

## Оценка возможности создания автономной малогабаритной системы генерирования постоянного тока и определение принципа ее построения

ИШУТИНОВ В.В., САВИН А.А., ПЫХТЕЕВ Е.Н., КУЛЯБИН С.В.

*Одной из актуальных задач при разработке электрооборудования автономных объектов является создание малогабаритной системы генерирования. В статье рассмотрены факторы, которые определяют принципы построения системы генерирования и возникающие при этом проблемы. Показано, что ключевым вопросом при определении концепции построения системы генерирования является выбор типа электромеханического преобразователя энергии – генератора. Его конструкция определяет массогабаритные и энергетические показатели всей системы, а блок управления – диапазон регулирования напряжения и уровень пульсаций. В ходе исследования была также рассмотрена надежность системы генерирования, состоящей из генератора и блока управления, в зависимости от концепции построения. В качестве наиболее перспективного варианта выбрана система генерирования на базе синхронного генератора с постоянными магнитами и блока управления на базе DC-DC-преобразователя.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** автономная система генерирования постоянного тока, принцип построения, синхронный генератор с постоянными магнитами, частота вращения

Перед отечественным машиностроением стоит ряд актуальных и амбициозных задач по разработке электрооборудования автономных объектов с качественно новыми показателями. Это связано с необходимостью масштабного обновления автономных объектов, а также с рядом серьезных успехов в смежных областях, таких как электромашиностроение, электроника, разработка программного обеспечения и др. Одна из актуальных задач – разработка автономных малогабаритных систем генерирования постоянного тока с низкими пульсациями выходного напряжения. Необходимость решения задачи обусловлена прежде всего фактором снижения габаритов объектов применения и повышением их автономности.

Создание любой новой системы начинается с определения концепции ее построения. В рассматриваемом случае выбор концепции определяется рядом факторов. Первый из них – уменьшение габаритов объекта применения. Это приводит к повышению частоты вращения приводного двигателя, а значит, и частоты вращения генератора – электромеханического преобразователя, являющегося основной частью системы генерирования. Частота вращения генератора для такой системы может составлять от 30000 до 70000 об/мин.

Второй фактор – повышение автономности всего объекта применения, а значит, и системы генерирования постоянного тока. Этот фактор непосредственно связан с первым и ведет к необходимости уменьшения числа аккумуляторных источ-

ников питания объекта. Уменьшение числа элементов и составных частей системы способствует повышению ее надежности, даже несмотря на усложнение отдельных блоков. Для пояснения можно привести пример. Генераторы, имеющие обмотку возбуждения, требуют дополнительного источника питания, например аккумуляторной батареи, для которой, в свою очередь, требуется выделить дополнительное место. Кроме того, регулирование напряжения такой обмотки не осуществимо физически без блока регулирования. Поэтому уход от дополнительных источников питания за счет создания несколько более сложного блока регулирования повышает надежность всей системы.

Имеется и третий фактор, связанный с первыми двумя. Это интеграция системы генерирования (в том числе и генератора) в объект применения. Таким образом, разрабатываемые разными предприятиями объекты – система генерирования и объект применения (двигатель) – имеют общие конструктивные элементы. Интеграция предполагает совершенно иной подход к проектированию. Поскольку и генератор, и блок выпрямления и регулирования имеют свои особенности, которые, в свою очередь, могут выражаться, например, в диапазоне рабочих температур, допустимых вибрациях, разновидности конструкции, способах технологии изготовления и т.д. На все вышеперечисленные особенности накладываются особенности проектирования и изготовления самого объекта применения. Необходимо и важно также помнить, что под изготовлением по-

нимаются не разработка комплекта документов (чертежей, расчетов, технологий) и гипотетическая возможность изготовления такой системы и не единичный выпуск одного изделия, а возможность серийного производства с обеспечением приемлемой технологичности конструкции.

Таким образом, получается сложная взаимосвязанная система объектов, подход к проектированию которой – сложная и противоречивая задача. В связи с этим необходимо рассмотреть основные особенности и связанные с ними проблемы создания малогабаритных систем генерирования.

