Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Anyge

Ануфриев Андрей Сергеевич

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕ-НЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, доцент Макаричев Ю.А.

Самара 2018

# содержание

		ВВЕДЕНИЕ	4
1.		АНАЛИЗ И ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ГЕНЕРА-	
		ТОРА	16
	1.1.	Предмет исследования и область применения генераторов ма-	
		лой мощности	16
	1.2.	Требования к электрическим машинам маломощных генера-	
		торных установок	20
	1.3.	Сравнение типов и конструкций генераторов	23
	1.4.	Критериальный анализ параметров генераторов	33
	1.5.	Задачи исследования	35
2.		МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРА-	
		ТОРА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИ-	
		ТОВ	38
	2.1.	Особенности конструкций систем возбуждения от высококо-	
		эрцитивных постоянных магнитов	40
	2.2.	Математическая модель СГ с постоянными магнитами	43
	2.3.	Моделирование поля генератора со встроенными магнитами	50
	2.4.	Выводы к главе 2	64
3.		СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
		ГЕНЕРАТОРА	66
	3.1.	Статические характеристики генератора	66
	3.2.	Динамические характеристики	72
	3.3.	Выводы к главе 3	80
4.		ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМАХ	
		ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ И	
		ОТДАВАЕМОЙ МОЩНОСТИ	81

Закономерности изменения главных размеров и параметров	
генератора в зависимости от мощности и частоты враще-	
ния	81
Потери и КПД в функции подведенной мощности и частоты	
вращения	86
Оптимизация соотношения постоянных и переменных потерь	
в генераторе	97
Выводы к главе 3	106
ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬ-	
НЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ	108
Промышленная реализация	108
Результаты испытаний генераторов	112
Сравнительные технические характеристики генераторов	114
Выводы к главе 5	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	120
ПРИЛОЖЕНИЯ	130
	Закономерности изменения главных размеров и параметров генератора в зависимости от мощности и частоты враще- ния

### введение

Генераторы ветроэнергетических установок (ВЭУ) в последнее время во многих странах вносят значительную долю в общее производство электрической энергии. По данным Renewables 2015 Global Status Report на 2015 год в Дании с помощью ветрогенераторов производится 42% всего электричества; в Португалии 27%; в Испании 20%; в Германии 8%; в ЕС 7,5% [85]. В России этот показатель составляет 4,8%. Единичная мощность агрегатов морского и наземного базирования достигает 4,5-5 МВт. Турбины класса 1,5-2,5 MBт по данным Renewable Energy World занимают 82% в мировой ветроэнергетике [101]. Такие установки не только решают проблему производства экологически чистой возобновляемой энергии, но и успешно конкурируют с традиционными методами генерирования электроэнергии. Стоимость 1 кВт-часа электроэнергии мощных ВЭУ приближается к стоимости электроэнергии, производимой на тепловых электростанциях [98]. Однако, ВЭУ малой мощности, по цене производимой электроэнергии с учетом капитальных затрат, эксплуатационных и амортизационных расходов, существенно уступают традиционным энергосистемам, если речь идет о районах с развитой структурой энергосетей. Но существует немало объектов электропотребления небольшой мощности, для которых нерентабельно строить линии электропередач. Это могут быть отдаленные сельскохозяйственные объекты сезонного использования, туристические кемпинги, заповедники и т.п. Их потребляемая мощность часто не превышает нескольких киловатт. Современная автономная система электроснабжения, состоящая из ветрогенератора малой мощности, солнечной батареи и буферной аккумуляторной батареи позволяет решить эту проблему экологически чистыми методами [7,8,16, 27, 32-34,55,83].

В качестве преобразователя механической энергии в электрическую в таких установках используются различные типы электрических машин: асинхронные, индукторные, постоянного тока и синхронные. У каждого типа имеются свои достоинства и недостатки, анализ которых проведен в первой главе работы на основе публикаций в научно-технической литературе [10,12,13,75,99] и собственных исследований автора.

Основы теории электрических генераторов малой мощности, используемых в автономных энергоустановках (ВЭУ, мини ГЭС), и ее практического воплощения заложили российские и зарубежные ученые: Артюхов И.И., Елистратов В.В., Николаев В.Г., Соломин Е.В., и др.[13,14, 32-34, 55,56, 66, 67,88].

При проведении исследований автор опирался на работы В.Я. Беспалова, В.В. Домбровского, А.В. Иванова-Смоленского, Ю.Б. Казакова, И.П. Копылова, И.Е. Тамма, В.П. Шуйского, в которых изложены теоретические основы расчета электромагнитных полей и оптимизационного проектирования электрических машин, в том числе, синхронных генераторов малой мощности [19,30,37-39,42,45, 46,69,70,79].

Наиболее эффективным, а, следовательно, и распространенным типом генераторов малой мощности в настоящее время являются синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Этому способствовало появление на рынке постоянных магнитов на основе Nd-Fe-B, обладающих высокой удельной магнитной энергией при относительно невысокой стоимости. Существует большое количество конструктивных типов синхронных генераторов с постоянными магнитами. Каждый из них имеют свои особенности, определяющие области их рационального использования. Однако единых объективных критериев оценки эффективности систем возбуждения синхронных генераторов малой мощности до настоящего времени не выработано. Этот вопрос актуален и для генераторов малых ВЭУ.

Спецификой работы синхронного генератора с постоянными магнитами, который чаще всего применяется для таких систем, является то, что он должен обеспечивать требуемое количество и качество электроэнергии при широком диапазоне изменения ветровой нагрузки. При проектировании традиционных электрических машин, и в частности, синхронных генераторов, одним из главных критериев, как правило, является минимум потерь в номинальном режиме. Но, такой подход применять для генераторов малых ВЭУ очевидно нецелесообразно, так как большую часть своей работы генератор может эксплуатироваться при частоте и мощности существенно отличающихся от номинальных. Задача повышения энергоэффективности генератора в «неноминальных» режимах остается актуальной.

Так же до настоящего времени не разработано достаточно полных и точных математических моделей и методов оптимизационного проектирования синхронных генераторов с постоянными магнитами, учитывающих особенности их функционирования в комплексах ВЭУ.

**Терминология**. Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) это комплекс оборудования и сооружений для преобразования энергии ветра в другие виды энергии (электрическую, механическую, тепловую и т. п.). В настоящей работе рассматриваются только ВЭУ для производства электроэнергии. В этом случае синонимом ВЭУ будет ветрогенератор — устройство для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию, которая в свою очередь электрическим генератором преобразуется в энергию электрического тока.

Существуют ветротурбины двух основных типов:

- с горизонтальной осью вращения (крыльчатые или пропеллерные);
- с вертикальной осью вращения (*«карусельные» роторные* (в том числе *«ротор Савониуса»*), лопастные ортогональные *ротор Дарье*).

Пропеллерные турбины в основном применяются в промышленных ветроэлектростанциях большой мощности, а карусельные – в агрегатах малой и средней мощности. Оба типа имеют как достоинства, так и недостатки, которые будут проанализированы в первой главе.

Следует различать *ротор турбины* и ротор электрического генератора: это соответственно, вращающиеся части движителя – пропеллерной или карусельной турбины, и генератора. Роторы механически связаны между собой непосредственно или через трансмиссию – *редуктор (мультипликатор)*.

Эффективность ВЭУ обычно оценивается коэффициентом использования энергии ветрового потока (КИЭВ) – отношением механической мощности на

валу турбины к мощности ветрового потока, проходящего через *площадь ометания ветроколеса*, при условии их ортогональности.

