

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ. К 100-ЛЕТИЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В ТЕХНИКЕ

А.М. Тишин, проф. физ. факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, Группа компаний АМТ&С, д-р физ.-мат. наук

В последние десятилетие вышли сотни научных работ, в которых интенсивно обсуждается вопрос о возможности применения редкоземельных постоянных магнитов в электрических машинах различного назначения. Созданы синхронные электромашины на основе постоянных магнитов (СЭПМ) имеющие мощность до 65 МВт на низких оборотах, а также сверхвысокоскоростные маломощные СЭПМ до 1 М об./мин. Целью настоящей статьи является краткое описание текущего состояния дел в редкоземельной отрасли, а также изложение новых идей, уже используемых в автомобилестроении, авиастроении и других отраслях (например, магнитных систем на основе Хальбах цилиндров, псевдо прямого привода и др.) для снижения массо-габаритных показателей электроприводов специального назначения и повышение плотности крутящего момента. Представленный в публикации материал, позволяет также развеять фобии о стоимости постоянных магнитов, о их коррозии, старении (временной стабильности), размагничивании, устойчивости к ударным нагрузкам, радиационному воздействию и их вредном влиянии на человеческий организм.

Ключевые слова: редкоземельные постоянные магниты, системы Хальбах цилиндров, массо-габаритные показатели электроприводов, электроприводы специального назначения, технологии специального назначения, влияние магнитов на человеческий организм.

PROSPECTS FOR THE USE OF RARE-EARTH PERMANENT MAGNETS IN ELECTRIC DRIVES OF A SPECIAL PURPOSE. TO THE 100 ANNIVERSARY USE OF PERMANENT MAGNETS IN ENGINEERING

A.M. Tishin, Professor, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, AMT&C Group of Companies, Ph. D. of Physics and Mathematics

In the last decade hundreds of scientific papers have appeared, in which the question of the possibility of using rare-earth permanent magnets in electric machines for various applications is intensively discussed. Synchronous electric machines based on permanent magnets (SEMPM) Having a power of up to 65 MW at low rpm, as well as ultra-high-speed low-power SEMPMs up to 1 M rpm. The purpose of this article is a brief description of the current state of affairs in the rare-earth industry, as well as the presentation of new ideas already used in the automotive, aircraft and other industries (for example, magnetic systems based on Halbach cylinders, pseudo direct drives, etc.) to reduce the mass-dimensional Indicators of special purpose electric drives and increasing the density of torque. The informaion presented in the publication also makes it possible to dispel phobias about the cost of permanent magnets, their corrosion, aging (temporary stability), demagnetization, resistance to shock loads, radiation exposure and their harmful effects on the human body.

Keywords: rare-earth permanent magnets, Halbach systems of cylinders, mass-dimensional parameters of electric drives, electric drives of special purpose, special-purpose technologies, influence of magnets on the human body.

В настоящее время редкоземельные материалы уже широко используются в таких изделиях военной техники, как электроприводы управления оперением ракет, оптические системы наведения оружия, контроль гравитации в стабилизаторах «умных», авиационные электрогенераторы и др [1] (см рис. 1), в первую очередь, для повышения КПД, снижения массо-габаритных показателей и повышение удельных энергетических характеристик. Сравнительно полный перечень использования РЗМ в вооружениях и военной техники США дан в работе [2].



Рис. 1. Применение редкоземельных металлов по данным работы [1]

Вопрос повышения КПД электроприводов является крайне важным и имеет особое значение для России не только с технической, но и с исторической точки зрения, поскольку именно низкий КПД угольных котлов кораблей (около 6–8%), принимавших участие в битве при Цусиме, и, как следствие, нехватка угля не позволила им выбрать оптимальный (более длинный), но менее безопасный маршрут движения во Владивосток. До сих пор в современной западной литературе делается акцент на том, что главенствующим правилом является рассматривать только технические решения, не снижающие КПД. Так, например, эквивалентный объем двух генераторных установок (16 м^3) может быть сэкономлен при компоновке энергетической установки, только за счет 1% прироста эффективности генератора. Оптимизация силовой установки с газовой турбиной мощностью 80 МВт может позволить уменьшить объем топливных баков на 603.5 м^3 [3].

Одним из первых шагов на пути повышения КПД стало, начало использования электромашин в составе судовых приводов. Как хорошо известно, идея использовать электрический привод для речных и морских судов возникла у итальянского инженера Цесидо Дел Пропосто в 1903 г., который работал параллельно, но независимо от Людвиг Нобеля, работающего в Санкт-Петербурге. В 1903 г. он подал патенты во многих странах мира [4, 5]. Отметим, что в патентах предлагалось использовать электромагнитную муфту в составе привода.

Поскольку в настоящее время синхронные электромашины на основе постоянных магнитов (СЭПМ) имеют наивысшие значения КПД (который может достигать 98.5% без учета потерь в инверторе), то представляло интерес осветить современное состояние дел в данной области. История развития постоянные магнитов (ПМ) и их использования в специальной технике развивалась параллельно разработки концепции электрических приводов и насчитывает около 100 лет (по крайней мере, та ее часть, когда магниты производились руками человека, см. рис. 2 и замечания ниже по тексту). Как видно из рис 1, за данный период энергетические характеристики ПМ были улучшены приблизительно в 100 раз. На рис. 1 представлены только некоторые из наиболее распространенных марок ПМ, общее количество которых уже перевалило за 20. При этом ПМ являются только одним из магнитных материалов, используемых в современных электромашинах. Важной составной частью электромашин являются магнитомягкие магнитные материалы (больше известные широкому читателю как статорное железо), которые, при правильном подборе, существенно снижают потери на перемагничивание. Поскольку существует широкий выбор магнитомягких материалов (марка, химсостава, технологии производства и т.д.), а правильный выбор напрямую влияет на величину КПД, то автор настоящей работы планирует рассмотреть современной состояние дел в данной области в рамках отдельной работы. Так, например, магнитоstrictionные преобразователи на основе Терфенола-D (сплав с низкой магнитной анизотропией), работающие в ультразвуковом диапазоне, могут быть использованы для оценки состояния валов электромашин, имеющих трещины и другие дефекты [7]. В целом, в настоящее время идет массовое внедрение, так называемых «умных» материалов, таких как магнитные жидкости и других в изделия специального назначения [8].

Интересно отметить, что если первый природный ПМ (естественно намагниченный ударом молнии кусок магнетита Fe_3O_4 , содержащий включения маггемита $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) использовался в первых компасах на судах еще в 6-м века до нашей эры, то ферриты бария $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ и стронция $\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ до сих пор занимают 85% (в весовом выражении) мирового рынка постоянных магнитов (35% в ценовом выражении), те люди в течении 25 столетий использовали и используют ПМ на основе оксидов. Помимо массового использования в быту (ферритовые кольца для динамиков и магнетроны в СВЧ печах), ферриты нашли свое многотоннажное применение в горнодобывающей промышленности, работая в составе магнитных сепараторов на открытых площадках по 50 и более лет.

Редкоземельные ПМ широко используются при проектировании магнитных систем различного назначения (например, магнитные фокусирующие системы для клистронов, магне-

тронов, ЛБВ, акустические преобразователи и т.д.), а также тяговых СЭПМ, электродинамических преобразователей, системы привода и стабилизации антенн и решеток, приводах слежения, системах управления оперением, магнитных муфт, магнитных редукторов, систем размагничивания, датчиков положения, магнитных захватов, стопоров, предохранителей, фиксаторов и т.д. ПМ используются при проектировании магнитных подшипников, например, мощных высокоскоростных турбин, накопителей энергии на основе СЭПМ и целого ряда других изделий, включая такие оригинальные, как установка «заплат» на постоянных магнитах на танкерах при утечках нефти.

