

13. Walter A.V. i dr. Research on Geometric Errors of Intermediate Unit Shell of a Geokhod // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2016. V. 127. S. 012017.

14. Horeshek A.A., Anan'ev K.A., Ermakov A.N. Opredelenie racional'nogo chisla rezcov v liniyah rezaniya barabannyh ispolnitel'nyh organov geohodov // Vest-nik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2017. № 3 (121). S. 110–116.

15. Val'ter A.V., Nozirezoda SH.S., Ivkin A.N. Issledovanie tochnosti izgotovleniya krupnogabaritnyh korpusov vrashcheniya opytnogo obrazca geohoda // Nauchno-metodicheskij ehlektronnyj zhurnal KONCEPT. 2016. № 11. S. 2026–2030.

16. Val'ter A.V., Chernukhin R.V., Kapustin A.N. Otkloneniya formy obolochki stabiliziruyushchej sekcii geohoda // Tekhnologii i materialy. 2016. № 1. S. 4–7.

17. Val'ter A.V., Nozirezoda SH.S. Analiticheskaya model' formirovaniya otklo-nenij bieniya, vznikayushchih pri sborke korpusov geohoda // Tekhnologii i materialy. 2016. № 4. S. 4–8.

18. Chernukhin R.V., Blaschuk M.Y., Blumenstein V.Yu., Chazov P.A. Objectivation of the Necessity of Structural and Parametric Synthesis of the Hydraulic Drive of Geokhod // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2016. V. 142. S. 123667.

19. Chernukhin R.V., Timofeev V.Y., Grigoryeva E.G. Effect of Incorporated Pump-ing Station Weight on the Rotating Torque of Geokhod Transmission // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2016. V. 127. S. 012035.

20. Anuriev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya. 8-e izd., pere-rab. i dop. Pod red. I.N. ZHestkovoij. – M.: Mashinostroenie, 2001. T. 1. 920 s.

Библиографическое описание статьи

Аксенов В.В. Моделирование взаимодействия элементов узла сопряжения секций геохода / В.В. Аксенов, В.Ю. Бегляков, А.А. Дронов // Горное оборудование и электромеханика — 2018. — № 4 (138). — С. 27-32.

Reference to article

Aksenov V.V., Beglyakov V.Yu., Dronov A.A. Simulation of the interactions between elements of the geokhod's bearing unit. Mining Equipment and Electromechanics, 2018, no. 4 (138), pp. 27-32.

УДК 621.825:621.318.12; 621.313.392

Гарганеев Александр Г.¹, доктор техн. наук, профессор, Кюи Динь К.¹, аспирант, Кашин Евгений И.², аспирант, Сипайлова Надежда Ю.¹,

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634034 Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

²Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Полюс», 634041 Россия, г. Томск, пр. Кирова, 56В

²Joint Stock Company “Research and Production Association “Polyus”, Tomsk, Russia

E-mail: garganeev@rambler.ru

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ МУФТЫ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА Fe-Cr-Co

Аннотация: Среди многообразия электромагнитных муфт, передающих движение от ведущего к ведомому валу электроприводного технологического механизма, особо выделяются гистерезисные муфты. Вследствие особенностей гистерезисного преобразования энергии гистерезисные муфты разгоняются (или работают в заторможенном режиме) с постоянством момента, что важно для надежной работы технологического механизма. Современным магнитным материалом является деформируемый сплав типа Fe-Cr-Co, обладающий высокими механическими и стабильными магнитными свойствами в широком температурном диапазоне и с большим для гистерезисных материалов значением энергетического произведения. Для четырех конструктивных схем гистерезисных муфт на основании предварительного анализа магнитных свойств и расчета магнитных проводимостей авторами получены регулировочные характеристики муфт. Для гистерезисных муфт на основе материала Fe-Cr-Co 22X15KA получены оптимальные значения частот и индукций, при которых достигается максимальные значения гистерезисного угла и относительной магнитной проницаемости. Сделан вывод о том, что сочетание особенностей гистерезисного преобразования энергии, простота реализации и возможности регулирования момента в условиях высоких температур и окружных скоростей является предпосылкой альтернативного применения гистерезисных муфт в электроприводах, осуществляющих контроль ограничения момента, например, в системах управления трубопроводной арматуры. В электроприводах с гистерезисными муфтами снимается необходимость в сложном алгоритме контроля момента приводного двигателя.

