

При объеме жесткого диска 1,2 Гбайт суммарное время эксперимента - 6 часов при использовании максимального количества каналов АЦП.

Принцип работы программно-измерительного комплекса заключается в следующем:

Сигналы с датчиков измеряемых величин поступают на входы модулей аналогового ввода блока измерительных модулей, где некоторые из этих сигналов усиливаются [3]. Базовый АЦП блока измерительных модулей преобразует аналоговые величины в цифровые, которые через интерфейс блока измерительных модулей передаются в персональный компьютер, где производится запись данных в файл на жесткий диск или в память компьютера, а также обработка этих данных. Обработанные данные могут быть сохранены как в графическом, так и табличном видах. В последующем, при статистической обработке, имеется возможность перекодировать полученные данные в файл с форматом распознаваемым программой EXCEL® (Microsoft®). Компьютерное программное обеспечение позволяет пользователю осуществлять просмотр данных в реальном масштабе времени при их записи и последующем просмотре в графическом или табличном видах, проводить дальнейшую обработку исследуемого сигнала во временной и частотных областях (устранение постоянной составляющей, сглаживание сигнала путем усреднения, проводить расчет амплитудно-частотной характеристики исследуемого процесса, статистический анализ и др.). Для обеспечения достаточно точных результатов измерений проводится калибровка каждого измерительного канала соответствующего измерительного модуля. Калибровка измерительного канала может осуществляться как в многоканальном режиме (отдельно датчик, submodule и измерительный канал), так и в сквозном (датчик – канал) режиме. Для получения достаточно точной характеристики канала при калибровке канала необходимо задать не менее 10 контрольных точек, равномерно распределенных от минимума до максимума эффективного диапазона измерений.

Литература

1. Чернов А.С. Качество и надежность систем электроснабжения автономных объектов // Грузовик, № 3, 2012, с. 8-14.
2. Чернов А.С., Акимов А.В. Системы электроснабжения АТС с Интеллектуальными алгоритмами, обеспечивающие повышение экологических и энергетических показателей // Известия МГТУ «МАМИ» № 1(13), 2012, с. 101-105.
3. Варламов Д.О., Еременко В.Г., Лавриков А.А. Моделирование устройства балансировки с рассеивающими резисторами для питания литий-ионной аккумуляторной батареи // Практическая силовая электроника, 2013, № 52(4), с. 43-47.

Применение магнитотвердых материалов в электрических машинах на транспортных средствах

Розин П.А., к.т.н. доц. Акимов А.В.
Университет машиностроения
(495) 223-05-29, ate@mami.ru

Аннотация. Рассмотрены наиболее распространённые типы постоянных магнитов, проведен анализ их свойств, а также положительные и отрицательные свойства.

Ключевые слова: электродвигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, магнитотвердые материалы, ферриты, производство ферритов, магнитопласты неодим-железо-бор, петля гистерезиса.

Постоянные магниты широко применяются как автономные источники постоянного магнитного поля в электротехнике, радиотехнике, автоматике, используются в электрооборудовании современных отечественных и зарубежных автомобилей, обеспечивая экономию цветных металлов и снижение массогабаритных характеристик как отдельных элементов электрооборудования, так и автомобиля в целом. Электрические машины с постоянными

магнитами характеризуется высокими массоэнергетическими показателями, имеют большой срок службы, надежны, просты в конструкции и изготовлении.

Традиционные изделия электрооборудования, использующие постоянные магниты, – это исполнительные двигатели стеклоочистителя, стеклоомывателя, вентилятора, стеклоподъемника, насоса, стартера, различного рода датчики и приборы.



Рисунок 1. Использование постоянных магнитов на стартере КЗАТЭ 5722.3708 на автомобиле Шевроле-Нива

На рисунке 1 показано использование постоянных магнитов в качестве полюсов индуктора электростартера.

