

УДК 658.5.12

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31>

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕКТРОГИДРОЦИЛИНДРА ПОВЫШЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

А.Е. Карамгужинова¹, В.Н. Кузнецова², В.В. Савинкин¹, Д.А. Коптяев¹
¹Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева,
г. Петропавловск, Казахстан;
²ФГБОУ ВО «СибАДИ»,
г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Проблема повышения эффективности силовых машин ставит первостепенной задачей разработку новой конструкции основных элементов или привода с возможностью широкого применения гибридных приводов. Для сохранения мощностных характеристик привода и его технико-эксплуатационных показателей как альтернатива рассмотрен гибридный с имеющимися электрическими и гидравлическими приводными частями, которые формируют сложный синергетический механизм. Предложенная комбинированная следящая система с указанными параметрами позволяет обеспечить эффективное функционирование привода многих машин.

Методика исследования. В статье представлены результаты аналитического исследования, перспективы развития мехатронных систем в технике и технологических комплексах. Определена отраслевая область с высоким потенциалом развития мехатронных и гибридных приводов.

Сформулирована проблема проектирования и развития гибридных приводов, связанная с тем, что отсутствует единый метод обоснования показателей энергоэффективности силового гибридного привода, который обеспечивал бы взаимодействие двух разнородных систем (электропривода и гидропривода с принципиально разными параметрами).

Результаты. Проведен анализ конструкционных, технологических и эксплуатационных параметров систем гибридного привода. Предложена комбинированная следящая система привода.

Заключение. Доказаны и обоснованы обширные возможности применения гибридных приводов как альтернатива пневмо- и гидроприводов. Анализ результатов проведенных исследований позволит конкретизировать направления и перспективы применения гибридных синергетических приводов и систем для функционирования рабочего оборудования, машин и комплексов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мехатронная система, электроцилиндр, гидроцилиндр, эффективность, силовая машина.

Поступила 26.01.2020, принята к публикации 21.02.2020.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов отсутствует.

БЛАГОДАРНОСТИ. Авторы выражают благодарность рецензентам статьи.

Для цитирования: Карамгужинова А.Е., Кузнецова В.Н., Савинкин В.В., Коптяев Д.А. Анализ перспективы развития мехатронных систем на примере электрогидроцилиндра повышенной эффективности. *Вестник СибАДИ*. 2020;17(1):22-31. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31>

© Карамгужинова А.Е., Кузнецова В.Н., Савинкин В.В., Коптяев Д.А.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0 License.

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31>

ELECTROHYDROCYLINDER OF INCREASED EFFICIENCY: PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MECHATRONIC SYSTEMS

Aigul E. Karamguzhinova¹, Victoria N. Kuznetsova², Vitaliy V. Savinkin¹, Dmitriy A. Koptyaev¹

¹North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev, Petropavlovsk, Kazakhstan;

²Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

ABSTRACT

Introduction. The problem of increasing the efficiency of power machines is important to develop a new design of the main elements or drive with the possibility of widespread use of hybrid drives. To preserve the power characteristics of the drive and its technical and operational indicators, the authors consider a hybrid with the available electric and hydraulic drive parts that form a complex synergistic mechanism as an alternative. The proposed combined tracking system with the specified parameters allows for the efficient operation of the drive of many machines.

Materials and methods. The paper presented the results of an analytical study, the prospects for the development of mechatronic systems in engineering and technological complexes. The research also identified the industry area with a high development potential for mechatronic and hybrid drives.

The authors formulated the problem of designing and developing hybrid drives due to the fact that there was no single method for substantiating the energy efficiency indicators of a power hybrid drive that ensured the interaction of two dissimilar systems (electric drive and hydraulic drive with fundamentally different parameters).

Results. Therefore, the authors conducted the analysis of the structural, technological and operational parameters of the hybrid drive systems and proposed a combined servo drive system.

Discussion and conclusions. The authors prove and justify the extensive possibilities of using hybrid drives as an alternative to pneumatic and hydraulic drives. The results of the research allow specifying the directions and prospects of using hybrid synergetic drives and systems for the functioning of working equipment, machines and complexes.

KEYWORDS: mechatronic system, electric cylinder, hydraulic cylinder, efficiency, power machine.

Submitted 26.01.2020, revised 21.02.2020.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

ACKNOWLEDGEMENTS. Authors express their gratitude to the reviewers of the paper.

For citation: Karamguzhinova A.E., Kuznetsova V.N., Savinkin V.V., Koptyaev D.A. Electrohydrocylinder of increased efficiency: prospects for the development of mechatronic systems. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2020;17(1):22-31. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-1-22-31>

© Karamguzhinova A. E., Kuznetsova V. N., Savinkin V. V., Koptyaev D. A.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0 License.