Без системы управления электрический генератор ВЭУ из-за непостоянства скорости вращения имеет на выходе нестабильное по частоте и амплитуде напряжение. Поэтому в системе, как правило, имеется преобразовательное устройство с промежуточным звеном постоянного тока AC-DC-AC, для получения электроэнергии стабильного напряжения промышленной частоты. Некоторые современные бытовые *источники бесперебойного питания (ИБП)* имеют модуль подключения источника постоянного тока специально для работы с солнечными батареями и (или) ветрогенераторами. В этом случае, ветрогенератор служит частью домашней системы электропитания, снижая потребление энергии от электросети.

Установки мощностью менее 100 кВт относят к *малой ветроэнергетике* (ВЭУ малой мощности). К микро-ветровой энергетике относят агрегаты мощностью менее 1 кВт. Соответственно, *генераторами малой мощности* будем называть машины мощностью 1-100кВт, а машины меньшей мощности отнесем к классу *микромашин*.

Синхронные генераторы, в которых постоянные магниты расположены в пазах магнитопровода ротора будем называть *генераторами со встроенными магнитами*. В англоязычной литературе такие машины называют *Embedded PMSG* - синхронный генератор с *встроенными* постоянными магнитами.

Термины и аббревиатуры, используемые в дальнейшем, и не определенные в этом разделе, соответствуют общепринятым в теории электрических машин и ветроэнергетики.

Области применения СГ малой мощности. Генераторы малой мощности находят применение в агрегатах автономного и резервного электроснабжения, где для их привода используются двигатели внутреннего сгорания – бензиновые или дизельные. Этот тип СГ отличает стабильная частота вращения, как правило, в диапазоне от 1000 до 3000 оборотов в минуту. Стабильность выходной частоты генератора поддерживается регулятором скорости приводного двигателя. Для поддержания уровня напряжения в машинах с электромагнитным возбуждением используют интегральные регуляторы напряжения. СГ такого типа массово выпускаются отечественными и зарубежными производителями. Основные теоретические и практические задачи при их производстве решены, поэтому этот тип генераторов не входил в круг исследовательских задач диссертации.

Второй сферой применения СГ малой мощности, особенно в последнее время, стала малая энергетика на основе возобновляемых источников энергии: ветра и водных потоков. В современной истории с появлением электричества, как основного вида энергии, используемого человеком, сразу же начались попытки использовать для привода электрических генераторов ветроагрегаты [73]. Применение в ВЭУ машин постоянного тока и асинхронных генераторов связано с труднопреодолимыми проблемами, вследствие чего, основным типом генераторов для ветроустановок стали синхронные генераторы, как правило, с возбуждением от постоянных магнитов. Исключение составляют асинхронные генераторы на основе машин двойного питания Doubly Fed, которые применяются в ВЭУ большой мощности.

К потенциальным объектам нуждающимся в автономных источниках электроэнергии можно отнести: ретрансляторы, сотовую связь, метеостанции, станции контроля на газопроводах, нефтепроводах, маяки, туристические объекты, станции мониторинга специального назначения, сезонные сельскохозяйственные объекты и т.д.

Использование ветроколеса для привода СГ накладывает специфические особенности на работу приводимой им электрической машины. Во-первых, это нестабильность частоты вращения и связанной с ней механической мощности на валу генератора. Во-вторых, если не использовать повышающий редуктор, то частота вращения ротора обычно не превышает 200-300 оборотов в минуту. То есть генератор – это тихоходная машина с большим числом полюсов, а такие машины проигрывают по массогабаритным показателям быстроходным машинам. В третьих, при варьировании нагрузки и переменной частоте приводного

движителя КПД генератора значительно отличается от своего номинального значения. Кроме того, КПД самой турбины существенно зависит от электрической мощности генератора. Если мощности турбинной и генераторной частей ВЭУ не согласованы, то установка не может работать эффективно. Поэтому, научный анализ и обоснованный выбор конструктивной схемы специализированного синхронного генератора, основанный на оптимизационном проектировании, является актуальной научной и практической задачей при создании ветроустановок малой мощности.

Целью работы является повышение энергетической эффективности синхронных генераторов малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов за счет совершенствования алгоритма расчетов, методов анализа и оптимизационного проектирования.

Для достижения поставленной цели должен быть исследован ряд научных и практических проблем по решению задач структурной и параметрической оптимизации машины, уточнения ее математической модели и выработке принципов проектирования, позволяющих повысить энергоэффективность генератора в условиях нестабильных значениях частоты вращения и нагрузки.

Более конкретно задачи исследования сформулированы в первой главе настоящей работы, после анализа публикаций по данной теме и выявления нерешенных к настоящему времени проблем, связанных с совершенствованием синхронных генераторов для малой энергетики.

Предмет исследования – синхронный генератор малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов, предназначенный для использования в установках с нестабильной частотой вращения и отдаваемой мощностью.

Методы исследования определялись предметом исследования и спецификой его математических моделей. Применялись методы теории поля и его численного моделирования в среде Ansys Maxwell, методы дифференциального и интегрального исчислений, оптимизационного проектирования и физического моделирования.

9

Научная новизна определяется тем, что в работе на основе критериального анализа параметров и методов оптимизационного проектирования расширяются и углубляются способы совершенствования синхронных генераторов малой мощности с постоянными магнитами для автономных энергетических установок.

В работе получены следующие новые научные результаты в указанном направлении:

- Методом многокритериальной структурной оптимизации, основанном на принципе доминирования Парето, определены объективные количественные параметры сравнения для различных типов генераторов, применяемых в энергоустановках с нестабильной частотой вращения и отдаваемой мощностью.
- Математическая модель СГ с возбуждением от постоянных магнитов, предназначенная для оптимизационного расчета, отличающаяся от известных, совмещением численного расчета магнитного поля с анализом векторных диаграмм рабочего режима.
- 3. Впервые аналитическим методом и численной параметрической оптимизацией определено рациональное соотношение постоянных и переменных потерь в генераторе, обеспечивающее прирост выработки электроэнергии за счет более эффективного использования ВЭУ в «неноминальных» по частоте вращения и нагрузке режимах работы.

Практическая ценность работы определяется тем, что полученные теоретические результаты позволяют:

- научно обоснованно выбирать тип и конструктивную схему генератора малой мощности для ВЭУ и микро ГЭС;

 за счет предложенного перераспределения постоянных и переменных потерь в генераторе повысить эффективность использования природных ресурсов и увеличить годовую выработку электроэнергии ВЭУ.

10

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением строгих математических методов, экспериментальной проверкой и сравнением их с теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

Реализация результатов работы. Теоретические положения и рекомендации по проектированию синхронных генераторов с ПМ, предложенные автором в настоящей работе, были использованы при разработке и промышленном внедрении ВЭУ малой мощности в ходе выполнения работ по договору НИР «Разработка методики электромагнитного расчета синхронного вентильного генератора для ветроэлектростанции», выполняемой кафедрой ЭМАЭ СамГТУ по заданию НПО «Шторм» г.Самары.

В результате, с участием автора, были спроектированы и изготовлены четыре типа синхронных генераторов с ПМ мощностью от 0,45 до 8 кВт, которые успешно прошли заводские испытания и были поставлены заказчику.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на VIII и IX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК» Саратов, 2017, 2018г.г.; на VIII Международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодежи», Самара, 2017; на Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения» – Самара, 2017; на 32nd International Conference on Information Networking, ICOIN 2018; Holiday Inn Chiang Mai Chiang Mai; Thailand; 10 January 2018 - 12 January 2018.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 9-ти печатных работах, в том числе – 4-х статьях из Перечня ведущих периодических изданий, рекомендованных ВАК РФ и одной статье индексированной в международной базе данных *Scopus*.

