

05.09.03 ЭК
Б493

Контрольный
экземпляр

На правах рукописи

Виноградов Константин Михайлович

**АВТОНОМНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ
УСТАНОВКА С СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ
МАШИНОЙ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Челябинск
2006

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор Усынин Юрий Семёнович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Беспалов Виктор Яковлевич;
доктор технических наук,
профессор Воронин Сергей Григорьевич.

Ведущая организация – ОАО «Электромашина», г. Челябинск.

Защита состоится 27 апреля 2006 г., в 14 часов, в ауд. 1001 на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ.

Факс: (351) 267-96-90. E-mail: uus@susu.ac.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан “___” марта 2006 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Ю.С. Усынин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одной из важнейших проблем автономных электроэнергетических установок (АЭУ), особенно работающих на бортовую сеть, является их дальнейшее совершенствование. Решение соответствующих этой проблеме научно-технических задач актуально в связи с увеличением числа и возрастанием мощности бортовых потребителей электроэнергии, повышением требований к надежности и эксплуатационному ресурсу электротехнического оборудования, к его удельным энергетическим и массо-габаритным показателям.

Автономные энергоустановки для производства электроэнергии, как правило, эксплуатируются в тяжелых условиях, поэтому к вентильным генераторам предъявляются повышенные требования: большая перегрузочная способность, поддержание заданного уровня напряжения при расширенном диапазоне изменения скорости вращения приводного двигателя, интенсивное использование активных материалов, малые потери при простоте конструкции электрической машины. В транспортных электроэнергетических установках широкого класса (самолетных, автомобильных, танковых и др.) применяются вентильные системы генерирования как переменного, так и постоянного токов.

В настоящее время прогресс в вентильных генераторах идет в большей степени за счет совершенствования преобразователя и в меньшей – самой электрической машины. Тем не менее, если обратить внимание на новые типы электрических машин и в комплексе с преобразователем проектировать новую генераторную установку, то можно добиться хороших результатов. Особое место в этом ряду занимает синхронная реактивная машина с независимым возбуждением (СРМНВ) (по английской терминологии – Field Regulated Reluctance Machine), в которой обмотка выполнена с полным шагом, при этом часть витков создает поток возбуждения, а другая – электромагнитный момент.

В существующих публикациях по СРМНВ предлагается сравнение ее работы в двигательном режиме чаще в сравнении с асинхронным двигателем, приводится ее математическое описание, высказываются некоторые соображения по выбору оптимального числа фаз.

Однако в приведенных источниках как отечественных, так и зарубежных, слабо освещена физика работы машины, не приводятся инженерные методики расчета генератора. Наконец, нет рациональных схем генераторной установки с СРМНВ, что позволило бы в комплексе рассматривать возможности этой системы. Между тем очевидны преимущества генераторной установки с СРМНВ: простота конструкции, «холодный» безобмоточный ротор, высокий КПД, большие перегрузочные способности, бесконтактность, стандартная элементная база и типовые структуры замкнутых систем управления.

Отмеченными выше обстоятельствами и аргументами обусловлена актуальность темы настоящей работы.

Работа поддержана грантом по программе развития научного творчества молодёжи в вузах Челябинской области, осуществляемой Министерством образования и науки РФ и Администрацией Челябинской области.

Целью работы является улучшение эксплуатационных и массогабаритных характеристик автономной генераторной установки, выполненной с применением синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи:

- систематизация сведений по современным автономным энергоустановкам, работающим на бортовую сеть, перспективным типам электрических машин и основным компонентам силовой электроники;
- разработка детальной классификации современных бесконтактных генераторных установок;
- разработка математических моделей генератора с СРМНВ для статических и динамических режимов работы установки;
- создание алгоритмов управления и типовых структур генераторной установки;
- проектирование и реализация лабораторного стенда для проведения натурных испытаний автономной энергоустановки;
- экспериментальное исследование опытного макета генераторной установки с СРМНВ для проверки предложенных алгоритмов управления.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались основные положения теории электромеханического преобразования энергии, общей теории электротехники, практические аспекты промышленной электроники, методы экспериментального исследования, методы математического моделирования систем на ЭВМ, классические и частотные методы теории регулирования, метод физического эксперимента.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту:

- предложенная в работе методика электромагнитного расчета СРМНВ, основанная на модели СРМНВ, которая включает в себя на разных этапах проектирования фрагменты типовых расчетов, общепринятых для машин постоянного тока, асинхронных и синхронных;
- предложенный критерий оптимизации формы линейной плотности поверхности тока, сформулированный на основе аппарата обмоточных функций, а также оптимальная форма ротора СРМНВ, которые учитывают особенности питания силовых (якорных) цепей и цепей возбуждения статора от вентильных преобразователей;
- алгоритмы управления и структуры генераторной установки с СРМНВ;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований на лабораторном макете, подтверждающие адекватность принятых моделей СРМНВ, а также возможность реализации предложенных структур и алгоритмов управления.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается удовлетворительным для инженерной методики

совпадением основных теоретических результатов и экспериментальных данных, проведённых на макете генераторной установки, аргументированностью исходных посылок, вытекающих из основ электротехники, корректным использованием теории электрических машин и теории автоматического регулирования

Значение работы и научная новизна. Научное значение работы заключается в следующем:

– систематизированы сведения по синхронным реактивным и другим типам машин современных генераторных установок автономных объектов и определены перспективы использования генераторных установок на базе СРМНВ;

– выполнена детальная классификация новых типов бесконтактных электрических машин, используемых в современных автономных энергоустановках, работающих на бортовую сеть;

– предложены обобщённые расчётные математические модели генератора с СРМНВ, позволяющие решать задачи оптимального выбора элементов, синтеза систем автоматического управления, анализа динамики систем управления;

– предложен алгоритм оптимизации формы линейной плотности поверхности тока и геометрических размеров СРМНВ с учётом особенностей питания обмоток статора от вентильных преобразователей;

– предложены и обоснованы алгоритмы управления генераторной установки с СРМНВ;

– разработаны перспективные структуры автономной энергоустановки с СРМНВ, имеющие высокие регулировочные и энергетические показатели.