### Основные ограничения и особенности при разработке системы генерирования

Ограничения и особенности	На что они влияют при проектировании системы генерирования
Ограничение на габариты и массу объекта применения	Наружный диаметр и активная длина генератора, размеры лобовых частей Отсутствие источников питания обмотки возбуждения Габариты и масса блока управления
Высокая частота вращения приводного двигателя объекта применения и отсутствие согласующего редуктора между генератором и приводным двигателем	Высокая частота вращения генератора, дополнительные требования к прочности конструкции Необходимость применения магнитных материалов с низкими магнитными потерями для обеспечения высокого КПД Необходимость точного расчета механических потерь для правильного определения КПД
Высокие значения рабочих температур окружающей среды	Необходимость подбора изоляционных и магнитных материалов Определение способа охлаждения генератора
Высокая надежность объекта применения	Необходимость повышения надежности генератора и блока управления
Большой диапазон частоты вращения приводного двигателя	Необходимость регулирования напряжения генератора с помощью блока управления
Высокая чувствительность электрооборудования к пульсациям выходного напряжения	Необходимость обеспечения низких пульсаций выходного напряжения системы генерирования с помощью блока управления

Безусловно, одним из ключевых вопросов при определении концепции построения системы генерирования постоянного тока является выбор типа электромеханического преобразователя энергии – генератора.

**Выбор конструкции генератора для обеспечения наилучших массогабаритных показателей при ограничении по наружному диаметру.** Определенные особенности при проектировании автономных малогабаритных систем генерирования постоянного тока

накладывают сильное ограничение по наружному диаметру генератора вследствие уменьшения размеров объекта применения. В связи с этим диаметр выбирается максимально допустимым, учитывая конструкцию той части объекта, где он располагается, а варьируется при определении расчетной мощности генератора только активная длина, исходя из широко известной зависимости для  $D^2 l_i$  [1]. В связи с этим и на диаметр ротора также накладываются ограничения. Поэтому система возбуждения должна быть компактной, но при этом позволяющей создавать в малых объемах большие значения потоков.

Очевидно, наилучшей заменой обмотки возбуждения для обеспечения малых габаритов и массы являются постоянные магниты на основе редкоземельных элементов самария и кобальта либо на основе интерметаллического соединения неодим-железо-бор. Они обладают превосходными энергетическими показателями, имея максимальные значения остаточной магнитной индукции 1,10–1,45 Тл и коэрцитивной силы 780–1200 кА/м. Однако они не позволяют просто изменением магнитного потока регулировать выходное напряжение системы генерирования. Поэтому нужна специальная система управления, которая будет обеспечивать необходимые уровни пульсаций и значения выходного напряжения при изменении частоты вращения приводного двигателя.

**Выбор конструкции генератора для обеспечения его механической прочности при высоких значениях частоты вращения генератора (высокой окружной скорости ротора).** Необходимо также отметить, что на конструкцию магнитной системы ротора накладывает отпечаток высокое значение окружной скорости ротора. В особенности высокое значение частоты вращения влияет на механическую прочность ротора с постоянными магнитами.

Очевидно, лучшими показателями с точки зрения обеспечения механической прочности обладает явнополюсный реактивный ротор без постоянных магнитов. Прочностные показатели такой магнитной системы выше, поскольку она монолитна, т.е. не содержит сборных элементов, при этом в случае применения специальных сталей (конструкционных, но с нормируемыми магнитными характеристиками) звездочка ротора может образовывать вместе с валом неразъемную конструкцию, что, в свою очередь, значительно повышает ее прочность [1]. Обмотка возбуждения в этом случае неподвижна и располагается в корпусе генератора. Генератор может иметь два конструктивных исполнения – однопакетное или двухпакетное.

Неподвижная обмотка возбуждения имеет ряд недостатков:

занимает большой объем, увеличивая осевую длину машины;

создает постоянную составляющую магнитного потока, которая приводит к большим магнитным потерям, вследствие чего снижается КПД; кроме того, при больших значениях частоты вращения магнитные потери в данном типе машин и так велики, а в данном случае увеличиваются еще больше;

требует источника питания для обеспечения полной автономности генератора, в качестве которого для обмотки возбуждения может выступать либо аккумуляторная батарея, либо магнитоэлектрическая машина – подвозбудитель.

Однако аккумуляторная батарея, обмотка возбуждения не вписываются в общую концепцию малогабаритной автономной системы генерирования. Такой концепции удовлетворяет генератор с постоянными магнитами. Таким образом, при использовании постоянных магнитов в качестве источника магнитного поля необходимо решить вопрос их крепления на роторе генератора.