### Основные положения, выносимые на защиту:

- Структурная многокритериальная оптимизация конструктивных типов генераторов, применяемых в энергоустановках с нестабильной частотой вращения и отдаваемой мощности, основанная на принципе доминирования Парето.
- Математическая модель СГ с возбуждением от постоянных магнитов, предназначенная для оптимизационного расчета, отличающаяся от известных, совмещением численного расчета магнитного поля с анализом векторных диаграмм рабочего режима.
- 3. Аналитический метод и алгоритм численной параметрической оптимизации определения рационального соотношения постоянных и переменных потерь в генераторе, обеспечивающий прирост выработки электроэнергии за счет более эффективного использования ВЭУ в «неноминальных» по частоте вращения и нагрузке режимах работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, библиографического списка и приложений. Основная часть изложена на 134 страницах, иллюстрирована 59 рисунками и 17 таблицами. Библиографический список включает 104 наименования.

### Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулирована цель исследования, его научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе цитируемой литературы и собственных исследований автора, проведен анализ современного состояния теории и практики разработки генераторов, используемых в малой энергетике. Определены специфические требования к электрическим машинам маломощных генераторных установок. Методом многокритериальной структурной оптимизации с использованием принципа доминирования Парето был проведен критериальный анализ типов и конструкций генераторов и на его основе по численному обобщенному критерию был определен тип генератора, имеющий в формулировке Парето лучший исход – многополюсный синхронный генератор прямого привода с возбуждением от постоянных магнитов. Выявлены нерешенные проблемы и «узкие» места этого типа генераторов, сформулированы основные задачи исследования, которые необходимо решить для достижения поставленной цели работы.

**Во второй главе** проведен анализ конструктивных схем роторов многополюсных синхронных машин с постоянными магнитами. Установлено, что в применении к поставленной задаче, одной из наиболее перспективных схем ротора является радиальная схема с магнитами, расположенными в пазах ротора (*Embedded PMSG*).

В этой конструкции магниты вставляются в соответствующие пазы в шихтованном магнитопроводе ротора. При этом радикально решаются проблемы с креплением магнитов и отводом от них тепла при работе генератора.

Особенностью конструкции в электромагнитном отношении является дополнительные потоки рассеяния, замыкаемые по телу ротора, по так называемым мостикам насыщения, в обход воздушного зазора. Главная сложность при расчете такой магнитной системы, заключается в выборе размеров насыщающихся мостиков и их геометрии. Если не решить эту задачу корректно, то магнитная система будет вообще неработоспособной из-за короткого замыкания магнитов – потоки рассеивания будут больше полезного потока в зазоре. Решение этой задачи невозможно без применения численного моделирования магнитного поля.

Задача численного моделирования была поставлена и решена для плоскопараллельного поля, созданного постоянными магнитами (холостой ход), продольной и поперечной реакцией якоря (работа под нагрузкой). Для расчета поля в номинальном нагрузочном режиме была использована диаграмма Блонделя явнополюсной машины.

Доказано, что аналитический расчет магнитной системы со встроенными магнитами без численного моделирования поля, не может обеспечить приемлемой точности из-за необходимости учета глубокого насыщения магнитных мостиков между однополюсными и разнополюсными магнитами. Предложенная математическая модель СГ с постоянными магнитами сочетает в себе расчет магнитного поля численными методами совместно с анализом векторных диаграмм. Математическая модель служит основой для оптимизационного проектирования и уточненных поверочных расчетов генератора.

В третьей главе проведено моделирование генераторной установки с различными видами нагрузки в программной среде *Ansys Maxwell*. Внешняя электрическая цепь набиралась из стандартных пассивных (резисторы, конденсаторы, индуктивности) элементов, значения которых варьировались. В ходе исследования были получены статические (внешние, угловые и токоскоростные) характеристики, сравнение которых с рассчитанными по теоретической модели и экспериментом, показали расхождение, не превышающее 8%.

Моделирование динамики СГ проводилось с целью определения исходных параметров для построения САУ ВЭУ. (В задачи исследования не входила разработка самой САУ). Кроме этого, режимы короткого замыкания (однофазного, двухфазного и трехфазного) были промоделированы для уточненного определения ударных токов КЗ и моментов на валу генератора, с целью определения настроек защит комплекса.

В четвертой главе проанализированы закономерности изменения параметров генератора в зависимости от мощности и частоты вращения. В частности, определены функциональные зависимости потерь и КПД генератора при варьировании значений частоты вращения. Приведены результаты исследования мощности и частоты вращения трех типов ветроколеса от скорости ветра. На основании статистических данных распределения периодов средних значений скорости ветра произведен расчет прогнозируемого количества выработки электроэнергии для каждой из этих ВЭУ.

Установлено, что, несмотря на то, что средняя скорость ветра, превышающая 8 м/с составляет по времени не более 37%, годовая выработка электроэнергии ВЭУ при этом, превышает 84,1%. Следовательно, для получения при-

14

роста выработки электроэнергии необходимо изменить соотношение постоянных и переменных потерь в генераторе таким образом, чтобы на высоких скоростях КПД генератора оставался на максимальном уровне.

Для того чтобы максимум КПД был в зоне максимальных нагрузок и частот вращения, необходимо обеспечить снижение доли переменных потерь в номинальном режиме в общей сумме потерь, за счет увеличения объема меди в пазу (снижения плотности тока), что, естественно, приведет к увеличению доли магнитных потерь.

Расчеты показывают, что только за счет перераспределения постоянных и переменных потерь при их неизменной сумме для номинального режима, годовая выработка электроэнергии ВЭУ возрастает не менее, чем на 3,5%. Для ВЭУ-2000 в абсолютных единицах это составит более 90 кВт час, а для ВЭУ-8000 – 250 кВт час дополнительной энергии для потребителя.

Пятая глава работы посвящена результатам практической реализации и экспериментальным исследованиям разработанных генераторов. На НПО «Шторм» г.Самара, при участии автора, были изготовлены и переданы заказчику синхронные генераторы с постоянными магнитами серии БРИД четырех типоразмеров с номинальной мощностью 450, 1000, 2000 и 8000 Вт. Все генераторы успешно выдержали заводские испытания.

По результатам исследований характеристик спроектированных и изготовленных генераторов можно констатировать, что они по основным выходным параметрам соответствуют, а по некоторым превосходят, аналоги отечественных и зарубежных производителей.

Энергоэффективность разработанных генераторов обеспечивается не только значением максимального КПД, но и расширением зоны высоких значений КПД при изменении их частоты вращения.

## 1. АНАЛИЗ И ВЫБОР КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА

### 1.1. Предмет исследования и область применения генераторов малой

#### мощности

Предметом исследования в представленной работе является электрический генератор малой мощности, предназначенный для использования в установках с нестабильной частотой вращения и отдаваемой мощностью.

Область применения таких генераторов – малая энергетика, основанная на использовании возобновляемых источников энергии: микро ГЭС, ветроэнергетических установках и, в меньшей мере, установках автономного электроснабжения с применением микротурбин или двигателей внутреннего сгорания. В последних скорость вращения можно стабилизировать с достаточной точностью для получения приемлемого качества выходного напряжения по частоте и амплитуде. Эти двигатели и сопряженные с ними генераторы имеют относительно высокую скорость вращения и, следовательно, малые значения массы и габаритов на единицу мощности [94,96]. Генераторы для таких установок массово выпускаются многими отечественными и зарубежными производителями и пользуются коммерческим спросом на рынке[90,96]. Поэтому в настоящей работе исследование быстроходных генераторов малой мощности с приводом от двигателей внутреннего сгорания не включено в задачи исследования.

