

УДК 62-83: 621.313.392

А.Г. Гарганеев, Д.А. Падалко, А.В. Черватюк

Перспективы развития мехатронных систем с синхронно-гистерезисными электрическими машинами

На основе теории гистерезисного преобразования энергии и свойств магнитных материалов типа Fe-Cr-Co и Fe-Co-V анализируется перспективность применения в электрических машинах мехатронных систем материала типа Fe-Cr-Co. Приведены примеры мехатронных систем с импульсным намагничиванием материала ротора.

Ключевые слова: электрическая машина, полупроводниковый преобразователь, инвертор, постоянный магнит.

Интенсификация научно-технического прогресса предопределяет широкое применение в различных сферах человеческой жизни постоянных магнитов. Магнитные материалы на основе редкоземельных металлов в большой степени определяют развитие энергетики и энергосберегающих технологий, экологически чистых видов транспорта и модернизации традиционных его видов, а также бытовой техники, медицины и т.п. [1]. По различным экспертным оценкам, основной рост объёмов потребления магнитов на основе структуры Nd-Fe-B во многом будет определяться потребностями производителей электромашинных генераторов и электродвигателей.

Производство редкоземельных постоянных магнитов на основе сплавов системы Nd-Fe-B в мире является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей промышленности. С момента освоения их промышленного выпуска (1987 г.) темпы среднегодового прироста объёмов их производства до 2000 г. составляли не менее 30%. Планируемые объёмы выпуска до 2020 г. приведены на рис. 1 [2]. В этой связи становится актуальным не только развитие отечественного производства магнитов на основе структур, в частности Nd-Fe-B и Sm_nCo_m , но и поиск альтернативных путей создания эффективных мехатронных систем (МС) с электрическими машинами на основе иных магнитотвёрдых материалов.



Рис. 1. Динамика роста мирового выпуска постоянных магнитов

Постановка задачи. При всей своей привлекательности «традиционные» постоянные магниты имеют и ряд недостатков, основными из которых являются:

- 1) высокая стоимость (особенно для структур Sm_nCo_m);
- 2) зависимость от иностранного производителя;
- 3) низкая механическая прочность и проблемы механической обработки;
- 4) старение;
- 5) возможность размагничивания при высоких температурах (низкая точка Кюри);
- 6) критичность к влаге (особенно для структур Nd-Fe-B);

7) сложность организации защит электродвигателя и генератора от короткого замыкания, прежде всего ввиду большого запаса электромагнитной энергии во вращающемся роторе (индукторе). В аварийных ситуациях «неисчезаемый» запас электромагнитной энергии ротора потенциально опасен;

8) проблемы применения во взрывоопасных средах ввиду потенциального запаса электромагнитной энергии в индукторе;

9) сложность технологического оборудования при сборке или ремонте электрических машин ввиду больших механических усилий, вызываемых взаимодействием магнитов с металлическими частями машины;

10) сложность управления электрической машиной по магнитной составляющей тока при скоростях выше синхронной.

Определенной альтернативой применению в МС постоянных магнитов вышеуказанных структур являются магнитотвердые материалы «гистерезисного типа». До настоящего времени гистерезисные электрические машины (ГМ) применялись в специальных технологиях: разделение изотопов урана (газовые ультрацентрифуги) и гироскопическая техника инерциальных систем навигации. Однако замечательные свойства гистерезисного материала позволяют создавать синхронные машины с «естественным» пусковым моментом, а применение режима «перевозбуждения» приближает эти машины по энергетическим показателям к машинам с постоянными магнитами. Область применения таких электрических машин может быть чрезвычайно обширной: от бытовой техники до промышленного применения. Из наиболее известных до настоящего времени структур следует отметить структуру типа Fe-Co-V («викаллоу»), впрочем, недостатком которого является наличие дорогостоящего ванадия. Таким образом, задачей данной статьи является выявление технико-экономических аспектов применения ГМ с магнитными материалами, альтернативными викаллоу.

Теоретические основы применения мехатронных систем с гистерезисными машинами на основе материала Fe-Cr-Co. Особенность ГМ состоит не только в природе образования момента, предусматривающего работу в синхронных и асинхронных режимах, но и в том, что магнитная «податливость» материала ротора делает ее полностью управляемой. Полная управляемость (помимо регулирования напряжения и частоты) достигается периодическим импульсным намагничиванием, позволяющим регулировать намагниченность материала ротора по амплитуде и фазе относительно синхронной системы координат. При этом на напряжение питания U_1 машины накладываются редкие импульсы с частотой f_n , фазой α_n , длительностью t_n и амплитудой U_n (рис. 2). Импульсы создают дополнительное намагничивание материала ротора, не только приближая коэффициент мощности машины, близкий к единице, но и эффективно демпфируя угловые колебания ротора [4].

