
МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН (05.02.02)

УДК 621.83.062.1

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-150-160

Сравнение структур контуров энергетики гидроприводов с частотным, насосным управлением и электромеханическими аналогами

Ю.Ю. Зуев, Е.Ю. Зуева

Представлены схемотехнические исполнения и внешний вид объёмных гидроприводов с частотным управлением (ОГП-ЧУ), а также их функциональных аналогов — объёмных гидроприводов с насосным управлением (ОГП-НУ) и электромеханических приводов с механическими редукторами (ЭлМП-МР). Приведено сравнение обликов ОГП-ЧУ, построенных на различной (имеющейся и перспективной) машинно-аппаратной базе. Установлено, что наибольшая эффективность применения ОГП-ЧУ ожидается в силовых системах объектов, отвечающих современной концепции построения полностью электрифицированного объекта (ПЭО).

Показано, что оценка эффективности приводов в силовых системах конкретного ПЭО определяется совокупностью частных показателей конкурентоспособности (ПК) при равных или близких значениях показателей работоспособности (ПР), характеризующих функциональное назначение модулей. Продемонстрирована возможность численной оценки конкурентоспособности различных видов приводов по технико-экономическим и эксплуатационным ПК.

Выполнен анализ физико-технических возможностей структур приводов с учётом перспективы развития их машинно-аппаратной базы, а также сформированы области предпочтительного применения приводов. Для ОГП-ЧУ — это силовые системы ПЭО с ограниченным диапазоном бесступенчатого регулирования скоростей выходных звеньев, испытывающие знакопеременные и ударные нагрузки, с длительными перемещениями выходных звеньев под действием сопутствующих (отрицательных) нагрузок. Доказано, что структура ОГП-ЧУ позволяет эффективно реализовать накопление и рекуперацию энергии как в самом приводе, так и осуществить передачу практически неограниченного количества рекуперативной энергии во внешнюю силовую электросеть ПЭО.

Ключевые слова: объёмный гидропривод, частотное и насосное управления, электромеханический привод, показатели конкурентоспособности, направления развития.

Для цитирования: Зуев Ю.Ю., Зуева Е.Ю. Сравнение структур контуров энергетики гидроприводов с частотным, насосным управлением и электромеханическими аналогами // Вестник МЭИ. 2019. № 5. С. 150—160. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-150-160.

Comparison of the Structures of the Energy Circuits of Hydraulic Drives with Frequency, Pump Control and Electromechanical Analogues

Yu. Yu. Zuev, E. Yu. Zueva

The circuit solutions and external appearance of frequency controlled volumetric hydraulic drives (VHD-FC) and their functional analogs, namely, pump controlled volumetric hydraulic drives (VHD-PC) and electromechanical drives with mechanical reduction gears (EMD-MRG) are presented. The appearances of VHD-FC devices implemented using different (currently available and prospective) machinery and hardware components are compared with one another. It is shown that the maximum effect from using VHD-FC devices is expected in the power systems of plants corresponding to the modern concept of constructing a fully electrical plant (FEP).

It is shown that the efficiency of drives used in the power systems of a particular FEP is determined by the totality of partial competitiveness indicators (CIs) provided that the devices have equal or close values of the performance indicators (PIs) characterizing the functional purpose of the modules. The possibility of numerically estimating the competitiveness of different kinds of drives in terms of technical, economic, and operational PIs is demonstrated.

The physical and technical capacities of drive structures are analyzed taking into account the future development of their machinery and hardware components, and the preferred drive application fields are pointed out. For VHD-FC, these are the power systems of FEPs with a limited range of smooth speed control of the outlet links operating under the conditions of sign-variable and shock loads with long-term movements of the outlet links under the effect of accompanying (negative) loads.

It has been demonstrated that the VHD-FC structure makes it possible to effectively implement energy storage and recuperation in the drive itself and to transmit an almost unlimited amount of recuperative energy to the FEP's external electric power network.

Key words: volumetric hydraulic drive, frequency control, pump control, electromechanical drive, competitiveness indicators, development lines.

For citation: Zuev Yu. Yu., Zueva E. Yu. Comparison of the Structures of the Energy Circuits of Hydraulic Drives with Frequency, Pump Control and Electromechanical Analogues. Bulletin of MPEI. 2019;5:150—160. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-5-150-160.

Введение

Объёмные гидравлические приводы (ОГП), в которых управление скоростью движения выходного звена осуществляется за счёт изменения частоты вращения вала насоса, соединённого с приводящим двигателем, рассматриваются в настоящее время как одно из перспективных направлений развития гидроприводной техники, связанное с энергосбережением и рекуперацией [1 — 5]. Функциональными аналогами приводов с частотным управлением (ОГП-ЧУ) принято считать традиционно используемые в силовых гидроприводных схемах различных технических объектов (ТО) гидравлические приводы с машинным и, прежде всего, насосным управлением (ОГП-НУ). Если к приводу не предъявляются специальные требования по энергосбережению и рекуперации, то ОГП-ЧУ более корректно сравнивать с электромеханическими приводами (ЭлмП), имеющими традиционный механический редуктор (МР), поскольку по существу ОГП-ЧУ — электромеханический привод с гидростатическим редуктором (ГсР) [6 — 8]. Применение ОГП-ЧУ (как ОГП-НУ в виде исполнительных модулей и ЭлмП) соответствует перспективной концепции построения ПЭО — так называемого полностью электрифицированного ТО, где имеется лишь одна разнесённая по объекту силовая система — электрическая [1 — 3, 9 — 12].

Рассмотрим ОГП-ЧУ, ОГП-НУ с замкнутыми потоками циркуляции жидкости, имеющими ряд значимых преимуществ по сравнению с разомкнутыми потоками [6, 7], и ЭлмП с выходными звеньями, совершающими вращательное движение. Укрупнённые структуры приводов, укомплектованных асинхронными электродвигателями (АЭД) с частотными преобразователями (ЧП), показаны на рис. 1, а — в. (жирными стрелками показаны сигналы электрического питания, тонкими без зачернения — сигналы управления).

Преимущества и недостатки ОГП-ЧУ, предпочтительные области применения данных приводов, основанные на анализе их показателей работоспособности и конкурентоспособности, специфика работы АЭД и ЧП в составе приводов различного вида детально описаны в [4, 5, 13 — 16].