ВВЕДЕНИЕ

Во всем мире машиностроение представляет ведущую отрасль экономики страны. Именно его развитие отражает уровень научно-технического потенциала и оборотоспособности страны. Машиностроение определяет перспективы мировой индустрии в целом.

Сложное оборудование и высокопроизводительные комплексы станкостроения, дорожно-строительного и транспортного машиностроения основано на применении гидромеханизмов, зарекомендовавших себя в течение многих десятилетий развивающейся отрасли. Сложные машины общего и специального назначения насыщены гидравлическими системами и агрегатами, которые по их назначению и выполняемым функциям принято подразделять на две основные группы: системы и агрегаты, предназначенные для передачи механической энергии от источника к рабочим органам машины и управления движением этих органов; системы и агрегаты, предназначенные для перемещения различных жидкостей из мест хранения к местам ее потребления [1, 2, 3, 4].

Но применение гидравлики, несмотря на широкий спектр достоинств, сопряжено с множеством сложностей, связанных с чистотой масла, безотказной работой насосов, силовых машин и фильтров, профессионализмом и своевременностью обслуживания, не говоря о необходимости нести весьма существенные дополнительные расходы, связанные с регламентными работами.

В производственной практике широкий функционал машиностроительного, дорожно-строительного и энергетического оборудования требует высокой точности позиционирования подвижных элементов и агрегатов, при этом сохраняя высокие мощностные и силовые характеристики машин. В настоящее время данная техническая задача решается применением гидравлических приводов. Однако сложность и громоздкость оборудования имеет существенные недостатки: негерметичность сопряжений, сложность в диагностике и ремонте, нестабильность динамических характеристик и высокая стоимость обслуживания. При эксплуатации данных систем зачастую не обеспечивается точность координатного пози-

ционирования элементов и усложнена автоматизация процессов диагностики на удаленном доступе. Имеется опыт энергетических предприятий по эксплуатации электроприводов, обеспечивающих точность позиционирования элементов, однако при этом возникает необходимость в высоких пусковых токах и невозможность создания больших сил и давлений для восприятия внешних нагрузок [5, 6]. Решить данную проблему предлагается внедрением гибридных приводов, обеспечивающих эффективную работу силовых агрегатов с возможностью гашения пиково-динамических нагрузок [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Современные технологии позволяют разрабатывать электромеханические и электрогидравлические приводы, концепция которых будет построена на системном подходе к функциональным задачам силовых машин¹ [16, 17].

Развитие гибридных приводов связано с необходимостью снижения расхода энергии, топлива, материалов и ужесточением экологических норм на эмиссию материалозатрат. Наибольшие успехи достигнуты в области автотранспортных средств, в дорожно-строительной технике и машиностроении. Гибридные приводы (ГП) пока распространены в меньшей степени, что связано с тяжелыми условиями эксплуатации дорожно-строительной техники, в том числе с необходимостью реализации больших тяговых усилий. Их устанавливают, как правило, на машины циклического действия, в частности, на фронтальные одноковшовые погрузчики, одноковшовые экскаваторы и бульдозеры, а также на погрузчики и краны. Однако, не смотря на низкий уровень применения ГП, наблюдаются существенные перспективы их развития и широкий функционал применения в различных сферах машиностроения. Одними из наиболее перспективных областей применения электромеханических систем являются гидроэнергетика, добывающая промышленность и дорожное строительство, требующие надежной работы, высокой точности позиционирования и быстродействия машин и комплексов² [18].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

На основе проведенного анализа практического использования ГП, выдвинуто предполо-

¹ Хайманн Б., Герт В., Попп К., Репецкий О. Мехатроника: Компоненты, методы, примеры. Новосибирск : Изд-во СО РАН. 2010. 602 с.

² Карнаузов Н.Ф. Электромеханические и мехатронные системы. Ростов н/Д : Феникс. 2006. 320 с.

жение, что использование в качестве привода исполнительных механизмов электрогидроцилиндров с роликово-винтовыми передачами (РВП), в том числе и дублированных, позволяет существенно улучшить динамику рабочих органов и их управление, а значит и энергоэффективность самого агрегата или комплекса. Кроме того, использование электрогидроцилиндров позволяет непосредственно контролировать положение и динамику поворота оборудования, сохраняя тяговые мощности и высокие силовые характеристики. Для самых крупных гидроагрегатов использование электрогидроцилиндров в качестве приводов позволит существенно снизить требования к качеству масла для гидрораспределителей и побудительных золотников, что приведет к существенному снижению ежегодных затрат на обслуживание и повышению надежности систем.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Повышение эффективности силовых машин, как правило, связано с разработкой но-