Ключевые слова: Муфта, гистерезис, момент, скорость, управление.

Информация о статье: принята 05 августа 2018 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2018-4-33-38

Среди разнообразия электромагнитных муфт особо можно выделить гистерезисные муфты (ГМ), которые ввиду особенностей гистерезисного преобразования энергии разгоняются (или работают в заторможенном режиме) с постоянством момента [1-4]. Указанное преимущество наряду с потенциальной возможностью управления намагниченностью гистерезисного слоя, в том числе импульсными методами, а также физико-технические характеристики новых деформируемых сплавов типа Fe-Cr-Co делает вопрос применения ГМ с указанными сплавами перспективным в электроприводах (ЭП) различных технологических механизмов [4 - 7].

По сравнению с магнитными ГМ, электромагнитные ГМ более сложны в конструкции и эксплуатации, требуют источника электроэнергии для питания обмотки, однако обладают возможностью электрического управления моментом.

Традиционно применяемыми в ГМ и электрических машинах гистерезисными материалами

являются сплавы викаллой (Fe-Co-V) и альни (Al-Ni-Fe) [7, 8]. По сравнению с гистерезисным материалом типа викаллой (Fe-Co-V), характеризующегося высокой стоимостью из-за содержания ванадия, деформируемые сплавы на основе материала Fe-Cr-Co в несколько раз дешевле, и могут иметь энергетическое произведение $(BH)_{\text{макс}}$ до 60 кДж/м³, что открывает новые перспективы их применения не только в спецтехнике, но и во многих отраслях промышленности [9-13]. Также следует отметить высокую прочность Fe-Cr-Co, превышающую аналогичный показатель для титана, что открывает перспективы создания сверхскоростных ГМ. При высокой коррозионностойкости этот материал не снижает своих магнитных свойств до температур $t = 350...400$ С°.

На рис.1 представлены основные конструктивные схемы ГМ.

В представленных конструкциях ведомая полу-муфта неподвижна до тех пор, пока угол поворота внешнего поля не достигает предельного значения

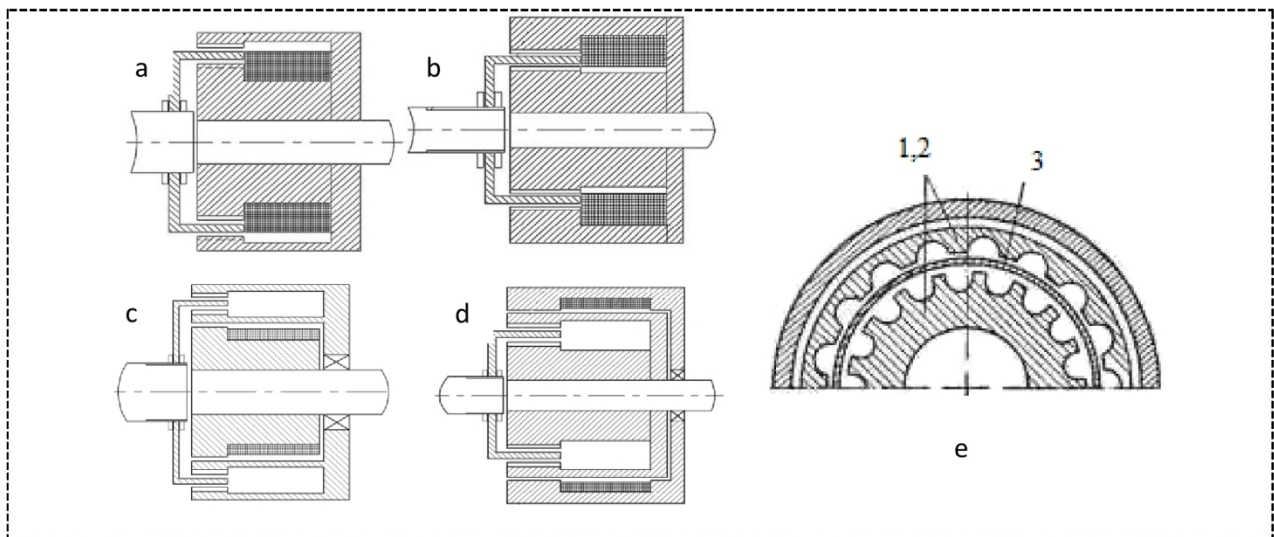


Рис. 1. Конструкции ГМ:

*a – с подвижной внутренней обмоткой; b – с подвижной наружной обмоткой;
c – с неподвижной внутренней обмоткой; d – с неподвижной наружной обмоткой;
e – поперечное сечение ГМ: 1,2 – полумуфты; 3 – гистерезисный слой*

Fig. 1. Hysteresis coupling construction design:

*a – with a movable inner winding; b – with a movable outer winding;
c – with a fixed internal winding; d – with a fixed outer winding;
e – cross-sectional view of the hysteresis coupling: 1,2 – half-couplings; 3 – hysteresis layer.*

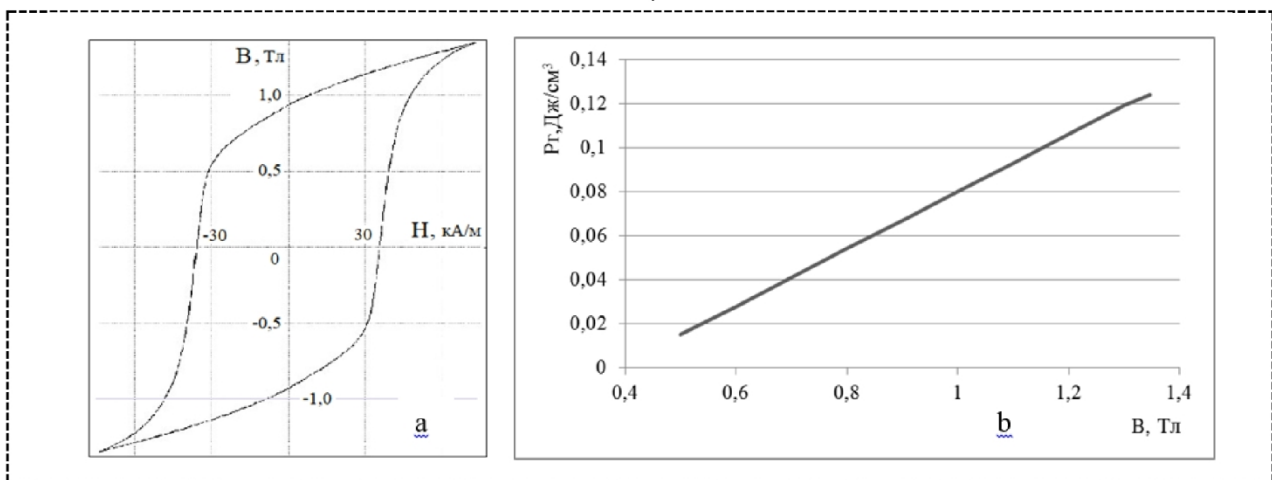


Рис.2. Петля гистерезиса (a) и зависимость удельных гистерезисных потерь (b) от индукции для материала 22X15KA

Fig.2. The hysteresis loop (a) and the dependence of the specific hysteresis losses (b) on the induction for 22X15KA material

так называемого гистерезисного угла γ , характерного для гистерезисного материала. Далее движение ведомой полумуфты происходит в синхронизме с моментом, определяемым нагрузкой, и ограничивается постоянным значением момента даже при переходе механизма в режим торможения независимо от скорости.

Мощность ГМ при заданной скорости вращения определяется объемом гистерезисного слоя и определяется выражением [7]:

$$V_{GM} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 9.55 \cdot P \cdot k_M}{p \cdot p_r \cdot n \cdot 10^6} \quad (1)$$

где: P - передаваемая мощность, Вт;

k_M - перегрузочная способность муфты;

p - число пар полюсов индуктора;

n - частота вращения ведущего вала, об/мин;

p_r - удельные потери на гистерезис, Дж/м³.

Для наиболее эффективного использования гистерезисного материала в конструкциях магнитомягких полумуфт применены зубчатые полюсные системы. Зубцы полюсных систем полумуфт сдвинуты относительно друг друга на половину зубцового деления, что способствует возникновению в гистерезисном слое тангенциальной составляющей поля, переменного по направлению.