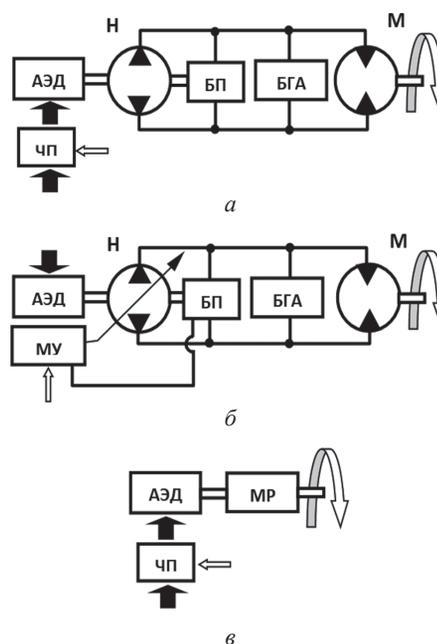


Рис. 1. Структуры объёмных гидроприводов с частотным, насосным управлением и электромеханического привода с механическим редуктором:

Н — насос; М — гидромотор; БП — блок подпитки; БГА — блок гидроаппаратуры (защита гидролиний от повышения давления, фильтрация и пр.); МУ — механизм управления подачей насоса (чаще всего электрогидравлический)

Структура любого регулируемого привода включает два контура, существенно различающихся по энергетическим уровням сигналов: управления (КУ) и энергетики (КЭ), причём именно КЭ определяет основные технико-экономические и эксплуатационные показатели привода в целом (энергетические, регулировочные, динамические, массовые, габаритные, стоимостные и пр.) [6 — 9, 13, 15].

Компоновка привода и оценка возможных исполнительных будущего изделия по совокупности данных показателей выполняется на завершающей стадии проектных работ, и тогда часто получающиеся неудовлетворительные решения приводят к необходимости возврата на предыдущие этапы, потерям времени и средств. По-

этому при проектировании привода анализ возможных и предпочтительных схмотехнических исполнений изделия и, прежде всего, КЭ, должен сопровождать, а во многих случаях даже предварять соответствующие расчётные процедуры.

Сделана попытка продемонстрировать возможный подход к решению данной группы задач.

Схмотехнические и компоновочные исполнения объёмных гидравлических приводов с частотным и насосным управлением и электро-механическим приводом

На рисунке 2 изображён внешний вид возможной «разнесённой» компоновки ОГП-ЧУ с высокомоментным гидромотором (передаточное отношение ГсР определяется соотношением объёмных постоянных H и M) и АЭД без дополнительного охлаждения электродвигателя (привод работоспособен в малом диапазоне регулируемых скоростей или при наличии внешнего эффективного охлаждения АЭД). Данная компоновка позволяет разместить активные части привода в уже имеющихся конструкционных нишах ТО. Применение герметичного закрытого гидробака-сильфона исключает дополнительный подпиточный насос и необходимость специального пополнения КЭ жидкостью по мере эксплуатации.

Практика эксплуатации приводов показывает, что их характерными режимами движения являются перемещения выходных звеньев с регулируемыми малыми и даже сверхмалыми (так называемыми «ползучими») скоростями при действии значительной нагрузки на звенья. В этих режимах традиционная система воздушного охлаждения АЭД становится мало- или вовсе неэффективной, что приводит к быстрому перегреву системы. Известное решение — улучшение охлаждения АЭД с помощью установки дополнительной системы вентиляторного охлаждения, не связанной с валом

АЭД [17 — 22]. На рисунке 3, *а* показан подобный привод, имеющий увеличенный осевой габарит, массу и стоимость, а на рис. 3, *б* (для сравнения) — ОГП-НУ, где необходимость специального охлаждения АЭД отсутствует, поскольку ротор АЭД и насос вращаются с паспортными скоростями, т. е. эффективность обычной системы охлаждения АЭД высока.

На рисунке 4 показан внешний вид ОГП-ЧУ «моноблочной» компоновки с серийным АЭД, имеющим дополнительное охлаждение.

Дальнейшее снижение массогабаритных показателей моноблочного ОГП-ЧУ при одновременном повышении надёжности и живучести целесообразно путём создания конструкции, в едином корпусе которой размещены основные части привода — электродвигатель, герметичный гидробак-сильфон, нерегулируемый реверсивный компактный насос высокого давления, БГА, М и необходимая электронная аппаратура управления, замыкания и т.д. В качестве примера на рис. 5 дан внешний вид такого привода-моноблока.

На рисунке 6, *а* в сопоставительном масштабе схематично представлен функциональный аналог ранее рассмотренных ОГП-ЧУ и ОГП-НУ — моноблочный ЭлМП с планетарным трёхступенчатым МР и АЭД, имеющим дополнительное охлаждение, а на рис. 6, *б* — аналогичный ЭлМП с волновым МР.

Волновой редуктор позволяет на одной ступени получить значительное передаточное отношение ($i = 1:30 \dots 1:200$), заменяя тем самым многоступенчатую схему планетарного механизма, а также обладает рядом дополнительных важных преимуществ, детально рассмотренных в [23]. Очевидно, что при $i = 1$ редукция отсутствует, и КЭ превращается в трансмиссию (гидравлическую или механическую). В простейшем случае для ЭлМП возможно соединение вала АЭД как непосредственно с внешней нагрузкой, так и через механическую передачу (например, в целях удобства

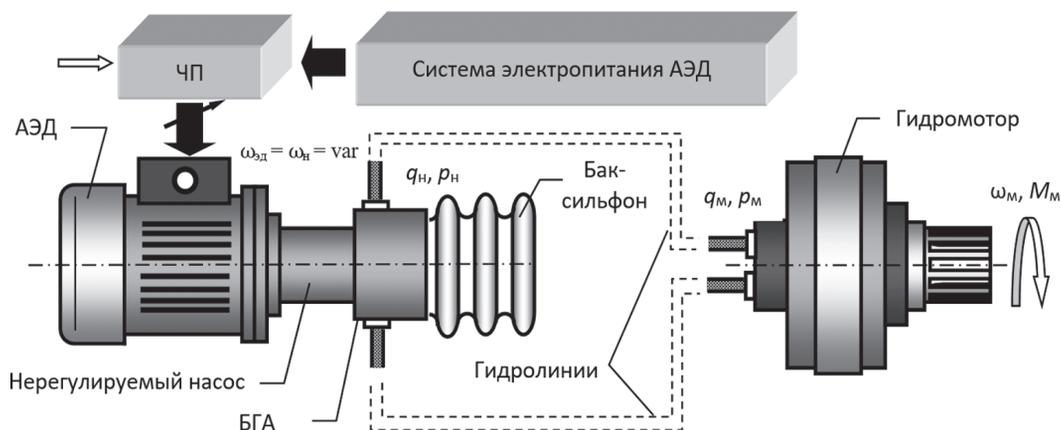


Рис. 2. Схмотехническое исполнение ОГП-ЧУ разнесённой компоновки с высокомоментным гидромотором:

$\omega_{эд}$ — угловая скорость вала АЭД, изменяемая с помощью ЧП и равная скорости вращения вала ω_n нерегулируемого насоса; q_n, p_n — подача насоса и давление в напорной гидролинии КЭ; q_m, p_m — расход жидкости, поступающий в гидромотор и давление в напорной гидролинии М; ω_m, M_m — угловая скорость и развиваемый крутящий момент вала мотора

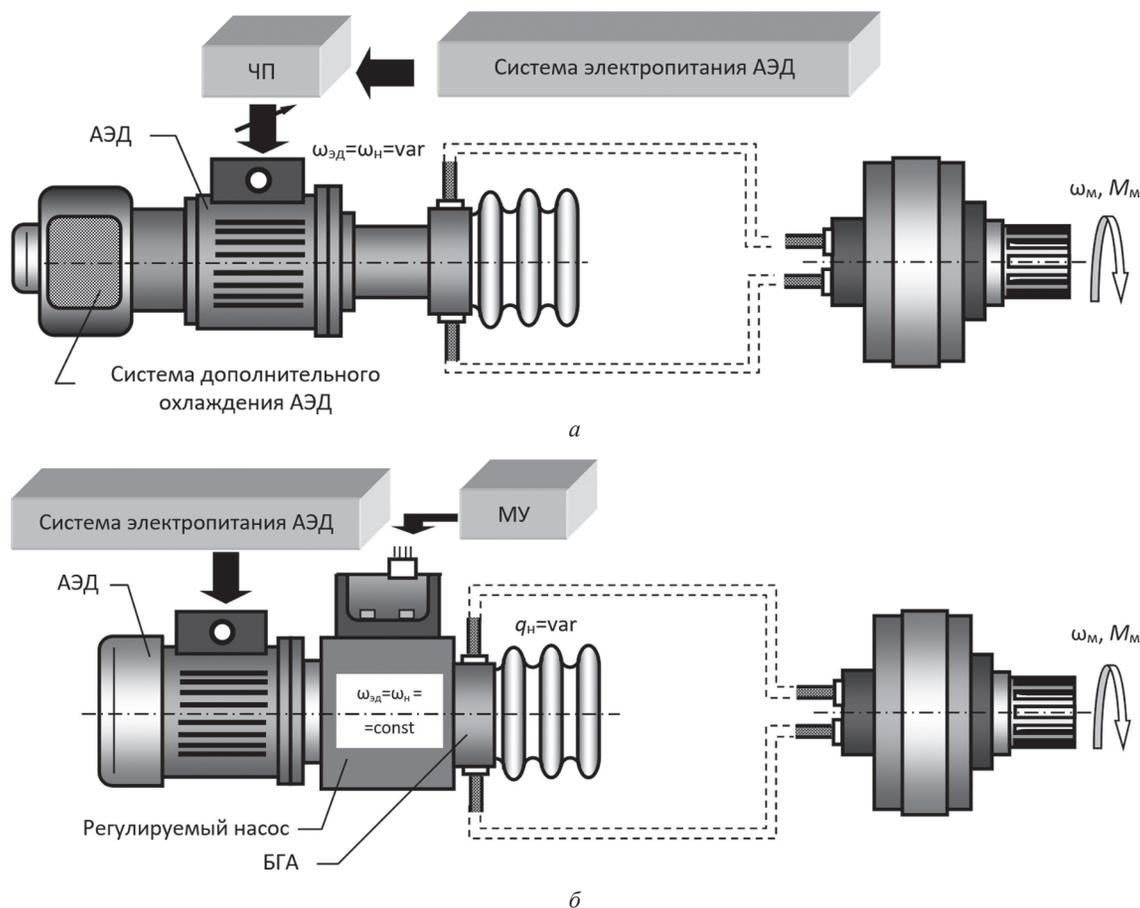


Рис. 3. Внешний вид ОГП-ЧУ с дополнительным охлаждением АЭД (а) и ОГП-НУ (б)

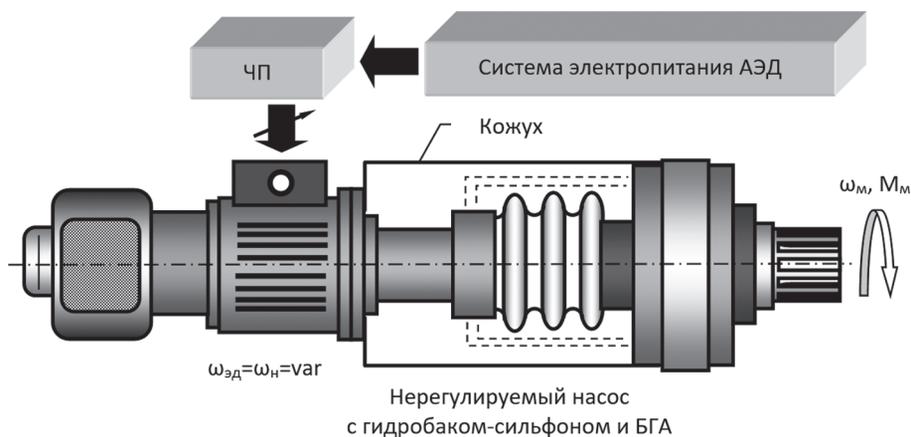


Рис. 4. Внешний вид ОГП-ЧУ моноблочного исполнения с серийным АЭД, имеющим дополнительное охлаждение

компоновки). Разнообразные схемы и варианты применения волновых передач также указаны в [23].