**Выбор магнитных материалов с целью минимизации потерь и обеспечения возможности работы при высоких температурах.** Высокая частота перемагничивания приводит к увеличению магнитных потерь в статоре. Кроме того, магнитные потери зависят от квадрата магнитной индукции на участках цепи, а также от толщины материала и технологических факторов при изготовлении листов. Магнитные потери определяются удельными магнитными потерями и могут быть в общем виде записаны, исходя из зависимостей, представленных в [2]. Под технологическими факторами понимается способ изготовления листов: на лазерной установке, на электроэрозионной установке, штамповкой. При каждом виде изготовления остаются заусенцы, которые могут в значительной степени оказывать влияние на магнитные потери. Таким образом, снижение магнитных потерь в статоре может достигаться тремя основными путями:

правильным выбором способа изготовления, отработкой технологии изготовления – данный способ может быть реализован лишь на этапе изготовления опытных образцов;

снижением магнитных индукций на участках цепи – данный способ реализуется на этапе расчетов и является достаточно эффективным, поскольку удельные магнитные потери прямо пропорциональны квадрату индукции, следовательно, уменьшение магнитной индукции, например в 1,25 раза, позволяет снизить удельные потери в 1,56 раза;

выбором материалов, имеющих низкие удельные потери на высоких частотах перемагничивания – от 400 до 3000 Гц (см. таблицу).

### Зависимость удельных потерь от толщины листа для различных материалов

Материал	Толщина листа, мм	Удельные потери $P_{2,0/400}$ , Вт/кг	Индукция насыщения, Тл
49К2ФА	0,35	108,0	2,45
49К2ФА	0,10	45,0	2,45
7421	0,025	3,35	1,95
2421	0,27	81,2	2,00
2421	0,18	54,5	2,00

Необходимо отметить, что уменьшение значений магнитной индукции на участках цепи уменьшает потери, но одновременно ведет к увеличению габаритов электрической машины, что, с одной стороны, является негативным фактором, а с другой, позволяет увеличить площадь поверхности охлаждения. Таким образом, необходимо определить оптимальное значение магнитной индукции из условий минимизации потерь и получения габаритов не выше допустимых с учетом необходимых условий охлаждения.

**Выбор способа охлаждения генератора по условиям его работы в кратковременном режиме.** Генератор работает в специфических условиях, поскольку температура окружающей среды может составлять до 100 °С, режим его работы – кратковременный, при этом с жестким ограничением по массогабаритным показателям. В связи с этим необходимо принудительное воздушное охлаждение генератора и применение материалов с максимально возможной рабочей температурой. Имеются в виду изоляционные материалы с классом нагревостойкости 220 °С, а также постоянные магниты на основе самария и кобальта, рабочая температура которых до 300 °С.

**Выбор схемы построения блока управления для обеспечения требуемых уровней регулирования и пульсаций с учетом получения минимальных габаритов.** Блок управления преобразовывает нерегулируемое напряжение переменного тока с обмоток генератора в напряжение постоянного тока требуемого значения. Напряжение на выходе системы должно поддерживаться на заданном уровне во всем диапазоне частоты вращения генератора. При разбросе значений рабочей частоты вращения генератора от 30000 до 80000 об/мин амплитуда переменного напряжения, поступающего в блок управления, имеет разброс значений более чем в 200%. Далее переменное напряжение с разбросом значений более чем в 200% поступает в блок управления, который формирует и поддерживает на выходе системы постоянный уровень напряжения. Также необходимо обеспечить отклонение выходного напряжения не более 10% в моменты скачкообраз-

ного изменения частоты вращения. В дополнение к вышеуказанным требованиям в современных системах генерирования есть необходимость построения «многоканальных» систем с различным уровнем стабилизированного напряжения в каждом из каналов, а также обеспечения гальванической развязки каналов. Указанные технические требования могут быть достигнуты путём использования в блоке выпрямления и регулирования совместно с выпрямителем DC-DC-преобразователя, позволяющего как решить задачу стабилизации напряжения на требуемом уровне, так и получить на выходе системы генерирования несколько каналов с различными уровнями стабилизированного выходного напряжения постоянного тока. Ранее этого невозможно было достигнуть, поскольку применялись системы генерирования, регулирование напряжения в которых осуществлялось с помощью обмотки возбуждения генератора.