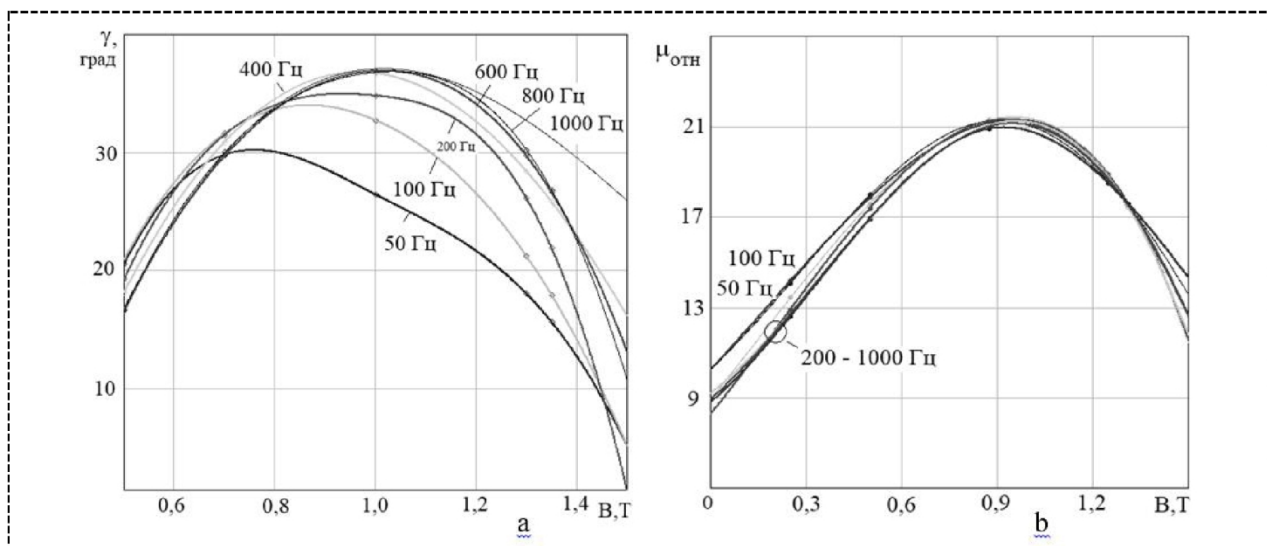


Рис. 3. Зависимость гистерезисного угла (а) и относительной магнитной проницаемости (б) от индукции при различных частотах перемагничивания гистерезисного слоя для материала 22Х15КА

Fig. 3. Dependence of hysteresis angle (a) and relative magnetic permeability (b) on induction at different frequencies of magnetization reversal of the hysteresis layer for 22X15KA material

Фактически, при заданном объеме гистерезисного слоя момент ГМ определяется удельными потерями на гистерезис, зависящими от характеристик петли гистерезиса материала. Для исследования магнитных свойств авторами был выбран материал 22Х15КА в виде втулки, предварительно термоманитно обработанной. На рис. 2 представлены петля гистерезиса и удельные потери на перемагничивание в зависимости от индукции. Для определения магнитных показателей использовалась установка контроля магнитных параметров УКМП-0,05-100.

Согласно результатам эксперимента, согласующимся с физикой перемагничивания гистерезисного материала [3], 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. таблица 1 и рис. 2 б). Экспериментальные зависимости гистерезисного угла γ и относительной магнитной проницаемости