Магнитотвердые материалы

Применяют магнитотвердые материалы для производства постоянных магнитов. Они являются источниками постоянных магнитных полей, используемых в различной аппаратуре, в электро- и радиотехнике, автоматике, приборостроении, электронике, в устройствах электромагнитной записи, фокусирующих устройствах для телевизоров, микрофонах, электроизмерительных приборах, микроэлектронике и т.д. Их используют для записи и хранения цифровой, звуковой и видеоинформации, а также в электрических машинах. Преимущества постоянных магнитов по сравнению с электромагнитами постоянного тока: повышенная работоспособность; экономия материалов и потребления энергии; экономическая и техническая выгода применения.

Магнитотвердые материалы [1] (магнитомягкие материалы), магнитные материалы характеризуются высокими значениями коэрцитивной силы H_c . Качество магнитотвердых материалов характеризуют также значения остаточной магнитной индукции B_r , максимальной магнитной энергии, отдаваемой материалом в пространство W_m и коэффициента выпуклости. Материалы также должны иметь высокую временную и температурную стабильность перечисленных параметров и удовлетворительные прочность и пластичность. В различных магнитотвердых материалах природа высоких значений коэрцитивной силы определяется одним из трех механизмов задержки процессов перемагничивания в ферромагнетиках: необратимым вращением намагниченности магнитных доменов; задержкой образования и (или) роста зародышей перемагничивания; закреплением доменных стенок на различных неоднородностях и структурных несовершенствах кристалла.

Для получения высокой коэрцитивной силы в магнитных материалах, кроме выбора химического состава, используют технологии, оптимизирующие кристаллическую структуру и затрудняющие процесс перемагничивания. Это закалка сталей на мартенсит, дисперсионное твердение сплавов, создание высоких внутренних механических напряжений и др. В результате затрудняются процессы смещения доменных границ. У высококоэрцитивных сплавов магнитная текстура создается путем их охлаждения в сильном магнитном поле.

Предотвратить процесс перемагничивания за счет движения доменных стенок можно, например, создав структуру, в которой мелкие однодоменные частицы ферромагнитного вещества окружены прослойками парамагнитного вещества. В таком случае перемагничивание может быть осуществлено за счет вращения вектора домена, что осуществимо только в сравнительно больших полях. Такая структура, состоящая из однодоменных частиц, образуется либо при мелком размоле ферромагнетика, с последующим смешиванием его с парамагнит-

ным связующим веществом и спеканием, или же при использовании разделения однородного твердого раствора на две фазы (парамагнитную и ферромагнитную). Для затруднения вращения вектора домена используют вещества с очень сильной магнитной анизотропией (некоторые типы ферритов) или обеспечивают вытянутую форму доменов (в сплавах). Все параметры увеличиваются при одинаковой ориентации осей легкого намагничивания (или в ряде случаев длинных осей доменов) вдоль одного направления. Магнитотвердые материалы намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях.

Преимуществами постоянных магнитов являются: повышенная работоспособность; экономия материалов и потребления энергии; высокие экономические показатели. Важнейшим требованием к постоянному магниту является получение максимальной магнитной энергии в рабочем зазоре, поэтому удельная магнитная энергия W_m (энергия, отнесенная к единице объема магнита) – одна из важнейших характеристик магнитотвердых материалов. Она пропорциональна произведению:

$$W_m = \frac{(B, H)_{\max}}{2},$$

где: B и H – максимальные значения остаточной индукции внутри магнита и размагничивающей напряженности, соответственно.

С усилением прямоугольности петли гистерезиса коэффициент выпуклости приближается к единице. Чем больше остаточная индукция, коэрцитивная сила и коэффициент выпуклости, тем больше максимальная энергия магнита. Магнитотвердые материалы намагничиваются с трудом, но зато длительное время сохраняют сообщенную энергию. Намагничивание происходит в основном за счет вращения вектора намагниченности. По составу и способу получения магнитотвердые материалы подразделяются на легированные стали, закаленные на мартенсит, литые высококоэрцитивные сплавы, порошковые магнитотвердые материалы, магнитотвердые ферриты, пластически деформируемые сплавы, сплавы для магнитных носителей информации.

Взаимозависимость параметров магнитотвердых материалов иллюстрирует рисунок 2.