Сравнение ОГП с разными видами управления происходит при равных или близких показателях функционального назначения (работоспособности), которыми установлены: вращательное движение выходного звена, диапазон мощностей 5...100 кВт, номинальный/максимальный перепады давлений в контуре энергетики ОГП-ЧУ и ОГП-НУ равные 25...32 МПа, комп-

лектующие части только серийного исполнения для общепромышленного применения изделий. В качестве примера в табл. 1 — 3 сопоставлены ОГП-ЧУ, ОГП-НУ и ЭлМП по ограниченному набору частных показателей конкурентоспособности (ПК): mN , $\$N$ — удельным массе и стоимости (приходящимся на единицу развиваемой мощности); T — ресурсу, оцениваемому по ресурсу основных комплектующих; δ — диапазону бесступенчатого регулирования скорости выходного вала

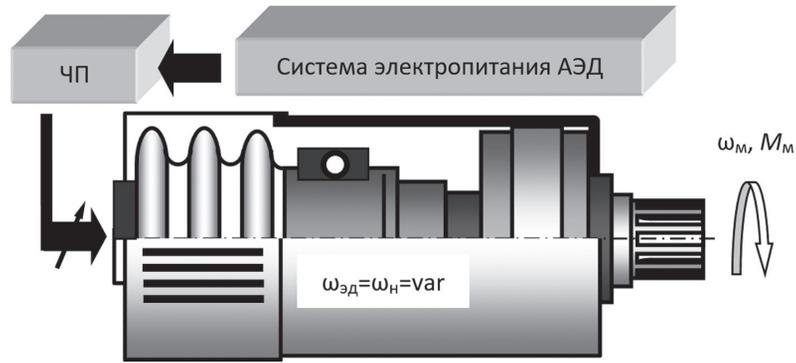


Рис. 5. Внешний вид герметичной капсулы- моноблока ОГП-ЧУ с встроенным АЭД

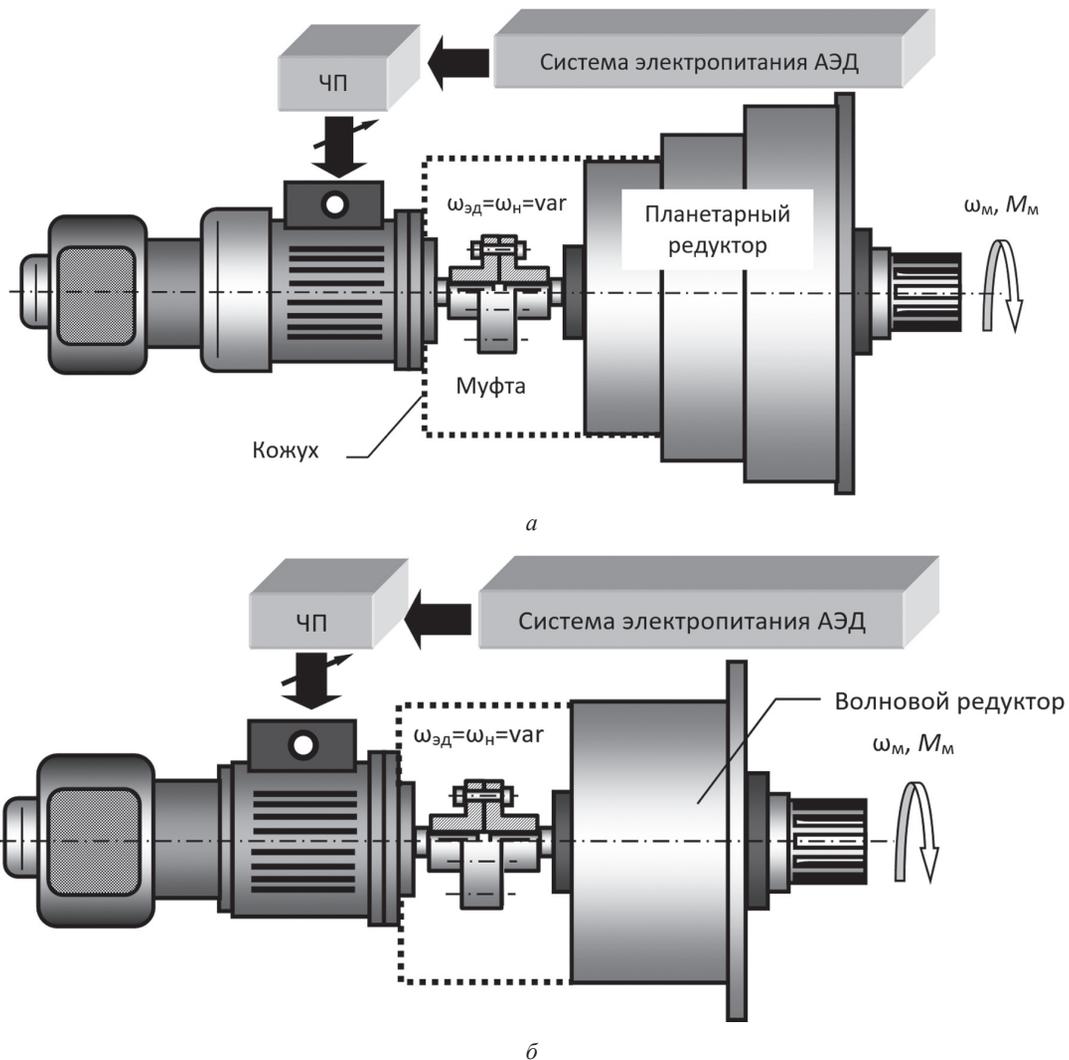


Рис. 6. Внешний вид ЭлМП с многоступенчатым планетарным (а) и волновым (б) механическими редукторами

(для АЭД и гидромашин), или расходов/давлений (для БГА); $\omega_{\text{м}}^{\text{min}}$ — минимальному достижимому значению угловой скорости вала привода.

Для получения единичного передаточного отношения в КЭ приводов, а также из соображений унификации в табл. 2 указаны ролик-лопастной и аксиальный гидромоторы с такими же объёмными постоянными, как и насосы. При необходимости редуцирования ско-

рости возможно применение высокомоментного гидромотора (например, типа МРФ).

На основании представленной информации сформирована табл. 4, где указаны физико-технические причины достигнутых свойств конкурсных аналогов (ОГП-ЧУ, ОГП-НУ и ЭлМП), а также возможные перспективные направления развития схмотехнического исполнения данных силовых исполнительных модулей.