Практическое значение работы заключается в следующем:

– разработаны рекомендации по проектированию генераторной установки на основе СРМНВ и выбору законов ее управления;

– разработаны структурные, функциональные и принципиальные схемы систем управления генераторной установкой с СРМНВ;

– разработан и реализован лабораторный стенд генераторной установки на основе СРМНВ;

– предложена методика расчёта установившихся и динамических процессов электромеханического преобразования энергии в генераторе с СРМНВ.

Новизна работы подтверждена патентом на изобретение РФ.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Разработанные структурные и функциональные схемы АЭУ с СРМНВ и методики их расчёта приняты для использования:

– в разработках перспективных электроприводов ОАО «Электромашин» (г. Челябинск);

– Южно-Уральским государственным университетом в учебном процессе на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок».

Апробация работы. В полном объёме работа докладывалась и обсуждалась на научно-техническом совете ОАО «Электромашина» и на расширенном заседании кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Южно-Уральского государственного университета.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах, в том числе :

– IV Международной (XV Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП – 2004» (Магнитогорск, 14–17 сентября 2004 г.);

– XIII Международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» (ЭППТ ' 05) (Екатеринбург, 2005 г.);

– на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (Челябинск, 2002–2005 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 1 патент на изобретение РФ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, изложенных на 173 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка, 8 таблиц, список используемой литературы из 187 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационной работы, ее научной и практической значимости, сформулированы задачи исследований, научные положения, выносимые на защиту, в виде краткой аннотации представлены основные этапы работы.

В первой главе рассматривается современное состояние и перспективы развития силовых элементов автономных электроэнергетических установок. Отмечается, что в связи со значительными успехами силовой и информационной электроники за последние годы в различных сферах энергетики (автоматизированный электропривод, автономная электроэнергетика и др.) произошли качественные изменения. На основе детального обзора работ, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, сформулированы требования к современным автономным электроэнергетическим установкам (АЭУ), работающим на бортовую сеть. В частности, были рассмотрены тенденции развития элементной базы и электромеханических преобразователей различных перспективных транспортных средств широкого класса: автомобили, тракторы, летательные аппараты, специальные транспортные средства, вездеходы и др. В табл. 1 представлены основные технические данные АЭУ различных автономных объектов.

Таблица 1

Технические характеристики АЭУ современных транспортных средств

Показатель	Транспортное средство		
	Автомобили	Спец.транспортные средства, тракторы	Самолеты
1. Мощность, кВА	0,5...6	7...30	16...120
2. Рабочая частота вращения ротора генератора, об/мин	1500...5000	2000...9000	6000...12000
3. Уровень напряжения, род тока	=14; 28; 42 В	=28 В	=270...470 В; ~208 В 400 Гц
4. Удельная масса, кг/кВА	2,5...5,5	1,8...3,7	0,6...1,7

Особый интерес проявляется к бесконтактным генераторным установкам, т.к. бесконтактность является часто не только желательным, но обязательным свойством генератора, работающего в тяжелых условиях.

При поиске новых эффективных решений в классе бесконтактных машин с пассивным ротором и «гладким» статором привлекла внимание многофазная синхронная реактивная машина независимого возбуждения (СРМНВ). Эта машина может служить примером улучшения удельных показателей реактивных машин, который связан с выявлением и использованием дополнительных возможностей, возникающих при совместной оптимальной работе машины и полупроводникового преобразователя. СРМНВ имеет на статоре многофазную обмотку с полным шагом и явнополюсный ротор. На рис. 1 представлен в разрезе пример трехфазного генератора на базе СРМНВ. В пазах, расположенных на статоре в плоскостях A-a, B-b, C-c,

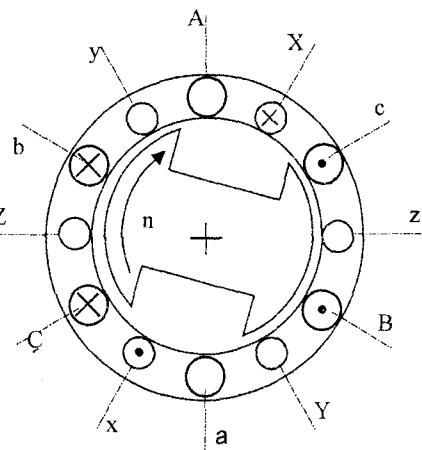


Рис. 1. Схематичный поперечный разрез синхронного генератора

сдвинутых пространственно на 120 градусов, размещены силовые (основные) обмотки, соединенные в звезду. Кроме силовых обмоток, на статоре аналогичным образом в плоскостях X-x, Y-y, Z-z, размещены дополнительные обмотки – обмотки возбуждения, выполненные также с полным шагом. Цепи основных и дополнительных обмоток конструктивно разделены. Это сделано в связи с тем, что в отличие от цепей обмоток возбуждения, которые требуют искусственной коммутации вентилей в функции положения ротора, якорные (силовые) обмотки работают в режиме естественной коммутации и могут быть подключены к неуправляемому выпрямителю. Направления токов во всех обмотках статора соответствуют указанному на рис. 1 мгновенному положению ротора генератора. Благодаря совместному вращательному движению ротора и магнитодвигущей силы возбуждения достигается непрерывное возбуждение генератора.