**Выбор конструкции генератора исходя с целью получения максимальной надёжности.** Как известно, надёжность системы зависит от многих факторов, и в первую очередь, от надёжности входящих в систему составляющих. Соответственно, самый простой способ повысить надёжность системы – стремиться к уменьшению числа связей в системе (т.е. уменьшению числа элементов системы) при сохранении необходимой работоспособности (и необходимого уровня надёжности).

В рассматриваемых вариантах конструкции генераторов отсутствует скользящий контакт, что в значительной степени повышает надёжность и долговечность. Такие машины более просты по конструкции, имеют больший срок службы, меньшую массу, требуют менее тщательного ухода в эксплуатации (проведения регламентных работ). С точки зрения надёжности рассматриваемые конструкции имеют последовательное соединение элементов, т.е. для эффективного функционирования изделия требуется исправное действие всех элементов.

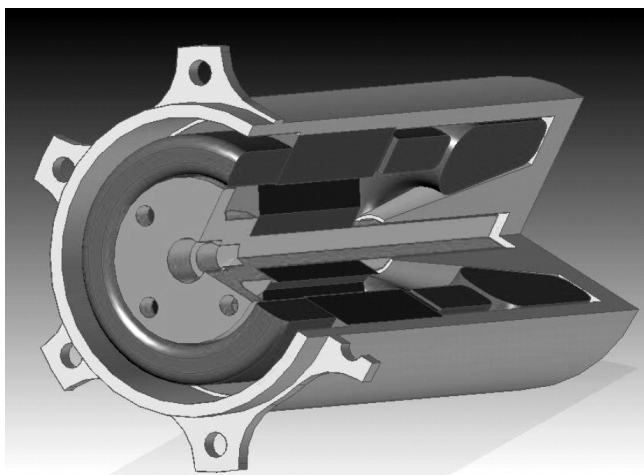


Рис. 1

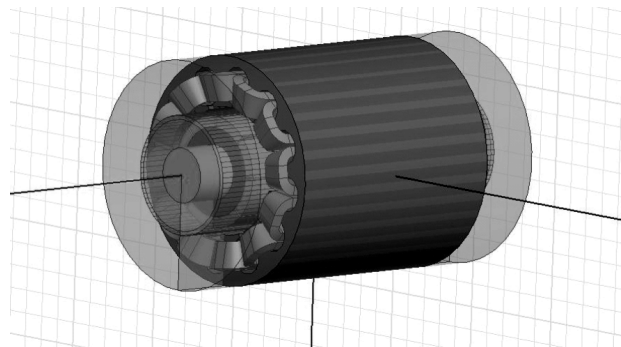


Рис. 2

Индукторный генератор (рис. 1) состоит из следующих составных частей: пакета ротора, пакета якоря, обмотки якоря, корпуса статора, обмотки возбуждения.

Основными преимуществами генератора индукторного типа являются упрощенные конструкции ротора (отсутствие сборных элементов и бандажа) и обмотки возбуждения (неподвижная катушка);

Генератор с возбуждением от постоянных магнитов (с внешним ротором) (рис. 2) предлагается выполнять встраиваемым. Он состоит из ротора с постоянными магнитами, пакета статора, якорной обмотки. Конструкция встраиваемого генератора исключает специальные подшипники, уплотнения, боковые щиты и корпус. Но в целом два рассматриваемых типа генераторов по своему исполнению одинаково надёжны. Наибольшую роль в такой сложной системе генерирования играют электронные компоненты, используемые в блоке управления каждого типа генератора. На уровне схемных решений имеются следующие отличия, влияющие на надёжность:

в системе генерирования с магнитоэлектрическим генератором отсутствует отдельный источник питания для обмотки возбуждения, что повышает надёжность системы;

в системе генерирования с индукторным генератором имеется выпрямитель, состоящий из схемы на 12 диодах (для получения необходимого уровня пульсаций), в свою очередь, в генераторе с возбуждением от постоянных магнитов используется диодный мост на 6 диодах (необходимый уровень пульсаций обеспечивается DC-DC-преобразователем);

у генератора с индукторным возбуждением имеются вспомогательный выпрямитель для измерения напряжения обмотки возбуждения, регулятор напряжения для регулирования, измеритель напряжения для измерения; в схеме генератора с возбуждением от постоянных магнитов эту роль выполняют два преобразователя.