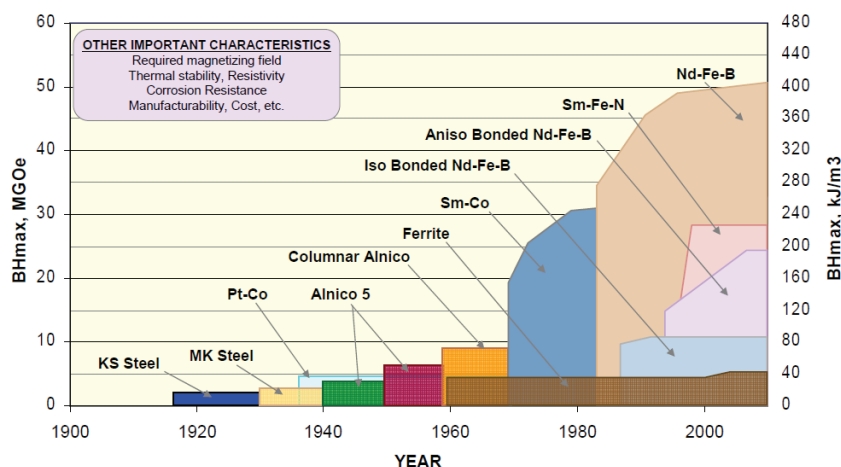


Рис. 2. История развития постоянных магнитов [6]

Так, например, разработанные ООО «ПМТиК» (ГК АМТ&С) магнитные муфты позволяют обеспечить плавное включение и выключение привода, мягкий старт, а также используются как предохранительная, легко отключаемая муфта, например, при попадании инородных предметов на выходной вал. Магнитные муфты позволяют обеспечить передачу крутящего момента в воду без прямого контакта (через немагнитную перегородку). Гибридные магнитные муфты позволяют малыми токами включать и выключать электрооборудование и экономить до 30% электроэнергии.

Системный подход ООО «Полимагнит» Северо-Запад (ГК АМТ&С) к проблеме мотор-колеса позволил решить одну из самых технически сложных задач в области электропривода на основе ПМ. Разработанный принцип поддрессоривания в сочетании с СЭПМ с радиальным магнитным потоком с высокими удельными характеристиками позволил не только решить проблему мотор-колеса, но и расширить функционал автомобиля сделав возможным разворот на месте или активное демпфирование подвески автомобиля во время движения, что существенно облегчает работу следящих приводов и позволяет синхронизировать движение нескольких тысяч колесных транспортных средств и других систем. С мотор-колесом автомобиль превращается в четыре колеса связанных с источником энергии и бортовым компьютером только электрическими проводами. А при наличии навигационной системы, системы связи, управления и контроля — это уже не автомобиль в привычном нам понимании, это электромеханический робототехнический комплекс.

В прошлом веке, постоянные магниты марки альнико, например, массово использовались при производстве индукционных электросчетчиков десятилетиями демонстрируя температурную стабильность в широкой области температур. Данная марка ПМ до сих пор используются в составе авиационных генераторов на самолетах и вертолетах, а также в со-

стае сейсмоприемников выпускаемых только в РФ до 100 тыс. шт. в мес. и применяемых для нефтеразведки, в том числе в зимнее время на замерзших болотах.

Постоянные магниты SmCo продолжительно время используются всеми крупными предприятиями РФ в составе электроприводов погружных нефтяных насосов на глубинах до 3.52 км, давлениях в скважине до 1000 атм., с доказанным на практике ресурсом работы электромашин до 1100 суток [9], а также в СВЧ электронике и связи в составе магнитных фокусирующих систем для клистронов и магнетронов различного назначения. Использование магнитов Sm-Co в электромашинных гироскопах спутников связи обусловлено тем, что их магнитные свойства не подвержены радиационному воздействию. При этом необходимо отметить, что такие марки ПМ как альнико (в российской терминологии ЮНДК), ферриты и самарий-кобальт SmCo используются в технических устройствах как гражданского, так и военного назначения от 75 до 45 лет соответственно (рис. 1).

Таким образом, анализ применения ПМ, позволяет сделать вывод, что ПМ длительное время используются в составе сложных технических изделий, в том числе в тяжелых условиях эксплуатации и, при соблюдении технологии изготовления и правильном использовании в составе изделия, обеспечивают длительное, стабильное функционирование изделия в широкой области температур.

При правильном проектировании изделия и подборе марок, ПМ практически не подвержены старению (временной стабильности), коррозии, радиации, механическим воздействиям, размагничиванию (размагничивающее поле должно быть как минимум на 2 кЭ меньше величины коэрцитивной силы при рабочей температуре) и не оказывают вредного влияния на человеческий организм, при соблюдении разумных предосторожностей [10]. При этом необходимо отметить, что если в зазоре электромшины в замкнутом и недоступном для человека пространстве, как правило, генерируется магнитная индукция в приблизительном диапазоне 0.4–2.35 Тл, то в широко используемых в настоящее время в медицине магнитных томографах, магнитные поля достигают напряженности 3 Тл, а обследование различных частей тела человека, включая головной мозг, продолжается до 1 часа и более.

ПМ марки NdFeB были открыты случайно в научно-исследовательские лаборатории ВМС США в 1981 г. при попытке улучшить свойства магнитомягких магнитных материалов [6]. Сразу после разработки технологии получения и начала массового производства редкоземельных (РЗМ) ПМ марки NdFeB (первый магнит NdFeB был продан только в 1984 г.) возник вопрос о возможности применения данных марок ПМ, как в общепромышленных изделиях в быту, автомобилестроении, так и в приводах различного назначения. Дальнейшее развитие показало, что более трети выпускаемых в настоящее время РЗМ ПМ используется при производстве именно электромашин (рис 3.). При этом, к настоящему времени созданы синхронные машины на основе постоянных магнитов (СМПМ) имеющие мощность до 65 МВт на низких оборотах, а также сверхвысокоскоростные маломощные СМПМ до 1 М об./мин. Основные физические и механические свойства всех ПМ сейчас хорошо изучены [11], редкоземельные ПМ доступны [12] и могут быть использованы в проектировании оборудования. Основы теории магнитокристаллической анизотропии, являющейся основой создания высококоэрцитивных магнитов, изложены в нашей работе [13].

Необходимо отметить, что если ранее некоторые производители магнитов выстраивались в США в очередь, чтобы заплатить миллионы долларов за право на производство спеченных NdFeB магнитов, то сейчас эра доминирования Китая стала реальностью, но большинство наблюдателей считают, что китайские инвестиции в РЗМ отрасль были чрезмерны, поскольку мощности по производству NdFeB загружены менее 50%, в то время как доля китайских производителей на мировом рынке в настоящее время превышает 80% [14] и упадет ниже 70% только к 2018 г. При этом, не менее 10 из 200 китайских производителей могут выпускать до 5 тыс. тонн РЗМ магнитов в год при годовой емкости рынка РФ на уровне 200 т. Таким образом, нет сомнений в том, что обилие производителей РЗМ ПМ смогло бы

держат цены на рынке на стабильном уровне (рис. 4). Однако, манипуляции китайского правительства с ценами на сырье РЗМ в 2011 году привели к появлению ряда альтернативных поставщиков РЗМ сырья вне Китая и прежде всего в США (Molycorp) и Австралии (Линас). Molycorp, ранее планировавший ежегодный выпуск до 40 тыс. тонн РЗМ оксидов, подал заявление о банкротстве в июне 2015 года и, таким образом, возникновение новых проблем в мире с РЗМ сырьем вполне возможно, в особенности при использовании данной сырьевой зависимости в политических целях, однако подобный вариант развития событий в настоящих условиях сближения отношений России и Китая маловероятен. Однако, необходимо признать, что по сравнению с базовыми металлами редкоземельные, как правило, производятся небольшим числом крупных производителей и, с глобальной точки зрения, имеют относительно более высокий риск поставки.

