулирования, насосно-аккумуляторного гидропривода, снижение габаритов и металлоемкости при одновременном росте удельных мощностей.

Приведены основные технические характеристики современных аксиально-поршневых, шестеренных насосов и гидромоторов. Описаны особенности их конструктивных решений, позволяющие повысить технический уровень.

Установлено, что современной тенденцией в развитии гидроаппаратуры является ее миниатюризация, расширение номенклатуры и улучшение технических параметров, применение аппаратуры ввертного монтажа. Показано, что наиболее интенсивное развитие получили дросселирующие гидрораспределители и аппараты с пропорциональным электрическим управлением, особенно со встроенной системой контроля и управления, гидроаппараты, управляемые шаговыми электродвигателями. Рассмотрены вопросы организации технического обслуживания гидроприводов.

Ключевые слова: объемный гидропривод, гидромашины, гидроаппаратура, технический уровень, энергосбережение, индекс энергетической эффективности.

Введение

В мировой и отечественной практике усовершенствования существующих и создания принципиально новых машин и оборудования определилась тенденция широкого использования ресурсо- и энергосберегающих технологий. Наиболее полно требованиям экономного расхода материалов и энергоресурсов удовлетворяют машины и оборудование с гидравлическим приводом, обеспечивающие, благодаря известным своим преимуществам, высокие значения показателей надежности и энергетической эффективности и позволяющие создавать мехатронные модули и системы любой сложности. Они успешно применяются в современном технологическом оборудовании и мобильных машинах. По данным статьи [1] прогнозируемый ежегодный прирост мирового производства гидрооборудования до 2020 года составит 6,5 %.

При модернизации существующих и проектировании новых гидроприводов машин и оборудования остро стоит вопрос выбора схемной и аппаратурной реализации, а также выбора их рабочих параметров. Решение этого вопроса лежит в плоскости аналитического обзора технического уровня продукции, выпускаемой ведущими мировыми фирмами-производителями

гидрооборудования, на основании которого возможно установить направление развития систем объемных гидроприводов и компонентов.

Основная часть

Основные тенденции развития современных промышленных гидроприводов рассмотрены нами в статье [2]. Дальнейшее их развитие характеризуется, прежде всего, повышением интеллектуального уровня и серьезными достижениями в области энергосбережения [3]. При этом основное внимание уделяется улучшению эксплуатационных показателей: упрощению технического обслуживания; снижению уровня шума и вибрации; энергосбережению за счет использования компенсаторов давления и рекуператоров энергии, повышению КПД гидромашин, оптимизации схемных решений, применению новейших систем управления, использованию принципа частотного регулирования или насосно-аккумуляторного гидропривода. Стратегическим направлением в развитии объемного гидропривода и его компонентов является снижение их габаритов и металлоемкости при одновременном росте удельных мощностей. Однако следует отметить, что стоимость изготовления объемного гидропривода одинаковой

мощности с возрастанием давления снижается, но только до давления 30—40 МПа [4].

Гидроприводы

В настоящее время для автоматизации производства опережающее развитие получили «интеллектуальные» гидроприводы — мехатронные модули, которые широко используются в мобильных машинах и уникальных проектах [1]. Перспективой дальнейшего развития объемного гидропривода является усовершенствование их систем управления, построенных на базе микропроцессоров и контроллеров, которые с высокой точностью и быстродействием обеспечивают реализацию сложных алгоритмов управления. При этом использование дискретных (импульсных, релейных) систем позволяет реализовать гидропривод на более простых технических устройствах [5]. Использование мощных пропорциональных электромагнитов, развивающих усилия, достаточные для прямого перемещения запорно-регулирующих элементов гидроаппаратов, позволяет применять аппараты прямого действия, благодаря чему существенно упрощается их схемная реализация, позволяющая перейти от двухкаскадных к однокаскадным схемам. Применительно к таким гидроаппаратам актуальной является задача повышения их быстродействия и ресурса, создание аппаратов, способных на протяжении достаточно большого промежутка времени работать с высокими частотами переключений [5].

Проведенный нами в статье [6] анализ схемных решений современных объемных гидроприводов позволил установить, что основным принципом их управления является принцип обратной связи, а гидропривод должен иметь свойства адаптивной (самонастраивающейся) системы. Современной тенденцией проектирования и производства промышленного оборудования и машин является использование блочно-модульного принципа. Для современных объемных гидроприводов такими модулями являются мехатронные модули. Блочно-модульный подход к проектированию систем гидроприводов позволяет производить их декомпозицию, уменьшить количество степеней свободы, получить иерархическую структуру, провести структурный синтез и упростить схемную реализацию за счет минимизации внутренних обратных связей, которые можно получить с информационной модели, подчинить структуру объекта процессу функционирования, использовать типовые модули при ее построении.

Одним из перспективных направлений повышения КПД объемных гидроприводов является замещение гидравлической обратной связи по давлению и некоторых гидромеханических аппаратов электрической обратной связью и электрогидравлическим регулятором потока. То есть интеграция электронной техники в контур управления гидроприводом, совершенствованием алгоритмов управления, а также замещением гидромеханических

гидроаппаратов электрогидравлическими [7]. Перспективным является также использование энергоэффективных насосно-аккумуляторных приводов и мультипликаторов, позволяющих увеличивать давление до 200—500 МПа, на базе которых создавать компактные зажимные механизмы без применения малонадежных и дорогих насосов высокого давления.

Для мобильной техники, снижение массы гидромашин при их непрерывном агрегатировании сопровождается комплектованием устройствами, обеспечивающими функционирование в закрытой системе циркуляции рабочей жидкости — предохранительными и антикавитационными клапанами, насосом подпитки, промывным клапаном, регуляторами разного функционального назначения, гидроаппаратами, предотвращающими работу в режиме постоянного открытия предохранительных клапанов основных магистралей, контрольными точками, позволяющими измерять давление [8].

Аналізу схемних рішень, позволяющих повысить энергоэффективность современных гидроприводов, посвящена статья [9]. Так, для существенного уменьшения дроссельных потерь мощности в гидроприводе с дроссельным регулированием (рисунок 1) предлагается установка трехлинейного компенсатора давлений — аппарата, поддерживающего постоянный перепад давлений на рабочих кромках дросселирующего гидрораспределителя (0,3—1 МПа) путем изменения давления на выходе из насоса в функции полезной нагрузки, действующей на гидродвигатель.

