

В. И. СЕРИКОВ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН В ПРИВОДАХ МЕХАНИЗМОВ И ТРАНСМИССИЯХ (ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ)

Работа посвящена обзору современных тенденций проектирования, исследования и использования гидравлических машин в приводах механизмов и трансмиссиях. Проведен анализ применения гидромеханических трансмиссий. Описаны преимущества и недостатки гидромеханических трансмиссий по сравнению с механическими. Выполнен краткий обзор современных подходов к проектированию новых изделий с учетом существующих информационных технологий. Проанализированы современные программные продукты, предназначенные для сопровождения проекта на разных этапах жизненного цикла изделия. Было выяснено, что в настоящий момент времени появление отдельных вариантов узкоспециализированного программного обеспечения с современным интерфейсом для синтеза структуры проектируемого изделия не дает возможности решать проблемы синтеза и структурного анализа гидромеханических трансмиссий. Проведен обзор анализа эксплуатационных факторов, влияющих на отказоустойчивость и параметры работы гидрообъемных передач в целом и гидромеханической трансмиссии в частности. Рассмотрены примеры технических решений, которые позволяют снизить количество отказов, связанных с воздействием того или иного фактора, уменьшить его влияние на параметры механизма. Проведен анализ источников с информацией об исследовании параметров гидрообъемных передач с помощью натуральных испытаний или разработанного авторами математического аппарата. Намечены пути решения задач, возникающих на этапах проектных исследований.

Ключевые слова: проектирование, гидрообъемная передача, гидромеханическая трансмиссия, влияние эксплуатационных факторов, синтез

В. І. СЕРИКОВ

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІ ПРОЕКТУВАННЯ, ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ МАШИН У ПРИВОДАХ МЕХАНІЗМІВ І ТРАНСМІСІЯХ (ОГЛЯДОВА СТАТТЯ)

Робота присвячена огляду сучасних тенденцій проектування, дослідження та використання гідравлічних машин у приводах механізмів та трансмісіях. Проведено аналіз застосування гідромеханічних трансмісій. Описані переваги та недоліки гідромеханічних трансмісій порівняно з механічними. Виконано стислий огляд сучасних підходів до проектування нових виробів з урахуванням існуючих інформаційних технологій. Проаналізовано сучасні програмні продукти, призначені для проведення проекту на різних етапах життєвого циклу виробу. Було з'ясовано, що зараз поява окремих варіантів вузькоспеціалізованого програмного забезпечення з сучасним інтерфейсом для синтезу структури проектного виробу не дає можливості вирішувати проблеми синтезу і структурного аналізу гідромеханічних трансмісій. Проведено огляд аналізу експлуатаційних факторів, що впливають на відмовостійкість та параметри роботи гідрооб'ємних передач загалом та гідромеханічної трансмісії зокрема. Розглянуто приклади технічних рішень, які дозволяють знизити кількість відмов, пов'язаних із впливом того чи іншого фактора, зменшити його вплив на параметри механізму. Проведено аналіз джерел з інформацією про дослідження параметрів гідрооб'ємних передач за допомогою натурних випробувань або розробленого авторами математичного апарату. Намічено шляхи вирішення завдань, що виникають на етапах проектних досліджень.

Ключові слова: проектування, гідрооб'ємна передача, гідромеханічна трансмісія, вплив експлуатаційних факторів, синтез

V. SIERYKOV

MODERN TRENDS OF DESIGN, RESEARCH AND USE OF HYDRAULIC MACHINES IN DRIVES OF MECHANISMS AND TRANSMISSIONS (REVIEW ARTICLE)

The work is devoted to an overview of modern trends in the design, research and use of hydraulic machines in the drives of mechanisms and transmissions. The analysis of the use of hydromechanical transmissions has been carried out. The advantages and disadvantages of hydromechanical transmissions in comparison with mechanical ones are described. A brief overview of modern approaches to the design of new products, taking into account the existing information technologies, is carried out. We have analyzed modern software products designed to support the project at different stages of the product life cycle. It has been found that at the present time the appearance of individual variants of highly specialized software with a modern interface for synthesizing the structure of a designed product does not make it possible to solve the problems of synthesis and structural analysis of hydro-mechanical transmissions. A review of the analysis of operational factors affecting the fault tolerance and operating parameters of hydrostatic transmissions in general and hydromechanical transmission in particular is carried out. We have also considered the examples of technical solutions that allow to reduce the number of failures associated with the influence of one factor or another, as well as allow to reduce its influence on the parameters of the mechanism. The analysis of sources with information on the study of the parameters of hydrostatic transmissions using field tests or the mathematical apparatus developed by the authors is carried out. The ways of solving problems arising at the stages of design research are outlined.

Keywords: design, hydrostatic transmission, hydromechanical transmission, influence of operational factors, synthesis

Введение. Как известно, гидравлическая энергия использовалась для приведения в движение рабочих органов механизмов достаточно давно. Оценки ученых-историков в датах начала использования такой энергии сильно отличаются. Документально зафиксированным считается тот факт, что Джозеф Брама в 1795 г. разработал агрегат, приводимый в действие с помощью подаваемой под давлением воды и увеличивающий полученное усилие. Вода, как

практически несжимаемая жидкость, использовалась в таких агрегатах до 1905 года. В этом же году Уильямс и Дженни впервые использовали минеральное масло в качестве рабочего тела для гидростатической трансмиссии, приводимой в действие аксиально расположенными относительно оси рото-

©В. І. Сериков, 2021

ра поршнями. Соответственно гидромашины (ГМ) получили в последнее время широкое распространение. При этом актуальным вопросом постоянно является повышение технических характеристик ГМ, что напрямую увязывается с проблемами анализа процессов и состояний в их элементах, а также синтеза прогрессивных структуры и параметров этих машин.

