

УДК: 621.313; 621.314

А.Г. Гарганеев, Д.К. Кюи, Е.И. Кашин

Электропривод задвижки трубопроводной арматуры с гистерезисной муфтой

Представлены результаты анализа электромагнитных гистерезисных муфт, предназначенных для работы в электроприводах трубопроводной арматуры нефтегазовых автоматизированных комплексов. Показано, что гистерезисная муфта на основе материала Fe-Cr-Co может являться альтернативой техническим решениям интеллектуальных электроприводов на основе асинхронных электродвигателей. Получены результаты электромагнитного анализа четырех типов гистерезисных муфт для применения в электроприводах запорной арматуры мощностью до 7,5 кВт.

Ключевые слова: электромагнитная муфта, электропривод, момент, мощность, гистерезис.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-127-131

В автоматизированных системах управления перекачки нефти и газа широко применяются электроприводы (ЭП) запорной арматуры (ЭПЗА) [1,2]. ЭПЗА выполняет функции перекрытия сечения трубопровода с фиксированным ограничением момента приводного двигателя (ПД) в специфических условиях – широкого температурного диапазона и удаления от диспетчерских пунктов и центральных электросетей. Решающее значение в обеспечении работоспособности ЭПЗА приобретает надежность его конструктивных и схемотехнических решений.

Вопросы применения того или иного типа ПД и управляющего полупроводникового преобразователя (ПП) подробно рассмотрены в работах [3–6], в которых впервые предложено в ЭПЗА применение электрической машины гистерезисного типа, являющейся по сути электромагнитной муфтой. Еще одним альтернативным вариантом является ЭП на основе широко применяемого асинхронного двигателя (АД) и гистерезисной муфты (ГМ) с блоком электронного управления (БЭУ).

Синхронно-гистерезисный электромеханический преобразователь энергии в ЭПЗА

Синхронно-гистерезисный двигатель (СГД) представляет собой двигатель, вращающий момент которого создается за счет взаимодействия вращающегося поля статора с магнитным полем ротора, возникающим в результате его намагничивания полем статора при включении двигателя в сеть [7, 8]. По сути, ГМ и СГД имеют одну природу образования и передачи электромагнитного момента. Из достоинств СГД как и ГМ, представленных в работах [3, 4], для использования в ЭПЗА выделим следующие:

1) ввиду особенностей гистерезисного преобразования энергии СГД и ГМ разгоняются (или работают в заторможенном режиме) с постоянством момента, фактически представляя собой естественную ограничительную моментную муфту. Это снимает необходимость в сложном алгоритме контроля момента с векторной системой управления ЭП, как это происходит в ЭП с АД;

2) отсутствие неконтролируемого переходного процесса («бросков») по току и моменту при прямом включении на питающее напряжение;

3) применение режима импульсного подмагничивания позволяет повышать перегрузочную способность гистерезисного электромеханического преобразователя, например при необходимости вытяжки клиновой задвижки из положения уплотнения.

Энергетический анализ конструктивных схем ГМ

Теория и методика расчета ГМ на основе магнитных материалов типа викаллоя (Fe-Co-V) появились в конце 60-х годов, но возможность их широкого применения ограничивалась высокой стоимостью гистерезисного материала из-за содержания ванадия [9]. Появившиеся в конце 20-го столетия деформируемые сплавы на основе материала Fe-Cr-Co с максимальным энергетическим произведением $(BH)_{\max} > 40 \text{ кДж/м}^3$ открывают новые перспективы их применения не только в спецтехнике, но и во многих отраслях промышленности. Магнитотвердые сплавы системы Fe-Cr-Co по сравнению с викаллоем содержат в 3–5 раз меньше кобальта и примерно в 2,5–3 раза дешевле его. При уровне полей до 60 кА/м указанные сплавы имеют высокие гистерезисные свойства и могут заменить все существующие гистерезисные материалы. Например, результаты применения сплава 25X15KA в девяти типоразмерах СГД показали, что электромеханические характеристики двигателей улучшаются на 10–30% относительно викаллоя, при этом трудозатраты при механической обработке и сборке роторов, а также брак по термообработке уменьшаются в 3 раза. Без ухудшения качества СГД себестоимость его изготовления снижается на 20–25% [10, 11]. Также следует отметить высокую прочность Fe-Cr-Co, превышающую аналогичный показатель для титана. При высокой коррозионностойкости этот материал не снижает магнитных свойств до температур $t = 350 \div 400 \text{ }^\circ\text{C}$. Изложенные факты в равной степени относятся и к ГМ.