При скольжении машины (например, в режиме запуска) такое регулирование является «квазисинхронным», поскольку ротор в промежутках времени между импульсами намагничивания работает на участках угловых характеристик. Дополнительно следует отметить, что гистерезисная машина с инерционным ротором может работать при сверхнизких положительных или отрицательных скольжениях. В принципе, ГМ может работать и без импульсов, однако при этом ее энергетические характеристики невысоки. Разработано много способов и устройств дополнительного намагничивания ГМ, которые могут применяться в сочетании как с обычной сетью, так и в составе инверторных электроприводов.

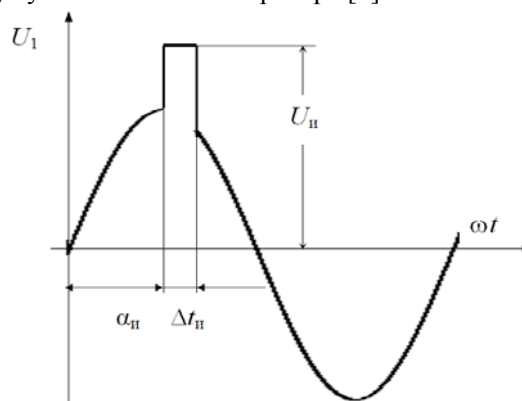


Рис. 2. Параметры импульсного намагничивания гистерезисной машины

Теория гистерезисных электроприводов разработана в ряде работ [8]. Однако представляет теоретический и практический интерес также применение ГМ в автономных системах генерирования электроэнергии (СГЭЭ) на основе режима самовозбуждения [9]. В качестве примера на рис. 3 представлена схема мехатронной СГЭЭ переменного тока. Согласно представленной схеме полупроводниковый преобразователь (ПП) образует необходимый уровень реактивного тока, поддерживающий процесс самовозбуждения в диапазоне регулирования. Для синхронно-гистерезисного генератора (СГГ) в ПП дополнительно предусмотрено наличие устройства импульсного подмагничивания ротора, как это используется у синхронно-гистерезисных двигателей (СГД). При возникновении ава-

рийных ситуаций, приводящих к перегрузке СГЭЭ, процесс самогенерации прекращается («срыв генерации») с принудительным управляемым размагничиванием материала ротора, не приводя к катастрофическим последствиям.

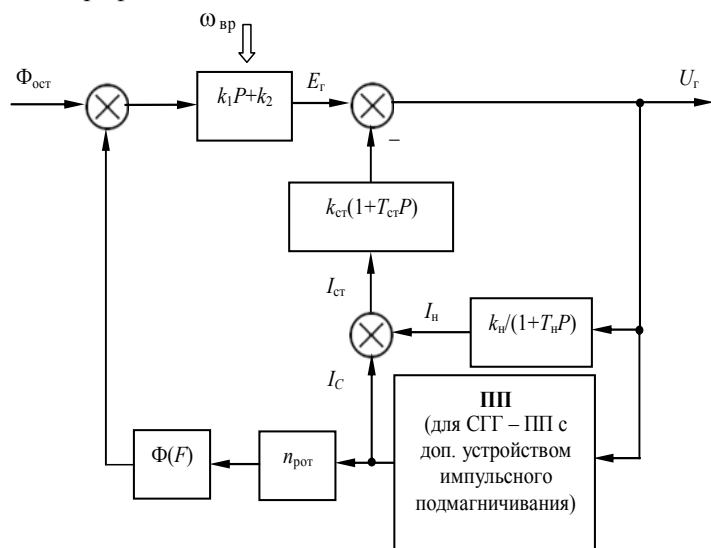


Рис. 3. Мехатронная СГЭЭ переменного тока с гистерезисным генератором

силе $H > 62$ кА/м, т.е. были получены постоянные магниты, по своим магнитным свойствам близкие к магнитам из наиболее широко используемого в технике сплава ЮНДК24 или Алнико 5. Также было сообщено, что сплавы Fe-Cr-Co являются пластичными, в частности, поддаются обработке давлением и режущим инструментом [11].