В работе далее изложен анализ современных тенденций проектирования, исследования и использования гидравлических машин в приводах механизмов и трансмиссиях.

Анализ областей применения гидромеханических трансмиссий. Необходимость согласования существующих и бурно развивающихся силовых установок и движителя в самоходных транспортных средствах обусловило появление трансмиссии. Минимальная устойчивая частота работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) (вращения его вала) достаточно высока, диапазон рабочих скоростей вращения вала недостаточен для того, чтобы удовлетворить потребностям движителя в различных дорожных условиях. Применение парового двигателя, которому не присущи описанные недостатки, в силу конструктивных и эксплуатационных особенностей было изначально ограничено рельсовым транспортом.

Таким образом, механические трансмиссии получили бурное развитие в применении на самоходном транспорте в силу сравнительной простоты и надежности технических решений. Кроме этого, такие трансмиссии позволяют варьировать не только конструктивными особенностями, но и принципами построения, применяя автоматизированные решения.

Однако, использование всего рабочего диапазона скорости вращения вала ДВС приводит к работе на режимах высокого расхода топлива, ухудшает динамические характеристики транспортного средства (ТС).

Использование электропривода для комбинированных трансмиссий большей частью решает проблему нерационального использования характеристик ДВС, но приводит к увеличению массы трансмиссии и удорожанию конструкции.

Также существуют технические решения, позволяющие плавно или мелкодискретно менять передаточное отношение трансмиссии при помощи специально сконструированных зубчатых колес. Такие решения обладают как рядом преимуществ, так и недостатков. К преимуществам можно отнести декларируемый высокий КПД зубчатой передачи. Недостатки таких передач (дискретность, хоть и небольшая; требование разгрузки элемента, с которого начинается переход к другому передаточному отношению, технологическая неотработанность конструкции) позволяют их рассматривать в настоящее время как экспериментальные.

По сравнению с чисто механическими трансмиссиями гидрообъемные механические трансмиссии (ГОМТ) позволяют плавно бесступенчато изменять передаточное отношение в широком диапазоне частот вращения, что дает возможность намного эффективнее использовать крутящий момент силовой установки по сравнению со ступенчатым приво-

дом во всем диапазоне нагрузок и скоростей машины. Их отличают следующие преимущества:

- более компактна при меньшей массе и габаритных размерах, что связано с полным отсутствием или применением меньшего числа шестерен, валов, муфт и других механических элементов [1]. В некоторых вариантах компоновки за счет того, что центральный вал трансмиссии проходит внутри оси цапфы гидропередачи, а картер трансмиссии является одновременно картером гидропередачи, достигается дополнительный выигрыш в массе около 30 % [2];

- по массе, приходящейся на единицу мощности, современная гидравлическая трансмиссия вследствие возможности реализации высокого давления и быстроходности имеет удельную массу 0,2...0,6 кг/кВт [3];

- обеспечивает непрерывное бесступенчатое регулирование передаточного отношения трансмиссии и, как следствие, скорости движения. При использовании в трансмиссиях гусеничных машин это дает возможность осуществлять регулирование поворота с любым радиусом, что значительно повышает управляемость. В зоне перехода на реверс передаточное отношение стремится к бесконечности, что позволяет реализовать очень большой крутящий момент;

- ГОМТ позволяет работать двигателю транспортной машины в оптимальных режимах как с точки зрения реализации наибольшей мощности, так и в режиме минимального расхода топлива во всех скоростных диапазонах движения;

- транспортное средство, оснащенное ГОМТ, выигрывает в динамических свойствах, обладает лучшей тяговой характеристикой по сравнению с аналогичным, оснащенным ступенчатой механической трансмиссией [2];

- ГОМТ дает возможность автоматизировать управления движением, что позволяет существенно улучшить эргономические показатели условий труда оператора;

- такая трансмиссия фактически становится предохранителем для силового агрегата и других узлов, так как устранена жесткая кинематическая связь между двигателем и движителем, и происходит демпфирование ударных нагрузок, в том числе и благодаря установке предохранительных и переливных клапанов.

Описанные преимущества позволяют сделать вывод о востребованности ГОМТ как в колесных и гусеничных машинах специального назначения, так и во многих других самоходных устройствах, например, в современной дорожно-строительной технике, погрузчиках и т.п., т.к. достоинства ГОМТ проявляются и при их повседневной эксплуатации.

Гидрообъемная трансмиссия обладает рядом известных недостатков: коэффициент полезного действия во всем рабочем диапазоне непостоянен и во многих режимах работы ниже, чем у чисто механической трансмиссии; сам принцип работы выдвигает высокие технологические требования при изготовлении, что обуславливает не только высокую

стоимость при изготовлении, но и ведет к использованию качественных и, соответственно, дорогих рабочих жидкостей с высокой степенью чистоты и последующей очисткой в процессе эксплуатации.

Описанный конфликт преимуществ и недостатков решается применением унифицированных сборочных единиц, которые производятся массово с использованием современных автоматизированных линий, что позволяет снизить себестоимость ГОМТ. Такое решение позволяет в настоящее время наблюдать массовый выпуск техники с ГОМТ, включая и технику практически бытового назначения (садовую, огородную).

С другой стороны, современные эргономические нормы требуют постоянного улучшения техники с целью уменьшения физических усилий, которые приходится затрачивать оператору для управления механизмами и (или) машиной, уменьшения звукового давления и вибраций, т.е. уменьшения или исключения факторов, которые непосредственно влияют на утомляемость человека. Кроме этого, скорость и качество выполнения работы напрямую зависит от количества совершаемых манипуляций управляющими элементами, их траекторий.