Очевидны конструктивные преимущества машины: бесконтактность, простая и технологичная конструкция, “холодный” (не содержащий обмоток) ротор, простая обмотка на статоре.

Тем не менее, обзор литературы по СРМНВ показал следующее:

- слабо освещена физика работы генераторной установки с данным типом машины, являющаяся основой для последующих работ (разработка моделей, проектирование и др.);
- известные математические модели машины не позволяют в комплексе проектировать машину и вентильный преобразователь;
- не рассмотрены и не обоснованы варианты структур системы управления генераторной установки с СРМНВ;
- не приводится сопоставление регулировочных показателей данного типа генератора с современными АЭУ.

Во второй главе предложена классификационная схема бесконтактных электрических машин автономных энергоустановок.

Классификационные признаки выбраны таким образом, чтобы с одной стороны, показать конструктивные и функциональные особенности СРМНВ, с другой, – дать их в сравнении с наиболее близкими типами машин (асинхронными, синхронными, машинами постоянного тока). В качестве классификационных признаков при сравнении были выбраны характерные особенности этих машин: тип обмотки на статоре, число фаз машины, количество пар полюсов статора и ротора, конструктивные особенности статора и ротора, способ возбуждения, картина магнитного потока в зазоре и особенности управления электрической машиной.

Классификационная схема позволила выделить основные конструктивные и функциональные свойства СРМНВ, имеющие как сходства, так и различия с другими типами электрических машин (табл. 2), что в, свою очередь, позволило использовать соответствующие типовые методики проектирования серийных электрических машин при электромагнитном расчете СРМНВ.

СРМНВ – принципиально новая машина, поэтому перед разработкой ее математической модели все вышесказанные предположения о принципе работы машины, ее функциональные особенности были проверены в сравнении с другими электрическими машинами.

Таблица 2

Наиболее важные функциональные и конструктивные признаки СРМНВ в сравнении с другими типами электрических машин

Тип электрической машины	Различия	Сходства	
		Признак	Где использовано
Машина постоянного тока	Нет коллектора, безобмоточный явнополюсный ротор, конечное число секций	Трапециoidalная форма поля в режиме холостого хода и искаженная форма из-за реакции якоря – при нагрузке	Электромагнитный расчет, математическая модель машины, синтез системы управления
Асинхронная машина	Ротор без обмотки, обмотка статора с полным шагом	Многофазная обмотка статора, магнитная система статора	Электромагнитный расчет, технология изготовления машины
Синхронная реактивная машина	Простой ротор с малым отношением Ld/Lq , специальные законы управления токами статора	Многофазная обмотка на статоре, явнополюсный безобмоточный ротор	Технология изготовления машины
Синхронная машина	Несинусоидальная форма поля, безобмоточный массивный ротор	Магнитная система статора, явнополюсный ротор	Электромагнитный расчет, математическая модель, технология изготовления

Сопоставление СРМНВ и машины постоянного тока на уровне принципа действия иллюстрируется кривыми МДС реакции якоря (рис.2). В СРМНВ физическая нейтраль сдвинута преднамеренно на край полюса (рис. 2, а), поэтому проводники, находящиеся над межполюсным промежутком, создают поле возбуждения, при этом намагничивающая составляющая реакции якоря приходится на полюс, а размагничивающая – на межполюсный промежуток. В итоге в СРМНВ полезно работают все проводники обмотки якоря. В машине постоянного тока строгое совпадение геометрической и физической нейтралей не по-

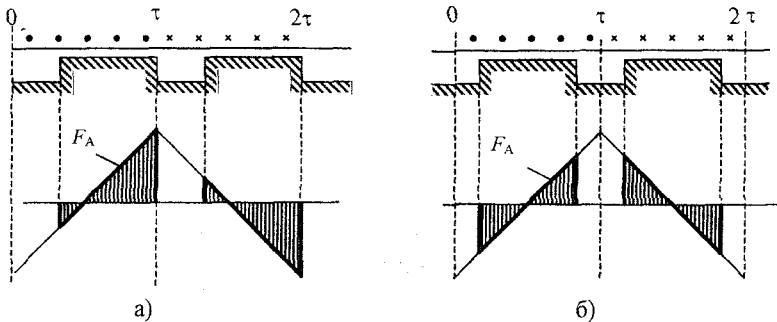


Рис. 2. Развертка машины и МДС реакции якоря:

- а) в СРМНВ;
- б) в машине постоянного тока

зводят продуктивно использовать проводники, расположенные в межполюсном промежутке (рис. 2, б).

Исходя из

того, что СРМНВ имеет функциональные сходства с машиной постоянного тока, в которой главные полюса чаще

выполняются массивными, в работе было

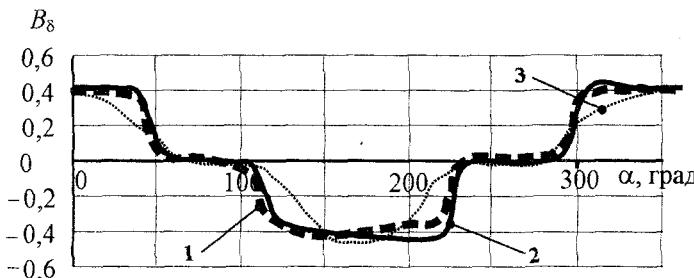


Рис. 3. Картина магнитных полей в воздушном зазоре:

- 1 – СРМНВ;
- 2 – синхронной машины с активным ротором;
- 3 – синхронной реактивной машины

предложено ротор исследуемой машины также выполнить массивным (вал и полюсы изготовлены из одной стальной заготовки). Такая конструкция ротора отличается технологичностью, высокой механической прочностью и жесткостью.