Таким образом, по совокупности преимуществ в качестве концепции нами выбрана система гене-

рирования на базе магнитоэлектрического генератора с регулированием напряжения при изменении частоты с помощью специального преобразователя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин. — М.: Высшая школа, 1982, 272 с.
2. Постников И.М. Проектирование электрических машин. — Киев: Государственное издательство технической литературы УССР, 1960, 736 с.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. Ч. 1. — Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического университета, 1999, 199 с.
4. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: Учебное пос. для вузов, 2-е изд. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007, 200 с.
5. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники, т. 1/Пер. с англ., 4-е изд. — М.: Мир, 1993, 413 с.

[14.11.2017]

Elektrichestvo, 2018, No. 6, pp. 66–70

DOI:10.24160/0013-5380-2018-6-66-70

## Estimating the Possibility of Developing a Self-Contained Compact DC Generation System and Determining the Principle of Its Construction

ISHUTINOV Vyacheslav V. (JSC «LEPSE»; Vyatka State University (VyatGU), Kirov, Russia) — Head of the Project; Associate Professor of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

SAVIN Andrei A. (JSC «LEPSE», Kirov, Russia) — 3-rd category engineer-designer

РЫКХТЕЙЕВ Yevgenii N. (JSC «LEPSE», Kirov, Russia) — 2-nd category engineer-designer

KULYABIN Stanislav V. (JSC «LEPSE», Kirov, Russia) — 2-nd category engineer-designer

*Development of a compact generation system is one of topical problems in designing electrical equipment for self-contained facilities. The article considers factors that determine the principles of constructing the generation system and the problems associated with this. It is shown that selection of the electromechanical energy converter type (the generator) is the key issue in determining the generation system development concept. Its design determines the overall mass and dimensions, and the power performance indicators of the entire system, and its control system determines the voltage control range and ripple level. The scope of investigation also included a reliability analysis of the generation system consisting of a generator and control unit depending on the design concept. A generation system based on a permanent-magnet synchronous generator and a control unit involving a DC-DC converter has been selected as the most promising version.*

**Key words:** self-contained DC generation system, design principle, permanent-magnet synchronous generator, rotation frequency

## REFERENCES

1. Balagurov V.A. *Proyektirovaniye spetsial'nykh elektricheskikh mashin* (Design of the special electrical machines). Moscow, Publ. «Vysshaya shkola», 1982, 272 p.
2. Postnikov I.M. *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin* (Design of the electrical machines). Kiyev, Ukraine State Publishing of Technical Literature, 1960, 736 p.
3. Zinov'yev G.S. *Osnovy silovoi elektroniki. Ch. 1* (Fundamentals of power electronics. Part 1). Novosibirsk, Publ. of the Novosibirsk State Technical University, 1999, 199 p.

*А в т о р ы: Ишутинов Вячеслав Владимирович окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) в 2009 г. по специальности «Электромеханика». В 2015 г. защитил кандидатскую диссертацию «Анализ и оптимизация вентильного электродвигателя для высокочастотного электропривода». Доцент кафедры электрических машин и аппаратов ВятГУ, руководитель проекта АО «ЛЕПСЕ».*

*Савин Андрей Александрович окончил ВятГУ в 2011 г. Инженер-конструктор 3 категории АО «ЛЕПСЕ».*

*Пыхтеев Евгений Николаевич окончил ВятГУ в 2011 г. Инженер-конструктор 2 категории АО «ЛЕПСЕ».*

*Кулябин Станислав Владимирович окончил ВятГУ в 2011 г. Инженер-конструктор 2 категории АО «ЛЕПСЕ».*

4. Popkov O.Z. *Osnovy preobrazovatel'noi tekhniki, 2-ye izd.* (Fundamentals of Converter technology, 2nd ed.). Moscow, Publ. House of the Moscow Power Engineering Institute, 2007, 200 p.

5. Khorovits P., Khill U. *Iskusstvo skhemotekhniki, tom 1/Per. s angl.* (The art of circuit design, vol. 1/Ed. from English). Moscow, Publ. «Mir», 1993, 413 p.

[14.11. 2017]