Как показывает литературный обзор [12, 13], современные новые российские промышленные сплавы 25X15КА и 22X15КА в зависимости от режима термической обработки заменяют не только все применяемые ранее промышленные сплавы для гистерезисных машин, но и обладают достоинствами, которые обеспечивают им неоспоримые конкурентные преимущества перед ними.

Магнитотвёрдые 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. Путём подбора соответствующей термообработки им можно придать магнитные свойства, не уступающие свойствам викаллоя. По уровню полей (2–30 кА/м), например, сплав 25X15КА, имеющий высокие гистерезисные свойства, может заменить все существующие гистерезисные материалы. Результаты применения сплава 25X15КА в девяти типоразмерах гистерезисных двигателей, где он заменил сплав викаллоем, показали, что электромеханические характеристики двигателей улучшаются на 10–30%, при этом трудозатраты при механической обработке и сборке роторов, а также брак по термообработке уменьшаются в 3 раза (!) [12].

По данным [11–13] опытные испытания роторов из сплава 25X15КА в электродвигателях постоянного тока ДПМ-35 взамен роторов из ЮНДК24, проведенные в ОАО «Псковэлектромаш», показали, что без ухудшения качества двигателя себестоимость изготовления снижается на 20–25%.

Примеры реализации мехатронных систем на основе гистерезисных машин и устройств импульсного намагничивания. Известно довольно много схем гистерезисных МС с устройствами импульсного намагничивания (УИН), отличающихся вариантами соединения основного и импульсного источников. При проектировании конкретных УИН необходимо таким образом выбирать алгоритмы управления ими, чтобы, выполняя задачу повышения энергетических показателей МС, не внести дополнительных возмущений по моменту и скорости машины, если это не требуется по каким-либо другим соображениям.

На рис. 4 представлена одна из схем, позволяющая производить форсированный пуск СГД с последующим перевозбуждением или, в принципе, формировать импульсы напряжения на двигателе в процессе его работы [14]. УИН выполнено в виде трехфазного трансформатора TV . Первичная обмотка I имеет отпайки, к которым может подключаться либо двигатель, либо напряжение сети. Концы фаз первичной и вторичной обмоток трансформатора подключены соответственно через выпря-

Перспективным магнитотвёрдым материалом с высоким уровнем механических свойств, как альтернатива викаллою, может стать, а фактически уже и является, сплав системы Fe-Cr-Co, о котором впервые было заявлено в 1936 г. В. Кёстером [10]. Поскольку в послевоенное время активно велись работы по внедрению в промышленное производство сплавов типа «алнико», потенциальные возможности магнитотвёрдых материалов структуры Fe-Cr-Co отошли на второй план. В 1971 г. в Японии были получены сплавы системы Fe-Cr-Co, содержащие 23–25% кобальта, 30–35% хрома с максимальным энергетическим произведением $(BH)_{\max} > 40$ кДж/м³ при остаточной индукции $B_r > 1,1$ Тл и коэрцитивной

мители $VD1$ и $VD2$ к бесконтактным тиристорным ключам $VS1$, $VS2$. При подключении СГД к отпайкам первичной обмотки его запуск происходит при включенном тиристоре $VS2$ и выключенном $VS1$. При этом СГД подключен на полное напряжение сети, а трансформатор работает в режиме трансформатора тока. При окончании запуска тиристор $VS1$ включается, а тиристор $VS2$ выключается, напряжение на двигателе резко снижается, так как оно определяется работой трансформатора в режиме понижающего автотрансформатора.

В случае если напряжение сети подведено к отпайкам первичной обмотки, а СГД подключен к сетевым контактам, пуск производится при включенном тиристоре $VS1$ и выключенном тиристоре $VS2$, а трансформатор работает в качестве повышающего автотрансформатора. По окончании пуска происходит обратное переключение тиристорных ключей, и напряжение на СГД понижается примерно до напряжения сети. В принципе, алгоритм переключения тиристорных ключей может реализовывать и импульсный режим намагничивания СГД. Схему можно рекомендовать при питании СГД непосредственно от промышленной сети.