Иначе обстоит дело с генераторами для малых и микро ВЭУ. Если генераторы крупных ВЭУ, мощностью в несколько мегаватт и стоимостью сотни тысяч долларов, специально проектируются известными фирмами производителями с учетом особенностей эксплуатации, то в малой энергетике, зачастую, используются не приспособленные для этого электрические машины, например, те же быстроходные генераторы от автономных миниэлектростанций. При этом приходится устанавливать специальную трансмиссию и мультипликатор, которые существенно понижают КПД установки, удорожают ее стоимость и снижают надежность работы.

В тех случаях, когда генератор проектируется специально для тихоходной

установки, проведение качественного сравнения вариантов затруднено отсутствием объективного критерия оценки эффективности конструкции, особенно, если сравниваются различные конструктивные схемы машины.

Для повышения конкурентоспособности малых ВЭУ необходимо оптимизировать конструкцию используемых генераторов на основе объективного критерия, в наиболее полной мере характеризующего их эффективность.

Для выработки этого критерия проведем краткий анализ конструкций ВЭУ мощностью 1...100 кВт на основе имеющихся библиографических источников с целью определения особенностей режимов работы используемых в них генераторов.

В качестве основных конструктивных схем малых ВЭУ используются две разновидности: ветрогенераторы пропеллерного типа с горизонтальной осью вращения (рис.1.1а) и установки с вертикальной осью вращения – ротором Савониуса и ротором Дарье (Рис.1.1б) [66,67,73].



Рисунок 1.1- Ветроэнергетические установки с горизонтальной (а) и вертикальной (б) осью вращения. 1 – лопасть ветроколеса; 2 – гондола; 3 – башня; 4 – фундамент.

Генераторные установки с горизонтальной осью вращения широко применяются в ВЭУ средней и большой мощности [83,85,98,101]. Это обусловлено их высокой эффективностью. Коэффициент использования энергии ветрового потока (КИЭВ) составляет 30-35% в установках мощностью 100...300 кВт, а в более мощных агрегатах достигает практически предельного уровня 42-45% за счет применения сложных электрогидравлических механизмов изменения угла поворота лопастей. В ВЭУ рассматриваемого в настоящей работе диапазона мощностей (1...100 кВт) КИЭВ ветрогенераторов с горизонтальной осью составляет 20...30% в зависимости от профиля и конструкции лопастей. Большие значения КИЭВ соответствуют конструкциям с изменяемым углом поворота лопастей, которые для установок малой мощности неоправданно сложны и дороги.

Следует отметить, что при анализе и сравнении характеристик ВЭУ малой мощности КИЭВ не главный параметр, характеризующий качество установки. Гораздо важнее для потребителя надежность и стабильность электроснабжения при приемлемой стоимости. Необходимо учитывать более сложную, а, следовательно, при одинаковом уровне технологии, менее надежную и дорогую конструкцию установок с горизонтальной осью, которая требует наличия устройства ориентации гондолы по направлению ветра, сложной трансмиссии и мультипликатора для привода генератора [73]. Использование же многополюсных тихоходных генераторов в безредукторных установках связано с трудностью размещения тяжелой и габаритной машины в гондоле ВЭУ. Кроме того, из-за большого диаметра статора многополюсного генератора ухудшаются аэродинамические характеристики активной части агрегата.

Ветроагрегаты с вертикальной (ортогональной) осью вращения имеют КИЭВ несколько меньший, чем ВЭУ с горизонтальной осью. Но, в последнее время, благодаря работам зарубежных и отечественных ученых в области совершенствования аэродинамики лопастей ветроколеса, удалось довести значение КИЭВ ротора Дарье до 35% даже в установках малой мощности [22, 81]. Отличительной особенностью и достоинством ротора Дарье является его нечувствительность к изменению направления ветра. В ВЭУ с ортогональной осью вращения не требуется механизм поворота и ориентации установки по направлению ветра. Кроме того, электрический генератор можно устанавливать на оси ветроколеса непосредственно без редуктора, что существенно упрощает конструкцию и уменьшает ее стоимость. Этим определились области конкурентного использования ВЭУ малой мощности с ротором Дарье: удаленные автономные объекты с небольшим потреблением электроэнергии (сельскохозяйственные сезонные полевые станы, метеостанции, военные объекты на отдаленных границах, базовые станции связи, маяки и т.д.). В комплексах «экологический дом» ВЭУ с ротором Дарье и солнечными батареями используются в качестве дополнительного, а часто и главного, источника электроэнергии, совместно с традиционными электрическими сетями. В качестве экологически чистого источника энергии ВЭУ используются на парусных яхтах премиум класса.



Рисунок 1.2 – Малошумные ветрогенераторы с ротором Дарье [22]

# **1.2.** Требования к электрическим машинам маломощных генераторных установок.

Рассмотрим, каким требованиям должен отвечать генератор малой мощности, предназначенный для работы в системе автономного электроснабжения. Эти требования во многом определяются архитектурой принципиальных схем.

Проанализируем типичные схемы электроснабжения автономных объектов и объектов, которые питаются параллельно от автономного источника и электрической сети.

1. Схема с использованием промежуточного звена постоянного тока (AC/DC/AC), показанная на рис.1.3, может использоваться не только для генераторов большой и средней мощности, но и для установок, которые традиционно относятся к сектору малой мощности.



Рисунок 1.3 – Принципиальная схема энергоустановки с промежуточным звеном постоянного тока.

ПД – приводной двигатель; AC/DC – управляемый выпрямитель; ФЭБ – фотоэлектрическая батарея; DC/AC – инвертор; AKБ – аккумуляторная батарея; ПЧ – частотный преобразователь.

В представленной схеме потребителям поставляется электроэнергия стан-

дартного качества [24] за счет интеллектуального инвертора и фильтров на выходе (на схеме не показаны). В установках большой и средней мощности электроэнергия может отдаваться в сеть. В малых генераторах условия передачи энергии в сеть по ряду технических и экономических причин выполнены быть не могут. Поэтому такие устройства работают только на автономную нагрузку.

К качеству входного напряжения инвертора (выходного напряжения генератора) предъявляются требования гораздо более низкие, чем к качеству промышленного напряжения, определяемые ГОСТ 32144-2013. Причем это относится не только к частоте и амплитуде напряжения, но и к его гармоническому составу, так как высшие гармоники напряжения после выпрямителя могут полезно использоваться.

Звено постоянного тока в современных ЧП легко согласуется с параллельным подключением аккумуляторной батареи (АКБ) и (или) с фотоэлектрической (солнечной) установки (батареи) (ФЭБ).

Для полностью автономных объектов с повышенными требованиями к бесперебойности питания, вместо подключения к сети, приходится добавлять в схему дизель-генератор.

2. Более простая и, часто более экономически целесообразная, схема использования ВЭУ малой мощности, ставит целью не получение электроэнергии промышленного качества, а генерирование постоянного или переменного тока (нестабильной частоты) с последующим ее преобразованием с помощью термоэлектрических нагревателей (ТЭН) в тепло для получения горячей воды или обогрева помещений.

Потребление тепловой энергии на обогрев и горячее водоснабжение в жилых и производственных помещениях, как правило, существенно превышает потребление электроэнергии на иные нужды. Потребление тепла не так требовательно к качеству и бесперебойности. Так температуру в бойлерах горячего водоснабжения можно без ущерба для потребителя поддерживать в диапазоне 40-90°C.

В этом случае, требования к генератору существенно упрощаются, а вся

схема электроснабжения может быть построена на нескольких тепловых реле.