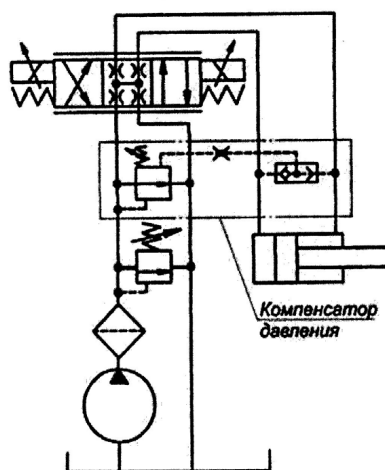


Рисунок 1 — Трехлинейный компенсатор давлений

Эффективным способом энергосбережения является установка многопоточных насосов, в которых возможна индивидуальная разгрузка отдельных секций в паузах между функционированием различных исполнительных гидродвигателей (рисунок 2).

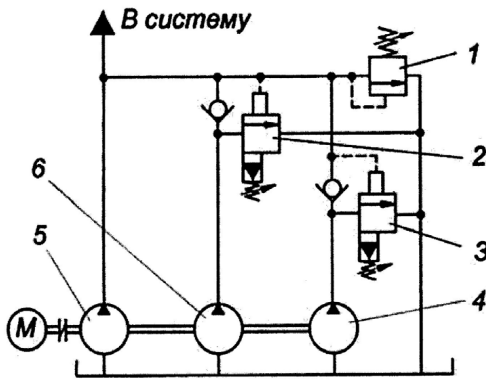


Рисунок 2 — Разгрузка секций многопоточного насоса:

1 — предохранительный клапан; 2, 3 — разгрузочные клапана; 4, 5, 6 — секции насоса

Разработанная фирмой *Yuken* система частотного регулирования насосов с компенсатором давления обеспечивает экономию энергии за счет оснащения асинхронного электродвигателя датчиком давления и использования частотного преобразователя. Система позволяет стабилизировать работу насоса при частотах вращения 300 мин^{-1} (нулевой подаче) и сократить потери мощности при давлении 15 МПа с $1,5$ до $0,5 \text{ кВт}$ [9]. Для поддержания номинального давления при нулевой подаче фирмой *Diplomatic* разработан новый механизм управления с электроразгрузкой в этом режиме (рисунок 3).

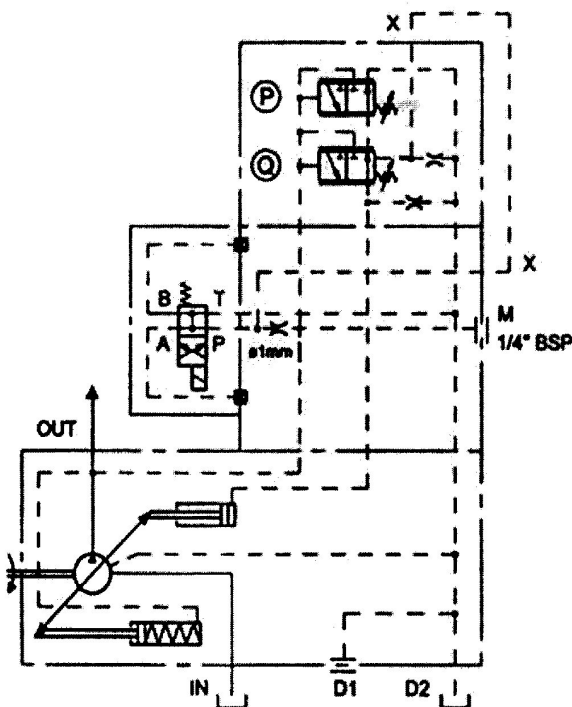


Рисунок 3 — Компенсатор давления с разгрузкой фирмы *Diplomatic*

Фирмой *Bosch Rexroth* разработан энергоэффективный гидропривод с регулируемой частотой вращения — *Rexroth Sytronics*, который позволяет сократить опера-

ционные расходы гидравлических систем в случаях, когда в различные моменты времени требуется различная подача. Он представляет собой модульную конструкцию, состоящую из насоса, системы управления, мотора и программного обеспечения, позволяющего создать насосную установку в соответствии с заданными параметрами. Благодаря интеллектуальным сервоприводам *Rexroth Sytronics* регулирует частоту вращения насосов, а в итоге и потребляемую электродвигателями мощность в точном соответствии с необходимой. Чем больше времени оборудование работает, тем больше экономия [10]. Применение *Rexroth Sytronics* позволяет уменьшить нагрев масла в гидросистеме и уменьшить объем гидробака, а в ряде случаев сократить потребление энергии до 80% , уменьшить уровень шума до 20 dB(A) .

Для существенного сокращения потерь давления в соединительных трубопроводах современных самолетов компания *Messier-Bugatti* (Франция) разработала малогабаритный поршневой мини-насос *Egide* с рабочим объемом не более $0,5 \text{ дм}^3$, вращение которого осуществляется напрямую от электродвигателя с частотой вращения 20000 мин^{-1} , и располагается рядом с приводами. Контроль давления и подачи в напорной линии такого привода позволяет исключить сервоклапаны в исполнительных механизмах. Кроме сокращения энергетических потерь такая компоновка позволяет снизить шум гидропривода [9].

В гидроприводах большой мощности перспективно использовать обратимые регулируемые гидромашины, работающие в режиме насоса или гидромотора с рекуперацией электроэнергии. Ведущие мировые фирмы — производители гидрооборудования большое внимание уделяют разработке систем рекуперации энергии. Так фирма *Parker Hannifin* разработала энергосберегающую систему для мобильных машин, использующую силы гравитации. Система содержит обратимый двигатель переменного тока с компьютерным управлением и постоянными магнитами, связанный муфтами с дизелем и шестеренным насосом гидропривода вертикального перемещения, причем через специальный преобразователь двигатель соединен с аккумулятором. При подъеме нагрузки двигатель работает в моторном режиме, а при опускании — в генераторном, обеспечивая рекуперацию энергии. Дизель, работающий в режиме максимального КПД, включается лишь при первоначальном запуске и периодической подзарядке аккумулятора. Энергосбережение такой системы составляет $5\text{—}40 \%$ [9].

В Денвере (США) применяются мусоровозы с шасси, оснащенными гидросистемой рекуперативного торможения, принцип работы которой основан на сохранении кинетической энергии торможения в гидроаккумуляторе с последующим использованием ее при разгоне. Расход топлива в такой системе снижается в среднем на 25% , а число техобслуживаний тормозной системы — в $3\text{—}4$ раза [9].

