



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ВЫБОРА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В ТОРЦЕВОМ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ГЕНЕРАТОРЕ

В данной статье рассмотрено три конструкции торцевых магнитоэлектрических генераторов с целью применения различных конструкций в генераторах автономных мало мощных энергетических комплексах. Рассмотрены вопросы выбора постоянных магнитов в зависимости от технического задания. Даны рекомендации по их выбору и особенности применения тех или иных форм постоянных магнитов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: постоянные магниты, торцевой, магнитоэлектрический генератор, полевая модель.

**В**ступление. При проектировании и изготовлении магнитоэлектрических машин используют редкоземельные магниты типа NdFeB и SmCo5. При этом тип, форма магнитов являются определяющими в режимах работы и таких параметрах машины, как качество кривой напряжения, устойчивость работы, перегрузочные способности и другое [1, 2]. Правильный логический выбор того или иного типа магнита важен на стадии составления технического задания. В данной статье приведено сравнение основных используемых типов постоянных магнитов и даны рекомендации по их использованию.

Следует сказать, что при проектировании и моделировании той или иной конструкции машины с постоянными магнитами следует провести предварительный инженерный расчет, а также тепловой расчет. После получения предварительных температур следует учесть их и внести поправки в определении рабочих значений индукции и коэрцитивной силы.

На сегодняшний день выделяют два основных типа редкоземельных магнита: NdFeB и SmCo5. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. В Табл. 1 приведено сравнение основных показателей редкоземельных постоянных магнитов упомянутых типов.

Как видно из сравнения наиболее высокими энергетическими характеристиками обладают магниты типа NdFeB, их максимальное значение энергии на 38% выше, нежели у постоянных магнитов типа SmCo5, поэтому с точки зрения обеспечения наивысших массогабаритных показателей целесообразней использовать постоянные магниты типа NdFeB, однако они имеют более низкую температурную стабильность, чем магниты типа SmCo5, т. е. в случаях когда температура окружающей среды меняется либо, когда система работает при повышенной температуре окружающей среды (класс изоляции машины должен соответствовать температуре эксплуатации машины). Для однофазного одно пакетного торцевого магнитоэлектрического генератора были использованы посто-

янные магниты NdFeB N38. При температуре 75°C магнит имеет следующие параметры:

Индукция: 1,18 Тл.

Коэрцитивная сила: 875 кА/м.

Однако при температуре 100°C постоянный магнит имеет следующие параметры:  $B_r = 1,12$  Тл,  $H_c = 718$  кА/м.

При этом постоянный магнит типа SmCo5 марки S3218 имеет следующие параметры при 100 °C:  $B_r = 1,13$ Тл,  $H_c = 860$ , при том, что произведение  $BH_{max}$  составило 32 Мг.

Сравнивая вышеприведенные данные можно прийти к выводу, что при увеличении температуры в редкоземельном магните типа NdFeB уменьшилось  $BH_{max}$  в большем порядке, нежели у постоянного магнита S3218. В качестве вывода можно сказать, что свойства магнитов SmCo5 в значительной степени меньше меняются при воздействии температуры, нежели у постоянных магнитов NdFeB. Однако постоянные магниты SmCo5

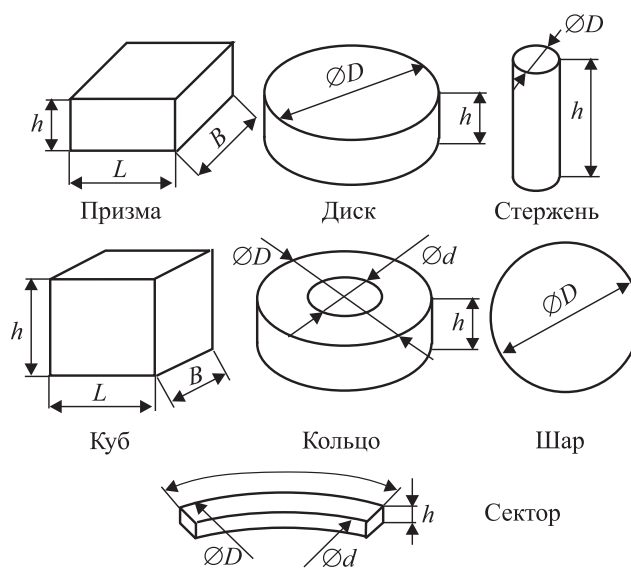


Рис. 1. Формы постоянных магнитов

Таблица 1. Сравнение основных показателей постоянных магнитов

Тип постоянного магнита	$B_r$ , кГс	$H_c$ , кОе	$BH_{max}$ , МГОе
NdFeB	10.6...14.5	10.4...12.7	28...52
SmCo5	8.6...11.6	8.2...10.8	18...32