Возможность экспериментального сопоставления СРМНВ с другими типами электрических машин представилась только для синхронной машины с активным ротором и синхронной реактивной машины, т.к. только в этом случае можно было все три варианта

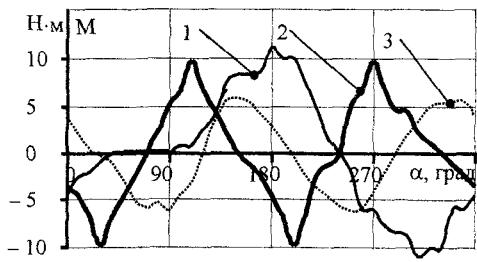


Рис. 4. Угловые характеристики синхронной машины с активным ротором (1); СРМНВ (2); реактивной машины (3)

выполнить на одном и том же магнитопроводе. Серия экспериментов, проведенная на реально действующих образцах, включала в себя сопоставление кривых магнитной индукции в зазоре вдоль расточки статора в режиме холостого хода (рис. 3), снимались также угловые характеристики (рис. 4).

Результаты экспериментов показали, что угловая характеристика СРМНВ имеет два периода на оборот (как в синхронной реактивной машине), максимальный момент практически не уступает (ниже всего лишь на 10%) синхронной машине с активным ротором и почти на 30...40 % превосходит реактивную машину. Это позволило сделать вывод о том, что в отличие от классической реактивной машины, в которой высоких удельных показателей добиваются за счет усложнения конструкции ротора (увеличения отношения Ld/Lq), в СРМНВ это достигается за счет применения специальных (необязательно синусоидальных) законов управления токами статора.

Кроме того, в ходе исследования функциональных свойств и угловых характеристик СРМНВ не наблюдалось каких-либо признаков ограничения кривой электромагнитного момента (рис. 5). Эксперименты проводились при токах до 4...5 от номинального значения, которое определялось из условия, что превышение температуры обмоток не выходит за допустимое значение в продолжительном режиме работы (точка «а», рис. 5). В случае последовательного соединения статорных обмоток зависимость максимального момента на угловой характеристике от тока имела прямолинейный характер (рис. 5, кривая 1). При независимом возбуждении (ток возбуждения поддерживался постоянным) кривая момента при малых нагрузках имела линейный характер, а при перегрузках наклон кривой снижался (рис. 5, кривая 2), что связано с размагничивающим влиянием реакции якоря.

В третьей главе проведен обзор существующих моделей электромеханических преобразователей. Показано, что модель СРМНВ на основе уравнений обобщенной электрической машины имеет свои особенности, связанные с тем, что ротор СРМНВ выполнен безобмоточным, а обмотка статора конструктивно разделена на обмотку якоря и обмотку возбуждения. Если модель СРМНВ представить в базисе α, β , то в дифференциальных уравнениях появляются коэффициенты, являющиеся периодическими функциями угла положения ротора. Модель в координатных осях d, q хотя и лишена этого недостатка, тем не менее, и она не приспособлена для электромагнитного расчета машины. Прово-

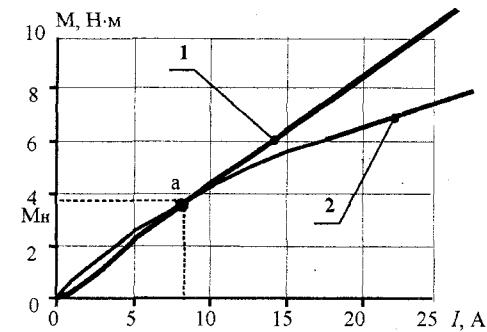


Рис. 5. Зависимость момента машины от тока якоря:
1 – при последовательном соединении всех обмоток статора; 2 – при постоянном независимом возбуждении $I_B = 10$ А

дить синтез системы управления генераторной установки с помощью данных моделей весьма проблематично. Модели машины на основе уравнений обобщенного электромеханического преобразователя подразумевают синусоидальное распределение магнитного потока в воздушном зазоре, в СРМНВ же применяемые законы управления токами статора носят принципиально несинусоидальный характер.

Сходство картины магнитных полей в СРМНВ и обращённой машине постоянного тока позволяет предложить расчетную модель СРМНВ, аналогичную моделям типовых машин постоянного тока.

Выражение для электромагнитного момента можно записать в виде:

$$M = B_\delta \cdot I_a \cdot l_\delta \cdot N_a \cdot \frac{D}{2} \cdot k_{cp}, \quad (1)$$

где B_δ – индукция в зазоре; I_a – величина якорного тока; l_δ – длина ротора; N_a – число проводников приходящихся на эквивалентную якорную обмотку; D – диаметр ротора; k_{cp} – коэффициент, учитывающий пульсации электромагнитного момента.

Коэффициент пропорциональности электромагнитного момента якорному току можно определить по выражению:

$$C_M = B_\delta \cdot N_a \cdot \frac{D}{2} \cdot l_\delta \cdot k_{cp}. \quad (2)$$

Среднее значение индукции в зазоре

$$B_\delta = \mu_0 \cdot \frac{(1 - \alpha_\delta) \cdot I_a \cdot K_b \cdot N}{4 \cdot p \cdot \delta' k_{pd}}. \quad (3)$$

Здесь $K_b = I_b / I_a$ – ток возбуждения в долях от тока якоря; p – число пар полюсов; δ' – расчётное значение воздушного зазора; k_{pd} – коэффициент насыщения магнитной системы по продольной оси; N – эффективное число проводников статора; α_δ – полюсная дуга.