Насосы

В условиях значительных усилий и скоростей, требований высокой точности и хорошей динамики, наличия больших пиковых нагрузок и температур наибольшее применение в системах объемных гидроприводов находят регулируемые аксиально-поршневые насосы с наклонным диском модели A10VSO (номинальное давление $p_{\text{ном}} = 28 \text{ МПа}$, пиковое $p_{\text{пик}} = 35 \text{ МПа}$, рабочий объем $V_0 = 10\text{--}140 \text{ см}^3$). Они отличаются использованием гидростатической разгрузки основных трущихся пар, низким уровнем шума, высоким КПД, наличием сквозного вала и различного исполнения по управлению [11]. Следует отметить, что аксиально-поршневые насосы PF фирмы *Oilgear Towler* (рабочий объем $V_0 = 4,5\text{--}580 \text{ см}^3$) могут работать на давлениях до 100 МПа на минеральных маслах и до 24 МПа на рабочих жидкостях HFA [1]. Электроприводные насосы UEW с двумя ступенями подачи фирмы *Hydramold Ltd* обеспечивают подачу 9 л/мин при давлении 20 МПа и 0,6 л/мин при 160 МПа [1].

Аксиально-поршневые насосы HALS 45/25 и HGLS 112/32 Шахтинского завода «Гидропривод» (номинальное давление $p_{\text{ном}} = 25$ и 32 МПа, рабочий объем $V_0 = 45$ и 112 см³ соответственно, КПД = 0,9), которые оснащены энергосберегающими LS-регуляторами, дополнительной гидроаппаратурой, а первая модель — вспомогательным насосом системы управления, по габаритным размерам меньше аналогов ОАО «Пневмостроймашина» [1]. Выполнение аксиально-поршневых гидромашин с двумя торцевыми волновыми кулачками, с которыми взаимодействуют пары поршней с шариками (рисунок 4), позволило фирме *Oleodinamica Geco* существенно уменьшить их осевые габариты [12].

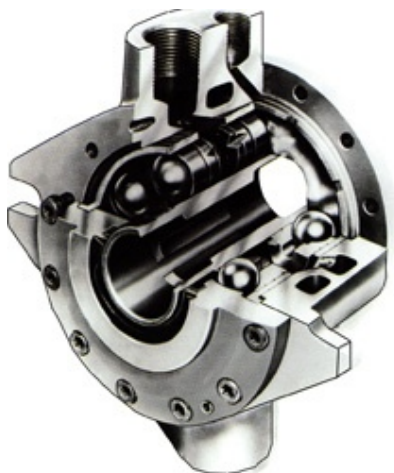


Рисунок 4 — Гидромашинка SF фирмы *Oleodinamica Geco*

При разработке шестеренных насосов внешнего зацепления большое внимание уделяется снижению уровня пульсаций подачи за счет внедрения прогрессивных конструктивных решений — использования сдвоенных шестерен, повернутых на 1/2 шага, применения невольвентного зубчатого зацепления и ряда других.

Интенсивно развиваются малошумные шестеренные насосы внутреннего зацепления, которые нашли широкое применение для перекачивания маловязких жидкостей в различном технологическом оборудовании. Такие ведущие фирмы как *Sauer*, *Linde*, *Bosch Rexroth* и др. широко применяют шестеренные насосы внутреннего зацепления в качестве насосов подпитки при создании гидрообъемных передач с замкнутой циркуляцией. В шестеренных насосах с внутренним зацеплением значительное снижение шума удалось достичь за счет исключения запирания рабочей жидкости в межзубьевых впадинах и расширения угловых секторов, соответствующих зонам всасывания и нагнетания.

В электрогидравлических приводах используются новые шестеренные насосы внутреннего зацепления модели QX фирмы *Bucher Hydraulics* с рабочим объемом $V_0 = 10\text{--}160 \text{ см}^3$, которые имеют большой скоростной диапазон, долговечность, способны выдерживать максимальные ускорения и возможность работы на различных рабочих жидкостях с хорошими антикавитационными характеристиками [3]. Основные параметры таких насосов: давление номинальное/пиковое 25/28 МПа; частота вращения 4600–2300 мин⁻¹; уровень шума 57–67 дБА (при $p=20 \text{ МПа}$ и $n=1500 \text{ мин}^{-1}$). Современной тенденцией развития шестеренных насосов внутреннего зацепления является увеличение КПД, снижение шума и неравномерности подачи, уменьшение габаритов, что может быть достигнуто путем многокритериальной оптимизации их параметров на базе разработанных математических моделей [13].

Одной из перспективных тенденций развития нефтедобычи является использование для диспергации воздуха, в качестве входных ступеней центробежных насосов лабиринтно-винтовых ступеней. Следует отметить, что лабиринтно-винтовые насосы широко используются в различных отраслях промышленности для перекачивания агрессивных и маловязких сред при практически нулевой пульсации потока и давления [14]. Развитие таких насосов происходит в направлении совершенствования формы их проточной части, определения оптимальных конструктивных и рабочих параметров.

При разработке и проектировании насосов ведущими фирмами-производителями большое внимание уделяется снижению шума и вибрации за счет совершенствования процессов распределения, изменения геометрии корпуса, использования гидростатической разгрузки, уменьшения сжимаемого объема рабочей камеры, расширения всасывающей линии, виброизоляции насосного агрегата. Например, введение компенсационных камер в насосах PV фирмы *Parker*, а также применение насосов с пропорциональным электроуправлением обеспечивает в мобильных машинах энергосбережение и защиту двигателя от перегрузок.

Для оценки энергоэффективности насосного оборудования в соответствии с законодательными нормативами Евросоюза [15] в статье [16] предлагается использовать

индекс энергетической эффективности EEI (Energy Efficiency Index), который определяется по формуле

$$EEI = \frac{P_{L,avg}}{P_{ref}} C_{20\%}, \quad (1)$$

где $P_{L,avg}$ — среднее значение мощности, которая потребляется данным насосом с учетом стандартизованного профиля нагрузки, рассчитывается по формуле (2) как среднее значение мощности, которая потребляется насосом за период его работы

$$P_{L,avg} = 0,06P_{L,100\%} + 0,15P_{L,75\%} + 0,35P_{L,50\%} + 0,44P_{L,25\%}; \quad (2)$$

P_{ref} — эталонная мощность как расчетная величина для циркуляционного насоса определенного типа; $C_{20\%}$ — законодательно принятый поправочный коэффициент, который учитывает, что только 20 % существующих циркуляционных насосов удовлетворяют требованиям $EEI=0,20$, $C_{20\%}=0,49$.

Отмечается, что момент принятия $EEI = 0,20$ является так называемым целевым ориентиром, то есть величиной, к которой необходимо стремиться. На законодательном уровне установлено, что для циркуляционных насосов мощностью 2500 Вт, которые поставляются как отдельные агрегаты, возможная величина индекса энергетической эффективности с 2013 года составляет $EEI = 0,27$.