Rare Earth Magnets by Application, 2012 year-end forecast

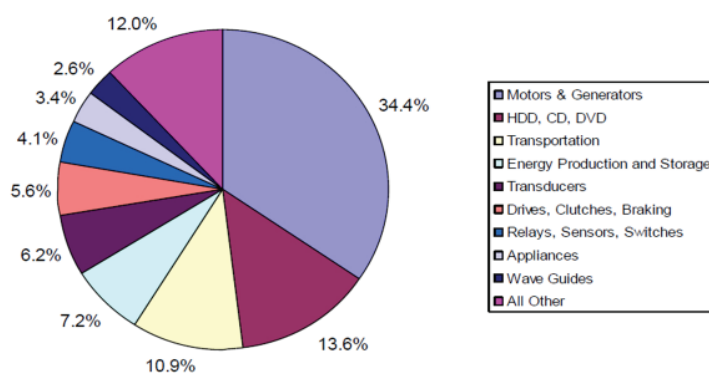


Рис. 3. Сравнительная диаграмма различных применений редкоземельных постоянных магнитов [5]

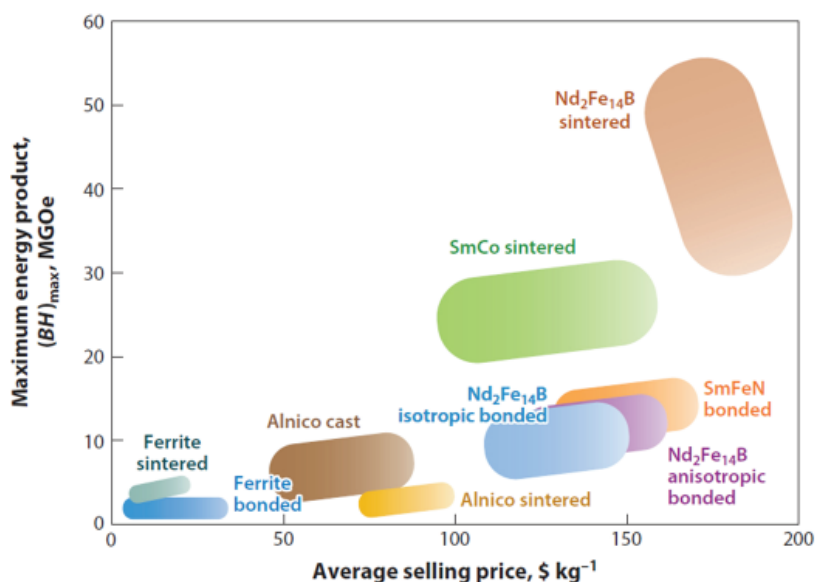


Рис 4. Зависимость максимального энергетического произведения магнитов от их цены за кг на рынке США в 2012 г. [15]

В этой связи шаги Минпроторга РФ по запуску подпрограммы «Технологии редких и редкоземельных металлов» государственной программы «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» по развитию РЗМ отрасли в РФ вполне обоснованы. Прогнозные ресурсы РЗМ в России оцениваются в 5,2 млн тонн в пересчете на сумму РЗМ оксидов. К 2018 году ожидается выпуск до 10 тыс. тонн оксидов РЗМ в год. [16]. Весьма активные шаги в данном направлении предпринимает ОАО «Акрон», который в 2011 году построил собственную опытную установку по выделению концентрата редкоземельных элементов из технологических потоков переработки апатитового концентрата с дальнейшим получением пяти продуктов — лантана, церия, неодима, концентратов легкой и тяжелой групп РЗМ элементов [17]. В 2014 г. завершено строительство производственной установки мощностью 200 т. оксидов в год. Текущие вложения в проект составили около 2 млрд руб.

Таким образом, все это дает надежду на появление собственной РЗМ ресурсной базы в России и, таким образом, необходимо упреждающие широкомасштабное начало работ по разработке и массовому внедрению продуктов высоких переделов РЗМ является своевременным.

Основным держателем технологии на производство РЗМ ПМ является Hitachi Metals, которая владеет более 620 патентами и с 2012 г. судится с десятками компаниями в США, пытаясь привлечь их к ответственности за незаконное использование своих патентов. На территории Российской Федерации компании NEOMAX (слияние с Hitachi) и NIPPON STEEL (слияние с Sumitomo) не имеют действующих патентов по спеченным постоянным магнитам марки NdFeB. Три действующих патента компании NEOMAX посвящены перспективным постоянным магнитам, которые включают в себя магнитнотвердую фазу с кристаллической структурой типа $R_2Fe_{14}B$ и магнитномягкую фазу. Глобальный мировой рынок РЗМ магнитов оценивается в 20 млрд долл. в то время как на Рождество американские потребители тратят более \$ 600 млрд [14]. Мало того, это даже меньше затрат американцев на косметику и препараты для снижения веса (\$50 млрд и \$60 млрд в год соответственно). Во всем мире существует более 1500 производителей, дистрибьюторов и изготовителей изделий на основе различных ПМ с продажами в среднем по \$13 млн в год на компанию.

Вначале многие потребители больших объемов РЗМ ПМ и, в частности, производители жестких дисков компьютеров, автомобильных компонент, приборов и ветряных турбин, рассматривали РЗМ ПМ как простое сырье и делали все возможное, чтобы использовать свои привлекательные объемы для достижения максимально низких цены. Этим в настоящее время страдает и ряд российских потребителей. Однако современные высокотехнологичные продукты не только используют марки магнитов специально скорректированные под конкретное изделие и позволяющие добиться оптимальных эксплуатационных характеристик изделия, но и требуют тщательного контроля целого ряда его свойств высококвалифицированными специалистами с применением поверенного современного оборудования. Мало того, часто бывает, что ПМ стандартных марок, приобретенные из двух разных поставщиков и испытанные в одинаковых условиях, показывают существенно разные магнитные характеристики и, в особенности, в условиях постоянного термоциклирования в процессе эксплуатации. Ведь само название $Nd_2Fe_{14}B$ это только торговая марка магнита, в химический же состав РЗМ ПМ определенной марки данного типа ПМ помимо Nd, Fe и B, также часто могут входить Gd, Dy, Tb, Y, Co, Cu, Ga, Al, Nb и другие. Необходимо отметить, что ряд китайских производителей пытается, не только заменить более дорогостоящие материалы дешевыми, но и зачастую нарушает технологий производства. Однако условия и время температурной обработки магнитов существенно влияют на ширину и форму петли гистерезиса (данные для Sm_2Co_{17} представлены, в качестве примера, на рис. 6). Sm_2Co_{17} представляет собой сложный сплав, содержащий также добавки Fe, Cu и Zr, которые в совокупности с окончательной термообработкой могут обеспечить оптимальную стабильную микроструктуру сплава, которая является комбинацией фазы 2:17 и фазы 1:5 по границам зерен. Добавление гадолиния в состав данного сплава позволяет добиться практически ну-

левого температурного коэффициента. Поскольку постоянные магниты марки $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ содержат около 50% кобальта, то последний рост цен на кобальт оказывает существенное влияние на стоимость производства данной марки магнитов.

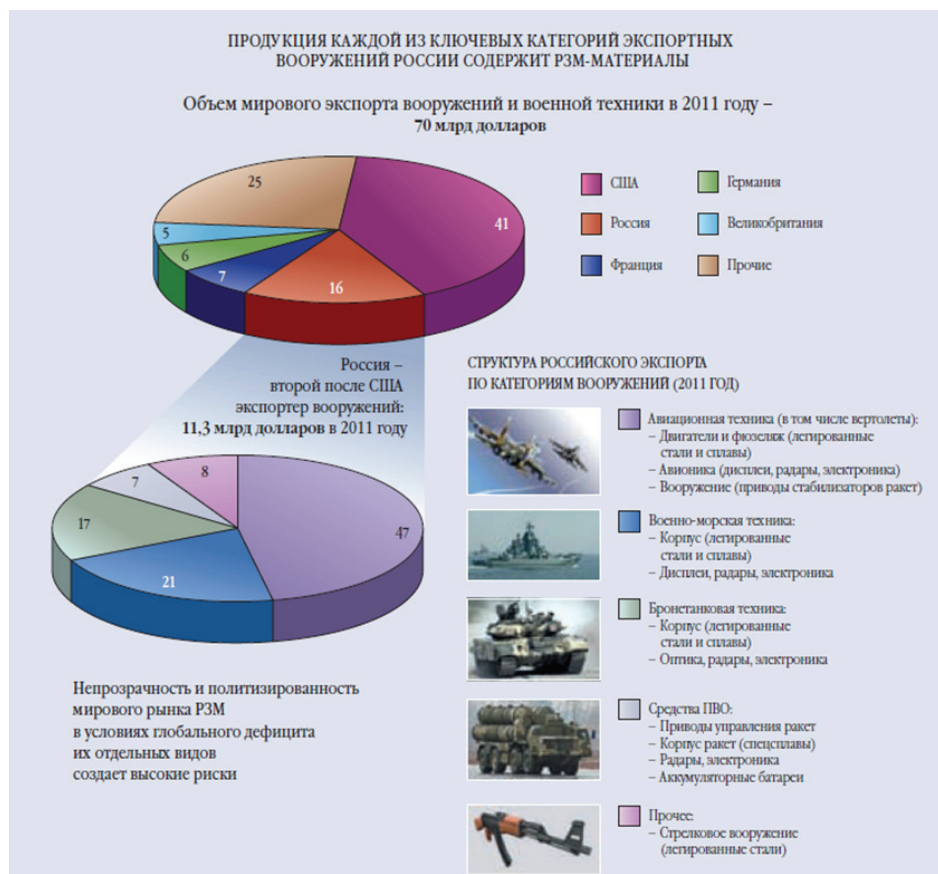


Рис. 5. Применение РЗМ в вооружении и военной технике РФ [1]