вых конструкций основных элементов или привода. Конструктивные элементы должны быть модернизированы таким образом, чтобы их основной функционал не был нарушен и КПД сохранился на прежнем уровне. Кроме того, усовершенствованная конструкция должна иметь повышенные характеристики тех параметров, которые являются общепринятыми в нормативных документах. Только в этом случае повышается вероятность долгосрочной перспективы эксплуатации данного устройства. Также одной из основных задач при модернизации прототипа силового привода является обоснование критериев энергоэффективности. Задача усложняется, когда при модернизации конструкции планируется обеспечить взаимодействие двух разных систем: электропривода и гидропривода (рисунок 1). Сложность связана с тем, что показатели энергоэффективности данных систем могут носить принципиально разные параметры и поэтому необходимо исследовать их функциональные зависимости конструкционных, технологических и эксплуатационных параметров [19, 20].

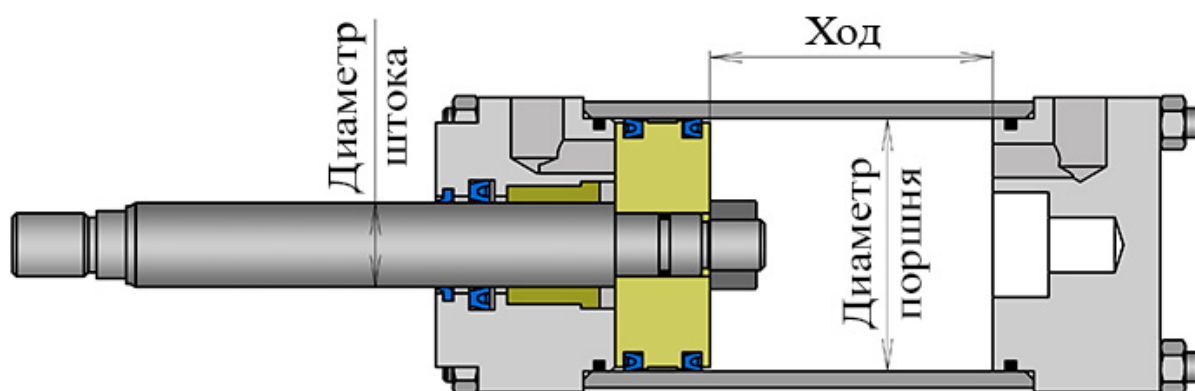


Рисунок 1 – Вид классического гидроцилиндра двухстороннего действия

Figure 1 – View of a classic double-acting hydraulic cylinder

Рассмотрим основные технические характеристики двух типов привода: гидравлический

(см. рисунок 1) и электрический (рисунок 2), цилиндры (таблицы 1 и 2).

Таблица 1
Основные технические характеристики гидроцилиндра ЦГ1-80.56Х900.11-УХЛ

Table 1
Main technical characteristics of the hydraulic cylinder TsG1-80.56X900.11-UHL

Конструктивные		Технологические		Эксплуатационные	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Диаметр поршня, d_p , мм	80	Толкающее усилие, F_p , кН	80,38	Номинальное давление, P_n , МПа	16
Диаметр штока, $d_{ш}$, мм	56	Тянущее усилие, $F_{тн}$, кН	40,99	Рабочее давление, $P_{раб}$, МПа	16
Ход поршня, h	900	Полный ход цилиндра, L , мм	900	Предельное давление, P_{max} , МПа	20
Расстояние по центрам, l_c , мм	1265	-	-	Скорость перемещения штока, V_p , м/с	0,1063
Масса, m , кг	53 кг	-	-	Расход жидкости, Q , л/мин	32