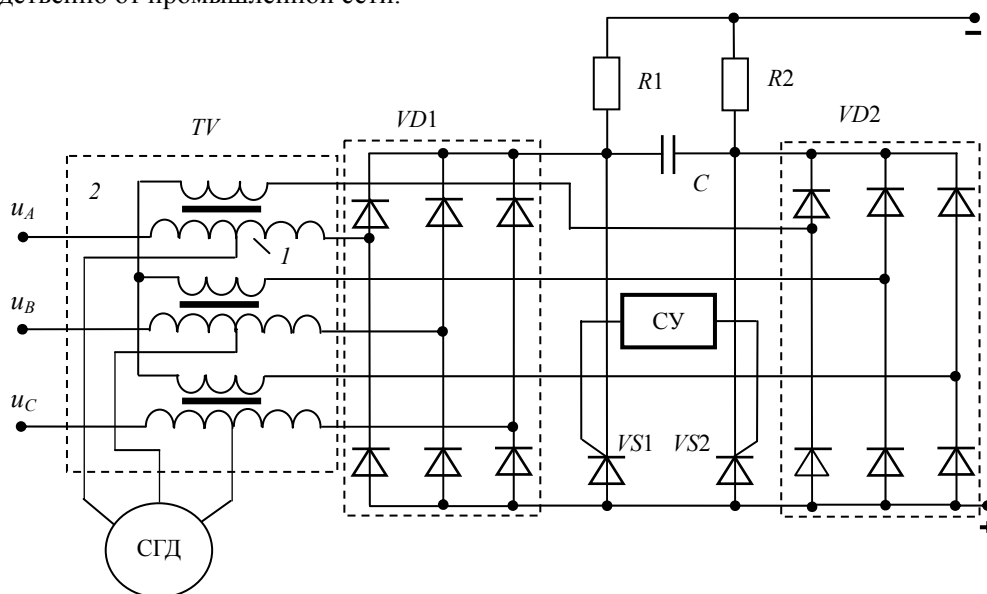


Рис. 4. Устройство намагничивания СГД с автотрансформатором (СУ – схема управления)

Рисунок 5 иллюстрирует схему МС на основе нулевого инвертора напряжения, используемого в качестве вольтодобавки [15]. При отсутствии импульса намагничивания полупроводниковые ключи $S1$ и $S2$ замкнуты, а ключ $S3$ разомкнут и трансформатор 5 работает как трансформатор тока замкнутой вторичной обмоткой. При формировании импульса намагничивания посредством схем управления 3 и 4 периодически замыкается полупроводниковый ключ $S3$ и размыкается один из ключей $S1$ или $S2$. Таким образом, на выходной обмотке трансформатора 5 образуется двуполярное выходное импульсное напряжение, которое суммируется с напряжением питания СГД, поступающим от сети. При этом нет одностороннего подмагничивания статора СГД. Импульсы намагничивания формируются по фазе и длительности в блоке 2, синхронизируясь с напряжением сети через датчики блока 1. Достоинство данной схемы состоит в том, что при вероятном выходе из строя полупроводниковых ключей УИН не нарушается целостность фазных проводников СГД.

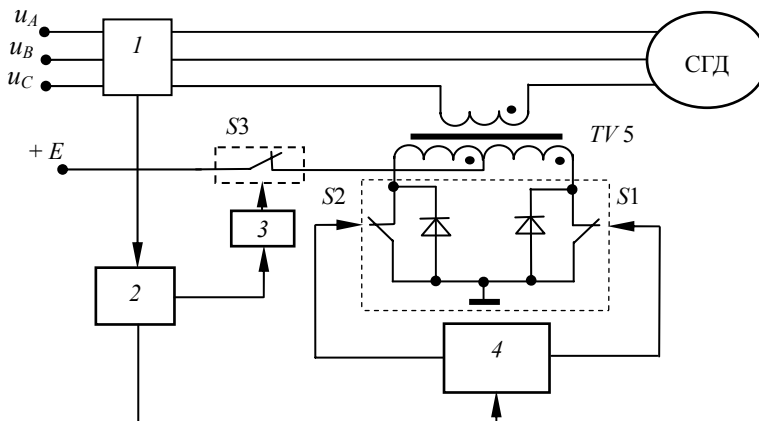


Рис. 5. Реализация МС с УИН на основе нулевого инвертора в фазе СГД

Источник постоянного тока может быть как дополнительным, так и основным – от звена постоянного тока автономного инвертора, поскольку может иметь общую точку с общей шиной постоянного тока статического преобразователя. Кроме того, такой УИН способен работать с любым основным источником питания – автономными инверторами напряжения или тока, генератором или промышленной сетью. Схема может быть рекомендована для питания СГД, входящих в состав инерциальных систем навигации, а также многодвигательных электроприводов ультрацентрифуг или веретен.

