

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.083:62-82

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201904.529-545



Разработка стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов с гидравлическим нагружающим устройством

П. А. Ионов, П. В. Сенин, С. В. Пьянзов, А. В. Столяров*,
А. М. Земсков

ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

*cabto@mail.ru

Введение. Статья посвящена разработке устройства для оценки технического состояния объемных гидроприводов отечественного и зарубежного производства в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров.

Материалы и методы. В работе использованы положения теоретической механики, теории гидрогазодинамики и основные принципы создания механизмов и машин. Для оценки технического состояния объемных гидроприводов применен метод гидравлического нагружения гидромотора. Достоверность результатов подтверждена экспериментальной реализацией стенда с гидравлическим нагружающим устройством.

Результаты исследования. Разработана и готовится к реализации новая конструкция стенда с гидравлическим нагружающим устройством для оценки технического состояния широкой номенклатуры объемных гидроприводов отечественного и зарубежного производства в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров. Отличительной особенностью разработанного стенда является использование метода гидравлического нагружения, при котором крутящий (тормозной) момент на валу испытуемого гидромотора создается при помощи гидромашин. Стенд состоит из блоков обработки и измерения данных. В основе блока обработки данных лежит многофункциональная плата сбора данных, соединенная с персональным компьютером. В структуру блока измерения данных входят частотный преобразователь, соединенный с электродвигателем, приводной вал для подключения к нему вала испытуемого гидронасоса, гидравлическая система, имеющая гидробак, линии всасывания, управления, слива, дренажа, нагнетания и реверсивные дроссели-расходомеры, установленные в линиях нагнетания и соединенные с гидронасосом и гидромотором, нагружающее устройство с реверсивным гидронасосом, приводной вал которого муфтой соединен с валом испытуемого гидромотора. Дополнительно реверсивные дроссель-расходомеры через специальные порты и электрические линии соединены с платой сбора данных. Разработанный стенд позволяет оценить техническое состояние наиболее распространенных моделей объемных гидроприводов, используемых в современной сельскохозяйственной и дорожно-строительной технике. Стенд характеризуют энергоэффективность, простота конструкции и низкая стоимость при лучших технических характеристиках, что обеспечивает его высокую конкурентоспособность.

© Ионов П. А., Сенин П. В., Пьянзов С. В., Столяров А. В., Земсков А. М., 2019



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Обсуждение и заключение. Разработанная конструкция стенда с гидравлическим нагружающим устройством позволяет реализовать методику динамических испытаний предприятий-изготовителей и с высокой точностью оценить техническое состояние объемных гидроприводов отечественного и зарубежного производства в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров. Дальнейшее усовершенствование эффективности оценки технического состояния объемных гидроприводов видится в разработке специализированного программного обеспечения для обработки и анализа результатов испытаний в режиме реального времени.

Ключевые слова: стенд, гидравлическое нагружающее устройство, динамическая методика испытаний, объемный гидропривод, техническое состояние, коэффициент полезного действия, крутящий момент, ремонтное предприятие, сервисный центр

Для цитирования: Разработка стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов с гидравлическим нагружающим устройством / П. А. Ионов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 4. С. 529–545. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>

Финансирование: Публикация подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госзадание, направление: развитие компетенций, проект № 11.3416.2017/4.6) «Разработка технологий и средств повышения долговечности деталей, узлов, агрегатов машин и оборудования путем создания наноструктурированных покрытий источниками концентрированной энергии».

Developing a Stand for Evaluating Technical Condition of Volumetric Hydraulic Drives with a Hydraulic Loading Device

P. A. Ionov, P. V. Senin, S. V. Pyanzov, A. V. Stolyarov*,
A. M. Zemskov

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

*cabto@mail.ru

Introduction. The article deals with the development of a device for evaluating technical condition of volumetric hydraulic drives made in Russia and abroad at repair and service centres.

Materials and Methods. The study uses the statements of theoretical mechanics and hydrodynamics, the basic principles of mechanisms and machines production. For technical condition evaluating of volumetric hydraulic drives, the method of hydraulic loading of hydraulic motor was applied. Reliability of results was confirmed during experimental settings of the hydraulic loading device stand.

Results. A stand design with the hydraulic loading device was developed and put into practice for new technical condition evaluating of volumetric hydraulic drives, made in Russia and abroad, at repair and service centres. A property of the stand is the use of the hydraulic loading method when the torque (braking) moment on the shaft of the tested hydraulic rotor is created using a hydraulic machine. The stand consists of data processing and measurement units. The data processing unit is based on a multifunctional data acquisition board connected with a personal computer. The structure of the data measurement unit includes a frequency converter connected to an electric motor, a drive shaft for connecting the shaft of the tested hydraulic pump; hydraulic system having a hydraulic tank; suction, control, drain, and discharge lines and reversible flow chokes installed in discharge lines and connected with the hydraulic pump and hydraulic rotor; loading device with the reversible hydraulic pump, drive shaft joined with the shaft of the tested hydraulic motor. Additionally, reversible throttle flow meters are connected via special ports and electric lines to the data acquisition board. The developed stand allows evaluating the technical condition of most widespread models of volumetric hydraulic drives used in

modern agricultural and road construction equipment. The stand is characterized by good energy efficiency, simplicity of design, low costs, good technical characteristics that make it competitive.

Discussion and Conclusion. The new stand design with the hydraulic loading device allows implementing of the dynamic testing methodology and guarantees high accuracy of evaluating the technical condition of the most widespread Russian and foreign volumetric hydraulic drives at repair and service centres. Further improvement of the evaluating the technical condition of volumetric hydraulic drives is related to the development of specialized software for processing and analysing test results in real-time.

Keywords: stand, hydraulic loading device, dynamic test, volumetric hydraulic drive, technical condition, efficiency, torque, repair centre, service centre

For citation: Ionov P.A., Senin P.V., Pyanzov S.V., et al. Developing a Stand for Evaluating Technical Condition of Volumetric Hydraulic Drives with a Hydraulic Loading Device. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(4):529-545. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201904.529-545>

Funding: The publication was prepared with the financial support of the Ministry of Education of Russia, State Assignment: Competency Development, Project No. 11.3416.2017/4.6: Development of Technologies and Means of Enhancing Durability of Parts, Components, Assemblies of Machinery and Equipment by Creating Nanostructured Coatings by Concentrated Energy Sources.

Введение

Современная сельскохозяйственная, строительно-дорожная, карьерная, горнодобывающая, лесозаготовительная, коммунальная, военная, путевая, речная и морская техника отечественного и зарубежного производства в свое конструктивное исполнение включает сложные и дорогостоящие гидроагрегаты, в том числе аксиально-поршневые гидронасосы и гидромоторы, которые образуют единую систему – объемный гидропривод. Данная система отвечает за работу исполнительных механизмов и обеспечивает перемещение техники с заданной скоростью, поэтому от технического состояния объемного гидропривода во многом зависят надежность и эксплуатационные показатели техники.

Оценка технического состояния объемного гидропривода на предприятиях-изготовителях проводится с помощью методики динамических ис-

пытаний на специализированных промышленных стендах преимущественно зарубежного производства [1–3].