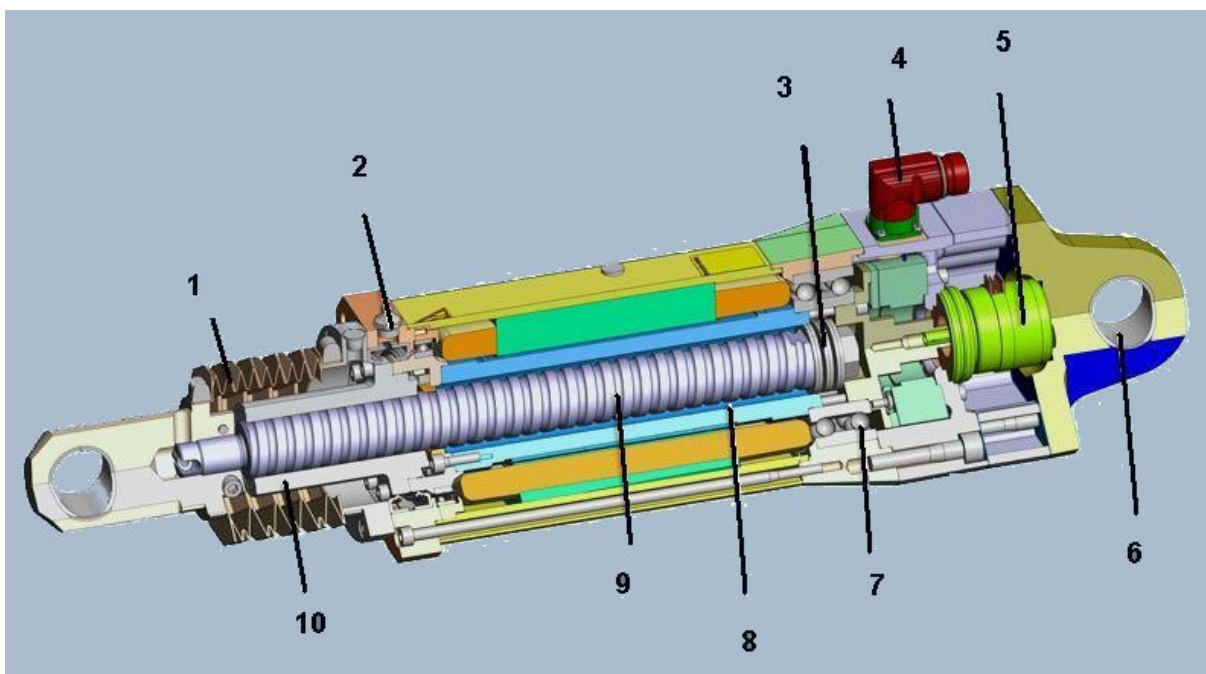


Рисунок 2 – Вид электроцилиндра:
1 – шток, 2 – датчик контроля, 3 – червячная втулка, 4 – коммутатор проводной,
5 – электромотор, 6 – монтажный кронштейн, 7 – опорный подшипник,
8 – статор электромагнита, 9 – винтовой шток, 10 – направляющая втулка

Figure 2 – View of the electric cylinder:
1 – rod, 2 – control sensor, 3 – worm sleeve, 4 – wired switch,
5 – electric motor, 6 – mounting bracket, 7 – pillow block bearing,
8 – electromagnet stator, 9 – screw rod, 10 – guide sleeve

Таблица 2
Основные технические характеристики электроцилиндра

Table 2
Main technical characteristics of the electric cylinder

Конструктивные		Технологические		Эксплуатационные	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Длина штока, I, мм	до 455	Максимальная сила, кН	до 55 кН	Ход (min – max), S, мм	100 ÷ 1200
Диаметр винта, дв, мм	12	Степень защиты	IP65/67	Максимальный вращающий момент, М, Нм	2,50
Шаг винта, Рв	5	-	-	Максимальная линейная скорость, V _л , мм/с	0,56
Динамическая грузоподъемность, С	6600	-	-	Максимальное ускорение, а, м/с ²	25
-	-	-	-	Скорость выхода штока, V _ш , мм/с	до 1000
-	-	-	-	Точность позиционирования, мкм	до 2,5
-	-	-	-	Усилие, F, кН	до 180
-	-	-	-	Угловая скорость вращения, ω, рад/с ⁻¹	312

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализируя технические характеристики двух систем привода, установлено, что не все параметры могут выступать показателями эффективности работы привода. Например, один из важных показателей гидроцилиндра – номинальное давление, Рн – не всегда влияет на фактический расход рабочей жидкости, Q, поскольку при постоянном давлении расход жидкости в процессе эксплуатации изменяет свои значения. Причиной могут быть различные факторы, которые не учтены ранее: износ контактных поверхностей, i , вязкость жидкости, степень вспенивания и т.д. Значит, эффективность работы гидроцилиндра оценить нормативным показателем Рн нельзя и тем более невозможно даже косвенно оценить энергоэффективность гидроцилиндра. Таким образом, параметром энергоэффективности должен выступать обобщенный показатель, характеризующий зависимость эксплуатационных и технологических параметров, которые предстоит установить. В основе конструкции электроцилиндров заложен ряд технических решений из механики и электротехники (рисунок 3).



Рисунок 3 – Электросервопривод

Figure 3 – Electric actuator

Особенность конструкции машин с электрическим приводом заключается в сложности физических явлений электрических полей, которые формируют основной функционал приводной или силовой машины. Структура таких механизмов должна обеспечивать надежную и синхронную работу всех его систем.