Таблица 1

Результаты сопоставления ОГП-ЧУ

Агрегат	Исполнение, функциональная часть	Частные показатели конкурентоспособности комплектующих ОГП-ЧУ					
		mN , кг/кВт	$\$N$, у.е./кВт	T , тыс. ч	η , %	δ	ω_m^{\min} , рад/с
ЧП	FECG, Bosch Rexroth	0,65...0,75	85...128	25...30	96...98	1:0,04...1:0,02	10^{-3}
АЭД	АИР серийный	8,5...9,1	22...28	25...35	89...92	1:0,11...1:0,08	50
	АДЧР-0*	8,6...9,3	39...50	28...40	86...89	1:0,14...1:0,11	4
	АДЧР-В*	11...12	81...129	20...22			
	АДЧР-ТВ*	14...15	135...234	18...20			
АДЧР-ДВ*	14,1...14,8	100...197					
Н	Пластинчатый	1,2...1,8	20...30	8	55...80	1:0,45...1:0,20	60
	Героторный	0,30...0,35	10...15	8...10	80...85	1:0,20...1:0,15	250
	Ролико-лопастной	0,18...0,20	12...15	15...18	88...94	1:0,12...1:0,16	0,1
	Шестер.с наруж. зацепл.	0,30...0,40	4...7	8...10	78...82	1:0,22...1:0,18	50
	Шестер. с внутр.зацепл.	0,30...0,38	8...10		80...85	1:0,20...1:0,15	300
	Аксиальный, схема с наклонным блоком цилиндров (НБ)	0,65...0,95	60...80	12...15	88...92	1:0,12...1:0,08	250
	Аксиальный, схема с наклонным диском (НД)	0,35...0,55	30...45	10...12	84...90	1:0,16...1:0,10	300
Аксиальный, схема с шатунным ведением поршней (ШП)	0,65...1,20	30...65	8...12	86...91	1:0,14...1:0,09	350	
М	Аксиальный, схема НБ	0,65...0,90	60...80	12...15	88...92	1:0,12...1:0,08	250
	Аксиальный, схема НД	0,35...0,55	30...45	10...12	84...90	1:0,16...1:0,10	300
	Ролико-лопастной	0,18...0,20	12...15	15...18	88...94	1:0,12...1:0,16	0,1
	Радиально-поршневой	2,0.....2,2	45...70	10...12	88...92	1:0,12...1:0,08	0,5
БГА	Гидроаппаратура, гидролинии**	0,85...1,16	55...95	8...10	90...95	1:0,01	—
ОГП-ЧУ	Контур энергетики	10,36...20,06	178...617	8...18	0,37...0,75	1:0,628...1:0,243	0,1...300

Примечание: * — данные предприятия [22]; ** — оценка эквивалентных потерь в силовых гидролиниях и БГА выполнена на основании обработанных каталогов гидроаппаратуры и применения расчётных соотношений [7]

Таблица 2

Результаты сопоставления ОГП-НУ

Агрегат	Исполнение, функциональная часть	Частные показатели конкурентоспособности комплектующих ОГП-НУ					
		mN , кг/кВт	$\$N$, у.е./кВт	T , тыс. ч	η , %	δ	ω_m^{\min} , рад/с
Н	Аксиальный, НБ*	0,98...2,15	105...125	8...10	86...90	1:0,14...1:0,10	250
	Аксиальный, НД*	0,65...0,90	72...95		82...88	1:0,18...1:0,12	300
	Аксиальный, ШП*	0,95...1,65	75...100		84...89	1:0,16...1:0,11	350
М	Аксиальный, НБ	0,65...0,90	60...80	12...15	88...92	1:0,12...1:0,08	250
	Аксиальный, НД	0,35...0,55	30...45	10...12	84...90	1:0,16...1:0,10	300
	Ролико-лопастной**	0,18...0,20	12...15	15...18	88...94	1:0,12...1:0,16	0,1
	Радиально-поршневой	2,0.....2,2	45...70	10...12	88...92	1:0,12...1:0,08	0,5
ГА (комплект)	СП, БКП, гидролинии	0,85...1,16	55...95	8...10	90...95***	1:0,01*	—
ОГП-НУ	Контур энергетики	10,18...14,61	161...328	8...10	0,552...0,739	1:0,448...1:0,261	0,1...300

Примечание: * — с электрогидравлическим МУ; ** — согласно [21, 24]; *** — оценка эквивалентных потерь в силовых гидролиниях и БГА выполнена на основании обработанных каталогов гидроаппаратуры и применения расчётных соотношений [7]

Таблица 3

Результаты сопоставления ЭлМП

Агрегат	Исполнение, функциональная часть	Частные показатели конкурентоспособности комплектующих ЭлМП					
		mN , кг/кВт	$\$/N$, у.е./кВт	T , тыс. ч	η , %	δ	$\omega_{\text{м}}^{\text{мин}}$, рад/с
ЧП	FECG, Bosch Rexroth	0,65...0,75	85...128	25...30	96...98	1:0,04...1:0,02	10–3
АЭД	АИР серийный	8,5...9,1	22...28	25...35	86...89	1:0,11...1:0,08	50
	АДЧР-0*	8,6...9,3	39...50	28...40			
	АДЧР-В*	11...12	81...129	20...22			4
	АДЧР-ТВ*	14...15	135...234	18...20			
	АДЧР-ДВ*	14,1...14,8	100...197				
МР	Планетарный**	20...28	125...160	25...40	89...91	1:0,11...1:0,09	0
	Волновой**	15...20	250...450	18...25	85...95	1:0,15...1:0,05	0
ЭлМП	Контур энергетики	24,20...43,75	232...812	18...40	0,702...0,857	1:0,298...1:0,143	4...50

Примечание: * — данные предприятий [21, 22]; ** — данные предприятий [24, 25]

Таблица 4

Физико-технические причины достигнутых свойств ОГП-ЧУ, ОГП-НУ и ЭлМП и возможные перспективные направления развития их схмотехнического исполнения