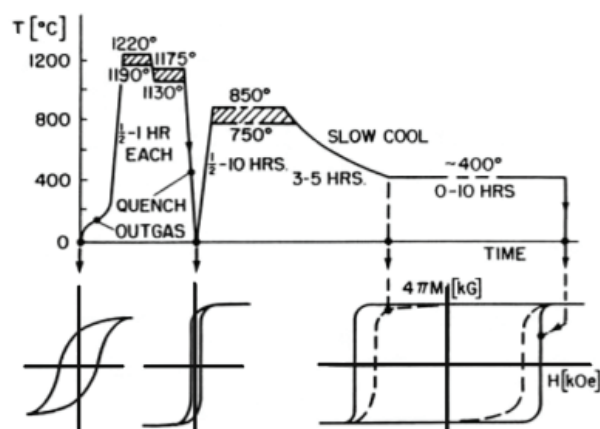


Рис. 6. Типичный температурный профиль для спекания и последующей термической обработки постоянного магнита марки $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ и влияние термообработки на ширину и форму петли гистерезиса [18]

Необходимо отметить, что для устранения зависимости от редкоземельного сырья, в последние годы в мире выполнен большой объем работ по разработке высокоэнергетичных ПМ не содержащих РЗМ элементы. Достижение очень сильной магнитной анизотропии в 3d материалах является сложной, но не невыполнимой задачей [19], но это трудно, потому, что нет общего рецепта как этого достичь. В работе [19] предпринята попытка исследования менее изученных 3d соединений, на примере $(\text{Fe}_{0.7}\text{Co}_{0.3})_2\text{V}$. Показано, что в принципе, нет никаких фундаментальных причин, почему 3d магнит не может обладать гораздо более высокой энергией анизотропии, чем несколько МДж м^{-3} , т.е. как в лучших известных материалов в настоящее время. В работе [20] показано, что постоянные магниты с частичным замещением неодима церием и железа кобальтом имеют значения коэрцитивной силы сопоставимые с высокомарочными РЗМ ПМ легированными диспрозием. Использование Се и Со может в будущем помочь исключить необходимость в добавлении дорогостоящего Dy для увеличения коэрцитивной силы, по крайней мере при производстве низких марок магнитов, однако вряд ли приведет к полной замене всех высокотемпературных марок [20]. Себестоимость производства церий содержащих магнитов также существенно меньше.

Один из перспективных методов производства наноструктурированных магнитов запатентован ООО «ФМТ» (ГК АМТ&С) совместно с учеными НИТУ «МИСиС» [21].

Как упоминалась выше, ПМ магниты могут работать в широкой области температур. На рис. 7. приведены температурные диапазоны возможного технического использования ПМ 4-х различных марок. Как видно из рис. 7, если ПМ марок альнико и SmCo могут быть использованы в крайне широком диапазоне от приблизительно $+500-550^\circ\text{C}$ до практически температуры жидкого гелия (приблизительно -269°C), то область температур ПМ марки NdFeB лежит в диапазоне от $+220^\circ\text{C}$ до -125°C , а ферритов ограничена диапазоном от -40°C до приблизительно 220°C . Важно отметить, что если максимальное энергетическое произведение 45 марки NdFeB возрастает при уменьшении температуры до величины 55 МГсЭ при минус 150°C и резко падает при нагреве, то для магнитов альнико данная величина незначительно изменяется во всем приведенном на рис. 8 температурном диапазоне от -150 до 300°C . При этом в отличие от всех других марок постоянных магнитов, величина коэрцитивной силы стронциевого феррита $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ заметно снижается при понижении температуры. Положительный температурный коэффициент по коэрцитивной силе $\sim +9 \text{ Э}/^\circ\text{C}$ (величина H_{cj} возрастает от 3,2 кЭ при 0°C до 5,9 кЭ при 300°C) [22], имеющий место в магнитотвердых ферритах, не запрещает их использования в электромашинах в Российской Федерации, но делает это проблематичным при температурах -40°C и существенно затрудняет холодный пуск, например, стартеров. Именно поэтому, а также для снижения массо-габаритных характеристик (это является весьма важным для подкапотного пространства современных западных автомашин), такие производители как Bosh перешли на использование магнитов марки NdFeB в автомобильных стартерах и генераторах.

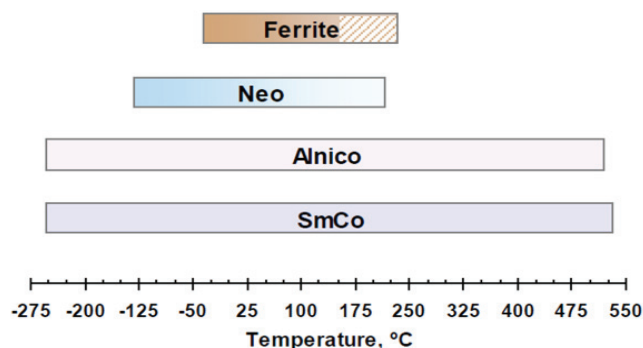


Рис. 7-а. Температурные области применения постоянных магнитов различных марок

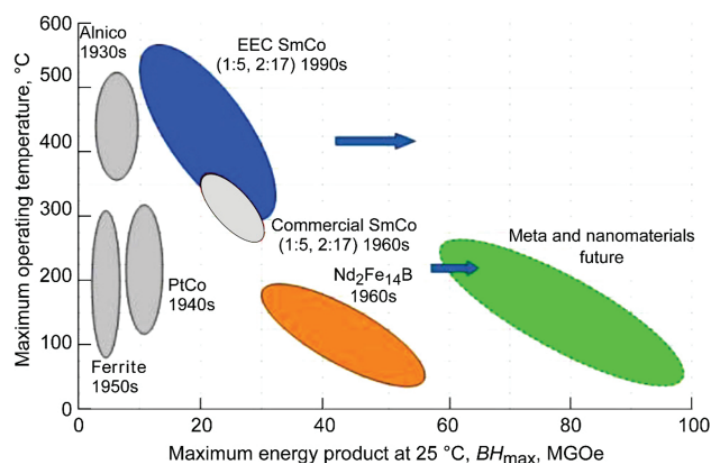


Рис. 7-б. Зависимость максимального энергетического произведения от температурного диапазона для различных марок магнитов по данным корпорации EEC