Согласно данным изготовителей (Sauer-Danfoss, Linde, Bosch Rexroth, Германия; Eaton, США; PSM-Hydraulics, Россия; ЗАО «Гидросила ГРУП», Украина), оценку технического состояния объемного гидропривода проводят по наиболее важным параметрам диагностирования агрегатов: подача (расход) рабочей жидкости, рабочее давление, крутящий момент, температура рабочей жидкости и коэффициенты полезного действия (КПД) – полный, объемный и гидромеханический. При этом критерием предельного состояния гидропривода принято считать падение объемного КПД на 20 % от нормативного (паспортного) значения¹.

В настоящее время на ремонтных предприятиях и в сервисных центрах практически отсутствуют средства для

¹ Каталог гидравлического оборудования ОАО «Пневмостроймашина» [Электронный ресурс]. URL: https://www.psm-hydraulics.ru/gallery/docs/doc_150.pdf (дата обращения: 28.10.2019); Technical Information Series 90 Axial Piston Pumps [Электронный ресурс]. URL: https://hmc.com.br/pdf/sauer_bomba_S90.pdf (дата обращения: 28.10.2019); Axial Piston Fixed Motor A2FM Series 6. Bosch Rexroth Group [Электронный ресурс]. URL: http://i-hydro.ru/images/rexroth/motor_a2fm.pdf (дата обращения: 28.10.2019); Variable Pumps for Closed Circuit Operation Hpv-02 [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/JguXu> (дата обращения: 28.10.2019).

реализации методики предприятий-изготовителей. Основная проблема заключается в создании на вращающемся валу испытуемого гидромотора переменной нагрузки. В основном используются методики, не позволяющие дать достоверное заключение о работоспособности бывших в эксплуатации и отремонтированных гидроприводов, что затрудняет проведение ремонтных работ [1]. Большинство ремонтных предприятий и сервисных центров вынуждены испытывать гидромоторы объемных гидроприводов в режиме гидронасоса, что дает косвенную оценку технического состояния, а конструкция отдельных гидроагрегатов (имеющих плунжеры с гидростатической разгрузкой опор) вообще не позволяет реализовать данный метод испытаний. Поэтому актуальной задачей является разработка нового стенда для оценки технического состояния объемного гидропривода, способного реализовать методику динамических испытаний в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров.

Обзор литературы

В настоящее время для оценки технического состояния объемного гидропривода используются отечественные и зарубежные испытательные стенды, в состав которых входят различные типы нагружающих устройств. Среди серийно выпускаемых можно выделить следующие стенды: КИ-28097-03М производства ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва [4]; СГН/110м-БИМ производст-

ва ООО «Стендовое оборудование», г. Санкт-Петербург²; инерционный испытательный стенд Маслова Н. А., г. Новосибирск [5]; Hydraulic Test Center Model 850 производства США³; комбинированный испытательный стенд серии YST500W китайской компании High Land Hydraulic Pump⁴.

По способу создания и измерения крутящего момента на валу испытуемого гидромотора известные модели можно классифицировать на стенды, реализующие статический и динамический методы. Статический метод заключается в определении крутящего момента при невращающемся валу испытуемого гидромотора, а динамический предусматривает вращение вала гидромотора с переменной нагрузкой [6]. В качестве нагружающего устройства при реализации статического метода измерения крутящего момента используется специализированная приставка, жестко фиксирующая вал испытуемого гидромотора и регистрирующая деформацию упругого элемента, расположенного в цепи передачи крутящего момента. При реализации динамического метода используются фрикционные, инерционные, пневматические и электрические нагружающие устройства, позволяющие создавать переменную нагрузку на валу испытуемого гидромотора.

Ярким примером реализации статического метода стал стенд КИ-28097-03М. Достоинствами стенда являются: простота конструктивного исполнения, низкая стоимость комплекующих и узлов стенда⁵. Однако

² Производственное Объединение ООО «Стендовое оборудование» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dta-stend.ru> (дата обращения: 28.10.2019).

³ AIDCO Test Systems Model 850 Hydraulic Test Center [Электронный ресурс]. URL: <https://powertestdyno.com/product/transmission-and-hydraulic-test-850-series/> (дата обращения: 28.10.2019).

⁴ High Land Hydraulic Pump [Электронный ресурс]. URL: <https://hydraulicliu.en.china.cn/> (дата обращения: 28.10.2019).

⁵ Петрищев Н. А., Данков А. А., Ивлева И. Б. К вопросу оснащения сервисной службы дилеров предприятий сельхозмашиностроения // Проблемы развития технологий создания, сервисного обслуживания и использования технических средств в агропромышленном комплексе: материалы междунар. науч.-практ. конф. (Воронеж, 15–16 ноября 2017 г.) / Под общ. ред. Н. И. Бухтоярова, В. И. Оробинского. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2017. С. 41–47.

в работе [7] отмечены недостатки данного стенда. Среди них автор выделяет малую мощность приводного электродвигателя (45 кВт), ограниченный диапазон частоты вращения приводного вала гидронасоса (до 1470 об/мин) и рабочего давления в гидросистеме стенда (до 35 МПа), невозможность определения основных технических характеристик, рекомендованных предприятиями-изготовителями объемных гидроприводов: подача гидронасоса, расход гидромотора, частота вращения гидромотора, КПД объемного гидропривода, развиваемого крутящего момента.

Среди стендов, использующих фрикционное нагружающее устройство на территории Российской Федерации, наибольшее распространение получил стенд СГН/110м-БИМ. В качестве достоинств стенда в одной из исследовательских работ⁶ отмечается простота конструктивного исполнения, бесступенчатое нагружение испытуемого гидромотора (в диапазоне от 0 до 600 Н·м). Однако авторами другой статьи [8] в качестве недостатков стенда отмечаются: быстрый износ тормозных фрикционов; неустойчивость создания нагружения в процессе испытаний и, как следствие, снижение точности определения крутящего момента; большая стоимость как самого стенда, так и нагружающего устройства.

На базе ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» Н. А. Масловым был разработан экспериментальный стенд с инерционным нагружающим устройством [9]. Данный прибор выполнен в виде маховика (маховой массы), соединенного с валом испытуемого гидромотора. Крутящий момент на валу гидромотора определяется по продолжительности разгона маховой массы до номинальной скорости, величина

момента равна произведению момента инерции маховой массы на ее угловое ускорение. В работе [8] в качестве достоинств стенда отмечаются простота конструктивного исполнения, низкая стоимость комплектующих и материалов, а в качестве недостатков – ограниченная номенклатура испытуемых гидроагрегатов и необходимость наличия маховиков с различными моментами инерции, что позволяет проводить диагностирование гидроагрегатов только по косвенным показателям.

Компания AIDCO Test Systems (США) серийно выпускает промышленный стенд Hydraulic Test Center Model 850, используемый для оценки технического состояния объемного гидропривода, реализующий электрический метод нагружения испытуемого гидромотора. Этот метод нагружения заключается в измерении емкости или разницы фаз между двумя магнитными кодировочными устройствами, установленными тангенциально на оси вала испытуемого гидроагрегата, что обеспечивает рассеивание кинетической энергии в виде тепла за счет генерации возникающих в процессе испытаний вихревых токов (токов Фуко). Анализ данных, приведенных в источниках⁷ [10; 11], позволяет выделить главное достоинство стенда – это электрическое нагружающее устройство, которое позволяет бесступенчато создавать нагрузку на валу испытуемого гидромотора в диапазонах от 0 до 712 Н·м (это позволяет проводить испытания широкой номенклатуры гидроагрегатов). Однако в одной из работ Н. А. Маслова в качестве недостатков стенда с электрическим нагружающим устройством отмечаются наличие в конструкции стенда сложных и дорогостоящих узлов, большие энергетические затраты при проведении испытаний, что за-

⁶ Земсков А. М., Ионов П. А., Столяров А. В. Методики и средства оценки технического состояния объемных гидроприводов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузовский сборник научных трудов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. С. 349–356.

