

УДК 621.175

В.В. Шевченко, С.В. Пидкивка

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ГЕНЕРАТОРОВ ФС ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Совершенствование процессов энергопотребления является важной задачей, нерешенность которой определяет энергетическую безопасность Украины, особенно учитывая отсутствие в стране больших запасов нефти, газа, ядерного топлива. в современной энергетике перспективно использование автономных энергоустановок, максимально приближенных к потребителю. С учетом современного развития технологии изготовления постоянных магнитов для малой энергетики следует рассмотреть возможность использования генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением в энергоустановках.

Ключевые слова: *энергосбережение, автономная энергосистема, постоянные магниты, малая энергетика.*

Введение

Постановка проблемы. По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА) первичные энергоносители, или, как принято их называть, классические источники получения энергии, составляют сегодня основу электроэнергетики всех стран.

По данным МЭА, электростанции работают на таких видах первичных энергоносителей: на нефти – 38 %, на природном газе – 20 %, на угле – 27 %, что составляет 85 % от общей выработки энергоресурсов. Остальные 15 % приходятся на АЭС и на электростанции, работающие от возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Чем активнее их используют, тем меньше их остается и тем дороже они обходятся. По расчетам специалистов, при нынешних объемах добычи угля на Земле хватит лет на 400 – 500, а нефти и газа – максимум на 100 лет. Повышение интереса к ВИЭ вызвало также подорожание с 70-х годов 20 века энергоносителей (особенно нефти), которое, в свою очередь, вызвало сокращение использования минеральных топливных ресурсов для выработки электроэнергии. Следует помнить, что величина добычи и цены на энергоносители в значительной мере определяют тенденцию развития энергетики мира. Кроме того, гидро-, тепловая и атомная энергетика вызывают значительные нарушения в окружающей природной среде, а увеличение масштабов производства электроэнергии на базе органического топлива может привести к глобальным экологическим последствиям для всей планеты. В связи с этим приоритетным становится поиск новых видов топлива и источников энергии.

Вопросы энергосбережения являются для Украины важнейшей проблемой, нерешенность которой может угрожать ее энергетической безопасности, особенно учитывая отсутствие в стране больших собственных запасов нефти, газа, ядерного топлива. Поэтому вопросы энергосбережения следует считать наиважнейшими экономическими и экологическими проблемами на данном этапе развития Украины.

Перед человечеством стоит задача освоения возобновляемых источников энергии. В современной энергетике перспективно использование автономных энергоустановок, максимально приближенных к потребителю. С учетом современного развития технологии изготовления постоянных магнитов для малой энергетики следует рассмотреть возможность использования генераторов с магнитоэлектрическим возбуждением в энергоустановках.

Анализ последних исследований и публикаций. Наибольшее распространение в автономных энергоустановках получили синхронные генераторы (СГ), которые, в отличие от асинхронных, не нуждаются в дополнительных источниках реактивной мощности для создания рабочего потока. В последнее время в связи с появлением постоянных магнитов с относительно высокими удельными энергетическими показателями высокой популярностью стали пользоваться бесконтактные электрические машины (БЭМ) с постоянными магнитами (ПМ). Изготовленные из различных сплавов, они незначительно уступают по показателям электромагнитам, что вызвало большой интерес к машинам с магнитоэлектрическими индукторами. Особенность БЭМ – отсутствие подвижных электрических контактов и необходимость в источниках реактивной мощности.

Целью настоящей работы является сбор, систематизация и проведение анализа характеристик современных магнитов, оценка возможности их использования для генераторов автономных энергоустановок.

Изложение основного материала

Наиболее перспективно применение генераторов с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок. В настоящее время доля ветровых и солнечных электростанций в мировой выработке электроэнергии составляет около 1,5%. Общая мощность ветровых электростанций (ВЭС) в 1995 году составляла 2500 МВт, из них 1600 МВт в США [1]. В настоящее время эта мощность превышает 9000 МВт. Только в Европе введено в эксплуатацию ВЭС общей мощностью более

3000 МВт [3, 4]. По некоторым оценкам, к середине будущего века ВЭС, возможно, будут обеспечивать 10 % потребления электроэнергии в мире [1 – 4].