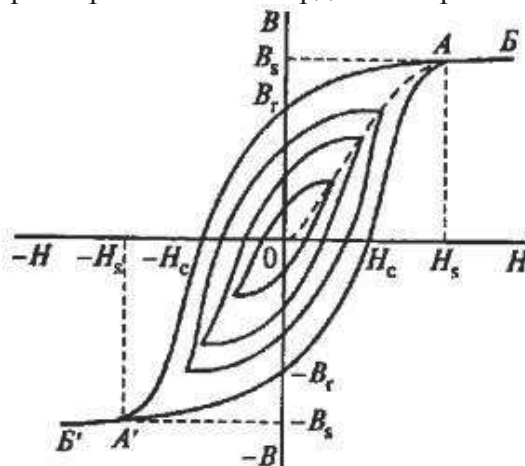


Рисунок 2. Предельная петля магнитного гистерезиса

В точке A при $H=H_s$ магнитная индукция образца достигнет **индукции насыщения** B_s . При уменьшении напряженности поля H намагниченность образца уменьшается по кривой $BA B_r$, и при $H=0$ образец будет обладать некоторой индукцией, величина которой отлична от нуля. Эта индукция называется остаточной и обозначается B_r . Остаточная индукция обусловлена тем, что при размагничивании, когда $H=0$, магнитные моменты доменов оказываются ориентированными вдоль оси легкого намагничивания, направление которой близко к направлению внешнего.

Для достижения полного размагничивания образца к нему необходимо приложить противоположное по знаку поле определенной напряженности. Напряженность такого поля называют **коэрцитивной силой** H_c . При дальнейшем усилении отрицательного поля магнит-

ная индукция тоже становится отрицательной и в точке A' при $H=-H_s$ достигает значения индукции технического насыщения ($B=-B_s$). После уменьшения отрицательного поля, а затем увеличения положительного поля кривая перемагничивания опишет петлю, называемую **предельной петлей магнитного гистерезиса**, которая является важной технической характеристикой магнитных материалов.

Таким образом, предельная петля магнитного гистерезиса – это кривая изменения магнитной индукции при изменении внешнего магнитного поля от $+H_s$ до $-H_s$ и обратно. Пользуясь предельной петлей магнитного гистерезиса, можно определить основные параметры материала: коэрцитивную силу H_c , индукцию насыщения B_s , остаточную индукцию B_r и др.

Такие характеристики материала, как точка Кюри и индукция насыщения, зависят только от химического состава магнитных материалов. Коэрцитивная сила H_c , магнитная проницаемость M и площадь петли гистерезиса являются структурно чувствительными. Чем больше размер зерна (меньше суммарная удельная поверхность зерен) и более совершенна структура кристаллической решетки (меньше дислокаций, внутренних напряжений, примесей и других дефектов), тем меньше H_c и больше M , а материал легче намагничивается и перемагничивается.

По величине коэрцитивной силы магнитные материалы подразделяются на **магнитомягкие** и **магнитотвердые**. Материалы, у которых $H_c < 4$ кА/м, относятся к магнитомягким, у которых $H_c > 4$ кА/м – к магнитотвердым.

Для магнитомягких материалов характерно малое значение коэрцитивной силы. У промышленных образцов наименьшая $H_c = 0,4$ А/м. Поэтому они намагничиваются до индукции технического насыщения при невысоких напряженностях поля. У магнитомягких материалов высокая магнитная проницаемость, малые потери на перемагничивание и узкая петля гистерезиса при высоких значениях магнитной индукции.

Для магнитотвердых материалов характерна широкая петля гистерезиса с большой коэрцитивной силой. У промышленных образцов наибольшая $H_c = 800$ кА/м. Магнитотвердые материалы намагничиваются при высокой напряженности внешнего магнитного поля, но зато длительное время сохраняют сообщенную энергию.

Наиболее распространённые типы постоянных магнитов

1. Магнитотвердые ферриты бария стронция и кобальта

Магнитотвердые ферриты (оксидные магниты) – это ферримангнетики с большой кристаллографической анизотропией. Из них применяются главным образом феррит бария $BaO \cdot 6Fe_2O_3$, феррит кобальта $CoO \cdot 6Fe_2O_3$ и феррит стронция $SrO \cdot 6Fe_2O_3$. Магниты из ферритов бария и стронция получили широкое распространение в 50-х годах XX века.