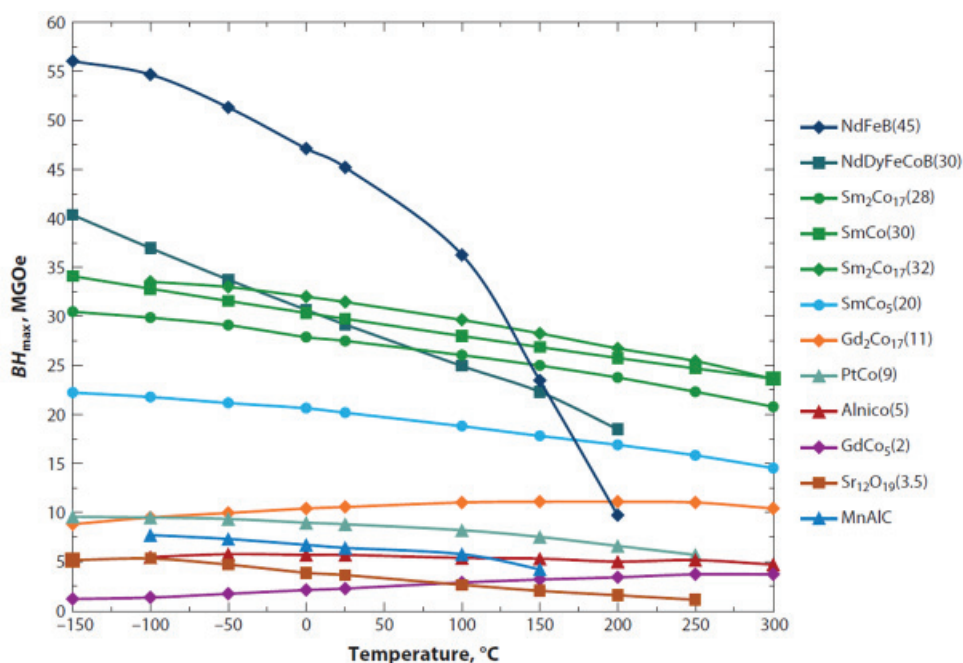


Рис. 8. Зависимость максимального энергетического произведения магнитов от температуры [14]

Синхронные электромашин, которые используют РЗМ ПМ несколько дороже из-за высокой стоимости РЗМ элементов, но как отмечалось выше, более эффективны (имеют более высокий КПД и удельные энергетические параметры) и имеют меньшие габариты, чем электромашин использующие другие типы ПМ и асинхронные и явнополюсные электромашин, а также значительно меньший потребляемый ток и ток холостого хода. Однако, эффективность электромашин с РЗМ ПМ может быть несколько (около 1%) снижена из-за низкого электрического сопротивления металлических РЗМ ПМ, что, при не правильном

проектировании, может повышать потери от вихревых токов в электромашине. Эта проблема не проявляет себя в электромашин, которые используют гораздо более слабые ферритовые ПМ и магнитопласты, которые являются неметаллическими и непроводящими и, таким образом, не испытывают диссипативных потерь от вихревых токов.

Ферритовые ПМ изготовлены из недорогого сырья, и являясь оксидами, имеют отличную коррозионную стойкость, но имеют приблизительно в 10 раз более низкие энергетические показатели и для достижения требуемых рабочих характеристик в таких электромашин требуется использовать по массе в 6 раз больше ПМ в роторе и до 4 раз больше меди в статоре, по сравнению с электромашин на основе РЗМ ПМ, что ограничивает их применение, например, в гибридных транспортных средствах. Но даже такое увеличение массы не может обеспечить необходимую мощность в генераторном режиме в случае необходимости. В том случае, если требование по массо-габаритным показателям не является ключевым, и акцент делается на цену изделия, то вся кажущаяся экономия за счет использования ферритовых ПМ, нивелируется за счет увеличения стоимости используемой в обмотках статора меди и как результат стоимость активных материалов может даже увеличиться до 50%. Мало того, например, для ветрогенераторов стоимость дополнительного конструктива для поддержки более массивной гондолы, содержащий генератор на основе феррита, превышает всю возможную экономию за счет исключения РЗМ ПМ из состава электромашин.

Таким образом, единственной разумным направлением для спецтехники, является применение синхронных электромашин с РЗМ ПМ. Показано, что оптимизация конструкции позволяет существенно снизить потребность в ПМ марки NdFeB в высокооборотных электромашин различной мощности в диапазоне от 100 кВт до 20 МВт до уровня 35–110 кВт на 1 кг ПМ соответственно. В мире ведут работы направленные на устранение зависимости от источников редкоземельного сырья, снижения стоимости материалов используемых при производстве РЗМ ПМ, а также снижении стоимости производства. Однако не ожидается, что производство подобных постоянных магнитов начнется в ближайшие несколько лет, но вполне возможно в обозримом будущем.

Другим важным направлением, на которых сконцентрированы усилия инженеров, конструкторов и ученых является максимально возможное снижение максимальной рабочей температуры электромашин и, таким образом, уменьшение рабочей температуры ПМ и требуемой величины коэрцитивной силы магнита, что равносильно уменьшению процентного содержания диспрозия и снижению цены ПМ.

На рис. 9 представлены кривые размагничивания во 2-м квадранте 4-х основных типов ПМ (слева), а также зависимости для типичной 36 марки NdFeB с максимальной рабочей температурой 175°С. Как видно из рис. 9, зависимость $B(H)$ для марки NdFeB 45 марки без добавления диспрозия (прямая пунктирная линия на левом рисунке) имеет колено при $H = 12$ кЭ, что указывает на нестабильность магнита к воздействию размагничивающего поля даже при комнатной температуре. Таким образом, данная марка не может быть использована в СЭПМ. При добавлении 4% диспрозия рабочая температур 36 марки NdFeB повышается и аналогичное колено на зависимостях $B(H)$ (рис. 9, справа) появляется только при 175°С, что означает данная марка магнита может быть использована в составе СМПМ до данной температуры [23].

На рис. 10 представлен характер изменения положения нагрузочной характеристики и положения рабочей точки магнита B_d/H_d (точки пересечения нагрузочной линии и кривой $B(H)$) от соотношения длины L и диаметра D цилиндрического постоянного магнита 33 марки NdFeB для диапазона температур 25–200°С. Видно, что до температуры 175°С может быть использован только магнит с $L/D \sim 0.7$ [23, 24], поскольку магниты с большими размагничивающими факторами ($L/D < 0.7$) имеют рабочие точки расположенные близко к колону и не стабильны к размагничиванию в особенности при пиковых мощностях и перегреве СМПМ. Магниты данной марки с большим размагничивающим фактором при $L/D \sim 0.15$ и

$B_d/H_d = 1.5 \text{ кЭ}/7.9 \text{ кЭ} \sim 0.2$ при 150°C , могут быть использованы только до 100°C . Т.е. если рабочая точка выбрана не правильно, то плоские магниты типа $L/D=0.15$ использованы при 125°C быть не могут, поскольку нагрузочная линия при 150°C попадает на колено. И это не связано с плохим качеством магнитов, как мы только что сказали, ПМ данной марки при правильном выборе рабочей точки могут быть использованы и при 175°C .

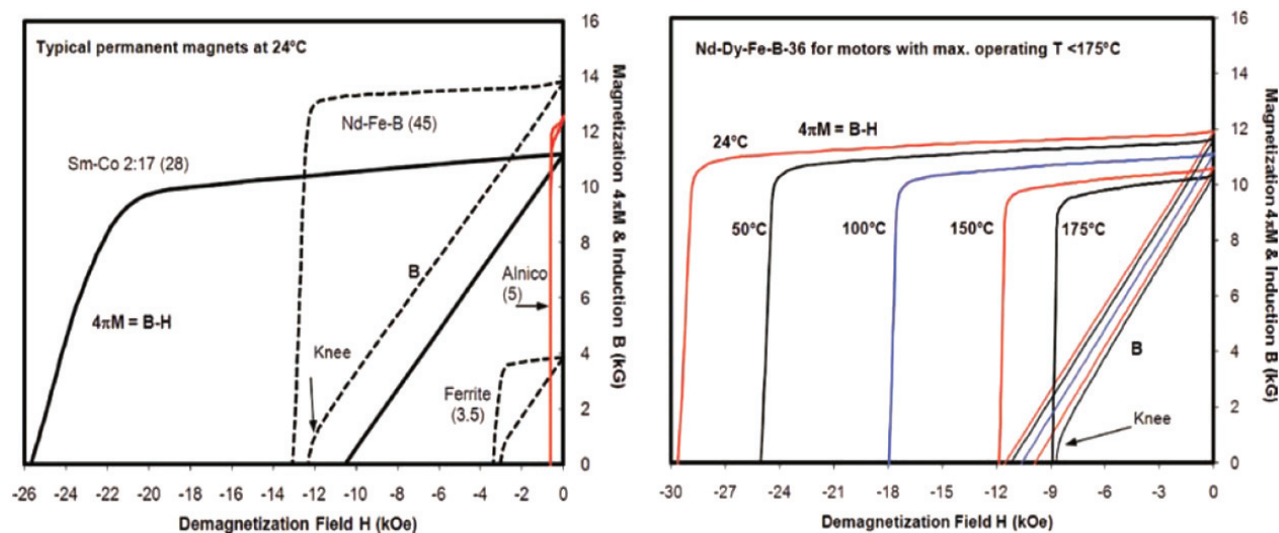


Рис. 9. Кривые размагничивания $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, NdFeB , альнико 5 и феррита (слева) и для типичного марки постоянных магнитов NdFeB , применяемых в электродвигателях (справа) [23]