⁷ AIDCO Test Systems Model 850 Hydraulic Test Center.

трудняет их использование в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров [12].

Китайская компания High Land Hydraulic Pump для проверки объемных гидроприводов предлагает комбинированный испытательный стенд YST500W. В стенде реализуется гидравлический метод нагружения, позволяющий создавать нагрузку на валу испытуемого гидромотора⁸. Нагружение осуществляется за счет дросселирования рабочей жидкости в линии нагнетания нагружающего гидромотора. Анализ работы Хайганг Динга позволил выделить следующие достоинства стенда: бесступенчатое нагружение испытуемого гидромотора в диапазонах 0...10000 Н·м; простота конструктивного исполнения; большой срок эксплуатации нагружающего гидромотора [13]. В то же время из недостатков следует отметить следующее: стенд позволяет проводить испытания только низкоскоростных гидромоторов с частотой вращения не более 1000 об/мин; не учитывается КПД нагружающего устройства и всего объемного гидропривода в целом; оценка крутящего момента производится по косвенному параметру; большая стоимость оборудования и запасных частей.

Таким образом, проведенный анализ научно-технической литературы и патентных исследований, выпускаемых и используемых в настоящее время стендов, показал, что наиболее полную оценку технического состояния объемных гидроприводов с определением всех технических характеристик гидроагрегатов дают специализированные стенды зарубежного производства, представленные отечественные стенды не позволяют достоверно оценивать техническое состояние гидроагрегатов. Это обусловлено, прежде всего, ограниченным диапазоном технических ха-

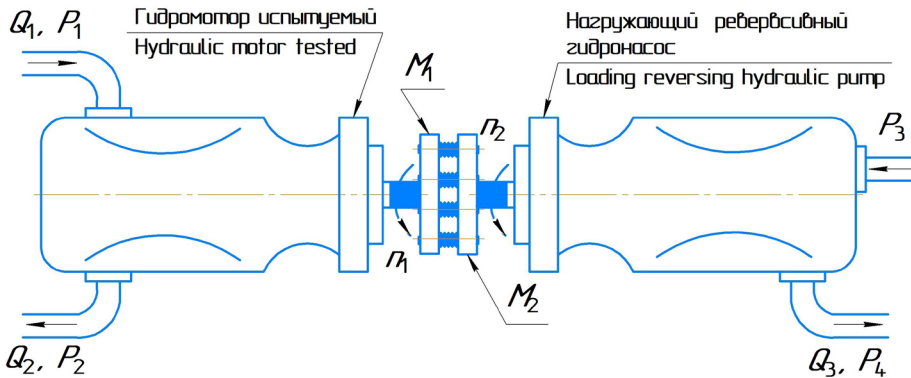
рактеристик (частоты вращения, регистрируемого значения давлений и так далее) и не способностью реализовать методику динамических испытаний предприятий-изготовителей.

Большинство отечественных организаций, занимавшихся проектированием и изготовлением новых стендов или модернизацией уже созданных, приостановило свою деятельность, а те модели, которые создаются, зачастую не соответствуют возросшим техническим требованиям. В то же время зарубежные стенды ввиду высокой стоимости в основном используются в промышленном производстве. Их внедрение в ремонтное производство экономически нецелесообразно. Поэтому на кафедре технического сервиса машин Института механики и энергетики ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» была поставлена задача по разработке стенда для оценки технического состояния объемных гидроприводов отечественного и зарубежного производства с гидравлическим нагружающим устройством, способного реализовать методику динамических испытаний объемного гидропривода в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров.

Материалы и методы

В процессе разработки стенда использованы положения теоретической механики, теории гидрогазодинамики, основные принципы создания механизмов и машин. Для оценки технического состояния гидромотора и всего объемного гидропривода в целом на кафедре технического сервиса машин был использован метод гидравлического нагружения, описанный в одной из научных работ [8]. Метод основан на применении в качестве нагружающего устройства гидромашин. На рисунке 1 представлена схема реализации

⁸ Ярстройрезерв [Электронный ресурс]. URL: <http://www.yarsr.ru/services/gidravlicheskiy-stend/> (дата обращения: 28.10.2019).



Р и с. 1. Схема соединения испытываемого гидромотора и нагружающего реверсивного гидронасоса: M_1, M_2 – фактические крутящие моменты испытываемого гидромотора и реверсивного гидронасоса; n_1, n_2 – частоты вращения валов испытываемого гидромотора и реверсивного гидронасоса; Q_1, Q_2 – подача (расход) рабочей жидкости на входе и выходе испытываемого гидромотора; Q_3 – подача рабочей жидкости на выходе реверсивного гидронасоса; P_1, P_2 – давление рабочей жидкости на входе и выходе испытываемого гидромотора; P_3, P_4 – давление рабочей жидкости на входе и выходе реверсивного гидронасоса

Fig. 1. Connection diagram of the tested hydraulic motor and the loading reversible hydraulic pump: M_1, M_2 – actual torques of the tested hydraulic motor and the reversible hydraulic pump; n_1, n_2 – frequencies of shaft speeds of the tested hydraulic motor and the reversible hydraulic pump; Q_1, Q_2 – supply (flow) of the working fluid at the inlet and outlet of the tested hydraulic motor; Q_3 – supply of working fluid at the outlet of the reversing hydraulic pump; P_1, P_2 – pressure of the working fluid at the inlet and outlet of the tested hydraulic motor; P_3, P_4 – pressure of the working fluid at the inlet and outlet of the reversing hydraulic pump

гидравлического метода нагружения, в которой в качестве нагружающего устройства, обеспечивающего необходимый крутящий (тормозной) момент на валу испытываемого гидромотора, используется реверсивный гидронасос.

Согласно схеме испытания с использованием предлагаемого гидравлического метода нагружения (рис. 1) валы испытываемого гидромотора и нагружающего реверсивного гидронасоса соединены между собой жесткой муфтой. Поэтому частоты их вращения равны $n_1 = n_2$, также равны развиваемый и приводной моменты испытываемого гидромотора и реверсивного гидронасоса, то есть $M_1 = M_2$.

Расчет развиваемого крутящего момента испытываемого гидромотора осуществляется путем пересчета на приводной (потребляемый) крутящий момент нагружающего реверсивного гидронасоса. Тогда фактический крутящий момент M_1 , Н·м, развиваемый

испытываемым гидромотором с учетом параметров гидравлического нагружающего устройства, определяется исходя из следующего выражения [18]:

$$M_1 = M_2 = \frac{Q_3 \cdot 500 \cdot \Delta p}{\pi \cdot n_2 \cdot \eta_2^o \cdot \eta_2^g}, \quad (1)$$

где Q_3 – подача реверсивного гидронасоса, л/мин; $\Delta p = (P_4 - P_3)$ – перепад давлений в гидролиниях реверсивного гидронасоса, МПа; n_2 – частота вращения вала реверсивного гидронасоса, об/мин; η_2^o и η_2^g – объемный и гидромеханический КПД реверсивного гидронасоса (соответствуют значениям нового гидронасоса).