Ферриты бария и стронция имеют гексагональную кристаллическую решетку с одноосной анизотропией [1]. Высокая коэрцитивная сила у этих материалов обусловлена малым размером кристаллических зерен и сильной магнитной кристаллографической анизотропией. Для получения мелкокристаллической структуры осуществляют тонкий помол, а спекание проводят при относительно невысоких температурах, чтобы исключить процесс рекристаллизации. Для придания анизотропии магнитных свойств материал текстурируют. Текстура создается путем формования массы в сильном магнитном поле.

Магниты на основе феррита бария выпускают изотропными (БИ) и анизотропными (БА), а ферриты стронция – анизотропными (СА). Производство магнитов марок (БА) и (СА) включает в себя прессование в постоянном магнитном поле для улучшения свойств в направлении действия поля. Однако в условиях, когда в пористую структуру феррита возможно попадание влаги, необходимо применять защитные покрытия во избежание растрескивания магнитов при морозении.

Ферриты кобальта имеют кубическую структуру с общей химической формулой $CoO \cdot Fe_2O_3$. Их получают по той же технологии, что и ферриты бария и стронция. Основное отличие заключается в термомагнитной обработке спеченных магнитов для придания им улучшенных свойств. Магнитные свойства феррита кобальта анизотропного (КА) заметно хуже, чем анизотропных ферритов бария и стронция. Однако в диапазоне температур -70°C

– +80°C температурный коэффициент B_r в 3 – 4 раза меньше, чем у ферритов бария и стронция.

Магниты из ферритов можно использовать при высоких частотах, что связано с высоким удельным сопротивлением.

К достоинствам ферритовых магнитов можно отнести возможность осуществлять у них многополюсное намагничивание на цельном компактном изделии, а также низкую электропроводность, позволяющую применять ферритовые магниты при наличии высокочастотных магнитных полей.

Ферритовые магниты завоевали популярность своей низкой ценой, и вместе с тем хорошими магнитными и эксплуатационными характеристиками. Они устойчивы к размагничиванию магнитным полем и температурным воздействием. Константа магнитокристаллической анизотропии этих материалов достаточно велика. Эти магниты практически не подвержены коррозии. Ферриты обладают хорошей механической прочностью.

Ферритовые магниты характеризуются высокой коррозионной (химической) и структурной (кристаллической) стабильностью, что делает их экологически безопасными и годными к применению практически без ограничений во времени.

Магниты из ферритов можно использовать при высоких частотах, что связано с высоким удельным сопротивлением.

Недостатком ферритовых магнитов является существенная зависимость коэрцитивной силы от температуры, которая ограничивает использование таких магнитов при отрицательных (ниже -20°C) температурах.

Также к недостаткам относится низкая механическая прочность, высокая хрупкость и твердость.

Известны случаи, когда на морозе невозможно было завести автомобиль из-за отказа стартера по причине размагничивания магнитов. Поэтому для работы в условиях с низкой температурой применяют ферриты с повышенной коэрцитивной силой.

Практическое применение получили ферриты бария, стронция и кобальта. Ферриты бария и стронция имеют гексагональную структуру с общей химической формулой $MeO \cdot nFe_2O_3$, где: Me – барий или стронций, n – коэффициент, изменяющийся в зависимости от марки феррита от 4,7 до 6,0. Для получения определенного сочетания магнитных свойств в материал вводят оксиды Al , Si , B и Bi в количестве 0,1 – 3,0 % и редкоземельные элементы – 0,1 – 1,0 %. Ферриты бария и стронция в сравнении с литыми магнитами обладают меньшими значениями B_r . Однако большая кристаллографическая анизотропия существенно увеличивает их H_c , что позволяет получать удовлетворительную W_m и придает им повышенную стабильность при воздействии внешних магнитных полей, ударов и толчков. Их плотность примерно в 1,5 раза ниже, чем у литых магнитов, а удельное сопротивление в миллион раз выше, что позволяет применять их в цепях, подвергающихся действию высокочастотных полей.