3. В системах, работающих параллельно с сетью и имеющих источники бесперебойного питания (ИБП), проблема стабилизации выходного напряжения решена (рис.1.4).



Рисунок 1.4 – Принципиальная схема с ИБП.

Современные ИБП, как правило, кроме возможности переключения потребителей в случае перебоев в сети на резервную АКБ, имеют опцию подключения фотоэлектрических (солнечных) батарей и генераторов с нестабильной частотой и амплитудой напряжения.

### Выводы:

Для автономных генераторов малой мощности, приводимых во вращение двигателями (турбинами) с нестабильной частотой и мощностью, требования к качеству выходного напряжения могут быть существенно снижены в устройствах с ПЧ (AC/DC/AC), установках для обеспечения теплом и горячего водоснабжения, схемах с использованием современных ИБП.

Снижение требований к качеству выходного напряжения заключается не только в части стабильности его частоты и амплитуды, но и в допустимости в

кривой напряжения кроме основной гармоники более широкого спектра высших гармонических.

### 1.3. Сравнение типов и конструкций генераторов.

Исходя из проведенного выше анализа, основные критерии, которые определяют качество генератора малой мощности, приводимого во вращение нестабилизированными по частоте тихоходными двигателями, можно сформулировать в следующем порядке:

- стоимость единицы мощности генератора с учетом привода;

- удельная мощность на единицу массы;

- КПД в номинальном режиме и в режимах неноминальных значений частоты вращения и мощности;

- наличие или отсутствие мультипликатора;

- затраты на обслуживание;

- наличие скользящих контактов;

- необходимость источника реактивной мощности;

- возможность размещения основного оборудования не в гондоле, а на поверхности земли.

При обоснования выбора оптимальной конструкции генератора будем пользоваться методикой, основанной на теории принятия решений для выбора вариантов из допустимого множества решений, которая разработана для мно-гокритериальной структурной оптимизации [78]. Для формулировки задачи необходимо определить показатели качества Y, описываемые частными целевыми функциями  $f_k$  с отображениями R

 $f_k: Y \rightarrow R, k = 1, 2, \dots, m,$ 

для которых необходимо отыскать экстремум (минимум или максимум).

Частным откликам (исходам) у необходимо поставить в соответствие некоторые численные оценки. Тогда сравнение исходов будет заключаться в сравнении соответствующих им действительных чисел. Будем считать исход *y<sub>i</sub>* более предпочтительным, чем  $y_j$ , если  $f(y_i) > f(y_j)$  при решении задачи максимизации. Если  $f(y_i) = f(y_i)$ , то исходы эквивалентны.

Задача оптимизации структуры генератора является многокритериальной, и как в большинстве подобных задач при улучшении одного частного параметра другие свои значения могут ухудшать. Для решения задачи воспользуемся отношением доминирования Парето *Rp* [78]

$$(y_i, y_j) \in R_p \leftrightarrow \forall k : [f_k(y_i) \ge f_k(y_j)] \land [f_k(y_i) = f_k(y_j)].$$

Принцип Парето состоит в том, что оптимальный исход необходимо искать только среди множества недоминируемых элементов P(Y). Иначе всегда найдется точка  $y \in Y$ , которая будет более предпочтительной, с учетом частных целевых функций  $f_i(y)$ .

Решить поставленную многокритериальную задачу,

$$f_k(y) \rightarrow \max_{y \in Y}$$

значит отыскать множество Парето. При неимении дополнительной информации о системе предпочтений пользователя большего сделать невозможно.

В качестве вариантов сравнения будем рассматривать следующие типы генераторов, пригодных для решения поставленной задачи:

- асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором (АГ) – вар.1;

- синхронный генератор с электромагнитным возбуждением, бесщеточный
– вар.2;

- индукторный генератор (ИГ) – вар.3;

- синхронный генератор с постоянными магнитами (быстроходный с мультипликатором) – вар.4.

- синхронный генератор с постоянными магнитами (тихоходный прямого привода) – вар.5.

Коллекторные генераторы постоянного тока из анализа сразу исключим, ввиду их известных недостатков, связанных с высокой стоимостью, малым ресурсом и ненадежностью коллекторно-щеточного узла. По этим же причинам исключим синхронные генераторы с контактными кольцами, которые в настоящее время для обозначенных целей практически не производятся.

Вар. 1. Асинхронные генераторы.

Асинхронные генераторы (АГ) выполняются на базе асинхронных машин с короткозамкнутым ротором и обладают присущими таким машинам достоинствами [74,75]:

- отсутствие скользящих контактов;

 обмотка ротора, как правило, выполнена в виде литой «беличьей клетки»,
сам ротор имеет монолитную конструкцию, стойкую к механическим и тепловым нагрузкам;

- изготовление АГ ведется на предприятиях, где отлажено массовое производство асинхронных двигателей, что снижает их себестоимость;

- АГ может быть изготовлен с любой степенью защиты от воздействия окружающей среды, вплоть до погружного исполнения;

У АГ имеются и недостатки, сдерживающие их широкое распространение в генераторных системах:

- для возбуждения АГ требуется реактивный ток, который, как и в асинхронных двигателях, потребляется из сети, если генератор работает на сеть. При работе на автономную нагрузку, источник реактивного тока - конденсаторная батарея, или ТИРМ, должны обеспечивать реактивную мощность, составляющую от 30 до 50% полной мощности генератора. Источники реактивной мощности в этом случае соизмеримы по стоимости с самой электрической машиной;

- при работе на автономную нагрузку при постоянной частоте вращения вала частота выходного напряжения и его амплитуда зависят от тока нагрузки.

Производство АГ для малой энергетики освоено многими производителями электрических машин в России и за рубежом: ELDIN, Россия; Marelli Motori, Италия; Geko, Германия и др.[87, 89, 92, 93].

В таблице 1.1 представлены технические характеристики некоторых АГ рассматриваемого диапазона мощностей. Генераторы СЗG произведены Marelli Motori, Италия, а ED-A/ZG - фирмой Gekon, Германия.

	C3G 250	C3G 250	C3G 280	C3G 280	C3G 315	C3G 355				
Тип, марка	S4	M4	S4	M4	MA6	LA12	2400 E-A/ZG	4000 ED-A/ZG	6000 ED-A/ZG	9000 ED-AA/ZG
Номинальная мощ- ность, кВт	55	75	90	110	110	110	2,3	3,9	5,7	9
Масса генератора, кг	275	350	405	445	750	1160	17,5	38,5	48,5	61
Масса редуктора, кг	205	270	310	420	390	280	23,0	31,2	43,7	55
Масса генератора с редуктором, кг	480	620	715	865	1140	1440	40,5	69,7	92,2	116,0
КПД генератора <i>,</i> %	92	92,5	93	93	93,5	93,6	86,8	87,8	88,8	88,8
КПД установки с уче- том редуктора, %	87,4	87,9	88,4	88,4	88,8	88,9	82,5	83,4	84,4	84,4
n, об/мин	1535	1520	1520	1520	1010	508	3100	3100	3100	3100
Мощность удельная, кВт/кг	0,115	0,121	0,126	0,127	0,096	0,076	0,057	0,056	0,062	0,078
Цена генератора, руб	Нет дан- ных	Нет дан- ных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	Нет данных	31 487	45 626	68 758	102400
Удельная цена гене- ратора, руб/кВт							13690	11699	12063	11378

# Таблица 1.1 – Технико-экономические характеристики асинхронных генераторов

В четырехполюсных генераторах C3G наблюдается рост удельной мощности с ростом номинальной мощности машины. В генераторах с числом полюсов, равным 6-ти и 12-ти, естественно, удельная мощность снижается.