Полученное значение крутящего момента испытываемого гидромотора M_1 , Н·м, позволит определить его гидромеханический КПД по формуле:

$$\eta_1^g = \frac{M_1}{M_1^T}, \quad (2)$$

где M_1^T – теоретическое значение крутящего момента испытуемого гидромотора. Тогда общий КПД испытуемого гидромотора определяется по формуле:

$$\eta^m = \eta_1^o \cdot \eta_1^q, \quad (3)$$

где $\eta_1^o = Q_2 / Q_1$ – объемный КПД гидромотора; Q_1, Q_2 – подача (расход) рабочей жидкости на входе и выходе испытуемого гидромотора при номинальном значении давления P_1 .

Зная значения полного КПД испытуемого гидронасоса, можно дать оценку техническому состоянию всего гидропривода в целом. Описанная методика была положена в основу разрабатываемого стенда.

Результаты исследования

Для решения поставленной задачи авторским коллективом была предложена новая принципиальная схема стенда с гидравлическим нагружающим устройством, способным оценить техническое состояние объемного гидропривода по методике динамических испытаний предприятий-изготовителей в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров (рис. 2).

Стенд содержит частотный преобразователь 1, соединенный с электродвигателем 2, приводной вал, который муфтой 3 соединен с валом испытуемого гидронасоса 4 насосом подпитки 5 и сервораспределителем 6, линию всасывания 7 с вентилем 8, фильтром 9 со встроенным вакуумметром 10. Линия всасывания 7 соединяет гидробак 11 с входом насоса подпитки 5. Гидробак 11 оснащен указателем уровня рабочей жидкости 12, электронным термометром 13 и водяным охладителем 14. Линия управления 15 соединяет выход насоса подпитки 5 с сервораспределителем 6. Линия дренажа 16 связывает дренажные полости испытуемых гидронасоса 4 и гидромотора 17. Сливная линия 18 соединяет сливную полость гидронасоса 4 с гидробаком 11. Обратные 19,

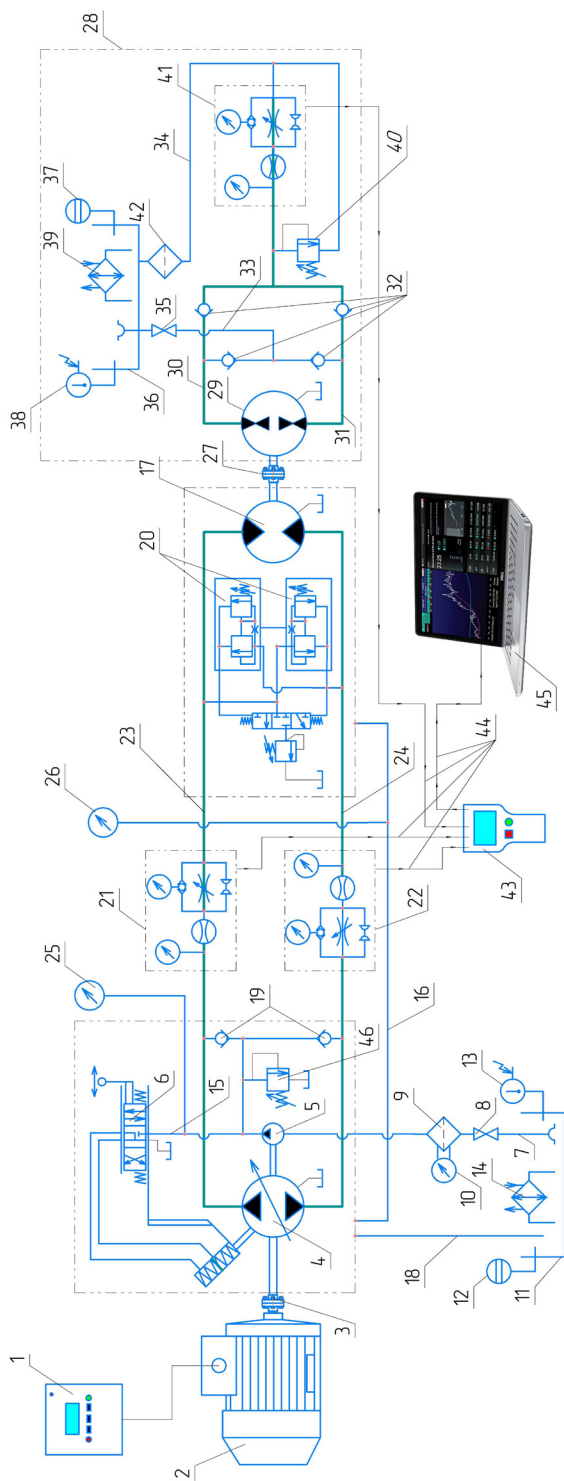
предохранительные 20 клапаны и реверсивные дроссели-расходомеры 21 и 22 установлены в линиях нагнетания 23 и 24. Линии нагнетания 23 и 24 соединяют гидронасос 4 с гидромотором 17. Манометры давления 25, 26 установлены в линиях управления 15 и дренажа 16. Выходной вал испытуемого гидромотора 17 соединен муфтой 27 с валом гидравлического нагружающего устройства 28, который обеспечивает заданный тормозной момент.

Гидравлическое нагружающее устройство 28, используемое в составе стенда, включает в себя нагружающий реверсивный гидронасос 29, приводной вал, который муфтой 27 соединен с валом испытуемого гидромотора 17. Линии нагнетания 30 и 31 через систему обратных клапанов 32 соединены с линией всасывания 33 и линией слива 34. Линия всасывания 33 с вентилем 35 соединяет реверсивный насос-мотор 29 с гидробаком 36, в котором установлены указатель уровня рабочей жидкости 37, электронный термометр 38 и водяной охладитель 39. Линия слива 34 соединяет реверсивный насос-мотор 29 через предохранительный клапан 40, реверсивный дроссель-расходомер 41 и фильтр 42 с гидробаком 36.

Реверсивные дроссель-расходомеры 21, 22 и 41 через специальные порты и электрические линии 43 соединены с платой сбора данных 44, подключенной к персональному компьютеру 45.

Для практической реализации предложенной принципиальной схемы разработана структурно-функциональная схема (рис. 3), включающая наименование и марки промышленного оборудования отдельных систем стенда.

Стенд состоит из двух блоков: обработки и измерения данных. В основе блока обработки данных лежит многофункциональная плата сбора данных National Instrument USB-68, соединенная с персональным компьютером под управлением операционной системы MS Windows 7 x86 (32-bit).