Сочетание высокой коэрцитивной силы с достаточно высокой остаточной индукцией позволяет получать магниты с удовлетворительной (для очень большого числа применений) удельной магнитной энергией, а доступность и дешевизна исходного сырья, низкая себестоимость производства позволяет производить ферритовые магниты массой в десятки тысяч тонн в год и удовлетворять порядка 75% потребностей мирового рынка постоянных магнитов.

Они изготавливаются из дешёвого сырья – окислов железа – по керамической технологии и технологии порошковой металлургии с прессованием (для анизотропных ферритов – в магнитном поле) и двукратным высокотемпературным спеканием в воздушной атмосфере. Далее во многих случаях необходима шлифовка и резка алмазным инструментом.

2. Постоянные магниты железо-никель-алюминий и железо-никель-алюминий-кобальт (ЮНД, или $Al-Ni$ и ЮНДК, или $Al-Ni-Co$)

В этих магнитах высококоэрцитивное состояние достигается охлаждением в магнитном поле. Такие магниты при самой высокой температурной и временной стабильности имеют

очень высокую стоимость. Их типичные магнитные характеристики: $B_r = 0,9-1,1$ Тл и H_c от 39 до 72 кА/м. В настоящее время они применяются лишь в военной промышленности и по инерции в некоторых других изделиях, работающих при высоких температурах. Их применение ограничено и достаточно низкой коэрцитивной силой, что требует довольно массивных магнитов с большой величиной соотношения длины к толщине.

3. Магниты самарий-кобальт SmCo (спечённые)

Эти магниты на основе редкоземельных интерметаллических сплавов обладают максимальной анизотропией, их типичные магнитные свойства B_r от 0,7 до 1,0 Тл и H_c от 1430 до 955 кА/м соответственно. Они получают по стандартной технологии порошковой металлургии, но из-за высокой химической активности Sm изготовление сплава, порошка, прессование брикетов и высокотемпературное спекание проводятся в атмосфере инертного газа. После прессования в магнитном поле для получения большой плотности и близкой к 100% магнитной текстуры и спекания проводится термообработка, затем необходима шлифовка алмазным инструментом. При высоких ценах на самарий и кобальт их применение оправдано лишь высокой температурной стабильностью.

4. Магниты неодим-железо-бор Nd-Fe-B (спечённые)

Стремление к миниатюризации технических изделий при сохранении высокой эффективности привело в середине 80-х гг. к появлению нового класса редкоземельных соединений с рекордными величинами остаточной магнитной индукции $B_r=1,1-1,2$ Тл и коэрцитивной силой $H_c=950-1750$ кА/м. Наиболее распространённый способ получения этих магнитов – порошковый, при котором все операции аналогичны процессам изготовления магнитов SmCo. Довольно сложный технологический процесс, высокая стоимость сырья, более низкая, чем у SmCo, температурная стабильность и необходимость механической обработки алмазным инструментом препятствуют широкому применению этого класса магнитов.

В последнее время появилась необходимость разработки новых типов постоянных магнитов, в которых бы оптимально сочетались высокая технологичность, однородность и стабильность магнитных характеристик со стоимостью, более низкой по сравнению с редкоземельными магнитами групп 3 и 4. Такие магниты и появились за последние десять лет.

5. Редкоземельные магнитопласты неодим-железо-бор Nd-Fe-B

Полимерные постоянные магниты, или магнитопласты, изготавливаются из смеси магнитного порошка и полимерного связующего. После сухого прессования в размер производится отверждение изотропных заготовок в сушильных шкафах в воздушной атмосфере. Этот вид магнитных материалов имеет ряд ценных свойств, выгодно отличающих их от металлических или керамических магнитов, получаемых спеканием.

Положительными сторонами их использования являются:

- во-первых, это высокая воспроизводимость и стабильность, однородность магнитных свойств, большой срок службы;
- во-вторых – хорошая механическая прочность и пластичность;
- в третьих – высокая технологичность, т.е. возможность получать изделия сложной формы с малыми затратами и при этом соблюдать с высокой точностью заданные размеры.