Все генераторы Gekon хотя и рассчитаны на синхронную частоту 3000об/мин, имеют на порядок более низкую номинальную мощность (2,3...9 кВт). В связи с этим их удельная мощность почти вдвое меньше.

Удельная цена генераторов находится в пределах 11...13 тыс.рублей/кВт. Отметим, что это цены только самих электрических машин без стоимости необходимых мультипликаторов и конструктивных элементов их трансмиссий – для быстроходных генераторов эти элементы обязательны.

Вар.2. Синхронный генератор с электромагнитным возбуждением (бесщеточный).

Бесконтактные синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением имеют обмотку постоянного тока на роторе, которая питается от вращающегося выпрямителя, соединенного с обмоткой переменного тока возбудителя. Регулирование возбуждения в таких генераторах происходит через неподвижную обмотку возбуждения возбудителя. Ввиду достаточно сложной системы возбуждения подобные генераторы изготавливаются на мощности не менее 10-ти киловатт. Типичным генератором с такой конструкцией магнитной системы являются генераторы МЈТ фирмы Marelli Motori, Италия [92]. В таблице 1.2 характеристики этих машин даны в сравнении с характеристиками быстроходных генераторов Месс Alte ECP *с возбуждением от постоянных магнитов (вар.4)*. Таблица 1.2 – Параметры синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением (МЈТ) и возбуждением от постоянных магнитов (Mecc Alte ECP)

Тип, марка	Mecc Alte ECP3- 2L/4	Mecc Alte ECP3- 3L/4	MJT 160 XA 4	MJT 160 MB 4	MJT 200 SA 4	MJT 225 MA 4
Номинальная мощ-						
ность, кВт*	10,8	12	10	23	30	87
Масса генератора, кг	87	93	109	188	219	390
Масса редуктора, кг	55	55	55	95	110	310
Масса генератора с						
редуктором, кг	142	148	164	283	329	700
КПД генератора , %	83	83,5	83,5	85	85	90
КПД генератора с						
учетом редуктора, %	78,85	79,325	79,325	80,75	80,75	85,5
n, об/мин	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Мощность удельная,						
кВт/кг	0,076	0,081	0,061	0,081	0,091	0,124

### Вар.3. Индукторный генератор (ИГ).

В настоящее время в альтернативной энергетике применение индукторных генераторов малой мощности встречается всё чаще. ИГ по своей сути является бесконтактным синхронным генератором особой конструкции [71]. Как и в обычном СГ в нем имеется жёсткая связь частоты генератора со скоростью вращения ротора. В ИГ есть возможность генерации реактивной мощности при работе параллельно с сетью, и регулирования активной мощности током возбуждения при работе на автономную нагрузку.

Основная конструктивная особенность ИГ– зубчатый ротор без обмотки и обмотка возбуждения, расположенная на статоре. Индукторный генератор отличают простота и надёжность конструкции. Ротор ИГ конструктивно проще ротора асинхронного генератора.

Главным достоинством ИГ является магнитная редукция скорости вращения, которая позволяет согласовывать скорость вращения генератора со скоростью вращения турбины без использования повышающей механической передачи – мультипликатора. В таблице 1.3 даны технические характеристики ИГ Тираспольского завода «Электромаш» [87].

Тип, марка	СГИ-75-22 УЗ с ЩУИ-75 УЗ	СГИ-БК 37-22 УЗ	СГИ-БК 75-22 УЗ	СГИ-250-16 УХЛ1
Номинальная мощ-				
ность, кВт*	75	37	75	250
Масса генератора, кг	4300	1600	2800	3550
Масса генератора с возбудителем, кг	4495	1600	2800	3550
КПД генератора , %	92	93	92	95
КПД генератора с учетом редуктора, %	92	93	92	95
n, об/мин	273	273	273	375
Число полюсов	22	22	22	16
Мощность удельная,	0.0167	0.0224	0.0200	0.0704
KDI/KI	0,0167	0,0231	0,0268	0,0704

Таблица 1.3 – Параметры индукторных генераторов СГИ

По параметру удельной мощности ИГ существенно уступает всем, рассмотренным ранее типам генераторов. Однако данный тип машин может применяться в безредукторных приводах прямого подключения к гидротурбине или ветроколесу, что не позволяет исключить его из настоящего анализа.

Вар.5. Тихоходные (многополюсные) генераторы с постоянными магнитами.

Наиболее эффективным, а, следовательно, и распространенным типом генераторов малой мощности в настоящее время являются синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. Этому способствовало появление на рынке постоянных магнитов на основе Nd-Fe-B, обладающих высокой удельной магнитной энергией при относительно невысокой стоимости. В генераторных установках, использующих альтернативные возобновляемые источники энергии, главная особенность заключается в том, что приводная гидротурбина или ветроколесо имеют частоту вращения 100...300 об/мин. Следовательно, генератор при выходной частоте 25...50 Гц должен иметь не менее 6-10 пар полюсов. При электромагнитном возбуждении эта задача в приемлемых габаритах неразрешима. Альтернативой является магнитоэлектрическое возбуждение. Многополюсные СГ с постоянными магнитами выпускаются многими производителями в Европе, США и Китае. В настоящем анализе проведем сравнение генераторов для ВЭУ производства КНР (SAV) и Франции (Falcon Euro) [89, 92, 93].

	SAV – 0,5	SAV -	SAV - 10	SAV –	«Falcon Euro»	«Falcon Euro»			
Тип, марка	kW	5kW	kW	64 kW	- 2 кВт	- 7,5 кВт			
Номинальная мощ- ность, кВт*	0,5	5	10	64	2	7,5			
Масса генератора, кг	160	440	560	1200	180	440			
КПД генератора , %	85	85	85	89	85	85			
n, об/мин	120	100	100	100	120	100			
Цена ВЭУ, руб	130000	440000	675000	1802000	180000	480000			
Удельная цена ВЭУ, руб/кВт	260000	88000	67500	28156	90000	64000			
Мощность удельная, кВт/кг	0,003	0,011	0,018	0,053	0,011	0,017			

Таблица 1.4 – Параметры ВЭУ на основе многополюсных синхронных генераторов с постоянными магнитами.

На диаграммах, представленных на рис.1.5 и 1.6 наглядно представлены зависимости удельных параметров (стоимости и мощности) генераторов различных типов.

Удельные мощности (по массе) быстроходных генераторов существенно превышают тихоходные многополюсные машины с постоянными магнитами и индукторные генераторы. Однако, как отмечалось выше, удельная мощность не единственный и часто не главный критерий качества для установки в целом.



Рисунок 1.5 – Цена 1 кВт мощности генераторов различных типов



Рисунок 1.6 – Диаграммы удельной мощности генераторов различных типов

## 1.4. Критериальный анализ параметров генераторов

Для численной критериальной оценки конструктивных схем генераторов, рассмотренных в предыдущем параграфе, по методу на основе формирования множества Парето, их частные параметры представим в виде матрицы, в которой вектор-столбцам соответствуют исходы j –го варианта, а строкам – i -й параметр сравнения.