Для насосов с подачей до 1000 м³/час шести конструктивных схем — консольных, консольно-моноблочных, консольно-моноблочных с расположением патрубков «в линию», вертикальных многоступенчатых и погружных многоступенчатых, в соответствии с EN 16480 «Минимальный требуемый КПД центробежных насосов для воды» введен показатель энергоэффективности MEI (Minimum Efficiency Index) — индекс минимального КПД. Отмечено, что MEI является десятичным числом менее 1,0 и отражает количественное соотношение представленной на рынке продукции разного технического уровня. Индекс MEI определяют по методике из статьи [15].

Приведенный выше индекс энергетической эффективности (1) есть ничем иным как интегральным КПД насоса, определенным для диапазона его работы на номинальном режиме и режимах, отличных от номинального, близких к нему.

Стандарт EN16480 фактически определяет порядок оценки технического уровня насоса по трем точкам характеристики КПД — q_{PL} (нагрузке при $q = 0,75 q_{BER}$), q_{BER} (в точке максимального КПД) и q_{OL} (перегрузке, при $q = 1,1 q_{BER}$) и задает значения КПД в этих точках («домик» КПД), ниже которых фактические значения КПД насоса опускаться не могут (рисунок 5).

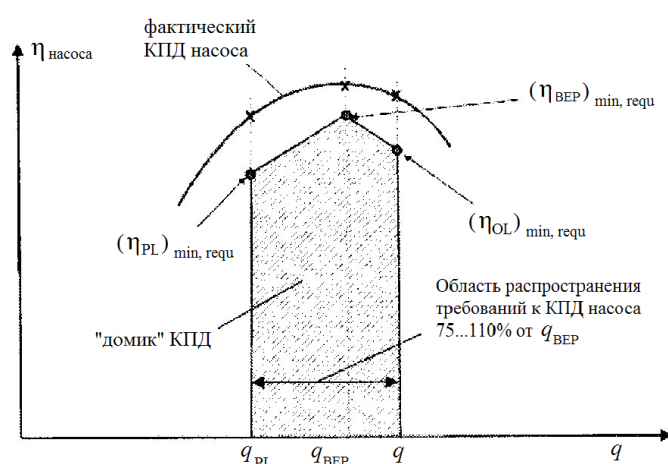


Рисунок 5 — Зависимость КПД насоса от расхода

Гидродвигатели

Современной тенденцией развития высокомоментных радиально-плунжерных гидромоторов, по данным работы [17], является исключение из их конструкции подшипников качения, изменение распределительного узла и использование гидростатической разгрузки. Это позволило увеличить КПД, в том числе и пускового режима, радиально-поршневого гидромотора многократного действия до 0,95—0,98.

Постоянно совершенствуется конструкция гидромоторов. Так, наличие встроенных датчиков качания поршней регулируемых радиально-поршневых гидромоторов фирмы *Bosch Rexroth*, обеспечивает возможность их использования в замкнутых циклах регулирования. Фирма *SAI* создала регулируемые радиально-поршневые гидромоторы нового поколения TV, BVFK4 и TS8, в том числе со встроенными редукторами, тормозами и датчиками угла поворота [11]. Планетарно-роторные гидромоторы фирмы *Hidroimpex* мощностью 2; 6,5; 11; 22 и 33 кВт имеют одинаковые присоединительные размеры и отличаются только длиной корпуса, что позволяет достичь уровня унификации 85 %. Центральные сквозные отверстия, выполненные в них, обеспечивают возможность компактной встройки в приводные механизмы [18, 19].

Одной из технических новинок последних лет являются энергосберегающие регулируемые радиально-поршневые гидромоторы *Parker* (рисунок 6), внутри вращающегося вала которых расположены цилиндры управления 1, изменяющие величину эксцентриситета. Наличие гидрозамков в системе управления гидромотором позволяет это делать ступенчато в зависимости от времени и числа включений управляющего гидрораспределителя [9].

Роторные планетарные гидромоторы с плавающими сателлитами и некруглыми солнечными колесами является одним из перспективных направлений развития роторных гидромашин. На основании анализа удельной массы гидромоторов различных типов [20], установлено, что у планетарных гидромоторов с плавающими

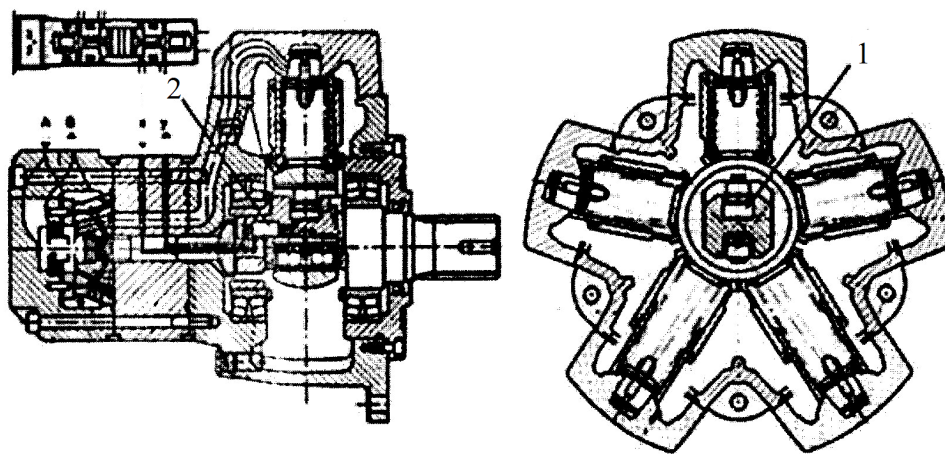


Рисунок 6 — Регулируемый радиально-поршневой гидромотор фирмы Parker

сателлитами с увеличением массы в два раза рабочий объем увеличивается в 6,5 раза. Для героторных гидромоторов их масса от рабочего объема практически не зависит. Для одного и того же рабочего объема масса аксиально-поршневого гидромотора по сравнению с планетарным с плавающими сателлитами больше в 6 раз, радиально-поршневого в 2 раза, героторного в — 5 раз. Удельный момент планетарных гидромоторов с плавающими сателлитами приходящийся на его массу, значительно превышает все остальные. Эти гидромоторы по массогабаритным показателям и по коэффициенту совершенствования конструкции в настоящее время не имеют себе равных [20]. Дальнейшее развитие таких гидромоторов лежит в плоскости изучения рабочих процессов, определения оптимальных конструктивных и рабочих параметров.

Для реализации неполноповоротных вращательных движений расширяется использование поворотных гидродвигателей, в том числе с поршнем, имеющим разнонаправленные несамотормозящие винтовые нарезки, которые взаимодействуют с соответствующими нарезками корпуса и выходного вала.