Р и с. 2. Принципиальная схема стенда с гидравлическим нагружающим устройством: 1 – частотный преобразователь; 2 – электродвигатель; 3, 27 – муфты; 4, 17 – испытуемые гидронасос и гидромотор; 5 – насос подпитки; 6 – сервораспределитель; 7, 33 – линии всасывания; 8, 35 – вентили; 9, 42 – фильтры; 10 – вакуумметр; 11, 36 – гидробак;

12, 37 – указатели уровня рабочей жидкости; 13, 38 – электронные термометры; 14, 39 – водяные охладители;

15, 16 – линии управления и дренажа; 18, 34 – линии слива; 19, 32 – обратные клапаны; 20, 40, 46 – предохранительные клапаны; 21, 22, 41 – реверсивные дроссели-расходомеры; 23, 24, 30, 31 – линии нагнетания; 25, 26 – манометры давления;

28 – гидравлическое нагружающее устройство; 29 – реверсивный нагружающий гидронасос; 43 – электропровода; 44 – плата сбора данных; 45 – персональный компьютер

Fig. 2. Schematic diagram of the stand with a hydraulic loading device: 1 – frequency converter; 2 – electric motor; 3, 27 – couplings;

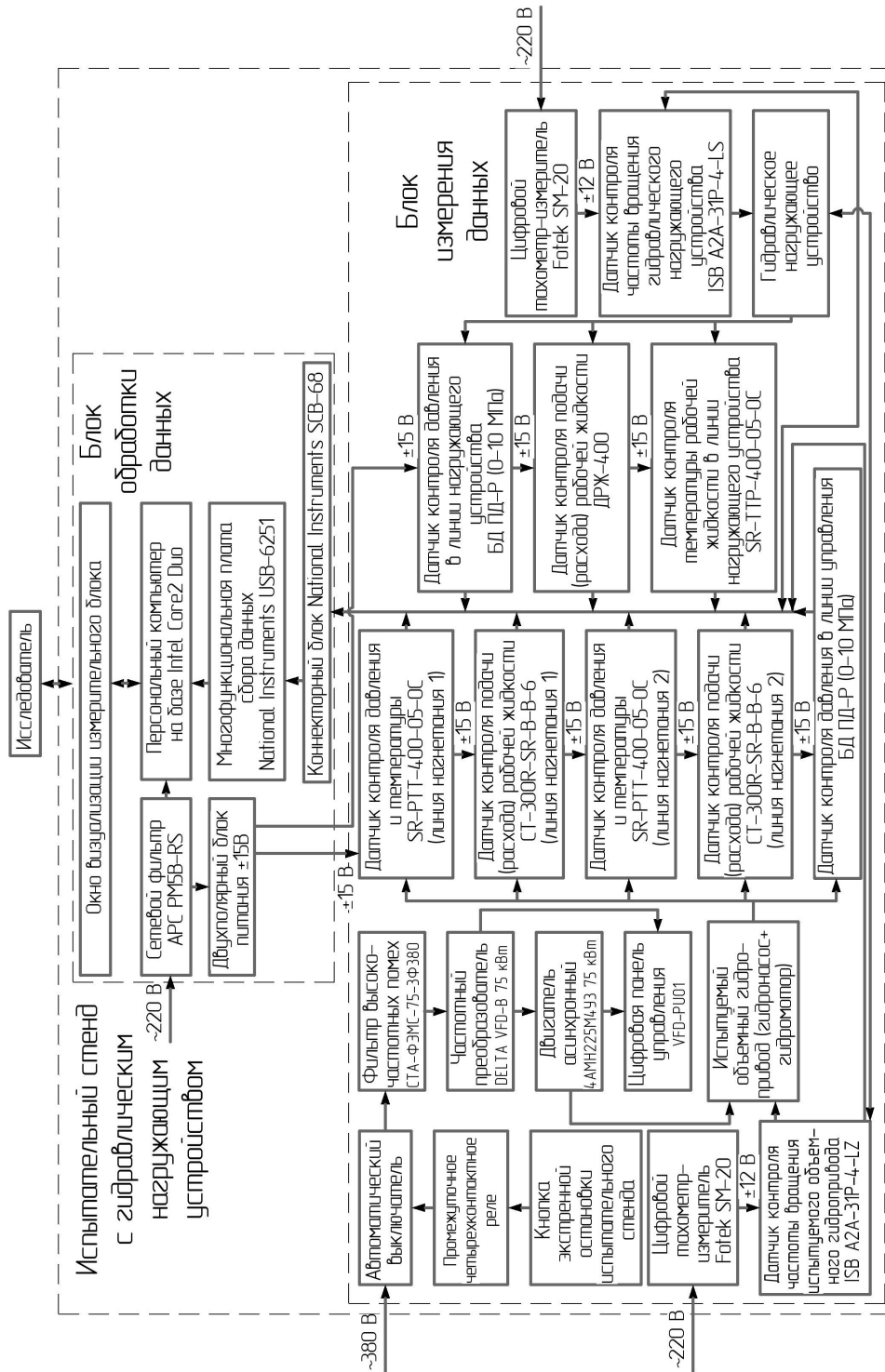
4, 17 – tested hydraulic pump and hydraulic motor; 5 – feed pump; 6 – servo distributor; 7, 33 – suction lines; 8, 35 – valves; 9, 42 – filters;

10 – vacuum gauge; 11, 36 – hydraulic tanks; 12, 37 – indicators of the working fluid level; 13, 38 – electronic thermometers; 14, 39 – the water coolers;

15, 16 – control and drainage lines; 18, 34 – drain lines; 19, 32 – check valves; 20, 40, 46 – reversible flow chokes;

21, 22, 41 – reversible loading device; 23, 24, 30, 31 – pressure gauges; 25, 26 – pressure gauges; 28 – hydraulic loading device; 29 – reverse loading hydraulic pump; 43 – electric wires;