Сложность синхронизации подвижных элементов заключается в выравнивании временного интервала t на разных режимах управления: t_1 – время разгона, t_2 – время установившегося движения и t_3 – время торможения. Для реализации указанной технической задачи одна часть устройства представляет собой синхронный сервомотор с установленными в нём постоянными магнитами и интегрированными датчиками обратной связи; другая часть – инвертированную роlikово-винтовую передачу (ИРВП). Статор электромотора представляет собой ламинированные сегменты с обмоткой, что в значительной степени повышает крутящий момент. Электромагнитное поле, которое генерируется обмотками статора, приводит во вращение ротор сервомотора. ИРВП преобразует вращательное движение ротора в поступательное движение штока. Вращающийся под действием электромагнитного поля ротор представляет собой полый металлический цилиндр с нарезанной внутри него ходовой резьбой. Внутри цилиндра по резьбе линейно перемещается механизм с большим количеством опорных роликов. Наличие подвижного узла, имеющего сферические тела качения, не всегда эффективно сказывается на процессе эксплуатации [21, 22].

Линейные сервомоторы могут развивать скорость до 1,5 м/с, усилие до 180 кН и обеспечивать ход штока в пределах до 1,2 м, точность позиционирования – единицы микрометров. Электромеханические линейные моторы отличаются своей миниатюрностью. Управление и задачи позиционирования для электро-механических систем решаются достаточно просто, так как требуются стандартные сер-

воусилители, которые имеют невысокую стоимость. Программирование профиля движения и настройку сервоусилителя осуществить достаточно просто.

Следовательно, необходимо решить научно-техническую задачу по разработке гибридного силового привода точного позиционирования и обосновать адекватные критерии энергоэффективности. Например, в момент разгона и торможения происходит проскальзывание тел качения или их кратковременное подклинивание. Более низкий КПД и максимальная скорость у шарико-винтовой пары (ШВП) обусловлена следующими факторами: чем больше скорость, тем больше трение и износ шариков, что уменьшает КПД (рисунок 4). На внешней оболочке поверхности цилиндра (ротора) установлены и надёжно зафиксированы несколько рядов постоянных магнитов. Количество магнитов является определяющим фактором для расчёта создаваемого крутящего момента и усилия, необходимого для линейного перемещения.

При скорости вала более 1000 об/мин возникают сильные соударения и вибрации шариков, поэтому все, даже самые точные и дорогие ШВП, не рассчитаны на скорости свыше 2000 об/мин.

Конструкция РВП изначально лишена подобных недостатков. Все ролики жестко закреплены друг относительно друга и не могут соприкоснуться. Для механической синхронизации вращения каждого ролика применены специальные зубчики на конце роликов (рисунок 5), что позволяет избежать ненужных проскальзываний [23].

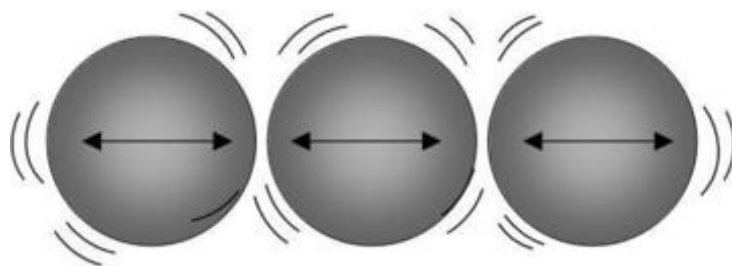


Рисунок 4 – Тела качения

Figure 4 – Rolling bodies

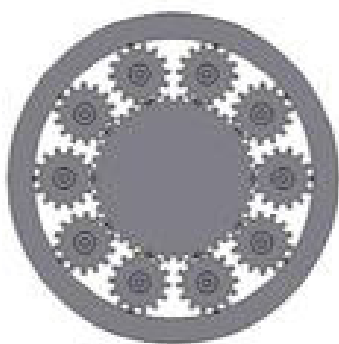


Рисунок 5 – Ролико-винтовая пара электропривода

Figure 5 – Roller-screw pair of the electric drive

При наличии подобных систем и подвижных элементов достигаются следующие технические характеристики: максимальные усилия до 6 кН; при длине штока до $l = 455$ мм скорость – до 550 мм/с. Для приведения в действие необходим источник питания постоянно-го тока с напряжением $24 \div 48$ В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, сделан вывод о возможности широкого применения гибридных приводов на основе электрических и гидравлических приводных частей, которые формируют сложный синергетический механизм. Предложенная комбинированная следящая система с указанными параметрами позволяет обеспечить эффективное функционирование привода многих машин. Представленная система с электрическим или гибридным приводом может быть эффективно использована для замены пневматических и гидравлических приводов в высокотоннажных машинах для регулирования расхода различных сред и обеспечения точности позиционирования рабочего оборудования. Диапазон подобных решений достаточно широк: энергетические турбины, системы управления сложными механизмами горнодобывающих и дорожно-строительных комплексов. Особенно эффективно применение данных систем для сложно-нагруженных режимов прецизионных пар, регулирующих скоростные характеристики узлов и сложных механизмов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Величко С.А., Чумаков П.В., Коломейченко А.В. Оценка технического состояния силовых гидроцилиндров серии С навесных гидросистем тракторов // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29. № 3. С. 396–413.