Свойство привода, характеристика	ОГП-ЧУ	ОГП-НУ	ЭлМП
Количество разнородных потоков энергии	Наличие электрической, гидравлической и механической энергий		Наличие электрической и механической энергий
Основное назначение КЭ	Нерегулируемый ГсР	Регулируемый ГсР	МР
Диапазон бесступенчатого регулирования скорости	1:0,628...1:0,243	1:0,448...1:0,261	1:0,298...1:0,143
Возможность получения требуемого передаточного числа редуктора КЭ	За счёт установки в КЭ с единым насосом разных гидродвигателей с требуемыми объёмными постоянными (достижимы диапазоны от 1:1 до 1:200)	Возможность обеспечения требуемого передаточного числа за счёт установки в КЭ насосов и гидродвигателей с требуемыми объёмными постоянными (достижимы диапазоны от 1:1 до 1:200) и дополнительной настройки рабочего объёма насоса (для современных насосов в диапазоне от 1:1 до 1:10)	За счёт установки планетарного многоступенчатого МР или одноступенчатого волнового МР (фиксированные диапазоны от 1:3 до 1:380). Возможность получения передаточного числа 1:1
Проблемы герметизации	Имеются при использовании традиционных уплотнительных узлов, отсутствуют в случае применения современных узлов абсолютной герметизации — передачи силового потока магнитным полем или деформацией гибкой разделительной герметичной оболочки полостей		Отсутствуют из-за отсутствия жидкости под избыточным давлением в контуре привода
Достижение полной (абсолютной) внешней герметичности привода	Имеются при использовании традиционных уплотнительных узлов, отсутствуют в случае применения современных узлов абсолютной герметизации — передачи силового потока магнитным полем или деформацией гибкой разделительной герметичной оболочки полостей		Для планетарных МР не достигается без специальных систем герметизации, а для волновых МР возможно
Необходимость регламентных работ по обслуживанию	Незначительные по трудозатратам работы по контролю мест возможного выхода жидкости с заменой жидкости по мере исчерпания заводского ресурса (5...10 тыс. ч)		Контроль люфтов, при необходимости — смазка в установленных точках
Наличие люфтов (в состоянии заводской поставки модуля)	Маловероятно, практически не ощущается при эксплуатации привода		Возможно для ЭлМП даже в состоянии поставки изделия
Развитие люфтов по мере эксплуатации привода	Маловероятно, практически не ощущается при эксплуатации привода		Вероятно по мере эксплуатации привода, требуется регулировка
Чувствительность к знакопеременным и, тем более, ударным нагрузкам	Незначительная, определяется, в основном, качеством исполнения узла соединения выходного звена привода с регулирующим органом ТО		Ощутимая даже при использовании деформируемых элементов и волновых МР

Продолжение табл. 4 на с. 157

Окончание табл. 4

Свойство привода, характеристика	ОГП-ЧУ	ОГП-НУ	ЭлМП
Связь массогабаритных показателей с тяговыми характеристиками	Проявляется в меньшей степени, так как передача усилий (моментов) осуществляется воздействием высоких давлений на развитые поверхности деталей гидромашин, а тяговые свойства гидродвигателя пропорциональны кубу его характерного размера		Весьма существенная, обусловленная передачей усилий через твёрдые контактные поверхности малой площади и необходимостью применения многоступенчатых МР
Связь надёжности и ресурса (износа конструкции) с тяговыми характеристиками	Практически не ощущается, поскольку передача усилий (моментов) осуществляется посредством рабочей жидкости под давлением, действующим на развитые поверхности гидромашин		Существенная, обусловленная высокими удельными напряжениями в местах контакта между взаимно перемещающимися твёрдыми поверхностями деталей
Возможность создания «разнородной» по ТО конструкции	Допустимо как моноблочное, так и распределённое по ТО конструктивное исполнение за счёт отделения гидродвигателя и соединения его с насосной частью гидролиниями требуемой длины и геометрии		Практически исключена, применение тросовых проводок, валопроводов, тяг и пр. повышает сложность и ухудшает технико-эксплуатационные свойства привода
Конструкционная адаптивность к специфике конструкции ТО и размерам ниш, выделенных для размещения частей привода	КЭ имеет меньшие массогабаритные показатели, чем у ОГП-НУ благодаря компактному нерегулируемому насосу. Возможно отделение гидродвигательной части от насосной, размещение гидродвигательной части непосредственно в конструкционной нише ТО	Несколько большие, чем у ОГП-ЧУ массогабаритные показатели из-за более громоздкого регулируемого насоса. Возможно отделение гидродвигательной части от насосной, размещение гидродвигательной части непосредственно в конструкционной нише ТО	Наихудшая при сравнении ЭлМП с ОГП-ЧУ и ОГП-НУ.
Удельная масса на единицу мощности для характерного диапазона мощностей от 10...150 кВт	10,36...20,06 кг/кВт	10,18...14,61 кг/кВт	24,20...43,75 кг/кВт
Удельная стоимость закупки для диапазона 10...150 кВт	178...617 у.е/кВт	161...328 у.е/кВт	232...812 у.е/кВт
Диапазон бесступенчатого регулирования скорости	1:0,628...1:0,243*	1:0,448...1:0,261*	1:0,298...1:0,0143**
Сложность и стоимость обслуживания	Незначительная, сводится к периодическому осмотру мест возможной негерметичности и замене рабочей жидкости при исчерпании заводского ресурса		Повышенная, особенно при знакопеременных и ударных нагрузках
Пожаровзрывоопасность	Существует		Практически отсутствует
Эффективный КПД	0,372...0,757	0,552...0,739	0,702...0,857
Ресурс	8...18 тыс.ч	8...10 тыс.ч	18...40 тыс.ч
Ремонтпригодность	Замена агрегатов		Замена агрегатов, регламентные работы по устранению люфтов и смазке МР
Образование унифицированных типоразмерных рядов	Возможно за счёт установки различных регулируемых ЭД, широкого выбора насосов и гидродвигателей	Ограничено более узким типоразмерным рядом регулируемых насосов и гидродвигателей	Затруднительно
Возможность дополнительного регулирования при неизменной выходной мощности привода	Допускается при установке регулируемого гидромотора (частотно-моторное управление)	Допускается при установке регулируемого гидромотора (насосно-моторное управление)	Практически отсутствует (установка механического вариатора между АЭД и МР приводит к неоправданному ухудшению почти всех остальных ПК привода)

Примечание: * — нижнее пороговое значение определяется, в основном, объёмными потерями, зависящими от вида гидромашин, степени износа и нагрузки; ** — нижнее пороговое значение зависит от системы охлаждения приводящего АЭД, два значения указаны для серийного АЭД и электродвигателя с дополнительной системой воздушного охлаждения [20 — 22]

Выводы

Выполнение расчётных процедур по созданию ОГП-ЧУ должно сопровождаться, а во многих случаях предваряться схемными и компоновочными проработками обличков будущих изделий.

Применение ОГП-ЧУ как исполнительного модуля возможно в тех областях и для тех ТО, где используются ОГП-НУ, а также ЭлМП с МР.