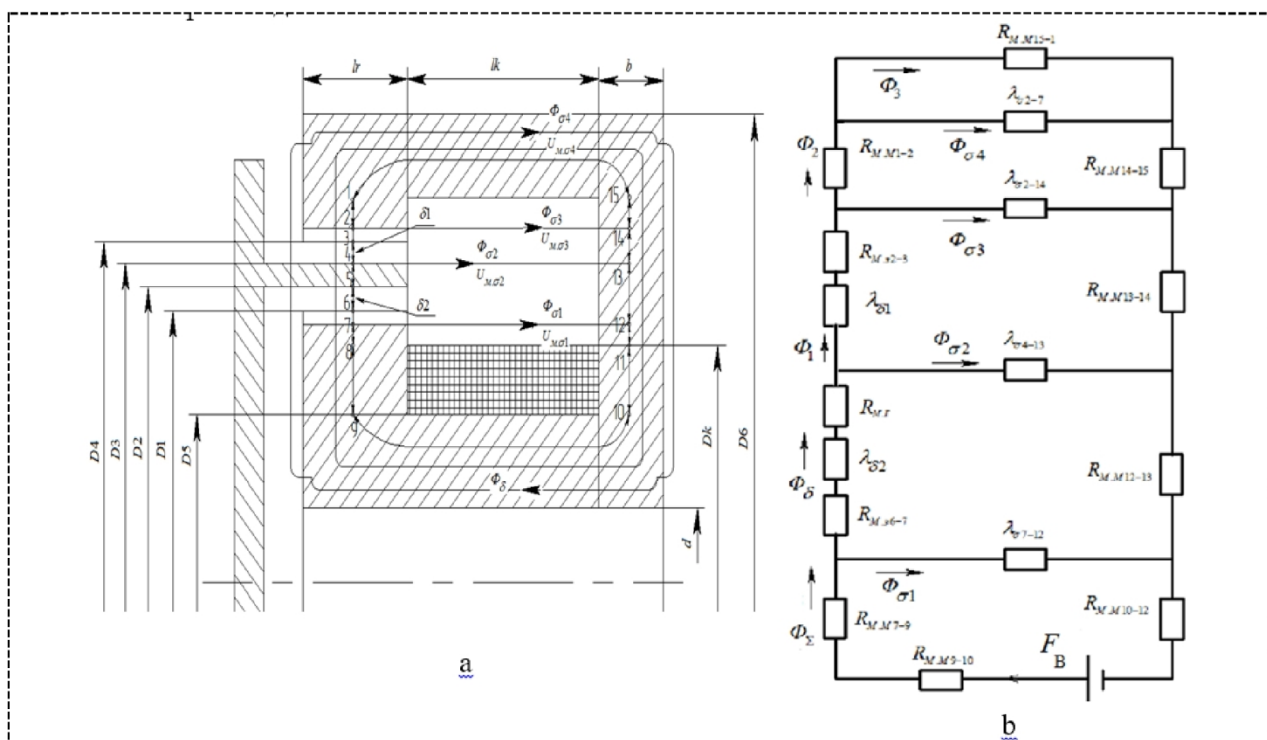


Таблица 1. Мощность удельных объемных потерь для материала 22Х15КА
Table 1. Specific volume loss for material 22Х15КА

Частота, Гц	B=0,5 Тл	B=0,7 Тл	B=1 Тл	B=1,3 Тл	B=1,5 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	-	-	-	-

$\mu_{отн}$ от индукции при различных частотах перемагничивания гистерезисного слоя для материала 22Х15КА представлены на рис. 3.

Расчет проводимостей магнитных цепей вышеприведенных ГМ проводился на основании схем замещения (см. пример на рис. 4) [14]. При этом были приняты следующие допущения:

- 1) обмотка имеет равномерную намотку;
 - 2) намагничивание осуществляется по основной кривой намагничивания;
 - 3) поле в зазоре принимается плоским;
- изменение торцового рассеяния зубцовых элементов муфты при сдвиге не происходит.

После решения последовательными приближениями уравнения (2)