На рис. 6 представлены варианты реализации бестрансформаторных схем импульсного намагничивания на выходе основного источника – автономного инвертора или сети [5]. Схема, представленная на рис. 6, а, формирует импульс намагничивания при размыкании полупроводникового ключа S_2 и замыкании ключа S_1 . Недостатком схемы является необходимость пропускания импульсного тока через основной источник. От этого недостатка свободна схема, представленная на рис. 6, б. В момент формирования импульса намагничивания полупроводниковые ключи S_1, S_2 отключают основной источник питания, и ток импульсного источника замыкается только через фазы СГД.

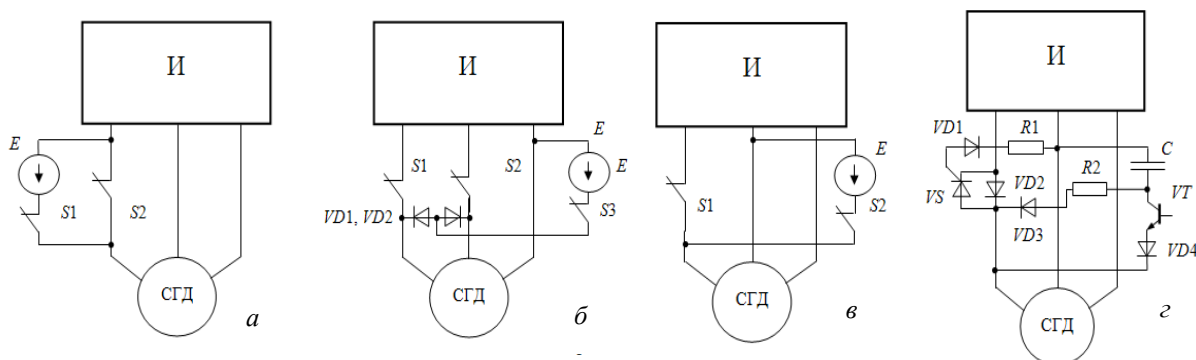


Рис. 6. Бестрансформаторные варианты схем УИН на выходе инвертора

Схема на рис. 6, в является фактически частным случаем предыдущей схемы. Общим недостатком схем на рис. 5 и 6 является наличие большого количества полупроводниковых ключей в цепях питания СГД. На рис. 6, г представлен вариант практической реализации схемы рис. 6, в. УИН содержит последовательный полупроводниковый ключ переменного тока, выполненный на тиристоре VS и диодах $VD1, VD2$. В качестве импульсного источника применен конденсатор C с цепью заряда $R2, VD3$. Работа транзисторного ключа VT синхронизирована с работой ключей инвертора $И$. В исходном состоянии транзисторный ключ VT выключен, ключ на тиристоре VS и диодах $VD1, VD2$ включен. При формировании импульса намагничивания включается транзистор VT и выключается тиристор VS .

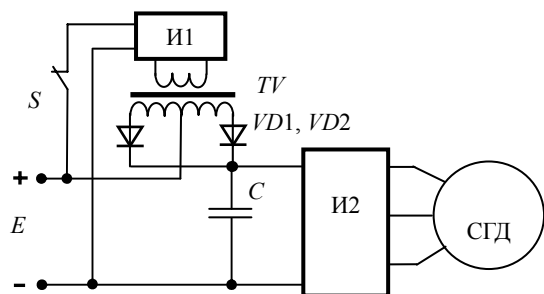


Рис. 7. УИН с дополнительным вольтодобавочным инвертором в цепи постоянного тока основного инвертора

На рис. 7 представлена схема МС с УИН в виде вольтодобавочного инвертора $И1$, расположенного в цепи постоянного тока основного инвертора $И2$ и способного выполнять функцию форсажа при запуске СГД. Схема формирует повышенное напряжение на входе основного инвертора при замыкании переключателя S . Следует отметить, что в представленной схеме ввиду наличия компенсирующего конденсатора C на входе основного инвертора затруднено формирование узких импульсов намагничивания [5]. Схема может быть рекомендована для применения в МС, не требующих информации о положении ротора, например в электроприводах топливных насосов.

Если в инверторе реализуется закон широтно-импульсной модуляции (ШИМ) выходного напряжения, то, вводя задержку в работу ключей инвертора, т.е. «вырождая» на время номинальный алгоритм ШИМ, можно получить возрастание тока на интервале задержки. Таким образом также достигается режим перевозбуждения двигателя.

Заключение. Проведенный технико-экономический анализ показывает, что в ряде МС машины на основе материала Fe-Cr-Co способны заменить дорогостоящие электрические машины с материалом Nd-Fe-B. Разработчикам следует обратить пристальное внимание на изучение регулировочных свойств и эксплуатационных возможностей МС с электрическими машинами гистерезисного типа.