2. Величко С.А., Сенин П.В., Чумаков П.В. Пути повышения межремонтного ресурса силовых гидроцилиндров // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 4. С. 36–41.

3. Cristescu C., Radoi R., Dumitrescu C., Dumitrescu L. Experimental Research on Energy Losses Through Friction in Order to Increase Lifetime of Hydraulic cylinders // 13th International Conference on Tribology. 2017. Vol. 174. pp. 79–86.

4. Kobzov D., Kobzova I., Lkhanag D. Hydrocylinder Diagnostic Parameters // System. Method. Tehnologii. 2009. No 3. pp. 19–23.

5. Velichko S.A. Formation of Thick Layer Electro-Spark Coatings for Restoring Worn-Out Parts of Power Hydraulic Cylinders // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2017. Vol. 53, No 2. pp. 116–123.

6. Zhang X., Wang G., Xia P., Li H.P., He M. Finite element analysis and experimental study on contact pressure of hydraulic support bud-shaped composite sealing ring. Advances in Mechanical Engineering. 2016. No 10, pp. 1–9.

7. Vorlauffer G., Ilincic S., Franek F. and Pauschitz A. Quantification of wear by comparison of surface topography data. Encyclopedia of tribology. New York :Springer Verlag, 2012. Ch. 967.

8. Allmaier H., Sander D.E., Reich F.M. Measuring friction in automotive engines & determining the contributions of the individual subsystems // World Tribology Congress. Torino. 2013. P. 117.

9. Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. Анализ эффективности работы одноковшового экскаватора // Вестник СибАДИ. 2014. № 6 (40). С. 26–33.

10. Lee S.U., Chang P.H. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface // Control Engineering Practice. 2002. T. 10. № 7. pp. 697–711.

11. Heipl O and Murrenhoff H. Friction of hydraulic rod seals at high velocities. Tribol Int 2015. 85. pp. 66–73.

12. Lang PS, Paluszny A and Zimmerman RW. Hydraulic sealing due to pressure solution contact zone growth in siliciclastic rock fractures. J Geophys Res: Sol Ea 2015. 120. pp. 4080–4101.

13. Mirza J. Joint seals for hydraulic structures in severe climates. J Civ Eng Manag 2014. 20. pp. 38–46.

14. Zhang F-Y and Li T. Initial modeling of Y-ring based on ANSYS. J Tianjin Polytech Univ 2013. 32. pp. 85–88.

15. Li S-H, Jia H-M, Li M-D. Theory and testing method of hyperelastic material constitutive model. China Elastom 2011. 21. pp. 58–64.

16. Сторожев В.В., Феоктистов Н.А. Системотехника и мехатроника технологических машин и оборудования: монография. М.: ИТК «Дашков и К». 2015. 412 с.

17. Лепешкин А.В. Гидравлика, гидропневмопривод: монография. М.: ГОУ МГИУ. 2007. 350 с.

18. Региня В.В. Гидромеханические передачи карьерных самосвалов БелАЗ с мехатронной системой управления: диагностирование технического состояния в процессе тестовых испытаний // Горная промышленность. 2017. №3 (133) С. 32–36.

19. Карпович С.Е. Мехатронные системы параллельной кинематики на гибридных приводах прямого действия // Доклады БГУИР. 2019. № 2 (120). С. 59–72.

20. Озерский А.И., Шошиашвили М.Э. Метод расчёта динамических режимов работы электрогидропривода с ампулизированной гидравлической системой // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2014. № 1. С. 52–60.

21. Исаев Ю.М., Матросов А.В., Машков М.А., Сунарчин Р.А. Расчётно-экспериментальное исследование многомашинного электрогидравлического следящего привода // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. Том 23. № 3. 2017. С. 136–143.

22. Скосарева Е.С., Колюбин С.А. Управление движением мехатронной системы с гибким вращательным звеном: теория и эксперимент // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Том 18. № 5. С. 780–786.

23. Тарасик В.П., Горбатенко Н.Н., Плякин Р.В., Савицкий В.С. Мехатронная система автоматического управления гидромеханической передачей мобильных машин // Вестник Белорусско-Российского университета. 2015. № 2(47). С. 68–80.

REFERENCES

1. Velichko S.A, Chumakov P.V., Kolomeychenko A.V. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya silovykh gidrocilindrov serii S navesnykh gidrosistem traktorov [Evaluation of technical condition of power hydraulic cylinders of series C of tractor hinged hydraulic systems]. *Inzhenerye tekhnologii i sistemy*. 2019; 29. № 3: 396–413 (in Russian).