Магниты, изготавливаемые из сплавов на основе редкоземельных металлов химического состава Nd₂Fe₁₄B, обладают наиболее высокими магнитными параметрами (B_r , H_{sv} , H_{sm} , $(BH)_{max}$) из всех выпускаемых промышленностью.

К недостаткам магнитов из NdFeB следует отнести низкую коррозионную стойкость, которая устраняется покрытием магнитов защитными слоями меди, цинка, никеля, хрома.

Возможно производить такие магниты до миллиона ежемесячно на площади 40 кв. м при персонале 10 человек. Среди других достоинств магнитопластов можно отметить большую, чем у других редкоземельных магнитов, устойчивость к коррозии, сравнительно высокое электросопротивление и меньший, чем у спечённых магнитов, вес. Технология изотропных полимерных магнитов даёт возможность достаточно легко создавать разнообразные сложные конфигурации магнитных полей.

Отсутствие в составе сплава NdFeB достаточно дорогого металла – кобальта – также

даёт преимущество магнитам этого состава перед магнитами из сплава SmCo по цене и масштабам производства.

Технология изготовления магнитов NdFeB достаточно сложна вследствие высокой окисляемости редкоземельных металлов, поэтому процесс изготовления сплава проводят в вакууме. Порошок сплава получают методом многоступенчатого дробления. Для наведения анизотропии свойств порошок сплава прессуют в магнитном поле, после чего образцы спекают. Для получения максимальной анизотропии образцы магнитов допрессовывают под нагревом. При этом протекает не только дополнительное уплотнение, но и перекристаллизация сплава с большей ориентацией кристаллической структуры.

Высокая удельная магнитная энергия и сопротивляемость размагничиванию в сильных полях делает магниты из NdFeB незаменимыми другими магнитными материалами в системах приборов и устройств с высокой напряжённостью магнитных полей в больших зазорах.

Магнитотвердые материалы – магнитопласты неодим-железо-бор отличаются от спечённых магнитов изотропной структурой и содержанием органического связующего от 10 до 50 объёмных процентов, что обеспечивает магнитные характеристики $B_r = 0,65$ Тл, $H_c = 520$ кА/м. Технология их производства легко поддаётся автоматизации, изделия получаются точно в размер (с допусками не хуже 0,05 мм) с высокой степенью однородности и воспроизводимости магнитных свойств.

В большинстве современных магнитных материалов – спечённых Nd-Fe-B, анизотропных ферритах, текстурированных магнитах на базе сплавов Al-Ni-Co – ось намагничивания задаётся ещё до процессов высокотемпературного спекания и не может быть изменена при их намагничивании. Из-за этого практически невозможно создание на таких магнитах неколлинеарного направления намагниченности. Вот почему в большинстве электродвигателей, генераторов, в различных датчиках применяют пластинки, скобки, однородно намагниченные, что неизбежно создает проблему краевых эффектов, создающих повышенное искрение, угловую неоднородность механического момента (зубцовый эффект) и др. А редкоземельные магнитопласты – изотропные вещества и могут быть намагничены произвольным образом. В частности, для них допустимы радиальное или когтеобразное распределение намагниченности, это в ряде случаев может привести к существенному выигрышу при конструировании магнитных систем. Безусловно, неколлинеарное намагничивание является более сложной задачей, чем обычное намагничивание в соленоидах простой формы, тем более что поля, необходимые для этого, достигают величин 2400-3200 кА/м. Однако преимущества, получаемые при использовании таких магнитных систем, целиком окупают необходимые для этого затраты.

Литература

1. Пятин Ю.М. Постоянные магниты справочник. М., Энергия, 1980.
2. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. Издательство: Мир.
3. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. М.: Энергоатомиздат.
4. Куневич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. Ферриты // Энциклопедический справочник. Магниты и магнитные системы. Том 1. Издательство: Лик, 2004.
5. Набоких В.А., Нигматуллин Ш.М. Развитие конструкций автомобильных генераторных установок и мотор-генераторов // Электроника и электрооборудование транспорта, № 6, 2013, с. 8-10.