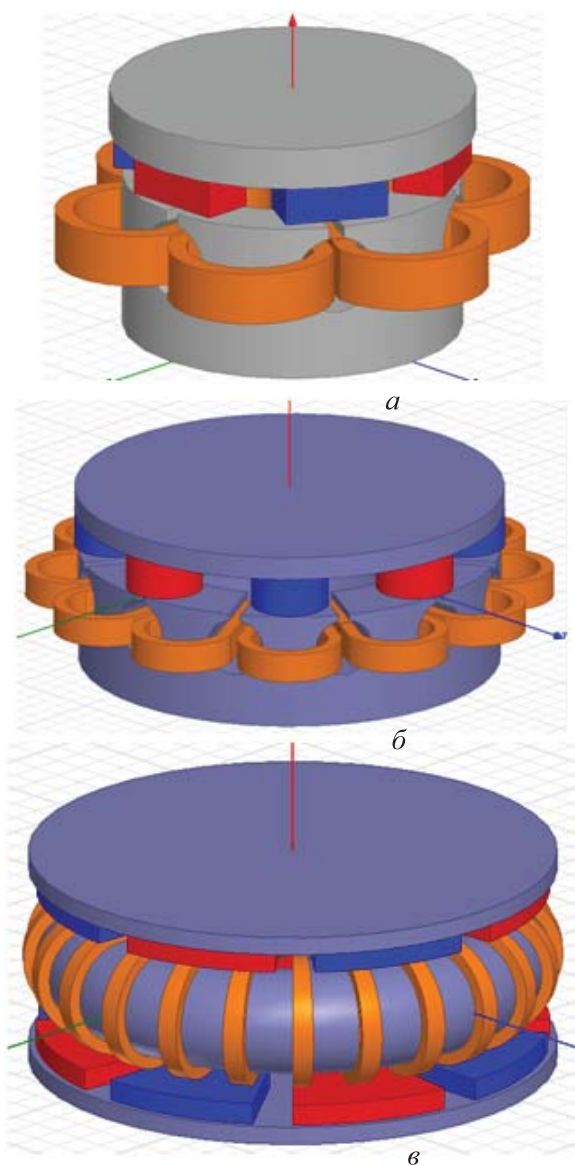


Рис. 2. Исследуемые конструкции магнитоэлектрических генераторов *а* – конструкция "А", *б* – конструкция "Б", *в* – конструкция "В"

имеют значительно более высокую стоимость, поэтому если проектируемая машина общего исполнения, то используют постоянные магниты типа NdFeB, выбирая их по классу работы при температурах 80 °С, 120 °С.

Немаловажным при проектировании является выбор формы магнита. На Рис. 1 представлены основные формы постоянных магнитов.

В зависимости от геометрии ротора и машины в целом, применяют ту или иную форму магнитов для обеспечения количественных (выходное напряжение, удельная мощность и т. д.) и качественных характеристик (форма поля, синусоидальность кривой и т. д.). В большинстве конструкций используют либо круглые, либо призматические постоянные магниты, либо же выполненные в виде сектора.

Были исследованы три машины различной конфигурации и различной геометрии. На Рис. 2, 3