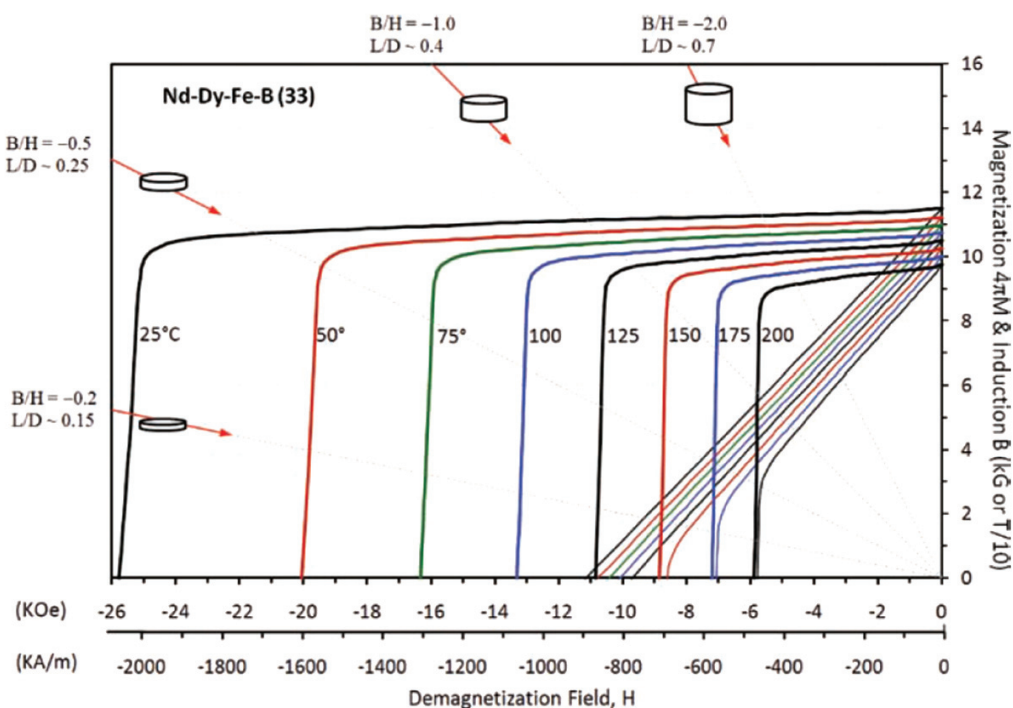


Рис. 10. Зависимость расположения нагрузочной линии от формы магнита NdFeB (соотношение длины L и диаметра D) [23, 24]

Мы решили уделить внимание данному вопросу по следующим причинам. Многие производители СМПП, предъявляют требование по термостабильности ПМ входящих в состав электроприводов различного назначения, что связано с желанием воспроизведения характеристик изделия после неоднократного нагрева и длительной работе при максимальной рабочей температуре. Однако не нужно путать термины термостабилизации и термостабильности. По мнению многих конструкторов термостабильность достигается за счет термостабилизации ПМ на заводе изготовителе, за счет нагрева и последующей выдержки ПМ в течении 1–2 часов при максимальной рабочей температуре, например, 120° или 175°С.

Необходимо отметить, что это не правильная точка зрения. Однократный или многократный нагрев ПМ до рабочей температуры, например, 120°С должен приводить к незначительным изменениям основных магнитных характеристик термостабилизированного магнита с маленьким размагничивающим фактором. Термостабилизация, как правило, достигается за счет изменения химического состава ПМ и соблюдения технологии его изготовления, например, за счет, как упоминалось выше, добавления диспрозия для увеличения коэрцитивной силы и правильной температурной обработки в процессе изготовления. Наиболее частой причиной нетермостабильности магнита является экономия китайских производителей на дорогом диспрозии. Отсутствие или недостаточное количество дорогостоящего диспрозия в химсоставе ПМ приводит к резкому снижению величины коэрцитивной силы даже при комнатной температуре (рис. 11) и к частичному или полному размагничиванию магнита при нагреве до рабочей температуры, например 120°С. Проверить термостабильность ПМ можно только на образцах с маленьким размагничивающим фактором, при этом размеры образца могут крайне существенно отличаться от геометрических размеров ПМ, используемого в составе изделия. В заводских условиях проверка термостабильности магнита может быть проверена непосредственно в составе изделия или в имитаторе магнитной цепи изделия. При этом, если это возможно, изделие полностью собирается с ПМ «на сухую» без применения клея и выдерживается при рабочей температуре. Потокосцепление определяется до сборки и после разборки изделия после окончания проверки.

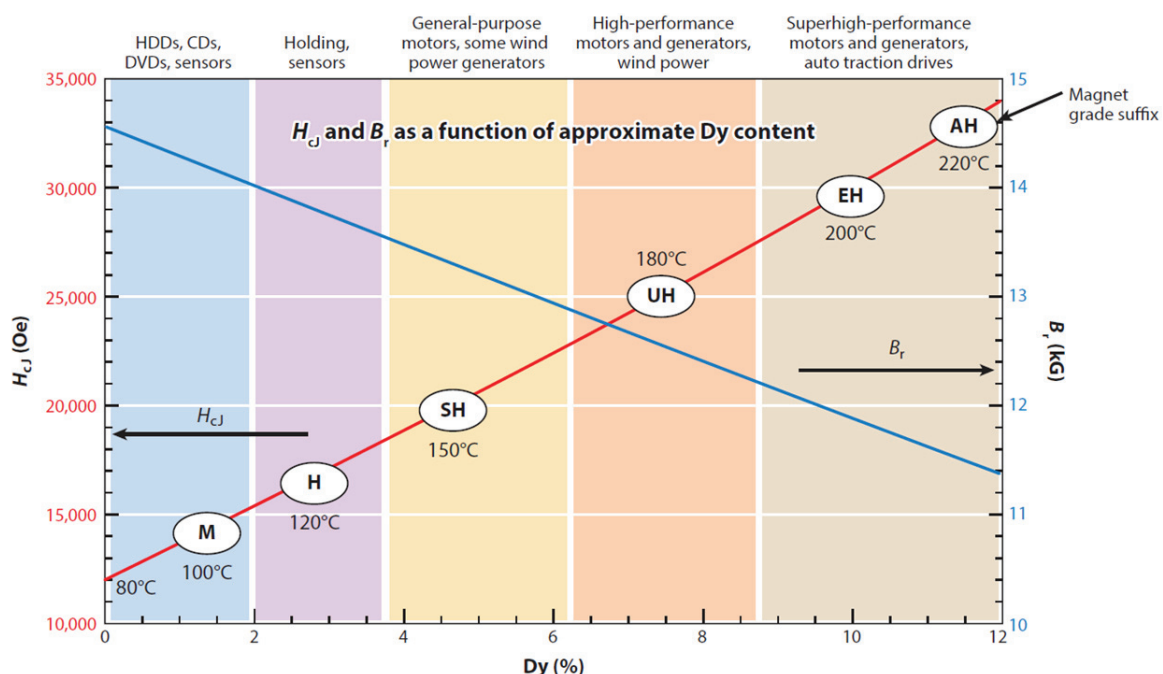


Рис. 11. Зависимость коэрцитивной силы и остаточной индукции от содержания диспрозия в постоянном магните [15]

Заметный вклад в разброс свойств магнитов при нагреве могут давать технологические особенности изготовления, и в частности, вырезание плоского магнита из большого блока при его неравномерной пропрессовке (неоднородной текстуре) и неравномерном промагничивании. Это, в частности, приводит к тому, что требуются особые технологические подходы при изготовлении ПМ при необходимости точного совпадения магнитной и геометрической осей ПМ, используемых в составе центрифуг, в особенности после нагрева до высоких температур.