Большинство указанных факторов напрямую зависят от типа механизмов, используемых для передачи энергии от двигателя к исполнительным устройствам транспортных средств. Учитывая, что современные машины, используемые не только в качестве машин специального назначения, но и в гражданских, коммунальных (муниципальных) предприятиях, к ним предъявляются еще и требования, специфические для области применения. Например, такие машины должны иметь возможность не только работать на сверхнизких скоростях перемещения исполнительных механизмов, но и иметь возможность беспрепятственно (не быть препятствием) участвовать в городском потоке, т.е. развивать транспортную скорость и иметь достаточную динамику разгона-торможения при перемещениях между дислокациями выполняемых работ [3].

В наше время гидропривод используется на экскаваторах и погрузчиках, самоходных буровых установках, бульдозерах, асфальтоукладчиках, спецтехнике.

Бесспорно, изменение структуры трансмиссии при внесении дополнительных гидравлических элементов должно приводить к существенному пересмотру общего подхода к проектированию структуры транспортных средств, компоновке отдельных элементов.

Средства проектирования и исследования ГОМТ. Улучшение показателей изделия возможно двумя путями: первое – совершенствование готового образца, второе – создание нового. В обоих случаях все этапы жизненного цикла изделия проходят в условиях современного производства с участием программно-информационного обеспечения полного автоматизированного сопровождения жизненного цикла изделия: от первых электронных чертежей и эскизов до производства, последующей продажи, гарантийного и послегарантийного сопровождения изделия [4].

Внедрение PLM (product lifecycle management – управление жизненным циклом продукции) подразумевает окончательный и бесповоротный переход предприятия на электронный документооборот, затрагивающий абсолютно все процессы деятельности от элементарных чертежей до послегарантийного сопровождения продукции.

Одной из главнейших составляющих PLM является CPD – Collaborative Product Development (совместная разработка продукта). В наше время большинство крупных производственных предприятий размещают свои заводы в странах с дешевой рабочей силой и низкой стоимостью размещения производства. При этом остро встает вопрос организации внутрикорпоративного взаимодействия управления фирмы и дизайн-студии, разнесенных географически.

При создании новой конструкции как механизмов и машин, так и других изделий проектирование начинается с синтеза структуры планируемого изделия по техническому заданию [5, 6]. В ГОМТ тот или иной вариант коммутации насосов и гидромоторов непосредственно связан с назначением транспортного средства, особенностями работы трансмиссии. Для разных типов техники это может быть: бортовая система поворота, секционный блокированный привод, дифференциальная связь между колесами и т.п. [7].

Несмотря на то, что достаточно большая часть работ по теории проектирования рассматривает вопросы параметрического синтеза и геометрического моделирования в CAD-системах, структурный синтез является актуальным и эффективным инструментом. Он позволяет на раннем этапе проектирования выбрать структуру изделия, которая позволит максимально удовлетворить требованиям ТЗ. Математический аппарат для таких работ широко известен, для ГОМТ и других трансмиссий и приводов с регулируемым передаточным отношением они описаны в работах ученых НТУ «ХПИ». При этом, надо отметить, что синтез структуры ГОМТ простым перебором также описан в некоторых недавних работах. Например, при синтезе конструкции, аналогично описанной в [8], в работе [9] описан выбор и обоснование структуры двухпоточной передачи для реализации на транспортной машине с комбинированной энергетической установкой, использующей в качестве дополнительного источника энергии маховичный аккумулятор энергии.

Описаны отдельные попытки создания программного обеспечения для синтеза структуры ГОМТ, но такие приложения пока не получили широкого распространения в связи с достаточно слабой интерфейсной частью [10–13].

Таким образом, можно отметить, что существует программное обеспечение, позволяющее по готовой конструкции генерировать (синтезировать) расчетную схему, что актуально на этапе проектировочных и проверочных расчетов. В то же время наблюдается появление отдельных слабо распространенных вариантов программного обеспечения с современным интерфейсом для синтеза структуры проектируемого изделия. Они имеют узко прикладной характер. Т.е. универсального и полного реше-

ния проблемы анализа, а тем более структурного синтеза ГОМТ не существует.

В процессе эксплуатации изделия со временем возникает необходимость модернизации существующих образцов узлов и агрегатов. Это может быть вызвано как проявившимися в работе недостатками созданной конструкции, так и объективно созревшей потребностью в модернизации с целью повышения технических и тактико-технических характеристик. Такая модернизация затрагивает отдельные узлы и агрегаты, которые не удовлетворяют вновь выдвигаемым требованиям. В целом же для всего изделия используются заложенные ранее запасы прочности.

В случае, когда модернизация связана с выявленными недостатками, структурный анализ применяется тогда, когда назревает комплексная проблема, вызванная, кроме всего прочего, конструктивными особенностями узлов и агрегатов, которые показали плохие эксплуатационные качества (характеристики). Чаще всего структурный анализ прошедшей этап эксплуатации конструкции (изделия) позволяет выявить слабые места, однако проектные решения остаются вне сферы внимания.

Анализ эксплуатационных факторов. В связи с тем, что эксплуатация механизмов с гидроприводом имеет к настоящему времени достаточно большую историю, можно говорить о том, что статистика отказов позволяет делать общие выводы о надежности и факторах, влияющих на нее.

Возрастающие требования к параметрам объемного гидропривода вынуждают проектировщиков и производство повышать скорости, давления, улучшать массово-габаритные показатели. Использование современных материалов и методик расчетов с использованием вычислительных мощностей современных компьютеров значительно уменьшают риск снижения эффективности использования объемного гидропривода за счет возникновения отказов. Причинами возникновения последних могут быть конструкционные, производственные, эксплуатационные. При этом необходимо отметить, что как проектирование и производство, так и эксплуатация осуществляются в соответствии с нормативно-технической документацией. Однако, во время эксплуатации происходят отказы отдельных гидроустройств и объемного гидропривода в целом.

Причиной появления отказов являются внутренние и внешние воздействия, выходящие за расчетные показатели, нарушающие энергетическое равновесие и, как следствие, вызывающие процессы, протекающие с различной динамикой воздействия на элементы конструкции и эксплуатационные материалы.