Коэффициент пропорциональности

$$C_E = B_\delta \cdot l_\delta \cdot w_\phi \cdot D \quad (4)$$

устанавливает зависимость между скоростью и ЭДС вращения якорной обмотки двигателя (w_ϕ – число витков статорной обмотки, приходящихся на фазу).

В случае, когда объект регулирования мало изучен, резко возрастает интерес к частотно-топологическим моделям вновь создаваемых электромеханических систем энергоустановок, особенно в тех случаях, когда имеется аппаратура для экспериментального определения частотных характеристик. Поэтому синтез частотно-топологической модели СРМНВ осуществлялся на основании экспериментально снятых на лабораторном макете частотных характеристик

АЭУ. Было показано, что математическую модель СРМНВ можно аппроксимировать звеном второго порядка с передаточной функцией:

$$W_F = \frac{k}{(1 + T_1 p) \cdot (1 + T_2 p)} \quad (5)$$

Исходя из того, что СРМНВ имеет сходства по функциональным и конструктивным признакам с наиболее распространенными типами электрических машин, была предложена методика электромагнитного расчета генератора, выполненного на базе СРМНВ, в основу которой положены современные типовые расчеты серийных электрических машин. Получены рекомендации по выполнению основных этапов расчета (см. табл. 3).

Таблица 3

Сравнение основных этапов электромагнитного расчета СРМНВ и серийных электрических машин

Этап расчета	Рассчитываемые параметры	Замечания
Выбор главных геометрических размеров	Высота оси вращения, внешний диаметр статора, внутренний диаметр расточки статора, активная длина статора, полюсное деление, геометрический фактор, коэффициент полюсного перекрытия	Расчет проводится аналогично серийным асинхронным двигателям
Расчет обмотки якоря	Число пазов статора, зубцовое деление, число эффективных проводников в пазу, сечение эффективных проводников, сечение и количество элементарных проводников, уточнение линейной нагрузки и проверка обмотки на нагрев пазовой части	Расчет производится по аналогии с машинами постоянного тока. Обмотка выполняется с полным шагом
Расчет зубцовой зоны статора	Предварительное значение магнитного потока на один полюс, допустимые значения магнитной индукции в спинке и зубце статора, высота спинки статора, ширина зубца, высота паза, меньшая и большая стороны паза, площадь паза под размещение обмоток, коэффициент заполнения паза	Расчет выполняется по аналогии с машинами переменного тока. Коэффициент заполнения паза в СРМНВ рассчитывается с учетом обмотки возбуждения

Окончание табл. 3

Расчет полюсов ротора	Выбор воздушного зазора, диаметр ротора, длина полюсной дуги, допустимое значение магнитной индукции в основании полюса, ширина полюсного сердечника, высота остова ротора	Расчет проводится по аналогии с расчетом полюсов ротора синхронных машин. Особенностью СРМНВ в этом случае является равномерный воздушный зазор вдоль полюсной дуги
Расчет полюсов ротора	Выбор воздушного зазора, диаметр ротора, длина полюсной дуги, допустимое значение магнитной индукции в основании полюса, ширина полюсного сердечника, высота остова ротора	Расчет проводится по аналогии с расчетом полюсов ротора синхронных машин. Особенностью СРМНВ в этом случае является равномерный воздушный зазор вдоль полюсной дуги
Расчет магнитной цепи на холостом ходу	МДС воздушного зазора, коэффициент воздушного зазора, МДС зубцовой зоны статора, напряженность магнитного поля в зубце, МДС ярма статора, напряженность магнитного поля в спинке статора, средняя длина магнитной силовой линии в спинке, МДС полюса ротора, напряженность поля в полюсном наконечнике ротора, МДС спинки ротора, напряженность поля в спинке ротора, МДС всей магнитной цепи, коэффициент насыщения магнитной цепи	Расчет проводится по аналогии с машинами переменного тока. Особенностью СРМНВ является отсутствие обмотки на роторе
Учет реакции якоря под нагрузкой. Расчет обмотки возбуждения	Переходная характеристика, МДС поперечной реакции якоря возле полюсного наконечника, эквивалентное значение МДС реакции якоря, МДС обмотки возбуждения	Расчет проводится согласно методике, предложенной для машин постоянного тока с учетом особенности распределения МДС в СРМНВ
Расчет выходных характеристик	Активное сопротивление обмотки, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки якоря, ненасыщенные значения индуктивных сопротивлений продольной и поперечной реакции якоря, синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси, синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси, построение внешней характеристики генератора	Расчет проводится по аналогии с синхронными машинами. Особенностью СРМНВ является ее работа на выпрямитель, что необходимо учитывать при построении векторных диаграмм

В связи с тем, что генераторная установка с СРМНВ мало изучена, то актуальна задача поиска оптимальной формы линейной плотности поверхностного тока статора.

Попытки решать указанную задачу аналитическими методами оказались малоэффективными, а учёт особенностей питания машины от вентильных преобразователей, выполненных по различным схемам, исключает получение решения в общем виде. Более продуктивными оказались численные методы, тем более что любая машина, имеющая конечное число пазов, дискретна по своей природе.