2. Velichko S. A, Senin P. V., Chumakov P. V. Puti povysheniya mezhremontnogo resursa silovykh gidrocilindrov [Ways to increase inter-repair life of power hydraulic cylinders]. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya*. 2015; 4: 36–41 (in Russian).

3. Cristescu C., Radoi R., Dumitrescu C., Dumitrescu L. Experimental Research on Energy Losses Through Friction in Order to Increase Lifetime of Hydraulic cylinders. *13th International Conference on Tribology*. 2017; 174: 79–86.

4. Kobzov D., Kobzova I., Lkhanag D. Hydrocylinder Diagnostic Parameters. *Systemi. Methodi. Tehnologii*. 2009; 3: 19–23.

5. Velichko S. A. Formation of Thick Layer Electro-Spark Coatings for Restoring Worn-Out Parts of Power Hydraulic Cylinders. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2017; 53, no. 2: 116–123.

6. Zhang X., Wang G., Xia P., Li H.P., He M. Finite element analysis and experimental study on contact pressure of hydraulic support bud-shaped composite sealing ring. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016; 10: 1–9.

7. Vorlauffer G., Ilincic S., Franek F. and Pauschitz A. Quantification of wear by comparison of surface topography data. *Encyclopedia of tribology*. New York: Springer Verlag. 2012. Ch; 967.

8. Allmaier H., Sander D.E., Reich F.M. Mea-

suring friction in automotive engines & determining the contributions of the individual subsystems. *World Tribology Congress*. Torino. 2013: 117.

9. Kuznecova V.N., Savinkin V.V. Analiz effektivnosti raboty odnokovshovogo ekskavatora. [Analysis of single-bucket excavator operation efficiency]. *Vestnik SibADI*. 2014; 6 (40): 26–33 (in Russian).

10. Lee S.U., Chang P.H. Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface. *Control Engineering Practice*. 2002; 10. № 7: 697–711.

11. Heipl O and Murrenhoff H. Friction of hydraulic rod seals at high velocities. *Tribol Int*. 2015; 85: 66–73.

12. Lang P.S., Paluszny A and Zimmerman R.W. Hydraulic sealing due to pressure solution contact zone growth in siliciclastic rock fractures. *J Geophys Res: Sol Ea* 2015; 120: 4080–4101.

13. Mirza J. Joint seals for hydraulic structures in severe climates. *J Civ Eng Manag*. 2014; 20: 38–46.

14. Zhang F-Y and Li T. Initial modeling of Y-ring based on ANSYS. *J Tianjin Polytech Univ*. 2013; 32: 85–88.

15. Li S-H, Jia H-M, Li M-D. Theory and testing method of hyperelastic material constitutive model. *China Elastom* 2011; 21: 58–64.

16. Storozhev V.V., Feoktistov N.A. Sistemotekhnika i mekhatronika tekhnologicheskikh mashin i oborudovaniya: monografiya [Systems engineering and mechatronics of process machines and equipment: monograph]. Moscow, ITK Dashkov i K. 2015: 412 (in Russian).

17. Lepeshkin A.V. Gidravlika gidropnevmoprivod [Hydraulics, hydropneumatic actuator: monograph]. Moscow, GOU MGIU, 2007: 350 (in Russian).

18. Reginya V.V. Gidromekhanicheskie peredachi kar'ernykh samosvalov BelAZ s mekhatronnoj sistemoy upravleniya: diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya v processe testovykh ispytaniy [Hydromechanical transmissions of mine dump trucks BelAZ with mechatron control system: diagnosis of technical condition during test tests]. *Gornaya Promyshlennost'* 2017; 3 (133): 32–36 (in Russian).

19. Karpovich S.E. Mekhatronnye sistemy parallel'noy kinematiki na gibridnykh privodakh pryamogo dejstviya [Mechatronic parallel kinematics systems on direct-acting hybrid drives]. *Doklady BGUIR*. 2019; 2 (120): 59–72 (in Russian).

20. Ozerskij A.I., Shoshiashvili M.E. Metod raschyota dinamicheskikh rezhimov raboty elektrogidroprivoda s ampulizirovannoy gidravlicheskoj sistemoy [Method of calculation of dynamic operating modes of electric hydraulic drive with ampulized hydraulic system]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki*. 2014; 1: 52–60 (in Russian).

21. Isaev Y.M., Matrosov A.V., Mashkov M.A., Sunarchin R.A. Raschetno-eksperimental'noe issledovanie mnogomashinnogo elektrogidravlicheskogo sledyashchego privoda [Design and experimental study of multi-machine electrohydraulic servo drive]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti CPbPU. Estestvennye i inzhenerye nauki*. 2017; 23. no. 3. 2017: 136–143 (in Russian).