		-	r	r		-
		Bap.1	Bap.2	Bap.3	Bap.4	Bap.5
N⁰	Параметр	АΓ	СГ с ЭМ возбуж- дением	Индук- торный генератор	СГ с ПМ (быстро- ходный)	СГ с ПМ (многопо люсный)
	Мощность удельная	<b>y</b> 11	<b>y</b> 12	<b>y</b> 13	<b>y</b> 14	<b>y</b> 15
1	(средняя), кВт/кг	0,105	0,089	0,0434	0,079	0,044
	Удельная цена еди-	<b>y</b> 21	<b>y</b> 22	<b>y</b> 23	<b>y</b> 24	<b>y</b> 25
2	ницы мощности, руб/кВт	12200	32300	33500	22900	19600
	КПД установки с	<b>y</b> 31	<b>y</b> 32	<b>y</b> 33	<b>y</b> 34	<b>y</b> 35
3	тора и трансмиссии, (ном. режим) о.е.	0,836	0,816	0,923	0,791	0,85
	КПД установки с	<b>y</b> 41	<b>y</b> 42	<b>y</b> 43	<b>y</b> 44	Y45
4	учетом мультиплика- тора и трансмиссии, (режим пониженной скорости) о.е.	0,610	0,596	0,674	0,577	0,723
		<b>V</b> 51	<b>V</b> 52	V53	V54	V55
5	типликатора	Да	Да	Нет	Да	Нет
	Необхолимость раз-	<b>y</b> 61	y62	y63	<b>y</b> 64	Y65
6	мещения в гондоле	Дa	Дa	Нет	Дa	Нет
		<b>y</b> 71	<b>y</b> 72	<b>y</b> 73	<b>y</b> 74	<b>y</b> 75
7	Сложность обслужи- вания	Нет, за исключе- нием ре- дуктора	Дa	Нет	Нет, за исключе- нием ре- дуктора	Нет
	Возможность исполь-	<b>y</b> 81	<b>y</b> 82	<b>y</b> 83	y84	y85
8	тикальной осью вра- щения	Пробле- матично	Пробле- матично	Дa	Пробле- матично	Дa
	Обобщенный критерий эффективности, <b>У</b> , о.е.	13	6	19	4	22

Таблица 1.5 – Матрица удельных параметров генераторов

На рис. 1.7 представлены графы для определения оптимального исхода в формулировке Парето.



Рисунок 1.7 – Графы предпочтительных исходов для параметров качества различных типов генераторов

Наличие вершины, которая соединена исходящими из нее векторами со всеми остальными вершинами графа, соответствует лучшему элементу. При этом могут быть и другие дополнительные соединения, в том числе и с двухсторонними стрелками, соответствующие равнозначным исходам. На рис.1.7 вершины графов с лучшими интегральными исходами по *i*-тому параметру сравнения, обозначены двойными окружностями. В исследуемом случае наибольший рейтинг по числу «истоков», а, следовательно, и по обобщенному параметру эффективности,  $Y_5 = 22$ , получает вариант №5, вариант №3  $Y_3 = 19$  баллов, вариант №1  $Y_1 = 13$ , варианты №2 и №4 соответственно –  $Y_2 = 6$  и  $Y_4 = 4$  балла.

Таким образом, многокритериальный структурный анализ, основанный на принципе доминирования Парето, отдает предпочтение из исследуемых типов генераторов малой мощности, предназначенных для ВЭУ и других альтернативных источников электроэнергии, многополюсному синхронному генератору с возбуждением от постоянных магнитов (вар. 5).

Отметим, однако, что однозначный вывод о безоговорочном преимуществе какой-либо из схем делать не всегда корректно, так как для устройств различного назначения весомость выбранных частных параметров не одинакова. Это подтверждает и практика применения всех рассматриваемых конструкций в различных технических устройствах.

Анализ выявил, что по некоторым параметрам, например, удельной мощности, многополюсный СГ с возбуждением от ПМ проигрывает практически всем остальным вариантам. Поэтому, вопросу оптимизации синхронного генератора по мощности и массе, следует уделить особое внимание, выделив его в качестве одного из приоритетов настоящего исследования.

### 1.5. Задачи исследования

Исходя из проведенного аналитического обзора работ в области теории и практики использования генераторов малой мощности для альтернативных ге-

нераторов с нестабильной частотой вращения и ограниченной переменной механической мощностью, выявлен ряд теоретических и практических проблем, вызванных недостаточной конкурентоспособностью в сравнении с традиционными источниками и сдерживающих их широкое внедрение. Во-первых, – нет объективных обобщенных количественных критериев выбора различных типов электрических машин, используемых для этих целей. Во-вторых, - несмотря на то, что разработчики синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов в последнее время существенно повысили их энергоотдачу, это произошло в большей мере за счет улучшения свойств самих магнитов, а вопросы параметрической оптимизации магнитных систем в анализируемой литературе освещены лишь фрагментарно. Нет и адекватных математических моделей, особенно это относится к индукторам с расположением магнитов в пазах. В-третьих, – электрические генераторы альтернативных источников энергии значительную часть времени работают в неноминальных по скорости и мощности режимах. Для таких режимов работы электрическая машина должна проектироваться таким образом, чтобы ее КПД оставался высоким не только в номинальной точке, но и в более широком диапазоне мощностей и частот вращения. В-четвертых, – теоретические результаты по синтезу оптимального варианта генератора должны быть подвергнуты численному и натурному моделированию, для подтверждения их адекватности.

Целью проводимых исследований является повышение энергетической эффективности синхронных генераторов малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов за счет совершенствования алгоритма расчетов, методов анализа и оптимизационного проектирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

 Разработать алгоритм и критерий для оценки энергетической эффективности генераторов различных типов на основе метода многокритериальной структурной оптимизации Парето.
- 2. Совершенствовать математические модели синхронных магнитоэлектрических генераторов малой мощности, учитывающие различные конструкции системы возбуждения с постоянными магнитами.
- Разработать имитационные модели системы синхронный генератор нагрузка с учетом уточненной математической модели для определения выходных параметров и характеристик генератора при работе в комплексе ВЭУ.
- Предложить методы синтеза генераторов, отличающихся высокими значениями энергоэффективности не только в номинальном режиме, но и в режимах изменяющихся частоты вращения и отдаваемой мощности.
- 5. Провести экспериментальную проверку выдвинутых теоретических моделей с целью оценки их адекватности.

# 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СГ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Структурный анализ конструктивных схем СГ малой мощности, проведенный в первой главе методом Парето, показал, что многополюсные машины с возбуждением от постоянных магнитов по обобщенному параметру эффективности выигрывают по сравнению с другими типами генераторов, применяющихся для энергоустановок малой мощности с приводами от нестабильных по частоте вращения и мощности турбин (ВЭУ, микро ГЭС). Это объясняется, в первую очередь, высокими энергетическими показателями современных постоянных магнитов.

На рис.2.1 и в табл. 2.1 приведены энергетические характеристики некоторых постоянных магнитов и темпы их изменения за последнее время [62,63].



Рисунок 2.1 – Изменение энергетических характеристик постоянных магнитов

Учитывая меньшую стоимость сплавов NdFeB по сравнению с самарий кобальтовыми, выбор типа магнита становится очевидным: во всех устройствах, где рабочая температура не превышает 120-130<sup>о</sup>С – неодимовые магниты предпочтительнее.