Очень удобным оказался аппарат обмоточных функций двигателя. В этом случае непрерывный график линейной плотности поверхностного тока заменялся реальной дискретной последовательностью импульсов, равных пазовым токам I_i статора (рис. 6, а). Интегрированием этой последовательности импульсов получался график МДС F в зазоре (рис. 6, б), который (в идеально линейной системе) в другом масштабе представляет график индукции в зазоре. Если ротор неявнополюсный, то сумма положительных и отрицательных импульсов удельной касательной силы f_t вдоль расточки статора (рис. 6, в) равна нулю. Чтобы электрическая машина развивала электромагнитный момент, необходимо импульсы одной полярности (положительные или отрицательные) «отсечь», для чего её ротор выполнить явнополюсным (рис. 6).

Критерий оптимизации был представлен в виде

$$q = \frac{\sum_{i=m}^k I_i \cdot \left(\sum_{i=1}^j I_i + C \right)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2}, \quad (6)$$

где I_i – пазовый ток; n – число пазов на статоре; C – постоянная интегрирования; m , k – номера пазов, соответствующих координатам x_1 , x_2 (рис. 6, а). Критерий q пропорционален отношению величины электромагнитного момента к потерям в меди. Он удобен тем, что имеет нулевую размерность относительно величины тока статора, так как и числитель и знаменатель в равной степени (во второй) зависят от тока.

Оптимизация формы линейной плотности поверхностного тока рассматривалась для случаев питания статорных обмоток: от индивидуальных источников на каждую фазу; от двух параллельно работающих автономных инверторов тока, каждый из которых выполнен по трёхфазной мостовой схеме. Оптимизация выполнялась для идеально линейной системы, затем учитывалось насыщение магнитной системы.

Оптимизация формы линейной нагрузки дала следующие результаты. Наибольшее значение показателя q (с учетом насыщения) наблюдалось при 120-градусной проводимости вентиляй в цепи возбуждения, правда, этот показатель на 15% ниже, чем в схеме с индивидуальными источниками (рис. 7, а). Оптимальная форма полуволны тока возбуждения для одной фазы статора СРМНВ (рис. 7, б) составлена из двух горизонтальных отрезков продолжительностью 60 градусов каждый, равных между собой по амплитуде. В том случае, когда обмотка возбуждения питается от традиционного источника синусоидального напряжения, показатель q снижался на 20%. В рассмотренных выше случаях величина относительной полюсной дуги ротора принималась равной $\alpha_p=0,67$, что диктовалось трехфазной мостовой схемой выпрямления, где угол проводимости вентиляй равен 120 эл. град. Когда величину полюсной дуги ротора уменьшали до $\alpha_p=0,5$ (90 эл. град), величина q уменьшалась на 25% по сравнению с исходным случаем.

В автономных энергоустановках низкого напряжения может найти применение нулевая схема выпрямления, например, «звезда—обратная звезда». В этом случае выбранный критерий оптимизации снижался на 30–35%, что можно объяснить недоиспользованием активных материалов машины. Тем не менее, эта схема (по сравнению с мостовой) имеет меньшее падение напряжения на вентилях, двойной выпрямленный ток при том же числе вентиляй и малый средний ток через вентиль. Это важно при низких напряжениях и больших токах АЭУ.

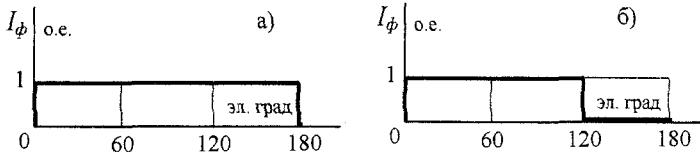


Рис. 7. Форма полуволны тока статора:

- а) при питании обмоток статора от индивидуальных источников тока;
- б) при питании обмотки возбуждения от униполлярного источника

В четвертой главе рассмотрены различные варианты структур систем управления и функциональные схемы силовых цепей и цепей возбуждения. Показано, что в СРМНВ автономной электрогенераторной установки целесообразно конструктивно разделить на статоре цепи силовые и возбуждения: то-

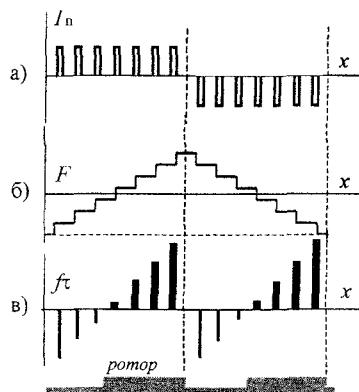


Рис. 6. Распределение пазового тока, МДС, и удельной касательной силы вдоль расточки статора

гда в силовых цепях можно исключить управляемые вентильные элементы, заменив их неуправляемым выпрямителем, работающим в режиме естественной коммутации, а в цепях возбуждения существенно снизить установленную мощность полупроводниковых элементов управления (патент РФ №2240640). В качестве источника питания цепей возбуждения использовался униполярный источник тока, получивший свое распространение в вентильно-индукторных приводах (рис. 8). По сравнению со стандартными автономными инверторами тока (напряжения) он отличается простотой и меньшим числом полностью управляемых вентилей на фазу.