22. Skosareva E.S., Kolyubin S.A. Upravlenie dvizheniem mekhatronnoj sistemy s gibkim vrashchatel'nym zvenom: teoriya i eksperiment [Mechatronic motion control with flexible rotary link: theory and experiment]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2018; 18. No 5: 780–786 (in Russian).

23. Tarasik V.P., Gorbatenko N.N., Plyakin R.V., Savickij V.S. Mekhatronnaya sistema avtomaticheskogo upravleniya gidromekhanicheskoj peredachej mobil'nyh mashin [Mechatronic system of automatic control of hydromechanical transmission of mobile machines]. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta*. 2015; 2(47): 68–80 (in Russian).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Карамгужинова Айгуль Еркеновна – Формирование направления исследования, обзор результатов предшествующих исследований по эксплуатации гидроцилиндров (25%).

Кузнецова Виктория Николаевна – Формирование матрицы сравнения технических характеристик гидроцилиндра и электроцилиндра. Установление критических позиций для параметризации критериев эффективности функционирования (25%).

Савинкин Савинкин Виталий Владимирович – Формулирование проблемы исследований, постановка задач исследования, обозначения алгоритма аналитических исследований, анализ конструктивно-технологических особенностей электроцилиндра (25%).

Коптяев Дмитрий Александрович – Аналитический свод результатов, анализ эффективности отдельных элементов электроцилиндра и гидроцилиндра, анализ возможности совмещения двух принципиально разных систем, формирование выводов (25%).

AUTHORS' CONTRIBUTION

Aigul E. Karamguzhinova formation of the research direction; review of the results on the operation of hydraulic cylinders by previous researchers (25%).

Victoria N. Kuznetsova formation of a matrix comparing the technical characteristics of the hydraulic cylinder and the electric cylinder; establishing of the critical positions for the performance criterion parameters (25%).

Vitaliy V. Savinkin formulation of research problems; formulation of research tasks; designation of analytical research algorithm; analysis of structural and technological features of the electric cylinder (25%).

Dmitriy A. Koptyaev analytical summary of the results; analysis of the effectiveness of individual elements of the electric and hydraulic cylinder; analysis of the possibility of combining two fundamentally different systems; conclusions (25%).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Карамгужинова Айгуль Еркеновна (г. Петропавловск, Казахстан) – старший преподаватель кафедры «Транспорт и машиностроение» РГП ПХВ «СКГУ им. М. Козыбаева» (150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, e-mail: vip.lady.sadvakasova@mail.ru).

Кузнецова Виктория Николаевна (г. Омск, Россия) – д-р техн. наук, проф., Scopus Author ID 8671569200, проф. кафедры «Эксплуатация и сервис транспортно-технологических машин и комплексов в строительстве» ФГБОУ ВО «СибАДИ» (644080, г. Омск, пр. Мира, 5 e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).*

Савинкин Виталий Владимирович (г. Петропавловск, Казахстан) – д-р техн. наук, Scopus Author ID 57195726895, доц. кафедры «Транспорт и машиностроение» РГП ПХВ «СКГУ им. М. Козыбаева» (150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, e-mail: cavinkin7@mail.ru).

Коптяев Дмитрий Александрович (г. Петропавловск, Казахстан) – старший преподаватель кафедры «Транспорт и машиностроение» РГП ПХВ «СКГУ им. М. Козыбаева» (150000, г. Петропавловск, ул. Пушкина, 86, e-mail: koptyev29@mail.ru).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aigul E. Karamguzhinova (Petropavlovsk, Kazakhstan) – Senior Lecturer of the Department of the Transport and Mechanical Engineering, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev (150000, Petropavlovsk, 86, Pushkin St., e-mail: vip.lady.sadvakasova@mail.ru).

Victoria N. Kuznetsova (Omsk, Russia) – Dr of Sci. (Engineering), Professor, Scopus Author ID 8671569200, Professor of the Department of the Operation and Service of Transport and Technological Machines and Systems in Construction, Siberian State Automobile and Highway University (644080, Russia, Omsk, 5, Mira Ave., e-mail: dissovetsibadi@bk.ru).*

Vitaliy V. Savinkin (Petropavlovsk, Kazakhstan) – Dr of Sci. (Engineering), Scopus Author ID 57195726895, Associate Professor of the Department of the Transport and Mechanical Engineering, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev (150000, Petropavlovsk, 86, Pushkin St., e-mail: cavinkin7@mail.ru).

Dmitriy A. Koptyaev (Petropavlovsk, Kazakhstan) – Senior Lecturer of the Department of the Transport and Mechanical Engineering, North Kazakhstan State University named after M. Kozybaev (150000, Petropavlovsk, 86, Pushkin St., e-mail: koptyev29@mail.ru).