Для решения настоящих проблем основную роль играют ветроустановки небольшой мощности. По опыту развитых стран известно, что суточная потребность семьи в сельской местности составляет до 2 кВт·ч, достаточно крупного фермерского хозяйства – до 10 кВт, небольшой деревни (до 50 семей) – 50 кВт·ч. Следовательно, для поддержания уровня жизни в мелких населенных пунктах и в единичных хозяйствах необходимо создавать системы малых энергоустановок. Малая ветроэнергетика не требует больших территорий. Локальные ветроэнергетические установки (ВЭУ) могут быть установлены практически везде, где среднегодовая скорость ветра не менее 4 – 5 м/с, а для тихоходных многолопастных ВЭУ не менее 3 м/с.

Постоянные магниты, благодаря достигнутым высоким характеристикам сплавов, из которых они выполняются, получили широкое распространение в самых разных областях техники. Их используют для создания постоянного магнитного поля в устройствах, которые превращают электрическую энергию в механическую (поляризуемые и магнитоэлектрические системы аппаратов, регистрирующие устройства, магнетроны, фокусирующие и дугогасящие устройства).

Они применяются также в устройствах, которые преобразуют механическую энергию в электрическую (магнетта, микрофоны, электрогенераторы и т.д.). В ряде случаев с помощью постоянных магнитов создают механическую силу, которая действует на детали из ферромагнитных материалов (магнитные плиты, синхронные передатчики моментов, замки, сепараторы, подъемники и т.п.).

Широкое использование нашли постоянные магниты также как тормозные магниты, например в разных индукционных системах электрических аппаратов.

В связи с такой огромной сферой применения постоянных магнитов и спецификой их работы в каждом отдельном случае следует, прежде всего, получать постоянные магниты с заданными характеристиками. Разнообразие конструкций устройств с применением постоянных магнитов приводит к возникновению большого количества форм их выполнения. На рис. 1 показанные примеры выполнения постоянных магнитов для магнитных цепей с разными рабочими воздушными зазорами.

В каждом отдельном случае условия работы постоянного магнита в данной системе должны быть тщательно проанализированные, и особенности, которые налагаются тем или другим конструктивным решением, учтены при расчете и выборе материала постоянного магниту.

Последние 30 лет, благодаря новым достижениям металлургии, созданы разнообразные магнитотвердые материалы с разными физическими свойствами и исключительно высокими магнитными характеристиками. Некоторые из этих материалов дают возможность

выполнять постоянные магниты с меньшим объемом и весом, чем эквивалентные электромагниты. Для большинства новых материалов характерна высокая стабильность параметров и характеристик.

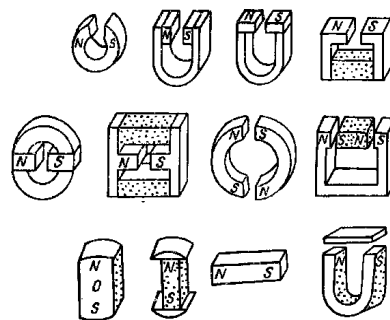


Рис. 1. Примеры выполнения постоянных магнитов

На силу магнита влияют следующие факторы: нагревание, радиация, сильные электрические токи вблизи магнита, присутствие других магнитов вблизи магнита; высокая влажность (для магнитов неодим-железо-бор без защитного покрытия). Удары и вибрация не влияют на силу современных магнитных материалов, пока не наступает физическое разрушение магнита.

Современные магнитные материалы теряют со временем лишь незначительную часть своих магнитных свойств. Например, магниты самарий-кобальт теряют менее 1 % за период 10 лет. Если магнитный материал не был поврежден чрезмерным нагреванием, магнит, потерявший часть своих магнитных свойств, может быть вновь намагничен до своего первоначального состояния.