Развитие гидроцилиндров идет в направлении их доукомплектования различными компонентами, совершенствованием технологии изготовления. В настоящее время разработаны цилиндры с гидрогазовыми аккумуляторами, встроенными в шток, а



Рисунок 7 — Цилиндр, укомплектованный малогабаритной гидростанцией

также датчиками положения поршня, регуляторами расхода, электроуправляемыми распределителями и малогабаритными гидростанциями (рисунок 7). Использование новых технологий и датчиков при их изготовлении позволяет получить гидроцилиндры с совершенно новыми качествами. Так, гидроцилиндры фирмы *Hunger Hydraulik* позволяют контролировать ход с разрешением 1 мм и обеспечивают работу в среде соленой морской воды [11]. Созданы принципиально новые приводные элементы — механические мышцы, представляющие собой отрезок рукава высокого давления с заделками. При подаче давления происходит увеличение поперечного сечения мускула и соответствующее уменьшение его длины, т.е. создается тяговое усилие в осевом направлении [11].

Гидроаппаратура

Современной тенденцией в развитии гидроаппаратуры является ее миниатюризация ($D_y = 2 \text{ мм}$), расширение ее номенклатуры и улучшение технических параметров, применение аппаратуры ввертного монтажа (рисунок 8) и оригинальных аппаратов для выполнения заданных функций.

Все больше в гидроаппаратах находит применение управление от задающих шаговых электродвигателей, являющихся частью цифровой электрической машины [3].

Наиболее интенсивное развитие получили гидроаппараты, связывающие электронные системы управления с исполнительными механизмами. А именно дросселирующие гидрораспределители и аппараты с пропорциональным электрическим управлением, особенно со встроенной системой контроля и управления.

Ряд ведущих фирм, производителей гидроаппаратуры, предлагает аппараты ввертного монтажа для создания гидроблоков. Система картриджных клапанов *CVS* фирмы



Рисунок 8 — Гидроаппараты ввертного монтажа

Parker, в том числе объединенных в интегральные блоки, обеспечивает минимизацию гидролиний, повышение герметичности, компактность конструкции, упрощение сборки и обслуживания, а также оптимизацию схемных решений [11]. Арматура и вентили фирмы «Мониторинг вентиль и фитинг» работает на давлении до 1000 МПа. Так вентили с пневмоуправлением работают при давлении до 700 МПа, а шаровые краны — до 140 МПа [1].

Важным направлением развития гидроаппаратуры является создание взрывобезопасной электрогидравлики в основном для нефтяной, газовой или горнодобывающей промышленности, химического машиностроения и судостроения, а также гидрооборудования для работы на водной эмульсии HFA (95 % воды) или чистой воде. Типичным представителем этого направления является изготовленный фирмой *Atos* из нержавеющей стали трехлинейный седельный гидрораспределитель с пропорциональным взрывобезопасным электроуправлением и дублирующим ручным [12].

Для повышения энергоэффективности гидроаппаратов реализована идея использования отдельного регулирования открытия рабочих кромок, которая используется в гидросистемах с дифференциальными гидроцилиндрами [3].

Электрогидравлика

Современной тенденцией в развитии систем электрогидроприводов является разработка мехатронных модулей и их компонентов. Управление такими электрогидравлическими приводами осуществляется распределителями с пропорциональным электрическим управлением, предохранительными и редуцирующими



Рисунок 9 — Компактный модуль фирмы *Hawe*

клапанами, регуляторами расхода. Привод оснащен насосом (в том числе с p/q — регулированием — одновременным управлением давлением и подачей), сервоцилиндром, датчиками и электронными устройствами управления.

Продолжает развиваться перспективное направление создания так называемых электрогидростатических приводов (ЕНА). В отличие от электромеханических аналогов взамен сложных, дорогих и сравнительно малонадежных исполнительных механизмов, связывающих электрический серводвигатель с нагрузкой (редукторов, винтовых передач и др.) здесь установлены гидроцилиндр, насос с реверсом по потоку и простейшие предохранительные клапаны. В гидросистеме отсутствует дросселирующая и направляющая гидроаппаратура, пуск-останов, изменение направления и скорости движения обеспечивается электрическим серводвигателем, который способен также точно позиционировать рабочий орган при наличии датчика обратной связи.

В режиме остановки серводвигатель вращается с минимальной частотой ($\sim 100\text{--}200 \text{ мин}^{-1}$), достаточной, чтобы насос поддерживал рабочее давление в гидросистеме, причем потери мощности при этом пренебрежительно малы [3]. В результате получаем автономный узел для соединения с системами питания и управления только электропроводами и практически не нуждающегося в техобслуживании при длительной эксплуатации. Концепция ЕНА была предложена более

20 лет назад фирмой *Moog* для авиационных рулевых механизмов и отлично себя зарекомендовала. Сейчас ЕНА — приводы для общемашиностроительного применения, освоили мировые лидеры гидравлики *Moog, Voith, Turbo, Bosch Rexroth, Parker* и др.

Гибридные энергосберегающие электростатические приводы (ЕНА) фирмы *Moog* кроме авиации находят применение в машиностроительной, энергетической и нефтегазовой промышленности, что позволяет снизить на 40% вес, уменьшить стоимость и износ, повысить надежность и полностью исключить загрязнение окружающей среды. Для уменьшения шума в компактных гидроагрегатах *Hawe* насосный агрегат расположен под уровнем рабочей жидкости в баке, а гидроаппаратура управления — на монтажных блоках, расположенных снаружи (рисунок 9) [11].

Энергосбережение

Использование замкнутых контуров циркуляции на базе регулируемых гидромашин в мобильных машинах позволяет снизить энергетические потери, улучшить условия «холодного запуска», а также почти вдвое повысить допускаемую частоту вращения, соответственно, подачу. Многочисленные примеры применения новейших систем пропорционального управления в мобильных машинах, которые упрощают их управление и улучшают условия работы, обеспечивают рекуперацию энергии и экономию топлива приведены в статьях [11, 21].

Перспективным направлением энергосбережения, наряду с известными, такими как установка аккумуляторов, замена дроссельного регулирования машинным и др. является частотное регулирование и использование различных способов рекуперации энергии за счет действия сил гравитации и торможения движущихся масс.

В статье [22] для повышения энергоэффективности электрогидравлического *flow sharing* гидропривода предложено использовать беспружинный компенсатор давления. На основании предложенного алгоритма синтезировано полное множество схемных решений беспружинных компенсаторов давления для таких гидроприводов. Показано, что теоретический КПД их приближается к единице.