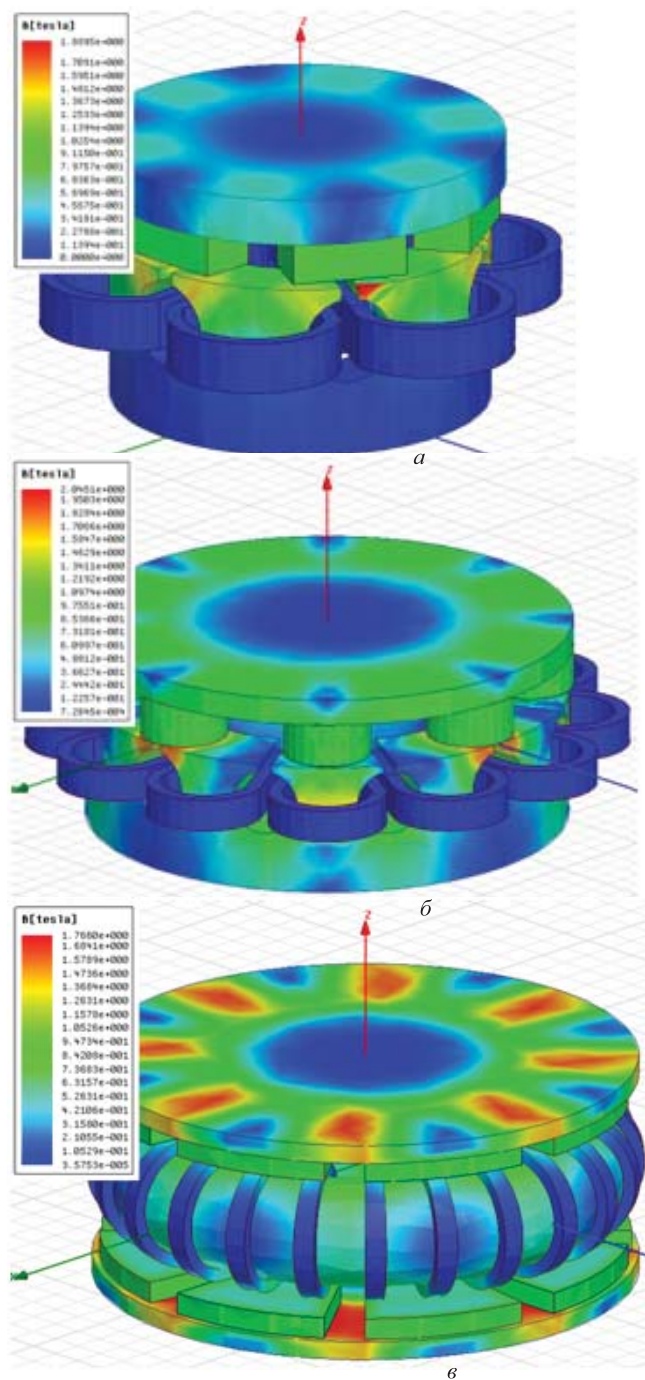


Рис. 3. Результаты моделирования в Ansys Maxwell

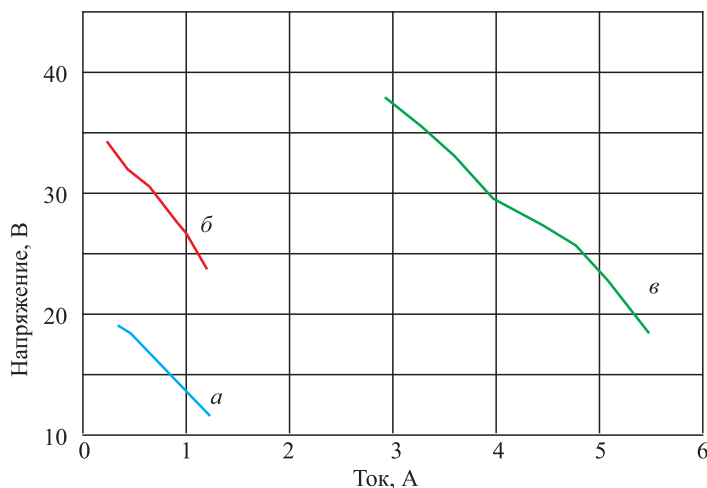


Рис. 4. Внешние характеристики исследуемых генераторов *а* – конструкция "А", *б* – конструкция "Б", *в* – конструкция "В"



представлены конструкции 3-х магнитоэлектрических машин.

Машина конструкции "А" [5] состоит из статора, ротора, 6 постоянных магнитов и однофазной обмотки (6 катушек). В конструкции "Б" количество катушек удвоено, а количество пар полюсов – 4, обмотка трехфазная. Обе вышеупомянутые конструкции – односторонние. В конструкции "В" реализована двухсторонняя конструкция, причем обмотка кольцевая, трехфазная. В Табл. 2 приведены основные данные по трем машинам.

Были проведены предварительные расчеты по методике [3, 4] и полевое моделирование всех трех машин.

Были проведены натурные испытания всех трех образцов и получены их внешние характеристики. На Рис. 4 представлены внешние характеристики трех машин.