ГМ может быть магнитного или электромагнитного типа. По сравнению с магнитными ГМ электромагнитные гистерезисные муфты (ЭМГМ) более сложны в конструкции и эксплуатации, требуют источника электроэнергии для питания обмотки, однако обладают возможностью электрического управления моментом, что необходимо в ЭПЗА.

Для возможного применения в ЭПЗА были проанализированы четыре типа ЭМГМ, конструкции которых представлены на рис. 1.

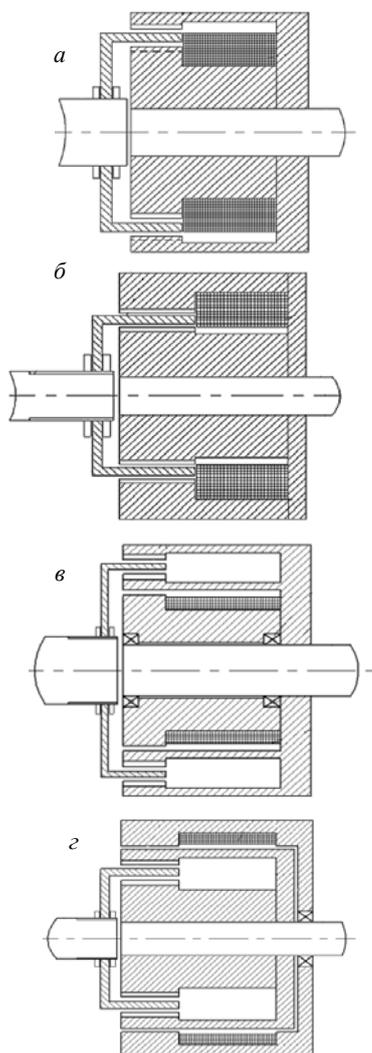


Рис. 1. Конструкции электромагнитных ГМ: с подвижной внутренней обмоткой – а; с подвижной наружной обмоткой – б; с неподвижной внутренней обмоткой – в; с неподвижной наружной обмоткой – г

В представленных конструкциях ведомая полумуфта неподвижна до тех пор, пока угол поворота внешнего поля не достигает предельного значения так называемого гистерезисного угла γ , характерного для каждого гистерезисного материала. Далее движение ведомой полумуфты происходит в синхронизме с моментом, определяемым нагрузкой ЭП,

и ограничивается постоянным значением момента при переходе ЭПЗА в режим уплотнения независимо от скорости АД. Функциональная схема ЭПЗА с ГМ и АД представлена на рис. 2.

Технические характеристики предлагаемых к использованию сплавов Fe-Cr-Co после проведенной авторами соответствующей термомагнитной обработки представлены в табл. 1, 2. Для определения показателей использовалась установка контроля магнитных параметров УКМП-0,05-100. Согласно результатам эксперимента, согласующимся с физикой перемагничивания гистерезисного материала [7], удельные гистерезисные потери за цикл перемагничивания, в отличие от мощности удельных объемных потерь, не зависят от частоты перемагничивания, а зависят лишь от индукции в магнитотвердом материале (см. табл. 2, рис. 3). Наибольшую эффективность показал материал 22Х15КА.

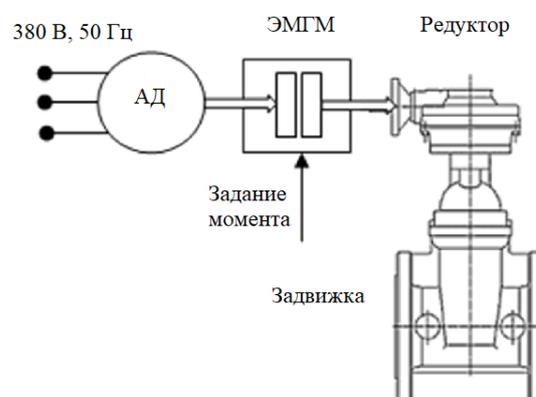


Рис. 2. Функциональная схема ЭПЗА с гистерезисной муфтой

Номинальные мощности АД, используемые в ЭПЗА, находятся в пределах от 250 до 7500 Вт в зависимости от диаметров трубопровода [2]. Идея проектирования единственной ЭМГМ, работающей на всех мощностях, нереальна. Мощность ГМ зависит от объема гистерезисного слоя и определяется выражением (1) [12]:

$$V_{\text{ГМ}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 9,55 \cdot P \cdot k_{\text{ЗМ}}}{p \cdot p_{\text{Г}} \cdot n \cdot 10^6}, \quad (1)$$

где P – передаваемая мощность, Вт; $k_{\text{ЗМ}}$ – перегрузочная способность муфты; p – число пар полюсов индуктора; n – частота вращения ведущего вала, об/мин; $p_{\text{Г}}$ – удельные потери на гистерезис.