Возможность и допустимость замены традиционных приводов ТО на ОГП-ЧУ или ЭлМП не означает предпочтительность такой замены. В каждом конкретном случае необходим детальный сопоставительный анализ преимуществ и недостатков альтернативных решений, касающийся их структурных исполнений и параметрии.

Сравнение ОГП-ЧУ с традиционными видами приводов должно выполняться при условии их равной и/или близкой функциональности, определяемой одинаковыми наборами ПР, на основании перечней ПК, т.е. в многокритериальной постановке оптимизационной задачи.

ОГП-ЧУ и ОГП-НУ (как исполнительные модули) с минимально возможным набором комплектующих частей, обеспечивающих требуемую функциональность, обладают существенно лучшими массовыми и стоимостными показателями по сравнению с ЭлМП при практически одинаковых эффективных КПД, заводском ресурсе и диапазоне регулирования скорости выходного звена. При этом ОГП-ЧУ несколько уступает ОГП-НУ по совокупности основных частных ПК.

Областями предпочтительного использования ОГП-ЧУ следует считать силовые системы ПЭО, к ко-

торым не предъявляются повышенные требования по широте диапазона регулирования скорости, с режимами движения, где наблюдаются длительные неподвижные положения выходного звена, а также движения с помогающими нагрузками под действием силы тяжести или возникающие в результате длительного торможения инерционных масс (грузоподъёмные и лифтовые механизмы, транспортные системы, системы с перемещением значительных инерционных объектов).

Для получения конкурентного преимущества ОГП-ЧУ, особенно при наличии режимов движения выходного звена с сопутствующими (помогающими) нагрузками следует реализовать дополнительные функции, в том числе: стопорения и/или совершения выходным звеном привода регламентированных движений с последующим переводом в требуемое состояние при отказах основного энергопитания и/или управления, под внешней нагрузкой; сокращения времени разгона выходного звена за счёт накопленной энергии в контуре энергетики; энергонакопления-рекуперации энергии как с помощью аккумулирующих блоков в КЭ, так и в результате возможности передачи неограниченного количества энергии в силовую электросеть ТО.

Наиболее перспективными направлениями разработки ОГП-ЧУ с расширенным диапазоном регулирования скорости выходного звена следует считать применение в КЭ роliko-лопастных гидромашин, а для снижения массогабаритных показателей — разработку специальных модулей, включающих энергоёмкий компактный электродвигатель, интегрированный насос, БГА и гидродвигатель.

Литература

1. Редько П.Г. и др. Концепция развития систем рулевых приводов перспективных самолётов // Новые рубежи авиационной науки: Сборник тезисов IX Международ. науч.-техн. симпозиума. М., 2007. С. 90.
2. Pat. 4.823.552.25.04 USA. Failsafe Electrohydraulic Control System for Veriable Displacement Pump / O. Larry, J.S. Ezell.
3. Leonard J.B. A Systemlook at Electromechanical Actuation for Primary Flight Control // Proc. IEEE Nat. Aerospace and Electron Conf. 1983. Dayton 1983. Pp.80—86.
4. Ruhlicke I. Elektro-hydraulische Antriebssysteme mit Drehzahlveranderbarer Pumpe // Olhydraulik und Pneumatik. 1977 (41). No. 9. Pp. 689—693; No. 10. Pp. 752—759.
5. Зуев Ю.Ю., Зуева Е.Ю., Голубев В.И. Объёмный гидропривод с частотным и частотно-дрессельным управлением — возможные исполнения, области применения, сравнительные характеристики и конкурентные аналоги // Индустрия. 2014. № 6 (88). С. 41—45.
6. Петров В.А. Гидрообъёмные трансмиссии самолётных машин. М.: Машиностроение, 1988.

References

1. Red'ko P.G. i dr. Kontseptsiya Razvitiya Sistem Rulevykh Privodov Perspektivnykh Samoletov. Novye Rubezhi Aviatsionnoy Nauki: Sbornik Tezisev IX Mezhdunar. Nauch.-tekhn. Simpoziuma. M., 2007:90. (in Russian).
2. Pat. 4.823.552.25.04 USA. Failsafe Electrohydraulic Control System for Veriable Displacement Pump. O. Larry, J.S. Ezell.
3. Leonard J.B. A Systemlook at Electromechanical Actuation for Primary Flight Control. Proc. IEEE Nat. Aerospace and Electron Conf. 1983. Dayton 1983:80—86.
4. Ruhlicke I. Elektro-hydraulische Antriebssysteme mit Drehzahlveranderbarer Pumpe. Olhydraulik und Pneumatik. 1977 (41);9:689—693; 10:752—759.
5. Zuev Yu.Yu., Zueva E.Yu., Golubev V.I. Obemnyy Gidroprivod s Chastotnym i Chastotno-Drossel'nyim Upravleniem — Vozmozhnye Ispolneniya, Oblasti Primeneniya, Sravnitel'nye Kharakteristiki i Konkurentnye analogi. Industriya. 2014;6 (88):41—45. (in Russian).
6. Petrov V.A. Gidroobemnyye Transmissii Samokhodnykh Mashin. M.: Mashinostroenie, 1988. (in Russian).