Следует сказать, так как все три машины имеют разную геометрию, конфигурацию магнитной системы, обмотки, и рассчитаны на оптимальный режим при разной частоте. Первичное сравнение предлагается провести по критерию удельной энергии (мощность на единицу веса).

Однако данное сравнение не является корректным, так как во всех трех машинах были применены разные марки постоянных магнитов, разная компоновка, количество фаз. Для адекватного сравнения необходимо обеспечить равенство остальных параметров. Поэтому на основании модели (Рис. 1, а) было проведено полевое моделирование (описание полевой модели и особенностей моделирования приведено в [6]) для разной формы магнитов с обеспечением одинакового объема постоянных магнитов. В качестве критериев сравнения были выбраны следующие параметры:

- напряжение холостого хода;
- ток короткого замыкания;
- коэффициент полюсного перекрытия;
- соотношение площади магнита на полюс к площади поперечного сечения статора на полюс:

$$k_r = \frac{\pi(D_{\text{вн}} - D_{\text{вн}})^2}{8p \cdot S_m},$$

где  $D_{\text{вн}}$  – внешний диаметр статора,  $D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр статора,  $S_m$  – площадь магнитов;

Таблица 2. Основные данные

Конструкция Параметр	Конструкция «А»	Конструкция «Б»	Конструкция «В»
Внешний диаметр, мм	65	110	175
Внутренний диаметр, мм	34	74	70
Длина машины, мм	46,5	44,5	63
Количество ПМ	6	8	16
Форма ПМ	призматические	круглые	секторальные
Частота вращения, об/мин	1000	750	300
Мощность, Вт	14	145	680
Удельный показатель	12	45,8	59,9

Таблица 3. Основные данные

Конструкция Параметр	Конструкция «А»	Конструкция «Б»	Конструкция «В»
Мощность, Вт	14	145	680
Удельный показатель	12	45,8	59,9

Таблица 4. Результаты сравнения форм постоянных магнитов

Параметр Форма ПМ	Призматические магниты	Круглые магниты	Секторальные магниты
Напряжение холостого хода, о.е.	1	1.28	1.26
Ток короткого замыкания, о.е.	1	1.04	1.06
Коэффициент полюсного перекрытия	0.707	0.564	0.64
Коэффициент $k_r$	0.64	0.64	0.64

Результаты сравнение приведены в Табл. 4.

### Выводы

1. Проанализированы три варианта конструкций магнитоэлектрических машин с осевым магнитным потоком различной конфигурации, геометрии и магнитных материалов с целью выбора наиболее выгодного в энергетическом отношении образца в заданном объеме и соотношении диаметра и осевого размера.

2. На основе разработанных полевых моделей даны рекомендации по оптимизации существующей конструкции с односторонней магнитной системой путем обоснованного выбора формы постоянных магнитов.

3. Сравнение результатов моделирования с экспериментом показало, что численные методы дают высокую степень точности и отображают реальные процессы в электрических машинах разных конструкций. Отклонение рассчитанных и измеренных напряжений и токов составило не более 10%.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Паластин Л.М. Синхронные машины автономных источников питания. – М.: Энергия, 1980. – 384с.
2. Jacek F. Gieras, Rong-jie Wang, Maarten J. Kamper (2008) Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, Springer, USA.
3. Шишкин В.П. Автоматизированное проектирование торцовых магнитоэлектрических генераторов переменного тока./ Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, – Иваново: – 2006. – 68 с.



4. Монахов Е.А., Чумак В.В. Методика расчета магнитной системы торцевых синхронных магнитоэлектрических генераторов. // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, — 2015. — № 1 (90), Ч. 1. — С. 23–26

5. Патент на винахід № 106842 — Електрична машина з постійними магнітами. Автори: Богаєнко М.В., Монахов Є.А.,

Попков В.С., Чумак В.В. Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 10.10.2014, Бюл. №19

6. Чумак В.В., Монахов Е.А. Исследование многополосной торцевой электрической машины для малой гидроэнергетики // Гідроенергетика України. — 2014. — № 4, — С. 35–37

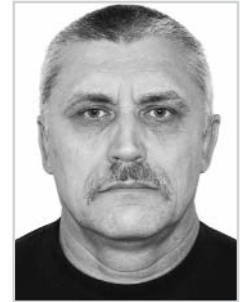
© Чумак В.В., Монахов Е.А., 2015



ЛОБАНОВСКИЙ Ю.И., канд. ф-мат. наук,  
ОАО "Корпорация "Иркут"