Таблица 1

Магнитно-физические свойства сплавов Fe-Cr-Co

Показатель	25X15КА	30X23КА	28X10КА	22X15КА
Коэрцитивная сила H_C , кА/м	40	55	38	47
Ост. индукция B_r , Тл	1,2	0,75	1,1	1,5
Коэрцитивная сила в точке $W_{\text{max}} \cdot H_C$, кА/м	32	40	31	44
Ост. индукция в точке $W_{\text{max}} \cdot B_r$, Тл	0,97	0,73	0,88	1,3
Макс. магнитная энергия W_{max} , кДж/м ³	16	6	13	28
Уд. потери на гистерезис за цикл перемагничивания $p_{\text{Г}}$, Вт/см ³ Гц	0,12	–	–	0,12
Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$ кг/м ³	7,9	7,9	7,9	7,9

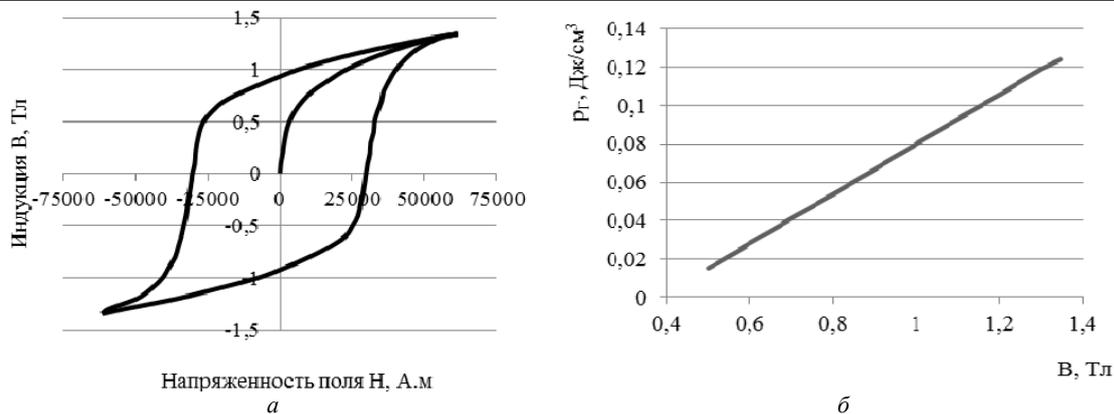


Рис. 3. Магнитные характеристики сплава 22X15KA: кривая намагничивания – а; зависимость удельных гистерезисных потерь от индукции – б

Таблица 2

Мощность удельных объемных потерь для материала 22X15KA

Частота, Гц	V = 0,5 Тл	V = 0,7 Тл	V = 1 Тл	V = 1,3 Тл	V = 1,35 Тл
	Мощность удельных объемных потерь P _v , Вт/см ³				
50	0,730	1,759	4,132	5,795	6,193
100	1,509	3,637	7,097	11,53	12,13
200	2,942	7,197	15,28	23,15	24,27
400	5,603	14,61	28,65	46,27	48,66
600	8,368	20,99	44,63	70,15	74,64
800	11,29	28,91	63,46	94,29	100,5
1000	14,21	36,28	82,17	117,7	124,4
1500	23,78	52,51	108,4	–	–
2000	26,23	–	–	–	–

Таблица 3

Длина и средний диаметр гистерезисного слоя, ток управления при воздушном зазоре 0,4 мм