44 – data collection board; 45 – personal computer



Р и с. 3. Структурно-функциональная схема стенда

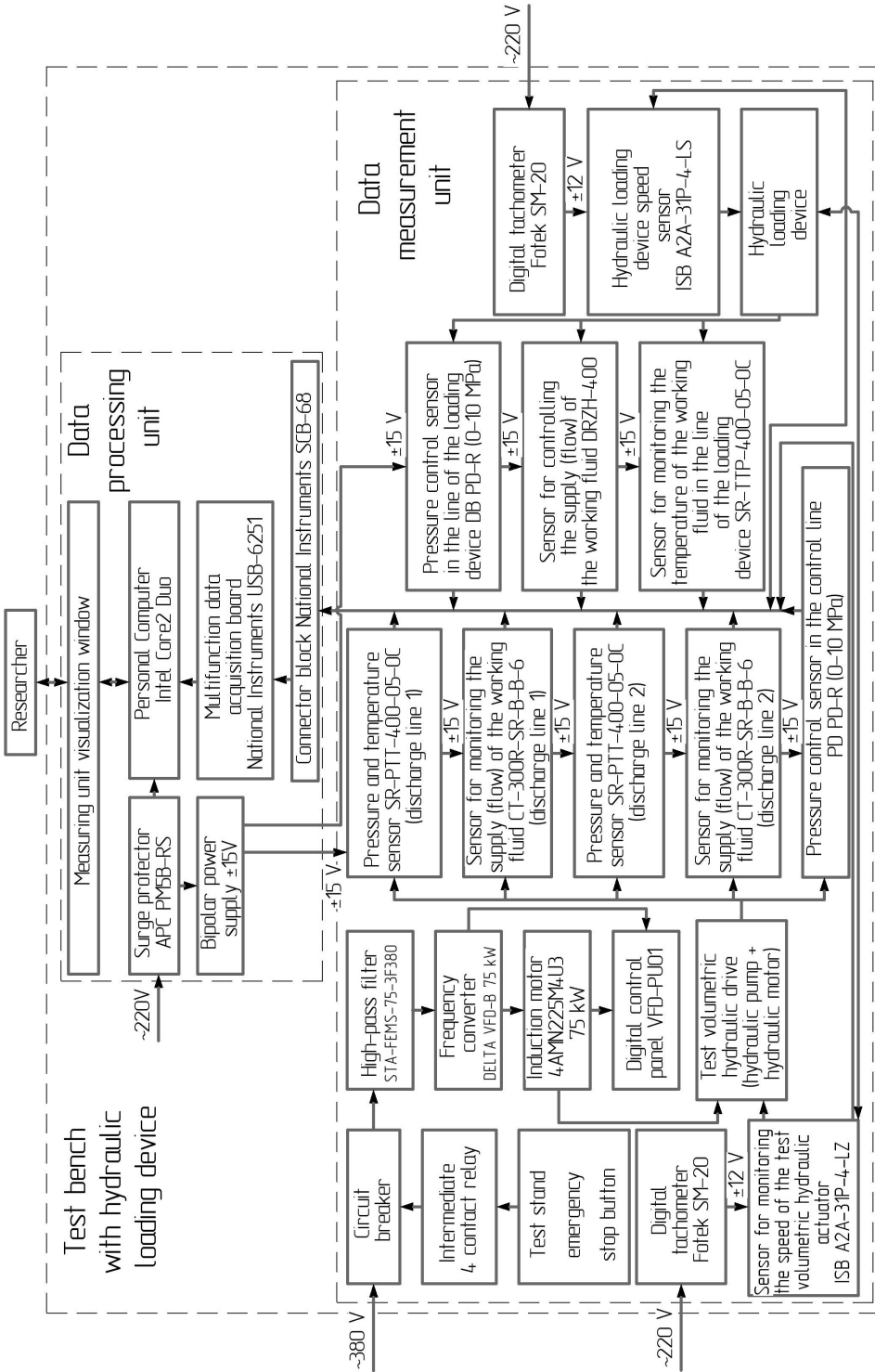
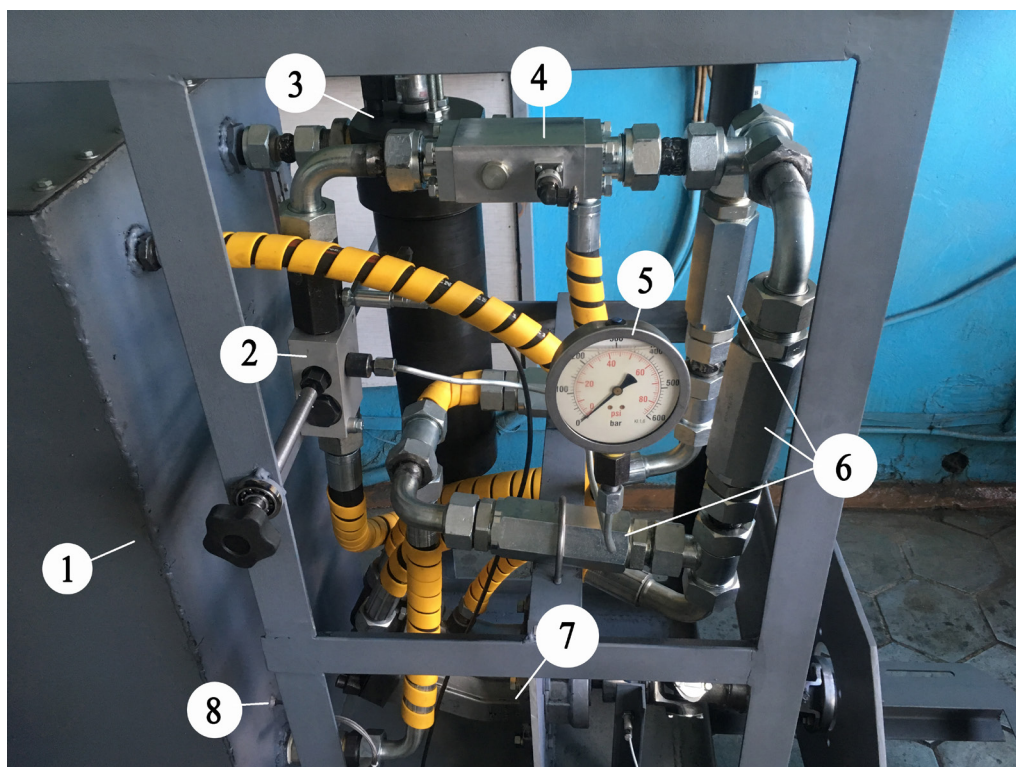


Fig. 3. Structural and functional diagram of the stand

В блоке измерения данных использовалось следующее оборудование: трехфазный асинхронный электродвигатель 4АМН225М4У3 (75 кВт), частотный преобразователь DELTA VFD-B (75 кВт/380 В), реверсивные дроссели-расходомеры СТ-300R-SR-B-B-6 (Webtec), испытуемый гидропривод, реверсивный гидронасос 310.3.112, индуктивные датчики контроля частоты вращения вала гидронасоса, гидромотора и нагружающего устройства ISB A2A-31P-4-LZ, аналоговые датчики давления и температуры SR-PTT-400-05-0C (Webtec),

портативное считывающее устройство НРМ-540-05-0С с комплектом аналоговых кабелей SR-CBL-003-55-ММ (Webtec). Рама стенда с гидравлическим нагружающим устройством и соединительные муфты были изготовлены индивидуально.

На рисунке 4 представлено гидравлическое нагружающее устройство, состоящее из нагружающего аксиально-поршневого нерегулируемого гидронасоса 310.3.112, дросселя ГТ-600М с преобразователем давления БД ПД-Р, преобразователя расхода



Р и с. 4. Гидравлическое нагружающее устройство: 1 – бак; 2 – дроссель ГТ-600М с преобразователем давления БД ПД-Р (0...60 МПа); 3 – фильтр напорный 4ФГМ32; 4 – преобразователь расхода жидкости турбинного типа ДРЖ-400 (0...500 л/мин); 5 – манометр; 6 – обратные клапаны VD7-W1/30 (трубного монтажа); 7 – нагружающий аксиально-поршневой нерегулируемый гидронасос 310.3.112; 8 – датчик температуры SR-TTP-400-05-0C (-25...+125 °C), Webtec (Англия)

F i g. 4. Hydraulic loading device: 1 – tank; 2 – GT-600M throttle with a pressure transducer BD PD-R (0 ... 60 MPa); 3 – 4FGM32 pressure filter; 4 – DRZh-400 turbine type liquid flow converter (0 ... 500 l/min); 5 – pressure gauge; 6 – VD7-W1 check valves / 30 (pipe mounting); 7 – 310.3.112 loading axial piston unregulated hydraulic pump; 8 – SR-TTP-400-05-0C temperature sensor (-25 ... + 125 ° C), Webtec (England)

турбинного типа ДРЖ-400, обратных клапанов VD7-W1/30, соединенных в единую гидросистему замкнутого типа согласно принципиальной схеме стенда (рис. 2).