В процессе эксплуатации давление жидкости, которое зависит от рабочей нагрузки и ее состояния (степень загрязненности, вязкость), является тем фактором, который влияет на изменение показателей надежности [14].

Развивая описанное в [14] деление элементов гидропривода по отношению к нагрузке на укрупненные группы, можно предложить для обзора и исследования с точки зрения отказоустойчивости следующие группы:

- узлы и пары трения, генерирующие отказ в связи с наступлением предельного состояния по износу;
- элементы, разрушающиеся в результате усталостных разрушений;
- элементы, подверженные влиянию кинематических и динамических характеристик конструкции (воздействие инерционных сил, ударных нагрузок, колебательных процессов) влияние которых оператор не учитывает, в связи с чем наступает отказ таких элементов;
- элементы, для которых существует вероятность мгновенных кратковременных превышений расчетных значений нагрузок (кавитация, парообразование, гидроудар, динамическая нагрузка, имеющая не расчетное направление).

Быстротечные процессы характеризуются значительным изменением параметров в доли секунды. Зачастую такие изменения являются знакопеременными и (или) периодическими. Что, соответственно, приводит к значительным динамическим нагрузкам и может возбуждать паразитические колебательные процессы. Это такие процессы, как вибрация элементов и, как следствие, при переходе резонансных зон, резкое возрастание значений параметров, пульсации рабочей жидкости. В результате такого воздействия могут нарушаться взаимное расположение элементов, что приводит к нарушению проектных взаимосвязей (кинематических, силовых, гидравлических) и искажает рабочий процесс объемного гидропривода.

Процессы, протекающие за время работы машины в интервале от минут до часов, считаются процессами средней продолжительности. В таком временном интервале происходит изменение температуры рабочей жидкости (за исключением возможных локальных аномалий), поверхностей деталей гидроустройств, физических свойств жидкостей и др.

Процессы, которые воздействуют на конструкцию механизма достаточно долго и результат этого воздействия проявляется в течение всего периода эксплуатации объемного гидропривода, считаются медленно протекающими (усталость материала конструкций, естественное старение манжет, патрубков, уплотнений, изнашивание пар трения) [15].

Отказ самих силовых элементов в гидрообъемных передачах (ГОП), согласно [15], составляет всего 10 %. При этом, необходимо отметить, что эти отказы в классификации по степени тяжести относятся к критическим с трудно диагностируемым (трудно контролируемым) проявлением.

Процессы, которые протекают в узлах и агрегатах ГОП, могут оказывать влияние на изменение геометрии и физических свойств деталей и жидкостей, что в свою очередь приводит к изменению расчетных параметров рабочего процесса и, как следствие, к отказу.

Наличие в конструкции ГОП конструктивно обоснованных элементов, приводящих к сужению и ускорению потока жидкости, а также сужения (что влияет на гидродинамические параметры потока (давление, скорость)), возникающие в процессе ра-

боты, приводят к возникновению кавитации. Приводит к этому газ, находящийся внутри образовавшихся пузырьков, имеющий высокую температуру и химическую агрессивность, что вызывает эрозию металлов, схлопывание кавитационных пузырей сопровождается концентрацией энергии процесса в очень маленьком объеме. В пределах этого объема образуется ударная волна высокой интенсивности и локально повышается температура рабочей жидкости, что в свою очередь также приводит к эрозии материала. Кавитация может привести к полному отказу гидрооборудования в критических ситуациях за 2–3 часа [16].

Провоцируют возникновение кавитации также загрязнение фильтров, наличие микропримесей в рабочей жидкости, физические и термодинамические свойства жидкостей, гидродинамические параметры потока.

В качестве примера воздействия кавитации в [15] описаны испытания самовсасывающего насоса, которые завершились повышением люфта в сочленении поршень-шатун и выходом узла из строя. Это событие стало последствием ухудшения условия всасывания на повышенной частоте вращения, что привело к возникновению кавитации.

Барботажные потери на перемешивание рабочей жидкости в корпусе могут приводить не только к уменьшению КПД ГОП, но и к перегреву отдельных узлов, что свою очередь может приводить к заклиниванию. Например, в радиально-поршневых объемных скоростных гидроприводах типа ГОП-900 с шариками-поршнями [17]. Даже при работе в режиме холодного хода при высоких скоростях вращения повышался температурный режим поршневых групп. Причиной являлось предпусковое заполнение рабочей жидкостью корпуса.

Одним из деструктивных процессов в большинстве случаев в гидроприводе являются гидроудары - интенсивные волновые процессы в рабочей жидкости. Например, на Кременчугском заводе литья и штамповок [15] при рабочем давлении для гидромоторов 10 МПа при пробном пуске поточной линии было зафиксировано повышение давления в полостях до 20 МПа, что привело к разрушению узлов распределения гидромоторов. Такой процесс возник после установки дросселей на выходе из гидромоторов.

Классическим фактором, оказывающим влияние на отказоустойчивость в механических системах, является изнашивание рабочих поверхностей пар трения. Характер изнашивания узлов трения гидромашин и гидроаппаратов зависит от типа пары трения [15]. Сферические поверхности плунжерных пар гидромашин в процессе эксплуатации имеют усталостное разрушение материала с образованием осповидных углублений и трещин. Цилиндрические рабочие поверхности таких пар имеют схватывание трущихся поверхностей. Цилиндрические поверхности и кромки золотников гидрораспределителей, клапанные пары гидроаппаратов имеют гидроэрозинное разрушение вблизи кромок. Пластинчатые пары насосов в местах сопряжения поверхностей и

статора имеют задиры, вырыв и налипание материала, локальные срезы материала на ребрах пластин.