Мощность АД, кВт	Мощность ГМ, кВт	ЭМГМ с подвижной и внутренней обмоткой возбуждения (ВПО)			ЭМГМ с неподвижной внутренней обмоткой возбуждения (ВНО)			ЭМГМ с подвижной наружной обмоткой возбуждения (НПО)			ЭМГМ с неподвижной наружной обмоткой возбуждения (ННО)		
		$I_{Г}, 10^{-3}, м$	$D_{Г.СР.}, 10^{-3}, м$	$I_{У}, А$	$I_{Г}, 10^{-3}, м$	$D_{Г.СР.}, 10^{-3}, м$	$I_{У}, А$	$I_{Г}, 10^{-3}, м$	$D_{Г.СР.}, 10^{-3}, м$	$I_{У}, А$	$I_{Г}, 10^{-3}, м$	$D_{Г.СР.}, 10^{-3}, м$	$I_{У}, А$
7,5	7,5	59,9	166,2	3,53	46,9	187,6	3,94	77,5	146,1	4,91	74,5	148,9	5,47
	5,5	43,9			34,6			56,7			54,7		
	4,5	32,0			25,2			41,4			39,8		
2,2	2,2	33,7	120,1	2,55	24,2	141,8	2,55	49,5	99,0	3,53	48,2	100,3	3,94
	1,5	23,0			16,5			33,8			32,7		
	1,1	16,9			12,1			24,8			24,1		
0,55	0,55	15,8	87,6	1,50	–	–	–	24,6	70,2	2,16	26,0	68,3	2,84
	0,37	10,7			–			16,6			17,5		
	0,25	7,2			–			11,2			11,9		

При постоянстве диаметра гистерезисного слоя, регулировать мощности можно путем изменения длины гистерезисного слоя как составляющей объема $V_{ГМ}$. Таким образом, можно проектировать серии муфт, работающих на нескольких номинальных мощностях. Выбранными для проектирования мощностями ГМ являются 550 Вт, 2,2 и 7,5 кВт. В ЭПЗА необходимо установить длину гистерезисного слоя $I_{Г}$ в ЭМГМ в соответствии с мощностью АД. Результаты расчета выбранных конструкций ГМ представлены в табл. 3, на основании чего была произведена оценка их удельных массогабаритных показателей (рис. 5–7). Мощность управления при задании момента ограничения для всех типов ГМ не превышает 30 Вт, что легко реализуется БЭУ на основе DC-DC-преобразователя.

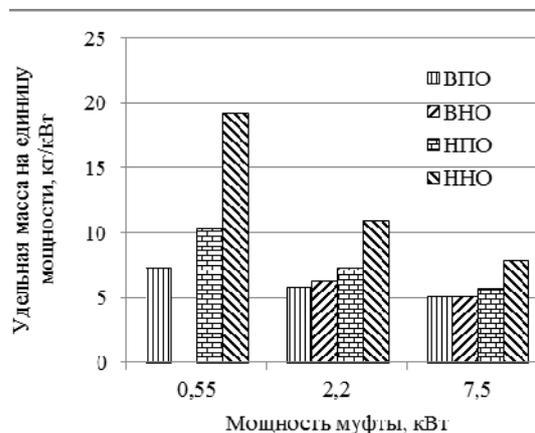


Рис. 4. Удельная масса различных конструкций ЭМГМ при воздушном зазоре 0,4 мм

Потери в подшипниках и от вихревых токов незначительны, поэтому КПД всех ЭМГМ в синхронном режиме приближается к единице. Из представленных ГМ наиболее предпочтительной для ЭПЗА можно считать муфту с неподвижной внутренней обмоткой возбуждения.