Тенденциями в повышении энергоэффективности современного гидрооборудования является применение регулируемых насосов, в том числе и с компенсаторами давлений (возможно, со сбросом давления в паузах между рабочими циклами); *p/q*-регулированием, обеспечивающим электронное управление давлением и подачей в соответствии с требованием того или иного конкретного перехода цикла, или *LS*-регулированием; использование многопоточных нерегулируемых насосов с возможностью индивидуальной разгрузки секций; использованием насосно-аккумуляторных гидроприводов, в которых нерегулируемый насос периодически подзаряжает аккумулятор и разгружается в паузах между

циклами подзарядки [23]. В длительных паузах между циклами вообще возможно полное отключение насоса, однако этого предпочитают не делать, направляя поток рабочей жидкости под минимальным давлением в системы кондиционирования.

Техническое обслуживание

Одним из перспективных направлений в повышении технического уровня гидроприводов является грамотная организация их технического обслуживания и ремонта.

В области фильтрации рабочих жидкостей современной тенденцией является использование саморегенерирующихся полнопоточных гидродинамических фильтров с пневматическим или электромагнитным приводом для пульсации фильтроэлемента, разработанных в ДонГТУ [24]. Они позволяют обеспечить степень очистки в 15–20 *мкм*, при ячейке 70 *мкм*, и подавать на очистку жидкость 17-го класса чистоты по ГОСТ 17216 с частицами до 150 *мкм*. При этом отпадает необходимость в многокаскадных схемах, фильтры не нуждаются в очистке, исключается опасность их засорения, а благодаря крупной сетке требуемая площадь поверхности фильтроэлемента в 16 раз меньше, чем у механического статического фильтра равной производительности и равной тонкости фильтрования. Такие фильтры выпускаются на пропускную способность от 4 *л/мин* до 1000 *м³/ч* с тонкостью очистки до 0,025 *мм* для масел, воды, лаков, красок, топлив, эмульсий, смазочно-охлаждающих жидкостей, клеев и др. Заметим, что наиболее рациональным путем сокращения расхода рабочих жидкостей является их регенерация непосредственно в емкостях машины и замена только при капитальном ремонте.

Перспективным является использование в качестве рабочих жидкостей эмульсий, представляющих собой механическую смесь 1—2 % маслянистой или синтетической жидкости в обычной воде. Качество таких суспензий по смазывающим, антиокислительным, антибактериальным, антикоррозионным и другим свойствам не уступает минеральным маслам, а стоимость в 30—50 раз меньше. Такие рабочие жидкости находят применение в гидрооборудовании, работающем на воде при давлении до 400 *МПа* [24].

Выводы

На основании проведенного анализа научно-технической литературы установлено, что основными направлениями развития систем объемных гидроприводов являются:

- энергосбережение за счет использования: рекуператоров энергии; электрической обратной связи и электрогидравлического регулятора потока; многопоточных насосов, в которых возможна индивидуальная разгрузка отдельных секций. Повышение КПД гидромашин, оптимизация

схемных решений, применение новейших систем пропорционального электрического управления, замена дроссельного регулирования машинным, использование принципа частотного регулирования или насосно-аккумуляторного гидропривода, различных способов рекуперации энергии, разработка мехатронных модулей и их компонентов;

- повышение рабочего давления, использование электрогидростатических приводов, мультипликаторов давления и блочно-модульного принципа построения гидросистем, снижение габаритов и металлоемкости при одновременном росте удельных мощностей;
- применение регулируемых аксиально-поршневых насосов, в том числе и оснащенных энергосберегающими LS-регуляторами, и новых шестеренных насосов внутреннего зацепления модели QX фирмы *Bucher Hydraulics*. Повышение технического уровня насосов путем совершенствования процесса распределения, изменения геометрии корпуса, использования гидростатической разгрузки, уменьшения сжимаемого объема рабочей камеры, расширения всасывающей линии и применения пропорционального электроуправления;
- применение планетарно-роторных гидромоторов фирмы *Hidroimpex*, исключение из конструкции высокомоментных радиально-плунжерных гидромоторов подшипников качения, использование гидростатической разгрузки, встроенных редукторов, тормозов и датчиков угла поворота;
- расширение номенклатуры гидроаппаратов, в основном в сторону миниатюризации, для создания гидроблоков, использование аппаратов ввертного монтажа и картриджных клапанов, применение аппаратов с пропорциональным электрическим управлением со встроенной системой контроля и управления, гидроаппаратов, управляемых шаговыми электродвигателями, разработка оригинальных гидроаппаратов для выполнения уникальных функций;
- использование в качестве рабочих жидкостей эмульсий, основой которых является обычная вода, и минеральных масел с высоким индексом вязкости, регенерация рабочих жидкостей непосредственно в емкостях машины и использование для ее очистки саморегенерирующихся полнопоточных гидродинамических фильтров;
- снижение уровня шума и вибрации за счет совершенствования конструктивных решений, обеспечивающих оптимальное протекание рабочих процессов, применение новых технологий при изготовлении гидравлических компонентов. Грамотная организация технического обслуживания.

Литература

1. Свешников, В.К. Где настоящее встречается с будущим. Выставка «Интердрайв-2012» глазами эксперта / В.К. Свешников: <http://www.konstruktor.net/pogrobnee-elekt/items>
2. Андренко, П.Н. Тенденции развития объемных гидроприводов / П.Н. Андренко, З.Я. Лурье // Промислова гідравліка і пневматика. 2013. — №3(41). — С. 3—12.
3. Свешников, В.К. Иновации в гидравлике / В.К. Свешников // РИТМ 24.04.15: www.ritm-magazine.ru
4. Кулешков, Ю.В. Шестеренные насосы с асимметричной линией зацепления шестерен (теория, конструкция и расчет) / Ю.В. Кулешков, М.И. Черновол, О.В. Бевз, Ю.А. Титов. — Кировоград: КОД, 2009. — 257 с.
5. Крутиков, Г.А. Системи гідроприводів: навч. посіб. / Г.А. Крутиков, М.Г. Стрижак, за ред. Крутикова Г.А. — Х.: НТУ «ХП», 2014. — 220 с.
6. Андренко, П.М. Поліпшення енергетичних характеристик об'ємних гідроагрегатів / П.М. Андренко, А.Ю. Лебедев // Вісник Чернігівського Державного технологічного університету. — № 2 (49). — С. 98—101.
7. Галухин, Н.А. Исследование влияния насыщения потока насоса на КПД Flow sharing гидропривода / Н.А. Галухин // Промислова гідравліка і пневматика. — 2014. — №1 (43). — С. 55—63.
8. Аврунін, Г.А. Основи об'ємного гідропривода і гідропневмоавтоматики: навч. посіб. / Г.А. Аврунін, І.Г. Кириченко, І.І. Мороз. Під ред. Г.А. Авруніна. — Х.: ХНАДУ, 2009. — 424 с.
9. Свешников, В.К. Энергосбережение в современных гидроприводах / В.К. Свешников // РИТМ 15.08.11. www.ritm-magazine.ru
10. Rexroth Sytronics — энергоэффективный гидропривод с регулируемой частотой вращения: <http://www.znk.by>
11. Свешников В.К. Развитие гидропривода: итоги 2011 г. / В.К. Свешников: <http://neftegaz.ru/analysis/view>
12. Свешников, В.К. Гидравлика на выставке ITFM / В.К. Свешников // Торговая площадка. Пульс цен. Екатеринбург, 18.11.2010: price@pulscen.ru
13. Лурье, З.Я. Поэтапная многокритериальная оптимизация качающих узлов шестеренных насосов внутреннего зацепления по заданному рабочему объему / З.Я. Лурье, А.И. Гасюк // Вісник Національного політехнічного університету «ХП». Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. — 2014. — № 1 (1044). — С. 69—76.
14. Лебедев, А.Ю. Визначення нерівномірності подачі лабіринтно-гвинтового насоса. / А.Ю. Лебедев,