УДК: 534-143/622.22.01

## НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ О ПРОБЛЕМАХ ТАШЛЫКСКОЙ ГАЭС



*В работе описываются проблемы, возникшие при эксплуатации Ташлыкской ГАЭС на основании данных, представленных ее сотрудниками. Показано, что наиболее вероятной причиной этих проблем является гидроакустическая неустойчивость ее напорной системы. Для получения окончательного диагноза и выработки рекомендаций по устранению проблем необходимо провести гидроакустические расчеты при точно известных основных размерах и геометрии напорных водоводов и отсасывающих труб.*

**И.** Что происходит с агрегатами Ташлыкской ГАЭС? В журнале "Гидроэнергетика Украины" вышла статья "Гидроакустическая теория и проблемы Нурекской ГЭС" [1], в которой вся история более чем сорокалетней эксплуатации одной из самых высоконапорных плотинных гидроэлектростанций мира описывается в преломлении через положения гидроакустической теории. Там, по мнению автора как той статьи, так и данной, приведены окончательные доказательства правильности использования этой теории для объяснения многих странных и ранее необъяснимых и часто катастрофических инцидентов, происходивших на гидроэлектростанциях в течение последних десятилетий. В том же номере журнала вышла еще одна статья — "Проблемные вопросы эксплуатации электротехнического оборудования и сооружений Ташлыкской ГАЭС" [2], где, насколько известно автору, впервые открыто обсуждаются серьезные проблемы, связанные с гидроагрегатами этой станции. В рассматриваемом контексте интерес представляют две первые части этой статьи — введение и "Допустимые режимы работы ГА", в которых описана грустная история создания и эксплуатации Ташлыкской ГАЭС на реке Южный Буг, входящей, вместе с буферной Алекса-

ндровской ГЭС, в состав энергетического комплекса вокруг Южно-Украинской АЭС.

Гидроаккумулирующая станция должна была обеспечить покрытие пиковых нагрузок в энергосистеме Украины при работе Южно-Украинской АЭС в базовом режиме, так как недопустимо часто, быстро и резко изменять режимы работы атомных реакторов. Для этого с 1981 года и строилась Ташлыкская ГАЭС. Нынешний ее вид показан на Рис. 1 [3].

Первый агрегат станции был пущен через 25 лет после начала ее строительства — в 2006 году, а второй — еще через год, в 2007 году [4]. Первоначально пуск третьего агрегата планировался на 2009 год [5], однако этого не произошло вплоть до настоящего времени — самого конца 2014 года

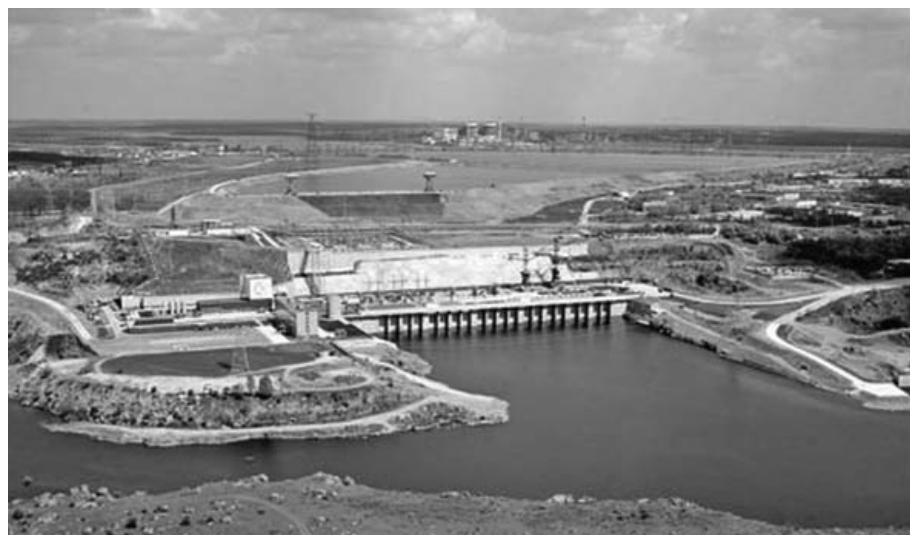


Рис. 1. Ташлыкская ГАЭС