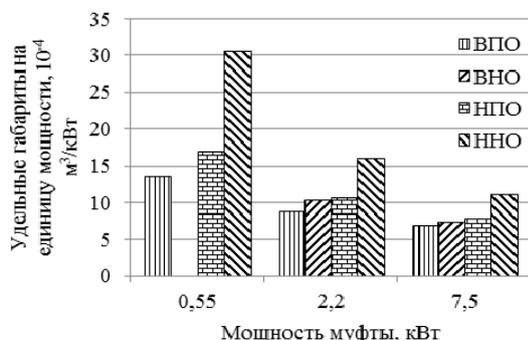


Рис. 5. Удельные габариты различных конструкций ЭМГМ при зазоре 0,4 мм

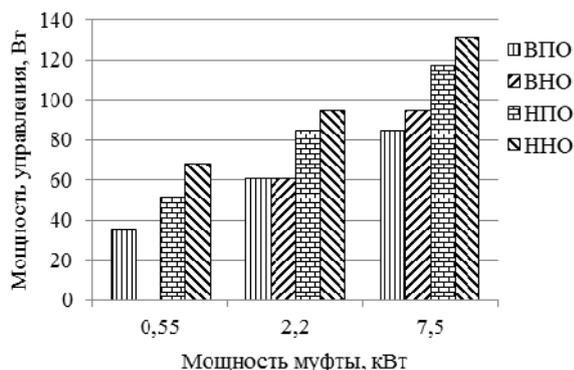


Рис. 6. Мощность управления различных конструкций ЭМГМ при зазоре 0,4 мм

Заключение

Применение ЭПЗА с ЭМГМ может явиться альтернативой ЭП с ПП частоты, осуществляющим управление АД и контроль его состояния по моменту на основе сложных алгоритмов векторного управления. Фактически ЭП с ПП частоты, реализованный на основе выпрямителя и инвертора с широтно-импульсной модуляцией со сложными алгоритмами управления, является дорогостоящим и малонадежным звеном в составе ЭПЗА. Идентификация момента АД в такой структуре, как правило, не отличается высокой точностью в условиях разброса параметров АД и редуктора по технологическим и температурным причинам. В этом смысле ЭМГМ нивелирует все недостатки ЭП с ПП частоты, являясь естественным ограничителем момента не только в статических, но и динамических режимах работы, поскольку не пропускает сложные колебательные переходные электромагнитные процессы, присущие АД, на редуктор и выходное звено ЭПЗА. В диапазонах мощностей АД 0,55–10 кВт эффективность применения ЭМГМ возрастает с ростом мощности двигателя.

Литература

1. Гарганеев А.Г. Интеллектуальный электропривод трубопроводной арматуры как элемент распределенной автоматизированной системы управления. Особенности применения и принципы построения / А.Г. Гарганеев, А.С. Каракулов // Журнал интеллектуальных технологий. Itech. – 2006. – № 4. – С. 37–42.
2. Гарганеев А.Г. Электропривод запорной арматуры / А.Г. Гарганеев, А.С. Каракулов, С.В. Ланграф. – Томск: ТПУ, 2013. – 157 с.
3. Гарганеев А.Г. Синхронно-гистерезисный двигатель в электроприводе трубопроводной арматуры // Электронные средства и системы управления. – 2012. – № 1. – С. 95–99.
4. Garganeev A.G. Application synchronous-hysteresis motors as electrical drivers for tube armature // 2012, 11-th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2012. – Proceedings 2012. – P. 135–137.
5. Гарганеев А.Г. Электропривод запорной арматуры как мехатронная система / А.Г. Гарганеев, А.С. Каракулов, С.В. Ланграф // Научный вестник Новосиб. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 2.
6. Гарганеев А.Г. Перспективы развития мехатронных систем с синхронно-гистерезисными двигателями / А.Г. Гарганеев, Д.А. Падалко, А.В. Черватюк // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 2 (32).
7. Мастяев Н.З. Гистерезисные электродвигатели. – Ч. I / Н.З. Мастяев, И.Н. Орлов. – М.: МЭИ, 1963. – 220 с.
8. Гарганеев А.Г. Мехатронные системы с синхронно-гистерезисными двигателями / А.Г. Гарганеев, С.В. Брованов, С.А. Харитонов. – Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2012. – 226 с.
9. Мизюрин С.Р. Проектирование магнитно-гистерезисных муфт / С.Р. Мизюрин, М.А. Ермилов. – М.: Рота-принт, МАИ, 1966. – 123 с.
10. Практика и дальнейшие перспективы промышленного использования высокопрочных наноструктурных магнитотвердых сплавов системы Fe-Cr-Co [Электронный ресурс] / Г.С. Бурханов, А.Г. Дормидонтов, И.М. Миляев и др. // Нанотехнол. общ-во России. – Режим доступа: <http://www.ntsr.info/science/library/3201.htm> (дата обращения: 5.11.2017).
11. Сплавы для гистерезисных двигателей / Л.А. Кавалерова, И.А. Малько, И.М. Миляев и др. // Электронная промышленность. – 1987. – Вып. 6(164). – С. 40–42.
12. Ганзбург Л.Б. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: справочник / Л.Б. Ганзбург, А.И. Федотов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1980. – 364 с.

Гарганеев Александр Георгиевич

Д-р техн. наук, профессор
инженерной школы энергетики (ИШЭ)
Томского политехнического университета (ТПУ).
Усова ул., д. 7, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 60-61-08
Эл. почта: garganeev@ Rambler.ru

Кюи Динь Конг

Аспирант ИШЭ ТПУ
Усова ул., д. 7, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-887-71-96
Эл. почта: caothuhanam89@gmail.com

Кашин Евгений Игоревич

Аспирант ИШЭ ТПУ

Усова ул., д. 7, г. Томск, Россия, 634050

Тел.: +7-923-418-34-07

Эл. почта: kashinei@sibmail.com

Garganeev A.G., Kyui D.K., Kashin E.I.