В настоящее время самыми сильными являются редкоземельные магниты, а именно спеченные магниты неодим-железо-бор (Nd-Fe-B). При высоких температурах эксплуатации (150°C и выше) магниты самарий-кобальт (SmCo) могут быть сильнее магнитов неодим-железо-бор (в зависимости от параметров магнитной системы).

Литые сплавы типа Альнико имеют хорошие магнитные свойства при магнитной текстуре и высокие при направленной кристаллизации. В лучших образцах остаточная магнитная индукция B_r равна 1,12 – 1,14 Тл при коэрцитивной силе до 15 – 125 кА/м энергетическое произведение ($B_d H_d$) достигает 96 ТлкА/м. К недостаткам таких материалов относится трудность обработки, невысокие механические свойства, в частности, малая механическая прочность: предел прочности на разрыв 210 – 640 Н/мм², на изгиб: 54 – 168 Н/мм². Такая механическая прочность ограничивает диаметр вращающихся магнитов, частоту вращения роторов электрических машин (до 100м/с) и, следовательно диапазон мощностей, в которых могли бы применяться постоянные магниты. Кроме того, эти материалы имеют довольно сложную технологию, что обуславливает их сравнительно высокую стоимость.

Металлокерамические материалы имеют несколько худшие магнитные свойства, но часто не

требуют обработки и имеют более высокие механические характеристики: предел прочности на растяжение до 210 – 330 Н/мм², предел прочности на изгиб до 500 – 600 Н/мм². Металлокерамические магниты выдерживают линейную скорость вращения до 140 м/с и выше, тогда как литые магниты при этом разрушаются. Энергетическое производство достигает до 38 тлкА/м.

Ряд магнитов из тонких порошков имеют хорошие магнитные свойства: например, из порошка Fe-Co с удлиненными частицами, для которых коэрцитивная сила равна 78,4 кА/м, а остаточная индукция $B_r=1,08$ тл. Магниты из сплавов на основе редкоземельных элементов имеют наивысшие магнитные свойства: энергетическое производство достигает величины 160 – 240 тлкА/м, а коэрцитивная сила 800 кА/м. Механические свойства этих сплавов исследованы слабо, но, во всяком случае, при использовании их в электрических машинах необходимо принимать меры для обеспечения механической прочности магнитов. Эти сплавы имеют высокую стоимость. Вместе с тем, рекордные магнитные свойства этих сплавов обуславливают все более широкое их применение.

Магнитотвердые материалы могут быть разделены, по способу получения материала, на следующие группы:

1. Литые магниты на основе системы железо-никель-алюминий и железо-никель-алюминий-кобальт, в некоторых случаях легированные медью, серой, титаном, ниобием и другими элементами.

2. Магниты, которые получают методами порошковой металлургии, в которых процессы литья заменяются прессованием порошков.

3. Стали, закаляемые на мартенсит: хромовые, вольфрамовые и кобальтовые.

4. Другие материалы для постоянных магнитов.

Все магнитотвердые материалы, начиная от углеродных сталей с коэрцитивной силой порядка 4 кА/м и максимальной полезной энергией 800 кДж/м³ и кончая многокомпонентными сплавами с коэрцитивной силой порядка 60 кА/м и энергией 26 400 кДж/м³, могут применяться для изготовления постоянных магнитов. В некоторых случаях применяются материалы, которые владеют особенно высокими значениями коэрцитивной силы (до 4000 кА/м), хотя они и уступают другим материалам по величине полезной энергии. Выбор того или другого материала определяется назначением постоянного магниту и требованиями, которые предъявляются к нему, а также экономическими и технологическими рассуждениями. В любом случае очевидно, что магнит должен владеть наименьшими размерами (массой) и иметь минимальную стоимость. До этого необходимо стремиться, но во многих случаях эти два требования оказываются несовместимыми. Кроме того, учитывая каждое из них, необходимо отдавать отчет в том, как это отобьется на других деталях устройства, в которое входит постоянный магнит.

При выборе материала необходимо также учитывать вопрос механической прочности и сопротивляемости действия размагничивающих полей, если последние могут иметь место.