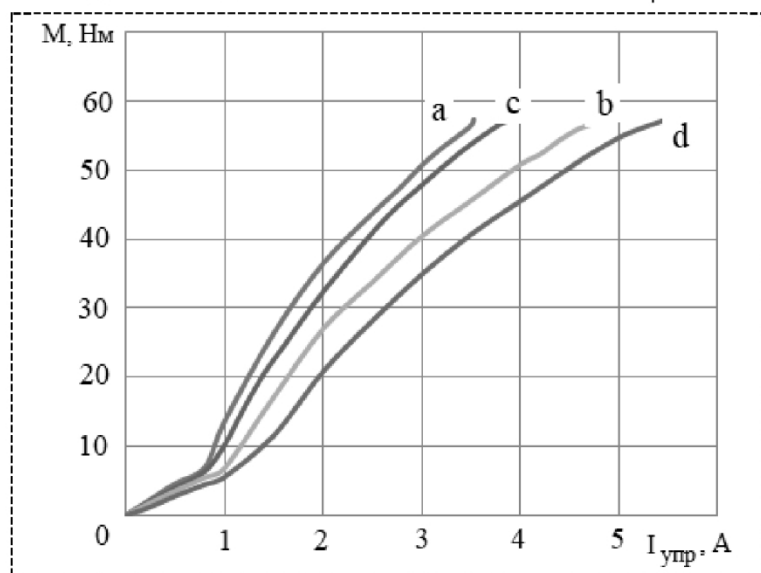


Рис. 5. Регулировочные характеристики ГМ при рабочем зазоре 0,4 мм:

- a – с подвижной внутренней обмоткой; b – с подвижной наружной обмоткой;
c – с неподвижной внутренней обмоткой; d – с неподвижной наружной обмоткой.

Fig. 5. Adjustment characteristics of electromagnetic hysteresis clutches at 0.4 mm gap:

- a – with a movable inner winding; b – with a movable outer winding;

$$F_B = \sum_{k=1}^n U_{M.MK} + \sum_{i=1}^m U_{M\delta i} + \sum_{j=1}^h U_{M\sigma j} + \sum_{x=1}^p U_{M\lambda x} \quad (2)$$

где: $U_{M.MK}$ – магнитное напряжение на k -м участке магнитопровода; $U_{M\delta i}$ – магнитное напряжение на i -м зазоре; $U_{M\sigma j}$ – магнитное напряжение на проводимости потока рассеяния; $U_{M\lambda x}$ – магнитное напряжение на зубцах x -ого участка,

по суммарной кривой намагничивания определяется общий магнитный поток $\Phi_{\Sigma} = \Phi_B$ и индукция B_{Γ} :

$$B_{\Gamma} = \frac{\Phi_B}{2\pi \cdot D_{\Gamma.CP} \cdot l_{\Gamma} \cdot k_{\Gamma} \cdot k_{\lambda\Gamma}} \quad (3)$$

где: $D_{\Gamma.CP}$ – средний диаметр гистерезисного слоя, м;

l_{Γ} – длина гистерезисного слоя, м;

$k_{\Gamma} = \Delta/\tau$ – коэффициент зазора; Δ – толщина гистерезисного слоя, м; τ – зубцовое деление, м;

$k_{\lambda\Gamma} = 0.9 \dots 1.0$ – коэффициент заполнения гистерезисным материалом.

Гистерезисный момент определяется по формуле 4 [8]:

$$M_{\Gamma} = \frac{D_{\Gamma.CP}^2 \cdot \pi \cdot p_{\Gamma} \cdot k_{\Gamma} \cdot k_{\lambda\Gamma} \cdot l_{\Gamma}}{2} \quad (4)$$

Регулировочные характеристики для рассматриваемых ГМ представлены на рис. 5. При этом был проанализирован вариант применения ГМ в ЭП

мощностью 2,2...7,5 кВт, широко применяемый, например, в запорной трубопроводной арматуре [15].

Результаты экспериментов показывают, что наиболее выгодный режим намагничивания гистерезисного слоя ГМ на основе материала Fe-Cr-Co 22Х15КА при токе управления $I_{упр}$ до 5 А достигается при гистерезисном угле $\gamma \approx 37^\circ$, и относительной магнитной проницаемости $\mu_{отн} \approx 22$, что достигается при индукции около 1,1 Тл при частоте перемагничивания $f = 400 \dots 1000$ Гц. Конструктивный тип ГМ выбирается исходя из конкретных условий применения ЭП (минимум массогабаритных показателей, условия взрывозащиты и искробезопасности, максимум КПД и т.п.).