Стенд работает следующим образом. Испытуемый объемный гидропривод монтируют на стенд. Пультом управления частотного преобразователя задают необходимое направление и частоту вращения приводного вала электродвигателя, который соединен с валом испытуемого гидронасоса. Рычаг управления сервораспределителя перемещают поочередно в крайние положения, при этом испытуемый гидронасос изменяет направление и объем подаваемой рабочей жидкости в линиях нагнетания, идущих к испытуемому гидромотору, вследствие чего выходной вал последнего совершает вращение (в одном из направлений) совместно с приводным валом реверсивного (нагружающего) гидронасоса, так как их валы жестко соединены между собой. Частота вращения испытуемого гидромотора варьируется путем изменения подачи рабочей жидкости (объема) испытуемого гидронасоса и определяется при помощи индуктивного датчика. При достижении рабочей жидкости своей рабочей температуры ($t = 50 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) в линиях нагнетания объемного гидропривода создают номинальное давление, установленное предприятием-изготовителем. Давление в линиях нагнетания создается гидравлическим нагружающим устройством. Торможение осуществляется в динамическом режиме, то есть вал испытуемого гидромотора вращается под заданной нагрузкой тормозного момента, созданного реверсивным (нагружающим) гидронасосом. Нагрузка (тормозной момент) задается путем изменения проходного сечения (повышения давления) при помощи реверсивного дроссель-расходомера. При изменении направления вращения вала испытуе-

мого гидромотора направление потока рабочей жидкости в гидросистеме гидравлического нагружающего устройства изменяется автоматически за счет попарного «открытия» и «закрытия» обратных клапанов. Принцип работы реверсивного гидронасоса в обоих направлениях вращения идентичен.

В процессе испытания реверсивные дроссели-расходомеры определяют подачу испытуемого гидронасоса и реверсивного гидронасоса, расход гидромотора, давление в линиях нагнетания объемного гидропривода и давление в линиях нагнетания гидравлического нагружающего устройства, а также температуру рабочей жидкости. Плата сбора данных обрабатывает информацию и передает на персональный компьютер основные технические характеристики испытуемого объемного гидропривода в заданный момент времени. Крутящий момент на валу испытуемого гидромотора определяется расчетным путем по формуле (1).

Разработанный стенд с гидравлическим нагружающим устройством позволяет расширить возможности оценки технического состояния объемных гидроприводов за счет увеличения диапазонов измеряемых (контролируемых) технических характеристик: частота вращения приводного вала от 0 до 4000 об/мин, рабочее давление в линии нагнетания от 0 до 48 МПа, подача и расход в линии нагнетания от 15 до 600 л/мин, крутящий момент на валу испытуемого гидромотора от 0 до 1000 Н·м. Стенд позволяет оценить техническое состояние наиболее распространенных объемных гидроприводов, используемых в агропромышленном комплексе, таких как: ГСТ-90, ГСТ-112 (ОАО «Пневмостроймашина» и ОАО «Гидросила»); 90R100 и 90M100 (Sauer-Danfoss); 6423-618 и 6433-113 (Eaton); BMV 70R и BMF75 (Linde); HPV105 и HMF105 (Linde); AA4VG90 и A2FM90 (Bosch Rexroth) [25].

Обсуждение и заключение

Разработанная конструкция стенда с гидравлическим нагружающим устройством позволяет в условиях ремонтных предприятий и сервисных центров реализовывать методику динамических испытаний предприятий-изготовителей и с высокой точностью определять основные технические характеристики объемного гидропривода отечественного и зарубежного производства.

По целому ряду технических характеристик стенд, созданный на кафедре технического сервиса машин ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва»,

превосходит существующие отечественные и зарубежные аналоги при более низкой стоимости. Гидравлическое нагружающее устройство создает, поддерживает и бесступенчато измеряет крутящий (тормозной) момент на валу испытуемого гидромотора до 1000 Н·м. Оценочная стоимость стенда – 1790000 рублей, что составляет 11 % от стоимости зарубежного аналога и 51 % от стоимости отечественного образца. Дальнейшее развитие стенда видится в разработке специализированного программного обеспечения для обработки и анализа результатов испытаний в режиме реального времени.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Mandal S. K., Singh A. K., Verma Y., Dasgupta K.** Performance Investigation of Hydrostatic Transmission System as a Function of Pump Speed and Load Torque // Journal of The Institution of Engineers (India): Series C. 2012. Vol. 93, Issue 2. Pp. 187–193. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40032-012-0022-4>
2. **Akkaya A. V.** Effect of Bulk Modulus on Performance of a Hydrostatic Transmission Control System // Sadhana. 2006. Vol. 31, Issue 5. Pp. 543–556. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02715913>
3. **Michelson Sh., Mueller M., Schurman B.** Hydraulic Test Bench Circuit Construction, Testing and Analysis // The Journal of Undergraduate Research. 2012. Vol. 10, Issue 9. Pp. 116–127. URL: <https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1037&context=jur> (дата обращения: 28.10.2019).
4. Стенд для испытания регулируемых аксиально-поршневых гидронасосов и гидромоторов: пат. 2381385 Рос. Федерация. № 2008137350/06; заявл. 19.09.2008; опубл. 10.02.2010. Бюл. № 4. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2381385C1_20100210.pdf (дата обращения: 28.10.2019).
5. Стенд для испытания гидромоторов: пат. 47057 Рос. Федерация. № 2005108014/22; заявл. 21.03.2005; опубл. 10.08.2005. Бюл. № 22. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU47057U1_20050810.pdf (дата обращения: 28.10.2019).
6. **Колчин А. В., Каргиев Б. Ш.** Динамические методы диагностирования гидротрансмиссии сельскохозяйственных комбайнов // Труды ГОСНИТИ. 2006. Т. 98. С. 67–71. URL: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=87482 (дата обращения: 28.10.2019).
7. **Гринчар Н. Г., Кузьмин Д. В.** Определение потребности средств диагностики для парков строительных машин // Механизация строительства. 2009. № 6. С. 16–19. URL: <https://www.rucont.ru/efd/541369> (дата обращения: 28.10.2019).
8. **Пьянзов С. В., Ионов П. А., Величко С. А., Земсков А. М.** Устройство для оценки технического состояния объемного гидропривода // Пермский аграрный вестник. 2018. № 2 (22). С. 15–22. URL: <http://agrovest.psa.ru/wp-content/uploads/2018/06/2-2018-15-22.pdf> (дата обращения: 28.10.2019).
9. **Маслов Н. А.** Обоснование принципиальной схемы стенда для испытаний объемных гидромашин // Главный механик. 2013. № 6. С. 56–60.
10. **Elshorbagy K. A., Kandil H., Latif M. R.** Development of a Multi-Functional Hydraulic Test Stand // Journal of Scientific and Engineering Research. 2018. Vol. 5, Issue 1. Pp. 123–132. URL: <http://jsaer.com/download/vol-5-iss-1-2018/JSAER2018-05-01-123-132.pdf> (дата обращения: 28.10.2019).

11. **Tkáč Z., Drabant Š., Majdan R., Cvičela P.** Testing Stands for Laboratory Tests of Hydrostatic Pumps of Agricultural Machinery // Research in Agricultural Engineering. 2008. Vol. 54, no. 4. Pp. 183–191. DOI: <https://doi.org/10.17221/704-RAE>

12. **Маслов Н. А.** Обоснование принципиальной схемы стенда для испытаний объемных гидромашин // Вестник машиностроения. 2014. № 6. С. 3–10. URL: https://www.mashin.ru/files/2014/ve0614_web.pdf (дата обращения: 28.10.2019).