П.М. Андренко // Промислова гідравліка і пневматика. — 2012. — №3 (37). — С. — 33—37.

15. Draft EUROPEAN STANDART prEN 16480 Pumps — Minimum required efficiency of rotodynamic water.

16. Тердохлеб, И. Современный подход к энергоэффективности насосного оборудования / И. Тердохлеб, А. Костюк, С. Соколов // Насосы и оборудование. 4-5/2014. С. 20—21: www.allpumps.kiev.ua

17. Финкельштейн, З.Л. Тенденции развития высокомоментных гидромоторов / З.Л. Финкельштейн // XVIII Міжнародна наук.-техніч. конф. «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці». Київ 21—24 трав. 2013 р.: Матеріали конф. — К.: Підприємство УВОІ «Допомога» УСІ», 2013. — С. 111—112.

18. Панченко, А.И. Обоснование путей улучшения выходных характеристик планетарных гидромашин малой мощности / А.И. Панченко, А.А. Волошина, А.А. Зуев, В.П. Кувачев // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. — 2012. — Вип. 12. — Т. 3. — С. 15—27.

19. Панченко, А.И. Экспериментальные исследования области изменения выходных характеристик гидравлических вращателей планетарного типа / А.И. Панченко, А.А. Волошина, И.А. Панченко // Праці Таврійського держ. агротехнологічного ун-ту. — 2015. — Вип. 15. — Т. 3. — С. 157—147.

20. Финкельштейн, З.Л. Малогабаритные высокомоментные планетарные гидромоторы с плавающими сателлитами / З.Л. Финкельштейн, А.П. Палюх // Промислова гідравліка і пневматика. — 2013 — №1 (39). — С. — 16—20.

21. Свешников, В.К. Новейшие гидроприводы стационарных машин / В.К. Свешников // Гидравлика & Пневматика, 2005. — № 20. — С. 3—11.: www.hap.ru

22. Галухин, Н.А. Новые энергосберегающие решения в электрогидравлическом Flow sharing гидроприводе / Н.А. Галухин // Промислова гідравліка і пневматика. — Вінниця ВДАУ, 2015. — №3 (49). — С. — 59—67.

23. Свешников В. Перспективы применения гидропривода в современных станках / В. Свешников, Г. Иванов // Гидравлика и Пневматика. 28.11.2011: <http://konstruktor.net/system>

24. Финкельштейн, З.Л. Експлуатація, обслуговування та надійність гідравлічних машин і гідроприводів: навч. посіб. / З.Л. Финкельштейн, П.М. Андренко, О.В. Дмитрієнко; під ред. проф. П.М. Андřenка. — Х.: НТУ «ХП», 2014. — 308 с.

References

1. Sveshnikov, V.K. Gde nastoyashchee vstrechaetsya s budushchim. Vystavka «Interdrayv-2012» glazami eksperta / V.K. Sveshnikov: <http://www.konstruktor.net/podrobnee-elekt/items>

2. Andrenko, P.N. Tendentsii razvitiya obyemnykh gidroprivodov / P.N. Andrenko, Z.Ya. Lure // Promislova gidravlika i pnevmatika. — 2013. — № 3(41). — S. 3—12.

3. Sveshnikov, V.K. Inovatsii v gidravlike / V.K. Sveshnikov // RITM 24.04.15: www.ritm-magazine.ru

4. Kuleshkov, Y.V. Shesterennye nasosy s asimmetrichnoy liniy zatspleniy shesteren (teoriya, konstruktsiya i raschet) / Y.V. Kuleshkov, M.I. Chernovol, O.V. Bevez, Y.A. Titov. — Kirovograd: «KOD», 2009. — 257 s.

5. Krutikov, G.A. Sistemy gidroprivodiv: navch. posib. / G.A. Krutikov, M.G. Strizhak, za red. Krutikova G.A. — H.: NTU «HPI», 2014. — 220 s.

6. Andrenko, P.M. Polipshennyya energetichnykh kharakteristik obiemykh gidroagregativ / P.M. Andrenko, A.Y. Lebedev // Visnik Chernigivskogo Derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu. — 2011. — № 2 (49). — S. 98—101.

7. Galuhin, N.A. Isslyedovanie vliyaniya nasyscheniya potoka nasosa na KPD Flow sharing gidroprivoda / N.A. Galuhin // Promyslova gidravlika i pnevmatika. — 2014. — №1 (43). — S. 55—63.

8. Avrunin, G.A. Osnovy obiemnogo gidroprivoda i gidropnevmoavtomatyki: navch. posib. / G.A. Avrunin, I.G. Kirichenko, I.I. Moroz. Pid red. G.A. Avrunina. — H.: HNADU, 2009. — 424 s.

9. Sveshnikov, V.K. Energoberezhenie v sovremennykh gidroprivodakh / V.K. Sveshnikov // RITM 15.08.11. www.ritm-magazine.ru

10. Rexroth Sytronics — energoeffektivnyi gidroprivod s reguliruemoy chastotoy vrashcheniya: <http://www.znk.by>

11. Sveshnikov, V.K. Razvitie gidroprivoda: itogi 2011 goda / V.K. Sveshnikov: <http://neftegaz.ru/analysis/view>

12. Sveshnikov, V.K. Gidravlika na vystavke ITFM / V.K. Sveshnikov // Torgovaya ploshchadka. Puls tsen. Ekaterinburg, 18.11.2010.: price@pulszen.ru

13. Lurye, Z.Ya. Poetapnaya mnogokriterialnaya optimizatsiya kachayushchikh uzlov shesterennykh nasosov vnutrennego zatspleniy po zadannomu rabochemu obiomu / Z.Ya. Lurye, A.I. Gasyuk // Visnik Natsionalnogo politekhnichnogo unsvrsitetu «HPI». Ser.: Energetichni ta teplotekhnichni protsesy i ustatkuvannya. — 2014. — № 1 (1044). — S. 69—76.