Литература

1. Савченко А.Г. Магниты Nd-Fe-B и перспективные технологии их производства // Научно-практический семинар «Научно-технологическое обеспечение деятельности предприятий, институтов и фирм» // МИСиС. – М., 2003. – С. 510–545.
2. Применение РЗМ для производства постоянных магнитов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://cniti-technomash.ru/assets/files/Doklad_konferencia_RZM.pdf, свободный (дата обращения: 11.05.2014).
3. Гарганеев А.Г. Экспериментальное исследование режима скольжения синхронно-гистерезисного двигателя // Изв. вузов. Электромеханика. – 2002. – № 2. – С. 35–42.
4. Гарганеев А.Г. Мехатронные системы с синхронно-гистерезисными двигателями / А.Г. Гарганеев, С.В. Брованов, С.А. Харитонов. – Томск: Изд-во Том. политех. ун-та, 2012. – 227 с.
5. Делекторский Б.А. Управляемый гистерезисный привод / Б.А. Делекторский, В.Н. Тарасов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
6. Делекторский Б.А. Регулирование гистерезисного гидродвигателя в процессе запуска / Б.А. Делекторский, В.Н. Тарасов // Труды МЭИ. 1974. – Вып. 187. – С. 37–41.
7. Мастяев Н.З. Гистерезисные электродвигатели. Ч. I / Н.З. Мастяев, И.Н. Орлов. – М.: МЭИ, 1963. – 220 с.
8. Гарганеев А.Г. Режим скольжения в гистерезисном электроприводе // Изв. вузов. Электромеханика. – 1989. – № 5. – С. 95–98.
9. Garganeev A.G. Autonomous electric power generation system based on self-excited electrical machine / A.G. Garganeev, S.A. Kharitonov // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2013. – № 4. – P. 56–58.
10. Ervens W. Chrom–Eisen–Cobalt–Werkstoffe: Neue Verformbare Dauermagnete // *Techn. Mitt. Krupp Forsch. Berichte*. – 1982. – В. 40, № 3. – P. 109–116.
11. Kaneko H. New Ductile Permanent Magnet of Fe–Cr–Co System / H. Kaneko, M. Homma, K. Nakamura // *AIP Conference Proceedings «Magnetism and Magnetic Materials»*. – 1971. – № 5. – P. 1088–1092.
12. Прецизионные сплавы: справочник под ред. Б.В. Молотилова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., Металлургия, 1983. – 439 с.
13. Сплавы для гистерезисных двигателей / Л.А. Кавалерова, И.А. Малько, И.М. Миляев и др. // *Электронная промышленность*. – 1987. – Вып. 6(164). – С. 40–42.
14. А.с. 179370 СССР, МКИ, НО2Р 1/00. Устройство для перевозбуждения гистерезисного электродвигателя / В.Л. Бунаков, С.Н. Стоборов (СССР). – № 927287/24-7; заявлено 28.10.64; опубл. 26.03.66. Бюл. № 5. – 3 с.
15. А.с. 1145443 СССР, МКИ4, НО2Р 7/36. Электропривод гироприбора / В.И. Авдзейко, А.Г. Гарганеев, А.С. Сухин и др. (СССР). – № 3649804/24-07; заявлено 06.010.83; опубл. 15.03.85. Бюл. № 10. – 7 с.

Гарганеев Александр Георгиевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. электротехнических комплексов и материалов
Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ)
Тел.: (382-2) 70-17-77 (доп. 1956)
Эл. почта: garganeev@rambler.ru

Падалко Дмитрий Андреевич

Аспирант каф. электротехнических комплексов и материалов НИТПУ

Тел.: (382-2) 70-17-77 (доп. 1956)

Эл. почта: padalko.da@gmail.com

Черватюк Александр Владимирович

Магистрант каф. электротехнических комплексов и материалов НИТПУ

Тел.: (382-2) 70-17-77 (доп. 1956)

Эл. почта: alexandr13@mail.ru

Garganeev A.G., Padalko D.A., Chervatyuk A.V.

Future Development of Hysteresis Synchronous Electrical Machine Mechatronic Systems

Based on the theory of hysteretic conversion of energy and magnetic material properties of Fe-Cr-Co and Fe-Co-V, it was concluded that the Fe-Cr-Co system materials are perspective to be applied in the electrical machines of mechatronic systems. Some examples of mechatronic systems with impulse excitation of rotor material are provided.

Keywords: Electrical machine, semiconductor converter, inverter, rectifier, magnetic materials.