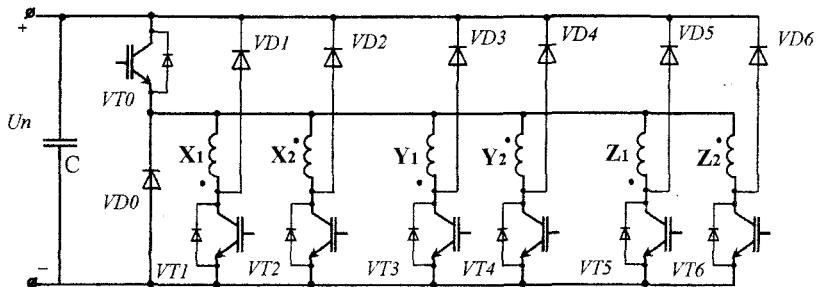


Рис. 8. Униполярный источник питания обмотки возбуждения

Было сформулировано техническое задание на лабораторный образец АЭУ с СРМНВ, в лаборатории автоматизированного электропривода кафедры ЭПА Южно-Уральского государственного университета был выполнен дейст-

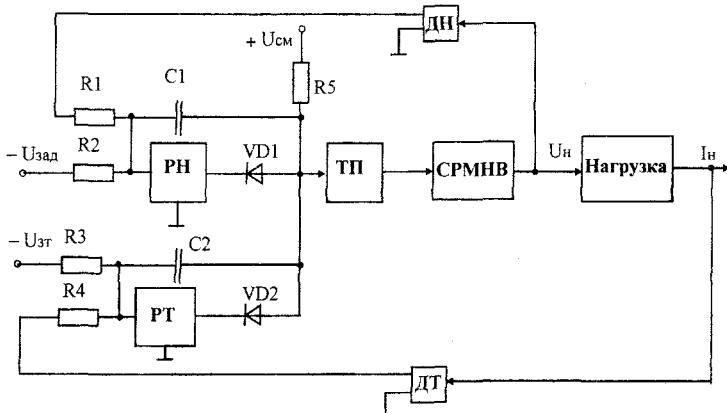


Рис. 9. Функциональная схема АЭУ с параллельными регуляторами

вующий макетный образец. Для проведения экспериментов были изготовлены четыре образца СРМНВ, которые различались числом полюсов и мощностью. Силовые цепи a) выполнялись в двух стандартных вариантах: мостовом или нулевом. На макете проверены основные положения теории, с использованием экспериментальных частотных характеристик уточнена математическая модель, обоснована работоспособность основных функциональных схем управления – схемы с подчиненным регулированием координат и схемы с параллельными регуляторами. Показано, что наиболее предпочтительной структурой управления АЭУ является структура с параллельными регуляторами (рис. 9) как наиболее простая схема вследствие нереверсивности привода генератора. При работе генератора, когда ток нагрузки не превышает допустимого значения, регулятор тока (РТ) насыщен до максимального положительного уровня избыточным входным сигналом $-U_{зт}$. Уровень напряжения на выходе регулятора напряжения (РН), задаваемый величиной $-U_{зад}$, меньше, чем на выходе РТ. Логическая схема (диоды VD1, VD2, резистор R5 и напряжение смещения $+U_{см}$) всегда пропускает меньшее из входных напряжений, т.е. в рассматриваемом случае диод VD2 закрыт, а VD1 – открыт, и на вход возбудителя подается напряжение с выхода РН. Схема работает в режиме поддержания напряжения. При увеличении тока нагрузки до максимально-допустимого значения (I_{max}) выходное напряжение на выходе РТ резко снижается, и когда оно станет ниже выходного напряжения РН, диод VD1 закроется, а VD2 – откроется. Схема будет работать в режиме поддержания (ограничения) заданного тока нагрузки. Когда нагрузка генератора уменьшится, вновь заработает контур регулирования напряжения.

В рассмотренных схемах управления исследовались основные показатели регулирования. Практический интерес представляли внешняя (зависимость выходного напряжения генератора от тока нагрузки) и скоростная (зависимость напряжения генератора от скорости вращения ротора генератора) характеристики. Было показано, что статическая характеристика АЭУ имеет прямоугольный характер. В зоне допустимых нагрузок она идеально жесткая (режим поддержания напряжения), в зоне перегрузок – идеально мягкая (режим огра-

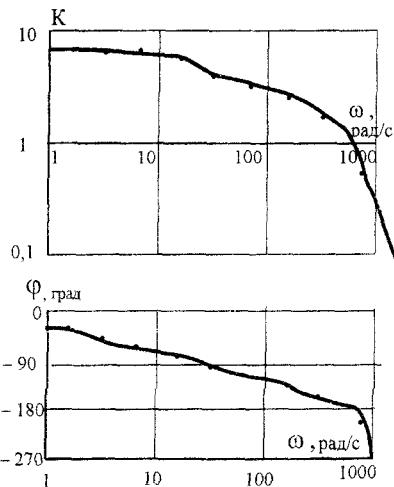
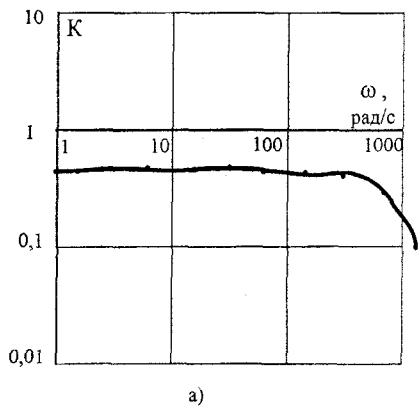
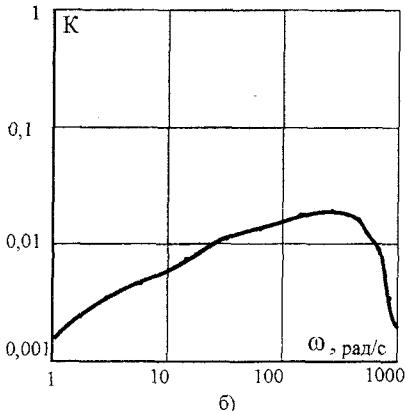


Рис. 10. Экспериментальные частотные характеристики разомкнутого КРН:
а) амплитудная;
б) фазовая



а)



б)

Рис. 11 Экспериментальные частотные характеристики замкнутого КРН:

- по сигналу задания;
- по возмущению

значения тока). Анализ расчётных и экспериментальных кривых показал их удовлетворительное совпадение.