Таким образом можно заключить, что несмотря на множество факторов, которые отрицательно влияют на отказоустойчивость гидрообъемного привода, широко применяются в большинстве случаев эффективные мероприятия, которые снижают негативное влияние этих факторов.

Для предотвращения кавитации, вызванной свойствами примесей в рабочих жидкостях, используются эксплуатационные мероприятия (установка фильтров, подбор жидкостей согласно выявленным эксплуатационным требованиям), устранение внутренних источников примесей (в зонах контактов пар трения, выкрашивания), предэксплуатационные мероприятия (разогрев жидкости до начала интенсивной эксплуатации, оптимизация вязкости в том числе и за счет подбора температур), дегазация рабочей жидкости [18], устранение источников локальной температурной напряженности. Также используются различные конструктивные мероприятия для изменения параметров потока жидкости (увод зон кавитации в нерабочие зоны [19], применение ежекции, электронное регулирование, в том числе для снятия динамических нагрузок).

Для исключения барботажа рабочей жидкости применяют спектр мероприятий от конструктивных решений и компенсаторов до электронной системы пропорционального управления (ЭПУ) [20], что в том числе снижает и тепловую нагруженность агрегата.

Исследования влияния отдельных факторов на работоспособность и характеристики ГОМТ. В работе [21] приведены теоретические зависимости влияния давления рабочей жидкости для оценки показателей надежности на этапе проектирования. На этапе эксплуатации авторы использовали комплект средств диагностики гидравлических систем, который обладает современным интерфейсом обмена данными с устройствами накопления и последующей обработки данных. Такой подход дает возможность определить количественные зависимости отказов и оценить надежность работы гидрооборудования с учетом эксплуатационных нагрузок.

Для исследования и моделирования тепловой нагруженности ГОМТ используются не только натурные испытания, но и различные модели и методы. Как правило, это модель, состоящая из блоков, которые описывают поведение и параметры отдельных частей системы (силовая установка, гидронасос, магистрали, в которых поведение жидкости описывается с учетом сжимаемости, гидромотор и другие гидроаппараты). Такой фактически модульный подход дает возможность анализировать широкий спектр конструкций. В таких моделях вводится учет тепловой нагруженности за счет ввода в математическую модель уравнения энергии и зависимости тепловых напряжений от диссипативной функции.

Результаты исследований используются в процессе моделирования для предварительного выбора параметров [22] с некоторым допущением. Используются как статические модель (упрощенная) [22], так и динамические модели, которые дают более

полную картину процессов, происходящих во время работы узлов и агрегатов ГОМП. Для исследования динамических характеристик объемного гидропривода представляется удобной математическая модель разработки НТУ «ХПИ» [23] с ее численной реализацией в пакете VisSim [24, 25].

Дальнейшим развитием динамической модели, которая позволяет разрабатывать, по утверждению авторов [26, 27], более усовершенствованные конструкции объемных гидроприводов, является нелинейная математическая модель. Она включает имитационный модуль устройства управления поворотом наклонного диска аксиально-поршневого насоса, линейный модуль распределения статических объемных расходов при переходных процессах и вычислительный модуль двухфазной рабочей жидкости.

Ввод в математическую модель описания рабочей жидкости как двухфазной [28, 29] позволяет не только получать более точные результаты исследований с учетом отрицательного влияния такой жидкости на динамические характеристики, но и моделировать и оценивать с достаточной для практики точностью, оценить степень компенсации колебаний.

Выводы.

Проведенный анализ современных тенденций проектирования, исследования и использования гидравлических машин в приводах механизмов и трансмиссиях свидетельствует о том, что в настоящее время это научное направление получило значительное развитие в науке и практике. В то же время полные и законченные решения всего спектра задач в этой области отсутствуют.

Полученные результаты дают основу для следующих выводов:

1. Для современного машиностроения характерна тенденция к интенсификации нагрузок на элементы гидравлических машин, причем область применения этих машин постоянно расширяется.

2. С учетом ужесточения требований к техническим решениям гидравлических машин традиционные методики расчета выходят за пределы своего применения. Соответственно, необходима разработка новых, усовершенствованных подходов, моделей и методов исследования процессов и состояний элементов гидромеханических передач, которые учитывают не отдельные факторы, а их наборы, причем во взаимодействии и взаимовлиянии.

3. Универсальные CAD/CAM/CAE системы обладают мощными средствами анализа процессов и состояний, в том числе – и в элементах гидромеханических передач, однако в них отсутствуют механизмы формирования комплексных расчетных моделей, в частности, в предметной области расчета (анализа и синтеза элементов гидромеханических передач с учетом всего комплекса физико-механических процессов и состояний, структуры, параметров и требований к техническим характеристикам). В качестве выхода из этой ситуации предлагается создание интегрированных программно-модельных комплексов, объединяющих, с одной стороны, универсальное программное обеспечение,

а, с другой, – специализированные модули и параметрические модели. Это позволит распространить возможности мощных универсальных систем моделирования на предметную область сопровождения разработок, изготовления и эксплуатации гидромеханических передач с высокими техническими характеристиками.

4. Для решения задач синтеза (обоснования структуры и параметров гидромеханических передач) применение традиционных упрощенных математических и численных моделей может приводить к существенным погрешностям в расчетах, а соответственно – и к ошибкам в ходе принятия проектных решений для современных гидромеханических передач. Соответственно, требуется интеграция в алгоритмы синтеза более адекватных комплексных моделей процессов и состояний в объектах исследований.

5. Учитывая направленность на решение проблемы обоснования прогрессивных технических решений элементов гидромеханических передач, необходимо создавать их параметрические модели, с привлечением которых путем варьирования в них состава структуры, схемы работы, конструктивных размеров, технологических и эксплуатационных режимов можно целенаправленно отыскивать прогрессивные технические решения для изделий с высокими техническими и тактико-техническими характеристиками.