Материалы, применяемые для постоянных магнитов, в зависимости от способов их изготовления могут быть разбиты на шесть основных групп:

- а) ковкие материалы;
- б) материалы, которые деформируются;
- в) материалы для литых магнитов;
- г) материалы для металлокерамических магнитов;
- д) материалы для металлопластичных магнитов;
- е) некоторые специальные материалы на основе благородных металлов.

Существует 4 класса современных наиболее используемых магнитов, каждый из которых базируется на своем составе используемых материалов. Внутри каждого класса различают семейства со своими магнитными свойствами. Эти основные классы следующие: неодим – железо – бор (Nd-Fe-B, NdFeB, NIB); кобальт самария (Sm-Co); керамические (ферриты). альнико (Alnico). Краткая классификация магнитов представлена на рис. 2



Рис. 2. Классификация магнитов

Магниты из сплавов неодим-железо-бор и кобальт-самария известны также, как редкоземельные магниты, поскольку в их состав входят элементы редкоземельной, или лантаноидной, группы периодической системы элементов. Они были разработаны в 70-х и 80-х годах прошлого века. Кобальт самария магниты имеют высокое значение максимальной энергии и соответствующую величину коэрцитивной силы, температурную стабильность, но вместе с этим они имеют высокую стоимость (самый дорогой магнитный материал) и хрупкость. При высоких ценах на самарий и кобальт их употребления оправдано лишь высокой температурной стабильностью. Магниты неодим-железо-бор имеют высокие значения остаточной магнитной индукции, коэрцитивной силы, максимальной энергии и соотношения продуктивность/стоимость, легко производить разных форм и размеров, подходят для разработки высокопродуктивных, компактных и легких устройств, рекордные величины остаточной магнитной индукции и коэрцитивной силы, однородность и

стабильность магнитных характеристик со стоимостью, высокая воспроизводимость и стабильность, большой срок службы, хорошая механическая прочность и пластичность, высокая технологичность, стойкость к коррозии, высокое электросопротивление, небольшой вес, но есть один существенный недостаток – низкая температурная стабильность.

Магниты альнико (Alnico) сделаны из сплава алюминия, никеля, кобальта и железа. Они были разработаны в 40-х годах прошлого века. Эти магниты отлично работают при повышенных температурах, имеют достаточно высокое значение максимальной энергии, температурная стабильность данного материала очень высокая, возможно формирование в материале магнитного поля большой кривизны, высокая остаточная намагничённость B_r , но они имеют низкое значение коэрцитивной силы, их относительно легко размагнитить, определенная трудность использования в составе изделия очень жесткий и хрупкий материал, может быть обработан лишь полированием, шлифованием или электроэрозионной обработкой, низкая коэрцитивная сила.

Alnico наиболее «старый» магнитный материал, который, тем не менее, имеет важные области применения. Его максимальная энергия составляет около 1/5 от энергии магнитов на основе Sm-Co, однако он имеет исключительно высокие температурные свойства и лучшую коррозионную стойкость. Магниты Alnico могут иметь разные формы с различной магнитной ориентацией.

Редкоземельные магниты Sm-Co и Nd-Fe-B имеют высокую коэрцитивность, поэтому их не нужно намагничивать в магнитной цепи и они могут быть изготовлены с низким значением коэффициента магнитной проводимости (проще говоря, в виде тонких дисков). Редкоземельные магниты идеально подходят для применения в электродвигателях. Магниты Sm-Co имеют хорошие температурные свойства, но хрупки. Магниты Nd-Fe-B менее хрупки, но имеют невысокие температурные свойства и более подвержены коррозии.

Керамические магниты (или ферриты) – наиболее известный класс магнитов. Они были разработаны в 60-х годах прошлого века. Они имеют высокую коэрцитивную силу, хорошую сопротивляемость к размагничиванию, дешевые, хорошую коррозионную стойкость, но у них умеренно низкая температура Кюри (около 450° С), а также низкая температурная стабильность, плохая механическая стойкость, необходимая для шлифовки и резания абразивным инструментом.

В табл. 1 представлены некоторые характеристики этих классов постоянных магнитов.