Закключение

Сочетание особенностей гистерезисного преобразования энергии, простота реализации и возможности регулирования момента в условиях высоких температур и окружных скоростей является предпосылкой альтернативного применения ГМ в ЭП, осуществляющих контроль ограничения момента, например, в ЭП трубопроводной арматуры. В ЭП с ГМ снимается необходимость в сложном алгоритме

контроля момента приводного двигателя, поскольку ГМ, фактически, представляет собой естественную ограничительную моментную муфту. Управление выходным моментом ГМ в соответствии с полученными регулировочными характеристиками может быть реализовано на основе простых схемотехнических решений для регулирования тока обмотки управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мизюрин С.Р. Проектирование магнитно-гистерезисных муфт/ С.Р. Мизюрин, М.А. Ермилов – М.: Ротапринт, МАИ, 1966. – 123 с.
2. 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.
3. Мастяев Н.З. Гистерезисные электродвигатели. Ч.1/ Н.З. Мастяев, И.Н. Орлов – М.: МЭИ, 1963. – 220 с.
4. Делекторский Б.А. Управляемый гистерезисный привод / В.Н. Тарасов, Б.А. Делекторский. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
5. 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.ntsrf.info/science/library/3201.htm> (дата обращения: 5.11.2017).
6. Сплавы для гистерезисных двигателей/Л.А. Кавалерова, И.А. Малько, И.М. Миляев и др. // Электронная промышленность. – 1987. – Вып. 6(164). – С. 40–42.
7. Ганзбург Л.Б. Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник/ Л.Б. Ганзбург, А.И. Федотов. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 364 с., ил.
8. Сталь качественная и высококачественная. Ч.2. ГОСТ 10994 – 74. Сплавы прецизионные. Марки. БЗ – 2003/Изд-во стандартов. – 2004. – С.116 – 132.
9. [ГОСТ 24897-81](#). Материалы магнитотвердые деформируемые. Марки, технические требования и методы контроля/ Изд-во стандартов. – 1981. – 9 с.
10. Kubota T. Hysteresis motor using magnetically anisotropic Fe-Cr-Co magnet/ T. Kubota, G. Watui, M. Itagati// IEEE Trans on Magnetics. – 1998. – No. 34(6). – P. 3888–3896.
11. Ghanbari T. Hysteresis Motor Using Heat Treated Fe-Cr-Ni-Mo-C Steel Alloy/ T. Ghanbari, A. Darabi, M. S. Moghadam// J. Electrical Systems. – 2015. – Vol. 11-1 – P. 49–60.
12. Kurihara K. Steady-state performance analysis for hysteresis motor with magnetic anisotropy/K. Kurihara, T. Kubota// COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2008. – Vol. 27. – Iss: 4. – P. 830 – 835.
13. 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).
14. Буль О. Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с.
15. Гарганеев А.Г. Электропривод запорной арматуры/ А.Г. Гарганеев А.С. Каракулов, С.В. Ланграф. – Томск: ТПУ, 2013 – 157 с.

Aleksandr G. Garganeev¹, D. Sc. (Engineering), Professor, D. K. Kyui¹, PhD student, Evgueniy I. Kashin², PhD student, Nadezhda Yu. Sipaylova¹, C. Sc. (Engineering), Associate Professor

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

²Joint Stock Company “Research and Production Association “Polyus”, Tomsk, Russia

HYSTERESIS COUPLINGS ON THE BASIS OF Fe-Cr-Co MATERIAL

Abstract: Among the variety of electromagnetic clutches that transmit the motion from the drive to the driven shaft of the electric drive technological mechanism, hysteresis clutches are particularly distinguished. Due to the peculiarities of the hysteresis energy conversion, the hysteresis clutches accelerate (or operate in the locked mode) with a constant torque, which is important for reliable operation of the technological mechanism. A deformable alloy of the Fe-Cr-Co type is a modern magnetic material with high mechanical and stable magnetic properties over a wide temperature range and with a high energy product value for hysteresis materials. Using the preliminary analysis of the magnetic properties and the calculation of the magnetic conductivities, the authors obtained the adjusting characteristics of the clutches for four structural schemes of the hysteresis clutches. For Fe-Cr-Co 22X15KA hysteresis clutches it was possible to obtain optimum values of frequencies and inductions, at which the maximum values of hysteresis angle and relative magnetic permeability can be reached. It was concluded that the combination of hysteresis energy conversion features, ease of implementation and the possibility of torque control under high temperatures and peripheral velocities are a prerequisite for the alternative use of hysteresis clutches in electric drives that control the torque limit, for example, in pipeline valve