Необходимо учитывать, что на рабочие характеристики СМПМ влияет не только форма магнита, но и характер расположения ПМ внутри ротора (рис. 12). По данным компании Toyota, V-образное расположение магнитов приводит к увеличению момента на 15% (с 350 до 400 Нм, рис. 12, слева) и мощности в 1.5 раза (от 33 до 50 кВт, рис. 12, справа). По опыту авторов работы, V-образное магнитов расположение также повышает управляемость СМПМ.

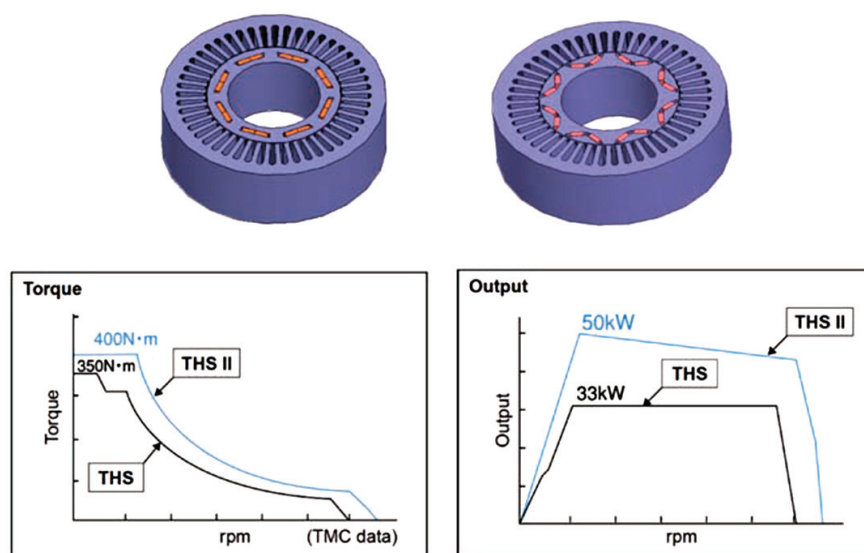


Рис. 12. Характер зависимости крутящего момента (слева) и мощности (справа) от характера расположения магнитов в роторе в мотор-генераторе Prius по данным компании Toyota

TMS – плоский вариант слева сверху. TMS II-V образный вариант справа сверху [24]

Как видно из рис. 13, развитие ПМ за последние годы привело к снижению объема магнитов требуемых для создания магнитного поля 1 кЭ на расстоянии 5 мм в 65 раз.

В настоящее время усилия ученых направлены на увеличение величины максимального энергетического произведения ПМ, которое может быть использовано при работе СМПМ. Результаты численного моделирования предсказывают появление ПМ с максимальным энергетическим произведением 72 МГсЭ (напомним что, в настоящее время для использования в СЭПМ доступны только высокотемпературные марки ПМ с (ВН)max до 42 МГсЭ).

На основе данных работы [25] можно ожидать, что NdFeB магниты с максимальным энергетическим произведением (ВН)max на уровне 58 МГсЭ будут доступны промышленности к 2027 г. (рис. 14). К 2042 г. ПМ марки NdFeB, вероятно, выберут свой полный потенциал 64 МГОе. При этом верхняя граница Вг около 1,65 Т, достигнутая к 2042 г. будет на 10 процентов выше, чем для магнитов, доступных сегодня. Это приведет к существенному увеличению (до 50%) как крутящего момента, так и мощности СЭПМ.

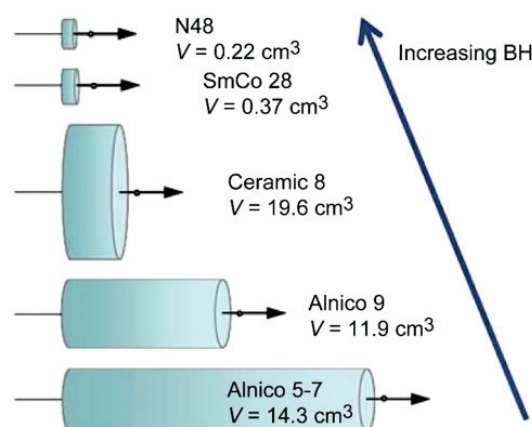


Рис. 13. Относительный размер и форма ПМ, которые могут создать магнитное поле 1кЭ на расстоянии 5 мм от поверхности полюса [5]

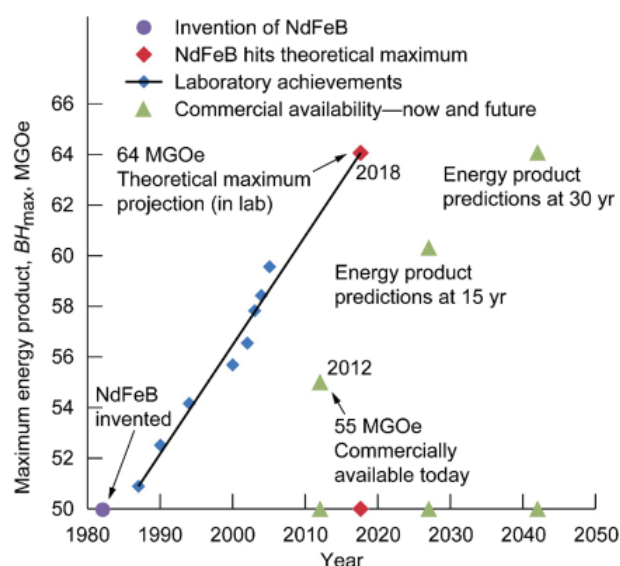


Рис. 14. История и прогноз развития ПМ марки NdFeB [25]

Таким образом, Российская наука имеет долгосрочный задел в исследовании редкоземельных ПМ [11, 13, 26]. Проведенные автором с коллегами работы по созданию действующих макетов и прототипов показали, что существующая актуальнейшая задача создания отечественной элементной базы синхронных электроприводов на основе редкоземельных постоянных магнитов для спецтехники, 4-х и 8-ми-осных колесных платформ, силовых роботов и робототехнических комплексов, с технической точки зрения, может быть успешно решена. Формирование в России собственной элементной базы в области силового электропривода открывает новые возможности в области проектирования для КБ и проектных организаций по созданию новых типов изделий включая шагающих роботов или аватаров.

Благодарности: Автор благодарен техническому директору ООО «Полимагнит» канд.техн. наук М.М. Надеву за полезные советы и обсуждения материалов данной работы.