При идентификации силового канала АЭУ с использованием аппарата экспериментальных частотных характеристик получены следующие результаты (рис. 10). В разомкнутой системе частота среза не превышает 600...900 рад/с.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования показали высокие динамические характеристики АЭУ с СРМНВ (рис. 11). В замкнутой системе полоса равномерного пропускания частот контура регулирования напряжения (КРН) доходит до 500...800 рад/с (рис. 11, а). Экспериментальная амплитудно-частотная характеристика замкнутого КРН по возмущению (рис. 11, б) имеет две ветви: восходящую (в диапазоне частот до $\omega \approx 300\ldots400$ рад/с), где ослабление периодического воздействия осуществляется контуром регулирования напряжения, и спадающую (при более высоких частотах), где действие обратной связи уже ослаблено, а подавление периодических возмущений осуществляется L–C фильтром в силовой цепи. В области экстремума величина динамической ошибки максимальна. Между тем, даже эти частоты ослабляются совместной работой КРН и фильтра в 30...50 раз.

Рассмотрены примеры автономных объектов (городской электротранспорт, летательные аппараты, промышленные тракторы и т.д.), где применение АЭУ с СРМНВ наиболее актуально.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача – разработка и исследование самостоятельного класса автономных генераторных установок с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволяют отметить следующие основные результаты и сделать выводы:

1. На основании систематизации сведений по бесконтактным автономным генераторным установкам разработана детальная классификация новых типов генераторных установок с бесконтактными электрическими машинами по конструктивному и функциональному признакам. На основании сопоставления этих признаков показано, что автономную генераторную установку с СРМНВ следует отнести к принципиально новому классу генераторных установок, отличному как от традиционных бесконтактных машин постоянного тока и классических синхронных реактивных машин, так и от вентильно-индукторных.

2. Теоретически показаны и экспериментально проверены высокие удельные показатели СРМНВ, близкие к синхронным машинам с активным ротором. Достигнутые кратности максимального электромагнитного момента (до 5...6 крат от M_n и более) значительно превышают аналогичные показатели других известных типов электрических машин и ограничены лишь механической и тепловой прочностью СРМНВ.

3. Разработаны обобщенные расчетные модели СРМНВ, на основании которых предложена методика электромагнитного расчета генератора. В основу этой методики на разных этапах проектирования положены типовые расчеты серийных электрических машин: синхронных, асинхронных и постоянного тока.

4. Предложен алгоритм и выполнена оптимизация линейной плотности поверхности тока. Алгоритм учитывает особенности работы генератора на внешний выпрямитель с различными схемами силовых цепей и цепей возбуждения.

5. Показано, что для автономной энергетической установки наиболее эффективной является структура управления с параллельными регуляторами. При синтезе и настройке этой системы весьма эффективен аппарат экспериментальных частотных характеристик. Высокое быстродействие контура регулирования напряжения, которое в экспериментальной лабораторной установке оценивалось частотой среза до 1000 рад/с, позволяет путем регулирования подавить влияние обратных пульсаций напряжения генератора не менее, чем в 30...50 раз.

6. Обоснованы перспективы использования генераторной установки с СРМНВ для объектов с тяжелыми условиями эксплуатации, где актуальны такие ее преимущества, как бесконтактность, высокая жесткость вала ротора, большие перегрузки по току, высокие регулировочные показатели и повышенные частоты вращения (летательные аппараты, специальные транспортные средства, стартер-генераторные установки автомобилей).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Экспериментальные частотные характеристики электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями частоты / Ю.С. Усынин, С.М. Бутаков, М.А. Григорьев, Г.В. Караваев, К.М. Виноградов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2002. – Вып. 2. – №7 (16). – С. 67–69.
2. Оптимальная форма линейной нагрузки в синхронном реактивном двигателе независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.С. Герасимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2003. – Вып. 3. – №11 (127). – С. 80–83.
3. Усынин Ю.С., Григорьев М.А., Виноградов К.М. Силовые цепи вентильных электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // Электротехнические системы и комплексы: Межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2004. – Вып. 8. – С. 13–17.
4. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, Г.В. Караваев, К.М. Виноградов // Труды IV Международной (ХV Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «Автоматизированный электропривод в ХXI веке: пути развития» (АЭП-2004, Магнитогорск, 14 – 17 сентября 2004 г.). – Магнитогорск, 2004. – Часть 1. – С.181–183.
5. Виноградов К.М. Разработка и исследование автономной электроэнергетической установки с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых учёных вузов Челябинской области: Сб. рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – С.117–118.
6. Оптимальная форма линейной нагрузки в синхронном реактивном генераторе независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.С. Герасимов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ, 2005. – Вып. 9. – С. 52–60.
7. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, Г.В. Караваев, К.М. Виноградов // Труды тридцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока (ЭППТ'05, 15–18 марта 2005 г., г. Екатеринбург)». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – С. 111–112.
8. Патент РФ №2240640. Синхронный реактивный генератор автономной энергетической установки и способ управления им / Ю.С. Усынин, С.М. Бутаков, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Бюл. изобр. – 2004. – №32. – С. 635–636.