Определенные в ходе анализа современных тенденции проектирования, исследования и использования гидравлических машин в приводах механизмов и трансмиссиях направления исследований будут реализованы в дальнейшем.

Список литературы

- Петров В.Г. *Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин*. Москва: Машиностроение, 1988. 248 с.
- Бибик Д.В. К вопросу о гидрообъемной механической трансмиссии. *Интеграції технології та енергозбереження*. Харьков. 2008. №2. С.67–71.
- Корсунский В.А. Анализ динамических качеств транспортной машины с комбинированной энергетической установкой и с гидрообъемной трансмиссией. *Наука и образование*. 2013. № 9. DOI: 10.7463/0913.0602200.
- Stephens Dick, Lushini J.R. Evolution of tire design methods: from slide rules to super computers. *Elasto-merics*. 1991. 123, №7. С.41–42.
- Божко А.Н., Толпаров А.Ч. *Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью*. URL: <https://www.metodolog.ru/00562/00562.html>
- Головицына М.В. *Методы, модели и алгоритмы в автоматизированной подготовке и оперативном управлении производством РЭС*: Монография. Москва: Инфра-М, 2019. 276 с.
- Курмаев Р.Х., Петров С.Е. Использование гидрообъемных трансмиссий в конструкции автотранспортных средств. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2009. Т. 1, №2. С. 108–115.
- Hanlon M. *Volvo touts mechanical KERS for future road cars (but fails to mention partners Flybrid & Torotrak)*. Gizmag.com 2011, June 1. URL: <http://www.gizmag.com/volvo-touts-mechanical-kers-technology-for-road-cars/18772/> (дата обращения 26.07.2021)
- Корсунский В.А. Анализ двухпоточных передач и выбор рациональной схемы для использования в приводе маховичного аккумулятора энергии транспортной машины *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2017. Вып. 7. URL:<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-7-1638>
- Уржумов Никита Александрович. *Создание инструментальной среды структурного синтеза объектов*: дис. ... канд.

- техн. наук: 05.13.12. Ижевск, 2007. 168 с.
11. Малина О.В., Валеєв О.Ф. Модель процесса структурного синтеза объектов, построенных на дискретных структурах, и особенности его реализации. *Вестник Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова*. 2013. № 2 (57). С. 24–26.
 12. Malina O., Valeyev O. Aspects of Optimization of the Process of Computer-Aided Design of Complex Objects. *Advanced Gear Engineering Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2018. Vol. 51. P. 447–464. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5_22
 13. Malina O. Problems of Developing the Model of Class of Objects in Intelligent CAD of Gearbox Systems. *Advanced Gear Engineering Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2018. Vol. 51. P. 393–418. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5_19
 14. Фатеєва Н. Н., Фатеєв А. Н. Оценка показателей надежности гидрооборудования с учетом влияния величины рабочего давления. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. Харків: НТУ "ХПИ". 2019. № 1. С. 104–108.
 15. Аврунин Г. А., Пимонов И. Г., Мороз И. И. Практический опыт изучения отказов в объемных гидроприводах. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2015. № 4 (50). С. 3–12.
 16. Каверзина А.С., Минеев А.В. Проблемы кавитации в гидроприводе самоходных машин и способы ее снижения. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2015. № 6. С. 171–176.
 17. Аврунин Г.А., Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М., Истратов А.В. Результаты экспериментальных исследований объемной гидропередачи с шариковыми поршнями. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2004. № 2 (4). С. 77–82.
 18. Альмохаммад А.М., Каверзина А.С., Сорокин Е.А., Гнидан Е.В. Исследование и разработка мероприятий для повышения работоспособности гидравлического привода дегазацией рабочей жидкости. *Строительные и дорожные машины*. Москва: Общество с ограниченной ответственностью СДМ-Пресс. 2018. Вып. № 10. С. 26–29.
 19. Кавитация причины и следствия. URL: (<https://www.aquatech.dp.ua/kavitaciya-prichiny-i-sledstviya/>)
 20. Электронные системы управления гидроприводом. URL: http://hydrapac.com/netcat_files/File/el_syst.pdf
 21. Фатеєва Н. Н., Фатеєв А. Н. Оценка показателей надежности гидрооборудования с учетом влияния величины рабочего давления. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. Харків: НТУ "ХПИ". 2019. № 1. С. 104–108.
 22. Никитин О. Ф. Статический расчет высокоэффективного объемного нерегулируемого гидропривода с одним объемным гидродвигателем. *Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 06. С. 1–14.
 23. Аврунин Г. А., Самородов В. Б., Пелипенко Е. С., Мороз И. И. Расчет объемного гидропривода подачи измельчителя древесных отходов с автовозвратом при перегрузках *Bulletin of the National Technical University "KhPI". 30 Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. 2019. № 1
 24. Лурье З. Я., Цента Е. Н., Панченко А. И. Динамика двухмерной системы управления матричного гидроагрегата навесным оборудованием трактора. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2017. № 3 (57). С. 29–46.
 25. Систук В. А., Богачевский А. А., Шумский В. Ю. Возможности использования программы имитационного моделирования PTV VISSIM для подготовки специалистов по направлениям «Транспортные технологии» и «Автомобильный транспорт». *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2016. Т. 52, № 2. С. 93–107.
 26. Лурье З. Я., Самородов В. Б., Аврунин Г. А., Цента Е. Н. Метод улучшения динамических характеристик процесса пуска объемного гидропривода с замкнутой цепью циркуляции рабочей жидкости. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Сер.: Гідравлічні машини та гідроагрегати*. Харків: НТУ "ХПИ". 2019. № 1. С. 104–108.
 27. Лурье З. Я., Панченко А. И., Цента Е. Н. Динамическая компенсация колебаний в матричном гидроагрегате мобильной машины. *Праці Таверійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки*. 2014. Вип. 14, т. 3. С. 3–18.
 28. Лурье З. Я., Цента Е. Н., Панченко А. И. Теоретические и практические аспекты динамической компенсации колебаний в матричных гидроагрегатах. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2015. № 1. С. 27–44.
 29. Лурье З. Я., Панченко А. И., Цента Е. Н. Динамическая компенсация колебаний матричного гидроагрегата мобильной машины с учетом влияния двухфазной рабочей жидкости. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2014. № 3 (45). С. 35–44.