Electric drive of pulley of pipeline valve with hysteresis coupling

The paper provides the results of the analysis of electromagnetic hysteresis couplings designed for operation in the pipeline valves electric drives for oil and gas automated complexes. It is shown that the Fe-Cr-Co hysteresis coupling can be an alternative to technical solution of the intelligent electric drives based on the asynchronous electric motors. The results of the electromagnetic analysis of four types of hysteresis couplings to be used in the electric drives of the stop valves up to 7.5 kW are obtained.

Keywords: electromagnetic coupling, electric drive, torque, power, hysteresis.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-1-127-131

References

1. Garganeev A.G., Karakulov A.S. Intelligent electric drive of pipeline valves as an element of a distributed automated control system. Features of the application and principles of construction. *Zhurnal intellektual'nyh tehnologij. Itech*, 2006, no 4, pp. 37–42. (In Russ.)
2. Garganeev A.G., Karakulov A.S., Langraf S.V. *Jelektroprivod zapornoj armatury* [Electric drive of stop valves], Tomsk, TPU, 2013, 157 p. (In Russ.)
3. Garganeev A.G. Synchronous-hysteresis motor in the electric drive of pipeline valves. *Jelektronnye sredstva i sistemy upravlenija*, 2012, no 1, pp. 95–99. (In Russ.)
4. Garganeev A.G.. Application synchronous-hysteresis motors as electrical drivers for tube armature. 11-th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2012, Proceedings 2012, pp. 135–137. (In Russ.)
5. Garganeev A.G., Karakulov A.S., Langraf S.V. Electric shut-off valve as mechatronic system. *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2013, no. 2. (in Russ.)
6. Garganeev A.G., Padalko D.A., Chervatjuk A.V. Prospects for the development of mechatronic systems with synchronous-hysteresis motors. *Doklady TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], 2014, no. 2 (32) (In Russ.)

7. Mastjaev N.Z., Orlov I.N. *Gisterezijsnye jelektro-dvigateli. Ch. 1: Hysteresis motors. Part I.* Moscow, MJEI publ., 1963. 220 p. (In Russ.)

8. Garganeev A.G., Brovanov S.V., Haritonov S.A. *Mechatronnye sistemy s sinhronno-gisterezijsnymi dvigateljami* [Mechatronic systems with synchronous-hysteresis motors]. Tomsk, NI TPU publ., 2012. 226 p. (In Russ.)

9. Mizjurin S.R., Ermilov M.A. *Proektirovanie magnitno-gisterezijsnyh muft* [Design of magnetic hysteresis couplings]. Moscow, Rotaprint, MAI publ., 1966. 123 p. (In Russ.)

10. Burhanov G.S., Dormidontov A.G., Miljaev I.M. and others. Practice and further prospects of industrial use of high-strength nanostructured magnetically hard alloys of the Fe-Cr-Co system. *Nanotehnol. obshh-vo Rossii.* (In Russ.). Available at: <http://www.ntsr.info/science/library/3201.htm> (accessed: 5 Nov. 2017).

11. Kavalerova L.A., Mal'ko I.A., Miljaev I.M. Alloys for hysteresis motors. *Jelektronnaja promyshlennost'*, 1987, no. 6 (164), pp. 40–42 (In Russ.)

12. Ganzburg L.B., Fedotov A.I. *Proektirovanie jelek-tromagnitnyh i magnitnyh mehanizmov. Spravochnik* [Designing of electromagnetic and magnetic mechanisms. Handbook]. Leningrad, Mashinostroenie publ., Leningr. depart., 1980. 364 p. (In Russ.)

Aleksandr G. Garganeev

Doctor of Engineering Sciences, professor, School of Energy
Tomsk Polytechnic University
7, Usov st., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 60-61-08
Email: garganeev@rambler.ru

Din K. Kyui

PhD student, School of Energy
Tomsk Polytechnic University
7, Usov st., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7-952-887-71-96
Email: caothuhanam89@gmail.com

Evgeniy I. Kashin

PhD student, School of Energy
Tomsk Polytechnic University
7, Usov st., Tomsk, Russia, 634050
Phone.: +7-923-418-34-07
Email: kashinei@sibmail.com