14. Lebedev, A.Y. Vyznachennyya nerivnomirnosti podachi labiryntno-gvyntovogo nasosa. / A.Y. Lebedev, P.M. Andrenko // Promyslova gidravlika i pnevmatyka. — 2012. — № 3 (37). — S. 33—37.

15. Draft EUROPEAN STANDART prEN 16480 Pumps — Minimum required efficiency of rotodynamic water.

16. Tverdokhleb, I. Sovremenniy podkhod k energoefektivnosti nasosnogo oborudovaniya / I. Tverdokhleb, A.Kostyuk, S. Sokolov // Nasosy i oborudovanie. 4-5/2014. — S. 20—21: www.allpumps.kiev/ua

17. Finkelshteyn, Z.L. Tendentsii razvitiya vysokomomentnykh gidromotorov / Z.L. Finkelshteyn // XVIII Mizhnarodna nauk.-tekhnic. konfer. «Gidroaeromekhanika v inzhenerniy praktitsi». Kyiv 21—24 trav. 2013 r.: Mater. konf. — K.: Pidpryemstvo UVOI «Dopomoga» USI», 2013. — S. 111—112.

18. Panchenko, A.I. Obosnovanie putey uluchsheniya vykhodnykh kharakteristik planetarnykh gidromashin maloy moshchnosti / A.I. Panchenko, A.A. Voloshina, A.A. Zuev, V.P. Kuvachev // Pratsi Tavriyskogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu. — 2012. — Vip. 12, T. 3. — S. 15—27.

19. Panchenko, A.I. Eksperimentalnye issledovaniya oblasti izmeneniya vykhodnykh kharakteristik gidravlicheskiy vrashchateley planetarnogo tipa / A.I. Panchenko, A.A. Voloshina, I.A. Panchenko // Pratsi Tavriyskogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu. — 2015. — Vip. 15, T. 3. — S. 157—147.

20. Finkelshteyn, Z.L. Malogabaritnyye vysokomomentnyye planetarnyye gidromotory s plavayushchimi satellitami / Z.L. Finkelshteyn, A.P. Palyuh // Promyslova gidravlika i pnevmatika. — 2013 — № 1 (39). — S. 16—20.

21. Sveshnikov, V.K. Noveyshie gidroprivody statsionarnykh mashin / V.K. Sveshnikov // Gidravlika & Pnevmatika, 2005. — № 20. — S. 3—11.

22. Galuhin, N.A. Novyye energosberegayushchie resheniya v elektrogidravlicheskom Flow sharing gidroprivode / N.A. Galuhin // Promyslova gidravlika i pnevmatyka. — 2015. — № 3 (49). — S. — 59—67.

23. Sveshnikov, V. Perspektivy primeneniya gidroprivoda v sovremennykh stankakh / V. Sveshnikov, G. Ivanov // Gidravlika i Pnevmatyka. 28.11.2011: http://konstruktor.net/system

24. Finkelshteyn, Z.L. Ekspluatatsiya, obslugovuvannya ta nadiynist gidravichnykh mashin i gidroprivodiv: navch. posib. / Z.L. Finkelshteyn, P.M. Andrenko, O.V. Dmitrienko; pid red. prof. P.M. Andrenka. — H.: NTU «HPI», 2014. — 308 s.

УДК 62-82

Напрямки розвитку об'ємних гідроприводів

П.М. Андренко,
З.Я. Лур'є

Наведено аналітичний огляд технічного рівня продукції, яка виробляється провідними світовими фірмами-виробниками гідрообладнання для встановлення перспективних конструктивних і схемних рішень, а також параметрів елементів та пристроїв об'ємного гідропривода, на які слід орієнтуватися при проектуванні нових гідрофікованих машин. Встановлено, що стратегічним напрямком розвитку об'ємного гідропривода та його компонентів є енергозбереження за рахунок використання компенсаторів тиску і рекуператорів енергії, багатопотокових насосів, застосування електричного зворотного зв'язку та принципу частотного регулювання, насосно-акумуляторного гідропривода, зниження габаритів і металоємності при одночасному зростанні питомих потужностей.

Наведено основні технічні характеристики сучасних аксіально-поршневих, шестеренних насосів і гідромоторів. Описано особливості їх конструктивного виконання, які дозволяють підвищити їх технічний рівень.

Встановлено, що сучасною тенденцією розвитку гідроапаратури є її мініатюризація, розширення номенклатури та покращення технічних параметрів, застосування апаратури ввертного монтажу. Показано, що найбільш інтенсивний розвиток отримали дроселюючі гідророзподільники та апарати з пропорційним електричним керуванням, особливо з вбудованою системою контролю і управління, гідроапарати які, управляються кроковими електродвигунами. Розглянуто питання технічного обслуговування гідроприводів.

Ключові слова: об'ємний гідропривод, гідромашини, гідроапаратура, технічний рівень, енергозбереження, індекс енергетичної ефективності.

UDK 62-82

Trends of volume hydraulic drive development

P. Andrenko,
Z. Lurye

Prepared analytical review of technical level of products, which are produced by leading hydraulic equipment manufacturers with aim to establish prospective design and parameters of hydraulic drive, which should be focused while designing

Надійшла 21.03. 2016 року

new hydraulic machines. It was found that strategic direction development of volume hydraulic drive and its components is energy saving by implementation the following improvements: using of pressure compensators and energy heat exchangers of multicircuit pumps, applying electrical feedback and frequency control, using pump-accumulator hydraulic drive, reducing overall dimensions and steel intensity to increase specific power of volume hydraulic drive at the same time.

Proposed basic technical characteristics of modern axial piston, gear pumps and hydro motors. Described features of their design solutions that to improve the technical level of them.

It was established that state-of-the-art trend of hydraulic equipment development is size reduction, range expanding, technical parameters improving and using of screw-joint. It is shown that throttling direction control valves, proportional electric control devices especially with integrated control system and hydraulic valve with step motor drive are the most developing devices. Described maintenance intervention schedules of hydraulic valves.

Keywords: volume hydraulic drive, hydraulic machines, hydraulic equipment, technical level, energy saving, energy efficiency index.