References (transliterated)

1. Petrov V.G. *Gidroob"yomnyye transmissii samokhodnykh mashin*. [Hydrostatic transmissions of self-propelled vehicles.] Moskva: Mashinostroyeniye, 1988. 248 p.
2. Bibik D.V. K voprosu o gidroob"yemnoy mekhanicheskoy transmissii. Integrirovani tekhnologii ta energoberezhennya. [On the issue of hydrostatic mechanical transmission. Integrated technologies and energy conservation.] Khar'kov. 2008, no. 2, pp. 67–71.
3. Korsunskiy V.A. Analiz dinamicheskikh kachestv transportnoy mashiny s kombinirovannoy energeticheskoy kachestvennoy transportnoy mashiny s kombinirovannoy energeticheskoy. [Analysis of the dynamic properties of a transport vehicle with a combined power plant and a hydrostatic transmission.] Nauka i obrazovaniye. 2013, no. 9. DOI: 10.7463/0913.0602200.
4. Stephens Dick, Lushini J.R. Evolution of tire design methods: from slide rules to super computers. *Elasto-merica*. 1991, vol. 123, no. 7, pp.41–42.
5. Bozhko A.N., Tolparov A.CH. Strukturnyy sintez na elementakh s ogranichennoy sochetayemost'yu. [Structural synthesis on elements with limited compatibility.] URL: <https://www.metodolog.ru/00562/00562.html>
6. Golovitsyna M.V. Metody, modeli i algoritmy avtomatizirovannoy podgotovki i operativnogo upravleniya proizvodov [Methods, models and algorithms in automated preparation and operational management of the production of RES] Monograph. Moscow: Infra-M, 2019.276 p.
7. Kurmayev R.KH., Petrov S.Ye. Ispol'zovaniye gidroob"yemnykh transmissiy v konstruksii avtotransportnykh sredstv. [The use of hydrostatic transmissions in the design of vehicles] *Izvestiya MG TU «MAM»*. 2009, vol. 1, no. 2, pp. 108–115.
8. Khenlon M. Volvo reklamiruyet mekhanicheskiye KERS dlya budushchikh dorozhnykh avtomobiley (no ne upominayet partnerov Flybrid i Torotrak). *Gizmag.com* 2011, 1 iyunya. URL: <http://www.gizmag.com/volvo-touts-mechanical-kers-technology-for-road-cars/18772/> (data obrashcheniya 26.01.2017)
9. Korsunskiy V.A. Analiz dvukhpotochnykh peredach i vybor ratsional'noy skhemy ispol'zovaniya v privode makhovichnogo akumul'yatora energii transportnoy mashiny. [Analysis of double-flow transmissions and the choice of a rational scheme for use in the drive of a flywheel accumulator of energy of a transport machine] *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*. 2017, vol. 7. URL: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-7-1638>
10. Urzhumov Nikita Aleksandrovich. Sozdaniye instrumentental'noy sredy strukturnogo sinteza ob'yektov [Creation of an instrumental environment for the structural synthesis of objects]: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.12. Izhevsk, 2007. 168 p.: Il.
11. Malina O.V., Valeyev O.F. Model' protsessu strukturnogo sinteza ob'yektov, postroyennykh na diskretnykh strukturakh, i osobennosti yego realizatsii [The model of the process of structural synthesis of objects built on discrete structures, and the peculiarities of its implementation] *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni M.T. Kalashnikova*. 2013, no. 2 (57), pp. 24–26.
12. Malina O., Valeyev O. Aspects of Optimization of the Process of Computer-Aided Design of Complex Objects. *Advanced Gear Engineering Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2018, vol. 51, pp. 447–464. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5_22
13. Malina O. Problems of Developing the Model of Class of Objects in Intelligent CAD of Gearbox Systems. *Advanced Gear Engineering Mechanisms and Machine Science*. Springer, 2018, vol. 51, pp. 393–418. DOI: 10.1007/978-3-319-60399-5_19
14. Fateyeva N. N., Fateyev A. N. Otsenka pokazateley nadezhnosti gidrooborudovaniya s uchetom velichiny rabocheho davleniya. [Assessment of indicators of reliability of hydraulic equipment taking into account the influence of the working pressure] *Vіsник Natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu "KHPÍ"*. Ser.: Gіdravлічні машини і гідроагрегати. Kharkiv: NTU "KHPÍ". 2019, no. 1, pp. 104–108.
15. Avrunin G. A., Pimonov I. G., Moroz I. I. Prakticheskiy opyt izucheniya otkazov v ob'yemnykh gidroprivodakh. [Practical experience of studying failures in volumetric hydraulic drives.]