13. **Ding H., Zhao J.** Performance Analysis of Variable Speed Hydraulic Systems with Large Power in Valve-Pump Parallel Variable Structure Control // Journal of Vibroengineering. 2014. Vol. 16, Issue 2. Pp. 1042–1062. URL: <https://jvejournal.com/article/14974> (дата обращения: 28.10.2019).

14. **Ионов П. А., Пьянзов С. В., Земсков А. М.** Обоснование технических параметров стендового оборудования для оценки технического состояния объемного гидропривода // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 128. С. 97–105. URL: http://vimtsm.ru/wp-content/uploads/2019/03/128_2017.pdf (дата обращения: 28.10.2019).

Поступила 28.09.2019; принята к публикации 07.10.2019; опубликована онлайн 31.12.2019

Об авторах:

Ионов Павел Александрович, профессор кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ResearcherID: S-7146-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, resurs-ime@yandex.ru

Сенин Петр Васильевич, заведующий кафедрой технического сервиса машин, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: H-1219-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, senin53@mail.ru

Пьянзов Сергей Владимирович, аспирант кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ResearcherID: B-1548-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5845-1635>, serega.pyanzov@yandex.ru

Столяров Алексей Владимирович, доцент кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ResearcherID: G-8460-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5898-0150>, cabto@mail.ru

Земсков Александр Михайлович, старший преподаватель кафедры технического сервиса машин, Институт механики и энергетики ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, ResearcherID: S-7748-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, ZAM503@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

П. А. Ионов – разработка метода гидравлического нагружения, принципиальной схемы стенда; П. В. Сенин – научное руководство, анализ и доработка текста; С. В. Пьянзов – подготовка текста с последующей доработкой, анализ литературных данных, разработка метода гидравлического нагружения; А. В. Столяров – подготовка и анализ литературных данных, доработка текста; А. М. Земсков – проработка структурно-функциональной схемы стенда, доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mandal S.K., Singh A.K., Verma Y., Dasgupta K. Performance Investigation of Hydrostatic Transmission System as a Function of Pump Speed and Load Torque. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2012; 93(2):187-193. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s40032-012-0022-4>
2. Akkaya A.V. Effect of Bulk Modulus on Performance of a Hydrostatic Transmission Control System. *Sadhana*. 2006; 31(5):543-556. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02715913>
3. Michelson Sh., Mueller M., Schurman B. Hydraulic Test Bench Circuit Construction, Testing and Analysis. *The Journal of Undergraduate Research*. 2012; 10(9):116-127. Available at: <https://openprairie.sdstate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1037&context=jur> (accessed 28.10.2019). (In Eng.)
4. Stand for Testing Adjustable Axial-Piston Hydraulic Pumps and Hydraulic Motors: Patent 2381385 Russian Federation. No. 2008137350/06; appl. 19.09.2008; publ. 10.02.2010. Bulletin No. 4. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2381385C1_20100210.pdf (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
5. Hydraulic Motor Test Stand: Patent 47057 Russian Federation. No. 2005108014/22; appl. 21.03.2005; publ. 10.08.2005. Bulletin No. 22. Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU47057U1_20050810.pdf (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
6. Kolchin A.V., Kargiev B.Sh. Dynamic Methods for Diagnosing the Hydrotransmission of Agricultural Combines. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2006; 98:67-71. Available at: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=87482 (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
7. Grinchar N.G., Kuzmin D.V. Determining the Need for Diagnostic Tools for Building Machine Fleets. *Mekhanizatsiya stroitelstva = Construction Mechanization*. 2009; (6):16-19. Available at: <https://www.rucont.ru/efd/541369> (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
8. Pyanzov S.V., Ionov P.A., Velichko S.A., Zemskov A.M. The Device for Assessing the Technical Condition of Hydraulic Gear. *Permskiy agrarniy vestnik = Perm Agrarian Journal*. 2018; (2):15-22. Available at: <http://agrovest.psa.ru/wp-content/uploads/2018/06/2-2018-15-22.pdf> (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
9. Maslov N.A. Reasoning of the Principle Scheme of a Stand for Tests of Massive Hydro Machines. *Glavnyy mekhanik = Chief Mechanical Engineer*. 2013; (6):56-60. (In Russ.)
10. Elshorbagy K.A., Kandil H., Latif M.R. Development of a Multi-Functional Hydraulic Test Stand. *Journal of Scientific and Engineering Research*. 2018; 5(1):123-132. Available at: <http://jsaer.com/download/vol-5-iss-1-2018/JSAER2018-05-01-123-132.pdf> (accessed 28.10.2019). (In Eng.)
11. Tkáč Z., Drabant Š., Majdan R., Cvičela P. Testing Stands for Laboratory Tests of Hydrostatic Pumps of Agricultural Machinery. *Research in Agricultural Engineering*. 2008; 54(4):183-191. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/704-RAE>
12. Maslov N.A. Substantiation of Principal Scheme of Bench for Tests of Positive-Displacement Hydraulic Machines. 2014; (6):3-10. Available at: https://www.mashin.ru/files/2014/ve0614_web.pdf (accessed 28.10.2019). (In Russ.)
13. Ding H., Zhao J. Performance Analysis of Variable Speed Hydraulic Systems with Large Power in Valve-Pump Parallel Variable Structure Control. *Journal of Vibroengineering*. 2014; 16(2):1042-1062. Available at: <https://jvejournal.com/article/14974> (accessed 28.10.2019). (In Eng.)
14. Ionov P.A., Pyanzov S.V., Zemskov A.M. Justification of Technical Parameters of the Stand Equipment for Assessment of Technical State Volumetric Hydraulic Drive. *Trudy GOSNITI = Works of GOSNITI*. 2017; 128:97-105. Available at: http://vimtsm.ru/wp-content/uploads/2019/03/128_2017.pdf (accessed 28.10.2019). (In Russ.)

Received 28.09.2019; revised 07.10.2019; published online 31.12.2019

About the authors:

Pavel A. Ionov, Professor of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-7146-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9794-0071>, resurs-ime@yandex.ru

Petr V. Senin, Head of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: H-1219-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3400-7780>, senin53@mail.ru

Sergey V. Pyanzov, Postgraduate Student of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), ResearcherID: B-1548-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5845-1635>, serega.pyanzov@yandex.ru

Aleksey V. Stolyarov, Associate Professor of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: G-8460-2016, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5898-0150>, cabto@mail.ru

Alexander M. Zemskov, Senior Lecturer of Technical Service Machines Chair, Institute of Mechanics and Power Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: S-7748-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1489-6077>, ZAM503@mail.ru

Contribution of the authors:

P. A. Ionov – development of the method of hydraulic loading and basic scheme of the stand; P. V. Senin – scientific guidance, analysis and improvement of the text; S. V. Pyanzov – drafting the text with further revision, analysis of literary data, development of the hydraulic loading method; A. V. Stolyarov – preparation and analysis of literary data, revision of the text; A. M. Zemskov – development of the structural and functional scheme of the stand, word processing and editing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.