7. **Кондаков Л.А. и др.** Машиностроительный гидропривод. М.: Машиностроение, 1978.
8. **Крымов Б.Г., Рабинович Л.В., Стеблецов В.Г.** Исполнительные устройства систем управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1987.
9. **Проблемы** электрификации самолёта. Отделение полёта и систем управления ЛА (НИО-15. Информационные материалы ЦАГИ, 2007.
10. **The «More Electric» Architecture Revolution.** MILTECH-10/2005.
11. **Cecere G.J., Mehdi I.S., Yurczyk R.F.** Feasibility Study of an All electric Fighter Airplane // Proc. IEEE Nat. Aerospace and Electron Conf. Dayton, 1983. Pp. 62—71.
12. **Lyle H.** Concept Eliminates Central Hydraulic System // Design News. 1988. V. 44. No. 4. Pp. 45—65.
13. **Зуев Ю.Ю., Петров Ю.А., Черкасских С.Н.** Особенности энергетического расчёта автономных электрогидравлических приводов различной структуры // Сб. науч. тр. ЦНИИАГ. М., 1990.
14. **Kazmaier B.** Energieverbrauchsoptimierte Regelung Eines Elektrohydraulischen Linearantriebs Kleiner Leistung mit drehzahlgeregeltem Elektromotor und Verstellpumpe // Olhydraul. und Pneum. 1999. V. 43. No. 10. P. 702.
15. **Беляев О.А., Зуев Ю.Ю.** Моделирование регулировочных характеристик объёмного гидропривода с насосным и частотным управлением // Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика: Сб. материалов науч.-техн. конф. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. С. 196—204.
16. **Алексеев А.С., Найдёнов Н.В., Селиванов А.М.** Развитие авиационных автономных электрогидравлических приводов // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 1. С. 43—48.
17. **Богданов Д.М.** Применение преобразователей частоты для управления электроприводами. Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2008.
18. **Kogel O.** Unterstützung für die Frmaturen-Auslegung bei Verwendung Drehzahlveränderlicher Stellantriebe. (SiPOS Aktorik GmbH) // Industriearmaturen. 2007. V. 15. No. 4. Pp. 368—372.
19. **Автоматизированный** электропривод / под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. М.: Энергоатомиздат, 1990.
20. **Справочник** по электрическим машинам / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1989.
21. **Русэлпром-Мехатроника** [Официальный сайт] www.Mechatronics.ruselprom.ru (дата обращения 12.12.2017).
22. **Электропривод** [Официальный сайт] www.Electroprivod.ru (дата обращения 20.01.2018).
23. **Герашченко А.Н., Самсонович С.Л.** Пневматические, гидравлические и электрические приводы летательных аппаратов на основе волновых исполнительных механизмов. М.: Машиностроение, 2006.
7. **Kondakov L.A. i dr.** Mashinostroitel'nyy Gidroprivod. M.: Mashinostroenie, 1978. (in Russian).
8. **Krymov B.G., Rabinovich L.V., Stebletsov V.G.** Ispolnitel'nye Ustroystva Sistem Upravleniya Letatel'nyimi Apparatami. M.: Mashinostroenie, 1987. (in Russian).
9. **Problemy** Elektrifikatsii Samoleta. Otdelenie Poleta i Sistem Upravleniya LA (NIO-15. Informatsionnye Materialy TSAGI, 2007. (in Russian).
10. **The «More Electric» Architecture Revolution.** MILTECH-10/2005.
11. **Cecere G.J., Mehdi I.S., Yurczyk R.F.** Feasibility Study of an All electric Fighter Airplane. Proc. IEEE Nat. Aerospace and Electron Conf. Dayton, 1983:62—71.
12. **Lyle H.** Concept Eliminates Central Hydraulic System. Design News. 1988;44;4:45—65.
13. **Zuev Yu.Yu., Petrov Yu.A., Cherkasskikh S.N.** Osobennosti Energeticheskogo Rascheta Avtonomnykh Elektrogidravlicheskikh Privodov Razlichnoy Struktury. Sb. Nauch. Tr. TSNIAG. M., 1990. (in Russian).
14. **Kazmaier B.** Energieverbrauchsoptimierte Regelung Eines Elektrohydraulischen Linearantriebs Kleiner Leistung mit drehzahlgeregeltem Elektromotor und Verstellpumpe. Olhydraul. und Pneum. 1999;43;10:702.
15. **Belyaev O.A., Zuev Yu.Yu.** Modelirovanie Regulirovochnykh Kharakteristik Obemnogo Gidroprivoda s Nasosnym i Chastotnym Upravleniem. Gidromashiny, Gidroprivody i Gidropnevmoavtomatika: Sb. Materialov Nauch.-tekhn. Konf. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2011:196—204. (in Russian).
16. **Alekseenkov A.S., Naydenov N.V., Selivanov A.M.** Razvitie Aviatsionnykh Avtonomnykh Elektrogidravlicheskikh Privodov. Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta. 2012;19;1:43—48. (in Russian).
17. **Bogdanov D.M.** Primenenie Preobrazovateley Chastoty dlya Upravleniya Elektroprivodami. Tomsk: Izd-vo Tomsk. Politekhn. Un-ta, 2008. (in Russian).
18. **Kogel O.** Unterstützung für die Frmaturen-Auslegung bei Verwendung Drehzahlveränderlicher Stellantriebe. (SiPOS Aktorik GmbH). Industriearmaturen. 2007;15;4:368—372.
19. **Avtomatizirovannyy** Elektroprivod. Pod Obshch. Red. N.F. Il'inskogo, M.G. Yun'kova. M.: Energoatomizdat, 1990. (in Russian).
20. **Spravochnik** po Elektricheskim Mashinam. Pod Obshch. Red. I.P. Kopylova, B.K. Klokova. M.: Energoatomizdat, 1989. (in Russian).
21. **Ruselprom-Mekhatronika** [Ofits. Sayt] www.Mechatronics.ruselprom.ru (Data Obrashcheniya 12.12.2017). (in Russian).
22. **Elektroprivod** [Ofits. Sayt] www.Electroprivod.ru (Data Obrashcheniya 20.01.2018). (in Russian).
23. **Gerashchenko A.N., Samsonovich S.L.** Pnevmaticheskie, Gidravlicheskie i Elektricheskie Privody Letatel'nykh Apparatov na Osnove Volnovykh Ispolnitel'nykh Mekhanizmov. M.: Mashinostroenie, 2006. (in Russian).

24. **Harmonic Drive AG** [Официальный сайт] www.Harmonicdrive.de (дата обращения 19.12.2017).

25. **Нордикс-Метрология** [Официальный сайт] www.Nordix-metrologia.narod.ru (дата обращения 09.12.2017).

24. **Harmonic Drive AG** [Официальный сайт] www.Harmonicdrive.de (Дата обращения 19.12.2017).

25. **Notdics-Metrologiya** [Официальный сайт] www.Nordix-metrologia.narod.ru (Дата обращения 09.12.2017). (in Russian).

Сведения об авторах:

Зуев Юрий Юрьевич — кандидат технических наук, доцент кафедры гидромеханики и гидравлических машин НИУ «МЭИ», e-mail: zuevyu@gmail.com

Зуева Елизавета Юрьевна — кандидат технических наук, доцент кафедры гидромеханики и гидравлических машин НИУ «МЭИ», e-mail: gelia-05@mail.ru

Information about author:

Zuev Yuriy Yu. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Hydromechanics and Hydraulic Machines Dept., NRU MPEI, e-mail: zuevyu@gmail.com

Zueva Elizaveta Yu. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Hydromechanics and Hydraulic Machines Dept., NRU MPEI, e-mail: gelia-05@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 09.11.2018

The article received to the editor: 09.11.2018