На рис. 3 приведено графическое сравнение достоинств и недостатков 4-х основных типов магнитных материалов.

Важнейшим вопросом эффективного использования магнитотвердых материалов являются высокие качества намагничивания систем из постоянных

магнитов. Обычно магниты (кроме магнитов из феррита бария) намагничиваются после сборки системы, поскольку при этом после магнитной стабилизации, значение индукции в зазоре оказывается больше, чем при намагничивании без системы, с последующей сборкой и магнитной стабилизацией.

Таблица 1
Характеристики постоянных магнитов

Материал	B_r Тл	H_c кА/м	$(BH)_{max}$ кДж/м ³	T_c / B_r % на °С	T_{max} °С	T_{cur} °С
NdFeB	1,38	860	318	-0,12	280	310
SmCo	1,05	160	210	-0,04	300	750
Альнико	1,25	55	44	-0,02	540	860
Керамические	0,39	38	44	-0,2	300	460

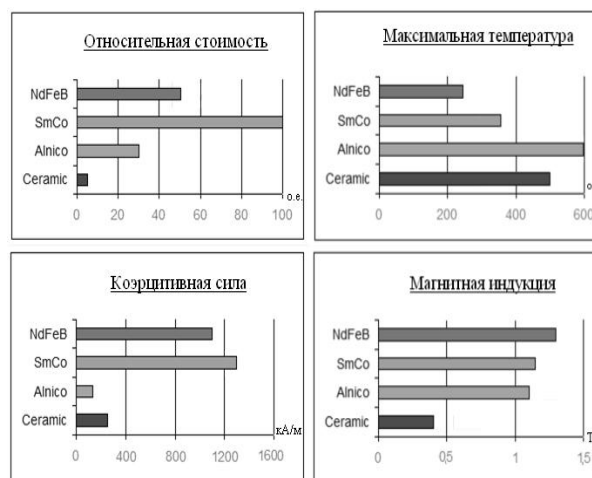


Рис. 3. Сравнительная характеристика основных типов постоянных магнитов

Намагничивание до сборки имеет трудности технологического характера, которые возникают при сборке устройств с намагничённым магнитом (необходимость иметь немагнитный инструмент, возможность засорения ферромагнитной пылью и т.п.). Применяется намагничивание в установках, которые могут быть запитаны как от постоянного, так и от переменного тока, при их одновременном действии, а также при импульсном намагничивании.

Установки с импульсным намагничиванием имеют большое распространение, потому что накапливают энергию в конденсаторе длительное время, а отдают ее в процессе разряда за короткий промежуток времени. Потому для создания мощного импульса не требуется потребления большого тока, что позволяет использовать для питания установки обычную осветительную сеть. К достоинствам импульсных установок следует отнести также их малые габариты и относительную простоту исполнения.

Техника намагничивания зависит от формы и размеров магнита. Для получения постоянных характеристик постоянных магнитов должна быть обеспечена стабилизация его свойств, которая предполагает все возможные для него виды старения, как магнитного, так и структурного, исходя из условий

работы постоянного магнита в данном изделии. Чаще всего стабилизация магнитов выполняется путем воздействия температуры, а также за счет применения размагничивающего поля, которое по величине должно превосходить максимально возможные поля, которые возникают в процессе работы.

Представленные диаграммы характеризуют наиболее распространенные характеристики семейств магнитных материалов. Для конкретных магнитов разных производителей некоторые характеристики могут отличаться от приведенных (например, коэрцитивная сила магнитов Nd-Fe-B при некоторых добавках может достигать величины 1700 кА/м). Однако диаграммы демонстрируют общие соотношения между семействами магнитных материалов.

В настоящее время кроме энергетических параметров большой интерес вызывают механические свойства постоянных магнитов. По стойкости к механическим действиям магниты можно условно разделить на 3 группы:

1. **Твердые.** В эту группу входят почти все ферриты, выпеченные NdFeB, Альнико и SmCo магниты. Они не поддаются механической обработке, теряют свои свойства при ударах и сильной вибрации, требуют специального дорогого оборудования для обработки.