Список литературы

1. Михайлов Ю.М. Специализированный юбилейный выпуск сборника «Федеральный справочник. Оборонно-промышленный комплекс России», 2014, Том 10.
2. Available at: <http://eurasian-defence.ru/sites/default/files/doc/rz2us.pdf>.
3. Davey K.R., Ship component optimization. Submitted to Marine Technology Society Journal, August 31, 2004, 16 p. (CEM Publications, 2015).
4. Patentschrift «Schiffsschraubenantrieb», No. 147927, ausgegeben 19.1.1904, patentiert ab 4.4.1903, Berlin. Koehler H.W., Oehlers W. 95 years of diesel-electric propulsion: a mekeshift solution to a modern propulsion system. 2th International Diesel electric propulsion, 26–29 April 1998, Helsinki, Finland, 1998, pp. 1–24.
5. Shaw S., Constantinides S. Permanent Magnets: the Demand for Rare Earths, Presentation at 8th International Rare Earths Conference, Hong Kong, November 2012.
6. Constantinides S. The Elements of Magnetism, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 1492, pp. 35–46.
7. Kim Y., Kim Y.Y. A novel Terfenol-D transducer for guided-wave inspection of a rotating shaft. Sensors and Actuators A, 2007, vol. 133, pp. 447–456.
8. Sheno A. et al. Smart Materials in the Marine Environment. A State of the Art Review, 2009, SMART, 49 p.
9. Available at: http://borets.ru/files/listovki/pcp_pmm1.pdf.
10. Icnirp guidelines. On limits of exposure to static magnetic fields. Published in: Health Physics 96(4), pp. 504–514, 2009.
11. Лилеев А.С., Надеев М.М., Тишин А.М. Магнитотвердые материалы, Большая российская энциклопедия, 2011, т. 18, ISBN 978-5-85270-351-4, с. 403.
12. Available at: <http://www.amtc.ru/production/magnet>.
13. Kuz'min M.D., Tishin A.M. Theory of crystal-field effects in 3d-4f intermetallic compounds, Handbook of Magnetic Materials, 2008, vol. 17, ch. 3, Elsevier Science BV.
14. Available at: <http://www.magneticmagazine.com/main/articles/what-the-heck-happened-to-the-magnet-industry/#more-8677>. Available at: <https://roskill.com/product/rare-earths-market-outlook-to-2020-15th-edition-2015>.
15. McCallum R.W., Lewis L.H., Skomski R., Kramer M.J., Anderson I.E. Practical Aspects of Modern and Future Permanent Magnets, Annu. Rev. Mater. Res. 2014, vol. 44, pp. 451–77.
16. Available at: <http://rostec.ru/news/1738>.
17. Available at: http://report2014.acron.ru/acron/annual/2014/gb/Russian/pdf/Chapter1_rus.pdf.
18. Strnatv K.J., Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets, (Ferromagnetic Materials, vol. 4, E.P. Wohlfarth and K.H.J. Buschow, ed., Elsevier Science Publishers B.V., 1988), p. 184.
19. Kuz'min M.D., Skokov K.P., Jian H., Radulov I., Gutfleisch O. Towards high-performance permanent magnets without rare earths. J. Phys.: Condens. Matter 26 (2014) 064205 (5pp) doi:10.1088/0953-8984/26/6/064205.
20. Pathak A.K., Khan M., Gschneidner Jr. K.A., McCallum R.W., Zhou L., Sun K., Dennis K.W., Zhou C., Pinkerton F.E., Kramer M.J., Pecharsky V.K. Cerium: An Unlikely Replacement of Dysprosium in High Performance Nd–Fe–B Permanent Magnets. Adv. Mater. 2015, vol.27, pp. 2663–2667.
21. Надеев М.М., Менушенков В.П., Савченко А.Г. Композиция для получения спеченного постоянного магнита, спеченный постоянный магнит и способ его получения, Евразийский патент № 014583, Дата выдачи: 30 декабря 2010 г.
22. Walmer M.S., Chen C.H., Walmer M.H., IEEE Trans. Magn., 2000, vol. 36, p.3376.
23. Chen C.H. Engineering magnetic materials and their applications, Course MAT-512, University of Dayton, 2006–2010.
24. Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E, Chen C.H., Sankar S.G., Liu J.P. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient Adv. Mater. 2011, vol. 23, pp. 821–842.

25. Dever T.P. et al. Assessment of Technologies for Noncryogenic Hybrid Electric Propulsion. NASA/TP—2015-216588, 2015, 46 p.

26. Дерягин А.В. Редкоземельные магнитомягкие материалы, УФН, 1976, т. 120, вып. 3, с. 393–438.

References

1. Mikhailov Y.M. (2014) *Spetsializirovanny yubileynyy vypusk sbornika «Federal'nyy spravochnik. Oboronno-promyshlennyy kompleks Rossii»* [Specialized anniversary issue of the collection «The Federal Directory: The Defence Industrial Complex of Russia»], vol. 10.

2. Available at: <http://eurasian-defence.ru/sites/default/files/doc/rz2us.pdf>.

3. Davey K.R. (2015) Ship component optimization. Submitted to Marine Technology Society Journal, August 31, 2004, 16 p. (CEM Publications, 2015).

4. Patentschrift «Schiffsschraubenantrieb», No. 147927, ausgegeben 19.1.1904, patent. 4.4.1903, Berlin. Koehler H.W., Oehlers W. 95 years of diesel-electric propulsionforma mekeshift solution to a modern propulsion system. 2th International Diesel electric propulsion, 26–29 April 1998, Helsinki, Finland, 1998, pp. 1–24.

5. Shaw S., Constantinides S. (2012) Permanent Magnets: the Demand for Rare Earths, Presentation at 8th International Rare Earths Conference, Hong Kong, November.

6. Constantinides S. The Elements of Magnetism, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 1492, pp. 35–46.

7. Kim Y., Kim Y.Y. (2007) A novel Terfenol-D transducer for guided-wave inspection of a rotating shaft. Sensors and Actuators A, vol. 133, pp. 447–456.

8. Sheno A. et al. (2009) Smart Materials in the Marine Environment. A State of the Art Review, SMART, 49 p.

9. Available at: http://borets.ru/files/listovki/pcp_pmm1.pdf.

10. Icnirp guidelines. On limits of exposure to static magnetic fields. (2009) Published in: Health Physics 96(4), pp. 504–514.

11. Lileev A.S., Nadeev M.M., Tishin A.M. (2011) *Magnitotverdye materialy, Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya* [Hard magnetic materials. The Great Russian Encyclopedia], vol. 18, ISBN 978-5-85270-351-4, p. 403.

12. Available at: <http://www.amtc.ru/production/magnit>.

13. Kuz'min M.D., Tishin A.M. (2008) Theory of crystal-field effects in 3d-4f intermetallic compounds, Handbook of Magnetic Materials, vol. 17, ch. 3, Elsevier Science BV.

14. Available at: <http://www.magnetismmagazine.com/main/articles/what-the-heck-happened-to-the-magnet-industry/#more-8677>. Available at: <https://roskill.com/product/rare-earths-market-outlook-to-2020-15th-edition-2015>.

15. McCallum R.W., Lewis L.H., Skomski R., Kramer M.J., Anderson I.E. (2014) Practical Aspects of Modern and Future Permanent Magnets, Annu. Rev. Mater. Res., vol. 44, pp. 451–77.

16. Available at: <http://rostec.ru/news/1738>.

17. Available at: http://report2014.acron.ru/acron/annual/2014/gb/Russian/pdf/Chapter1_rus.pdf.

18. Strnatv K.J. (1988) Rare Earth-Cobalt Permanent Magnets. Ferromagnetic Materials, Ed. E.P. Wohlfarth and K.H.J. Buschow, Elsevier Science Publishers B.V., vol. 4, p. 184.

19. Kuz'min M.D., Skokov K.P., Jian H., Radulov I., Gutfleisch O. (2014) Towards high-performance permanent magnets without rare earths. J. Phys.: Condens. Matter 26 064205 (5pp) doi:10.1088/0953-8984/26/6/064205.

20. Pathak A.K., Khan M., Gschneidner Jr. K.A., McCallum R.W., Zhou L., Sun K., Dennis K.W., Zhou C., Pinkerton F.E., Kramer M.J., Pecharsky V.K. (2015) Cerium: An Unlikely Replacement of Dysprosium in High Performance Nd–Fe–B Permanent Magnets. Adv. Mater., vol. 27, pp. 2663–2667.

21. Nadeev M.M., Menushenkov V.P., Savchenko A.G. (2010) *Kompozitsiya dlya polucheniya spechennogo postoyannogo magnita, spechenny postoyanny magnit i sposob ego polucheniya, Evraziyskiy patent No. 014583* [Composition for the production of sintered permanent magnet, sintered permanent magnet and method for its production, Eurasian patent No. 014583, Issue date: December 30].

22. Walmer M.S., Chen C.H., Walmer M.H. (2000) IEEE Trans. Magn., vol. 36, p. 3376.
23. Chen C.H. (2006–2010) Engineering magnetic materials and their applications, Course MAT-512, University of Dayton.
24. Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E, Chen C.H., Sankar S.G., Liu J.P. (2011) Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient Adv. Mater. 2011, vol. 23, pp. 821–842.
25. Dever T.P. et al. (2015) Assessment of Technologies for Noncryogenic Hybrid Electric Propulsion. NASA-TP—2015-216588, 46 p.
26. Deryagin A.V. (1976) *Redkozemel'nye magnitozhestkie materialy* [Rare-earth hard magnetic materials], UFN [Advances in Physical Sciences], vol. 120, issue 3, pp. 393–438.