- Promislova travlíka i pnevmatika. 2015, no. 4 (50), pp. 3–12.
16. Kaverzina A.S., Mineyev A.V. Problemy kavitatsii v gidroprivode samokhodnykh mashin i sposoby yeye snizheniya. [Problems of cavitation in the hydraulic drive of self-propelled vehicles and ways to reduce it] Gornyy informatsionno-analiticheskyy byulleten' (nauchno-tehnicheskyy zhurnal). 2015, no. 6, pp. 171–176.
 17. Avrunin G.A., Borislyuk M.D., Busyak YU.M., Istratov A.V. Rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy ob'yemnoy gidropere-dachi s sharikovymi porshnyami. [Results of experimental studies of volumetric hydraulic transmission with ball pistons] Promislova gidravlika i pnevmatika. 2004, no. 2 (4), pp. 77–82.
 18. Al'mokhammad A.M., Kaverzina A.S., Sorokin Ye.A., Gnidan Ye.V. Issledovaniye i razrabotka meropriyatiy dlya povysheniya rabotosposobnosti gidravlicheskogo privoda degazatsiyey rabochey zhidkosti. Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny. [Research and development of measures to improve the efficiency of the hydraulic drive by degassing the working fluid] Moskva: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu SDM-Press. 2018, no.10, pp. 26–29.
 19. Kavitatsiya prichiny i sledstviya. [Cavitation of cause and effect] URL:(<https://www.aquatech.dp.ua/kavitatsiya-prichiny-i-sledstviya/>)
 20. Elektronnyye sistemy upravleniya gidroprivodom. [Hydraulic drive electronic control systems.] URL: http://hydrapac.com/netcat_files/File/el_syst.pdf
 21. Fateyeva N. N., Fateyev A. N. Otsenka pokazateley nadezhno-sti gidrooborudovaniya s uchetom velichiny rabocheho davleniya. [Assessment of indicators of reliability of hydraulic equipment taking into account the influence of the working pressure] Vísnik Natsional'nogo tekhnicheskogo uníversitetu "KHPÍ". Ser. : Gídravlíchní mashiny i gídroagregati. Kharkív: NTU "KHPÍ". 2019, no. 1, pp. 104–108.
 22. Nikitin O. F. Sticheskiy raschet vysokoeffektivnogo ob'yomnogo nereguliruyemogo gidroprivoda s odnim ob'yemnym gid-rodvigatelem. [Static calculation of a highly efficient volumetric unregulated hydraulic drive with one volumetric hydraulic motor] Mashiny i Ustanovki: proyektirovaniye, razrabotka i ekspluatatsiya. MGTU im. N.E. Bauman. Elektron. zhurn. 2015, no. 6, pp. 1–14.
 23. Avrunin G. A., Samorodov V. B., Pelipenko Ye. S., Moroz I. I. Raschet ob'yemnogo gidroprivoda podachi izmel'chitelya drevesnykh otkhodov avtovozvratom pri peregruzkakh [Calculation of the volumetric hydraulic drive of the wood waste grinder feed with automatic return during overloads] Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPI». 30 Seriya: Gídravlícheskiye mashiny i gídroagregaty. 2019. № 1
 24. Lur'ye Z. YA., Tsenta Ye. N., Panchenko A. I. Dinamika dvukhmernoy sistemy upravleniya mekhatronnogo gidroagregata navesnym oborudovaniyem traktora. [Dynamics of a two-dimensional control system of a mechatronic hydraulic unit with tractor attachments] Promislova travlíka i pnevmatika. 2017, no. 3 (57), pp. 29–46.
 25. Sistuk V. A., Bogachevskiy A. A., Shumskiy V. YU. Vozmozhnosti ispol'zovaniya programmy imitatsionnogo modelirovaniya PTV VISSIM dlya podgotovki po napravleniyam «Transportnyye tekhnologii» i «Avtomobil'nyy transport». [Possibilities of using the PTV VISSIM simulation program for training specialists in the areas of "Transport technologies" and "Automobile transport"] Innovatsionnyye tekhnologii i zasobi navchannya. 2016, vol. 52, no. 2, pp. 93–107.
 26. Lur'ye Z. YA., Samorodov V. B., Avrunin G. A., Tsenta Ye. N. Metod uluchsheniya dinamicheskikh kharakteristik protsessa puska ob'yemnogo gidroprivoda s zamknutoy tsep'yu tsirkulyatsii rabochey zhidkosti. [Method of improving the dynamic characteristics of the start-up process of a volumetric hydraulic drive with a closed circuit of working fluid circulation] Vísnik Natsional'nogo tekhnicheskogo uníversitetu "KHPÍ". Ser. : Gídravlíchní mashiny i gídroagregati. Kharkív: NTU "KHPÍ". 2019, no. 1, pp. 104–108.
 27. Lur'ye Z. YA., Panchenko A. I., Tsenta Ye. N. Dinamicheskaya kompensatsiya kolebaniy v mekhatronnom gidroagregate mobil'noy mashiny. [Dynamic compensation of oscillations in the mechatronic hydraulic unit of a mobile machine.] Pratsí Tavriys'kogo derzhavnogo agrotekhnologicheskogo universiteta. Tekhníchní nauki. 2014, vol. 14, t. 3, pp. 3–18.
 28. Lur'ye Z. YA., Tsenta Ye. N., Panchenko A. I. Teoreticheskiye i prakticheskiye aspekty dinamicheskikh kolebaniy v mekhatronnykh gidroagregatakh. [Theoretical and practical aspects of dynamic compensation of oscillations in mechatronic hydraulic units] Promislova travlíka i pnevmatika. 2015, no. 1, pp. 27–44.
 29. Lur'ye Z. YA., Panchenko A. I., Tsenta Ye. N. Dinamicheskaya kompensatsiya kolebaniy mekhatronnogo gidroagregata mobil'noy mashiny s uchetom vliyaniya dvukhfaznoy rabochey zhidkosti. [Dynamic compensation of vibrations of the mechatronic hydraulic unit of a mobile machine taking into account the influence of a two-phase working fluid.] Promi-slova prisposoblenniya i pnevmatika. 2014., no. 3 (45), pp. 35–44.

Надійшла (received) 20.10.2021

Відомості про авторів /Сведения обавторах /About the Authors

Сериков Володимир Іванович (Сериков Владимир Иванович, Sierykov Volodymyr) – кандидат технічних наук (PhD in Eng. S.), доцент, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин; м. Харків, Україна; тел.: (057) 707-64-78; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5295-3925>; e-mail: SerikovVI@tmm-sapr.org