2. **Эластичные.** Магниты этой группы отличаются повышенной эластичностью. Изготавливаются из ферромагнитного порошка путем его заливки эластичной массой (резина, каучук, пластмассы и так далее).

3. **Пластичные.** Группа, в которой наилучшее соотношение механической стойкости и энергетических показателей. Изготавливаются из редкоземельных материалов на основе Nd-Fe-B путем прессования под большим давлением. Они объединяют в себе все необходимые качества: высокие механические свойства (пластичность, ударная вязкость, прочность, поддаются механической обработке), что обеспечит механическую надежность при возбуждении генератора, высокие магнитные свойства, что позволяет достичь высокого КПД и больших мощностей; имеют низкую удельную массу. Эти магниты можно изготавливать сложной формы методом литья под давлением, без употребления дополнительных операций сборки (многополюсные системы), что невозможно

при использовании спеченных магнитов. Целесообразно употребление магнитопластов в тех случаях, когда постоянный магнит должен повторить кривизну контактных поверхностей. Они могут использоваться в качестве конструктивных элементов со сложными поверхностями (множество отверстий, приливов и т.д.); как стойки в агрессивных средах, при работе на открытом воздухе. Магнитопласты менее склонны к действию вихревых токов, не нагреваются при работе в переменных электромагнитных полях.

Выводы

1. Анализируя спектр областей применения постоянных магнитов, разнообразие материалов и технологий, которые используются для их изготовления, а также условия использования магнитов, можно сделать вывод, что невозможно или экономически не оправданно использовать один несколько видов ли магнитов одновременно. Для каждого изделия нужно подбирать постоянные магниты индивидуально.

2. Показателем эффективного использования магнитотвердых материалов являются высокие качества намагничивания систем из постоянных магнитов.

3. Редкоземельные магнитопласты являются наиболее перспективными для создания магнитных систем в генераторах энергетических установок.

Список літератури

1. Ферриты / под ред. Такэси Такэси. – МЛ: Изд-во Металлургия, 1964. – 194 с.
2. Ситидзе Ю. Ферриты / Ю. Ситидзе, Х. Сато. – М.: Мир, 1964. – 408 с.
3. Структура и свойства ферритов. – Минск: Наука и техника, 1974. – 280 с.
4. Рабкин Л.И. Ферриты / Л.И. Рабкин, С.А. Соскин, Б.Ш. Эштейн. – Л.: Энергия, 1968. – 384 с.
5. Розенцвейг Р.Е. Феррогидродинамика: пер. с англ. / под ред. В.В. Гогосова. – М.: Мир, 1989.
6. Шевченко В.В. Проблемы и основные направления развития электроэнергетики в Украине / В.В. Шевченко // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 7(287). – С. 11-16.

Поступила в редколлегию 16.11.2010

Рецензент: д-р техн. наук, доц. Г.И. Канюк, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ПО ВИКОРИСТАННЮ ГЕНЕРАТОРІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

В.В. Шевченко, С.В. Підківка

Розглянуті питання енергозбереження – важливої технічної, економічної і екологічної проблеми, що визначає енергетичну безпеку України. у сучасній енергетиці перспективно використання автономних енергоустановок, максимально наближених до споживача. З урахуванням сучасного розвитку технології виготовлення постійних магнітів для малої енергетики слід розглянути можливість використання генераторів з магнітоелектричним збудженням в енергоустановках.

Ключові слова: енергозбереження, автономна енергосистема, постійні магніти, мала енергетика.

DEVELOPMENT OF SUGGESTIONS ON THE USE OF GENERATORS WITH PERMANENT MAGNETS IN THE POWER PLANTS

V.V. Shevchenko, S.V. Pidkivka

The questions of saving of electric power are considered – important technical, economic and ecological problem determining power safety of Ukraine. In modern energy perspective the use of autonomous power plants maximally close to the user. Taking into account modern development of technology of making of permanent magnets for small energy it is necessary to consider possibility of the use of generators with electro-magnetic excitation in power plants.

Keywords: energy-saving, autonomous grid, permanent magnets, small energy.