Марка матери-	Остаточная магнитная индукция <b>Br</b>		Коэрцитивная сила (по току) <b>Нсј</b>		Максимальное энер- гетическое произве- дение ( <b>BH</b> ) <b>max.</b>		Рабочая тем- пература t
ала	Tl (Тесла)	kG (КГаусс)	kA/m	kOe	MGOe	Kj/m3	С
N35H	1,15- 1,17	11,5-11,7	1355	17	35	279	120
N35SH	1,17- 1,20	11,7-12,0	1590	20	35	279	150
N35UH	1,17- 1,20	11,7-12,0	1990	25	35	279	180
N38H	1,22- 1,26	12,2-12,6	1355	17	38	303	120
N38SH	1,22- 1,26	12,2-12,6	1590	20	38	303	160
N38UH	1,22- 1,26	12,2-12,6	1990	25	38	303	180
N40H	1,26- 1,29	12,6-12,9	1355	17	40	318	120
N40SH	1,26- 1,29	12,6-12,9	1590	20	40	318	160
N40UH	1,26- 1,29	12,6-12,9	1990	25	40	318	180
N42H	1,30- 1,33	13,0-13,3	1355	17	40	318	120
N42SH	1,3-1,33	13,0-13,3	1590	20	42	334	160
N45M	1,33- 1,37	13,3-13,7	1115	14	45	358	100
N45H	1,33- 1,37	13,3-13,7	1355	17	45	358	120
N48H	1,36- 1,42	13,6-14,2	1355	17	48	382	120

Таблица 2.1 – Магнитные характеристики магнитных сплавов NdFeB

Существует большое количество конструктивных типов синхронных генераторов с постоянными магнитами. Каждый из них имеют свои особенности, определяющие области их рационального использования. Однако единых объективных критериев оценки эффективности систем возбуждения малых синхронных генераторов до настоящего времени не выработано. Этот вопрос наиболее актуален для синхронных генераторов, работающих от приводов с непостоянной частотой вращения.

Спецификой работы синхронного генератора с постоянными магнитами, который чаще всего применяется для таких систем, является то, что он должен обеспечивать требуемое количество и качество электроэнергии при широком диапазоне изменения частоты вращения. При проектировании традиционных электрических машин, и в частности, синхронных генераторов, одним из главных критериев, как правило, является минимум потерь в номинальном режиме. Но, такой подход применять для генераторов малых ВЭУ очевидно нецелесообразно, так как большую часть своей работы генератор может эксплуатироваться при частоте и мощности существенно отличающихся от номинальных. Задача расчета и оптимизации параметров генератора в «неноминальных» режимах остается актуальной.

До настоящего времени не разработано достаточно полных и точных математических моделей и методов оптимизационного проектирования синхронных генераторов с постоянными магнитами, учитывающих особенности их функционирования в комплексах ВЭУ и микроГЭС.

# 2.1. Особенности конструкций систем возбуждения от высококоэрцитивных постоянных магнитов

Существует несколько конструктивных схем роторов синхронных машин с постоянными магнитами [19, 45, 63]. На рис.2.2 показаны наиболее распространенные из них.

Схема с когтеобразными полюсами (Рис.2.2*a*) отличается технологичностью при массовом производстве. Поэтому она чаще всего используется в низковольтных автомобильных генераторах. У этой конструктивной схемы главный недостаток заключается в больших значениях рассеяния магнитного потока, которое может достигать 70-80%. В генераторах с ротором коллекторного типа (Рис.2.2 б) магниты намагничены в тангенциальном направлении. Такая конструкция становится выгодной при большом количестве полюсов, обычно более 20-ти. Как и в предыдущей схеме за счет шунтирования магнитного потока в полюсных наконечниках, результирующий поток заметно ослабляется потоками рассеяния.



Рисунок 2.2 – Конструктивные схемы роторов многополюсных синхронных генераторов с постоянными магнитами. 1 – магнит; 2 – полюсный наконечник; 3 – спинка ротора.

В роторах генераторов с магнитами Sm-Co часто используют радиальную систему с полюсными наконечниками (Рис. 2.2 *в*). За счет их использования можно получить кривую магнитной индукции в воздушном зазоре приближенную к синусоиде. Но применение полюсных наконечников приводит к уменьшению рабочего потока в зазоре из-за шунтирования в магнитомягком материале наконечников.

Как показывают расчеты [9], наибольшую магнитную энергию в воздушном зазоре обеспечивает конструкция с радиальными магнитами, расположенными на поверхности ротора непосредственно в воздушном зазоре. На кромках магнитов возникает концентрация магнитного потока, приводящая к появлению в кривой ЭДС генератора высокочастотных гармоник, вызывающих перенапряжения и дополнительные потери.

Одной из перспективных конструктивных схем ротора является схема с магнитами, расположенными в пазах ротора (Рис.2.3).



Рисунок 2.3 – Синхронный генератор с магнитами в пазах ротора 1 – магнит; 2 – спинка ротора; 3 – паз статора; 4 – спинка статора.

В англоязычной литературе эта схема носит название *Embedded PMSG* – синхронный генератор со вставными магнитами [9]. В этой конструкции магниты вставляются в соответствующие пазы в шихтованном магнитопроводе ротора. При этом радикально решаются проблемы с креплением магнитов и отводом от них тепла при работе генератора.

Особенностью конструкции в электромагнитном отношении является дополнительные потоки рассеяния, замыкаемые по телу ротора, по так называемым мостикам насыщения, в обход воздушного зазора. Однако преимущества конструкции, такие как технологичность и простота, делают ее конкурентоспособной при сравнении с другими вариантами.

Главная сложность при расчете магнитной системы, представленной на puc.2.3, заключается в выборе размеров насыщающихся мостиков и их геометpuи. Если не решить эту задачу корректно, то магнитная система будет вообще неработоспособной из-за короткого замыкания магнитов – потоки рассеивания будут больше полезного потока в зазоре. Для решения этой задачи рационально воспользоваться методами численного моделирования магнитного поля.

#### 2.2. Математическая модель СГ с постоянными магнитами

#### 2.2.1. Уравнения электромагнитного поля

Численное моделирование магнитного поля синхронного генератора предполагает следующие исходные допущения.

1. Геометрическая модель задана. Допускается параметрическое изменение геометрических соотношений в пределах, не изменяющих конструктивную схему. В данной работе изменению подвергались размеры и форма мостиков насыщения.

 Известны источники поля. В решаемой задаче для режима холостого хода это постоянные магниты, заданные кривыми размагничивания. В нагрузочном режиме – ПМ, и пазовые токи статора.

3. Заданы физические свойства материалов (электрические и магнитные проводимости – линейные и нелинейные).

4. Магнитостатическая задача решается в двумерной постановке.

Остальные допущения традиционны для решения полевых задач в электрических машинах:

- пренебрежимо малы ЭДС Томпсона, ЭДС Холла, ЭДС Толмена;

43

- не учитываются токи проводимостей в диэлектриках, конвекционные токи, токи смещения и запаздывания;

 влияние механических напряжений на параметры и размеры сред пренебрежимо мало;

параметры и размеры сред не зависят от температуры.

В общем случае, решение задачи моделирования магнитного поля в электрической машине сводится к решению уравнений Максвелла [69] в неподвижной области – статоре (индекс 1) в неподвижной системе координат  $r, \propto_1$  и z, и во вращающейся области – роторе (индекс 2)

$$rot \mathbf{H}_{11} = \mathbf{j}_{11}, \qquad rot \mathbf{E}_{11} = -\frac{\partial \mathbf{B}_{11}}{\partial t};$$
  

$$div \mathbf{B}_{11} = 0; \qquad div \mathbf{j}_{11} = 0;$$
  

$$\mathbf{B}_{11} = f_{H1}(\mathbf{H}_{11}), \qquad \mathbf{j}_{11} = f_{E1}(\mathbf{E}_{11});$$
  
(2.1)

Уравнения связи для сред во вращающейся области 2 – во вращающейся системе координат  $r, \propto_2$  и z

$$rot \mathbf{H}_{22} = \mathbf{j}_{22}, \qquad rot \mathbf{E}_{22} = -\frac{\partial \mathbf{B}_{22}}{\partial t};$$
  

$$div \mathbf{B}_{22} = 0; \qquad div \mathbf{j}_{22} = 0;$$
  

$$\mathbf{B}_{22} = f_{H2}(\mathbf{H}_{22}), \qquad \mathbf{j}_{22} = f_{E2}(\mathbf{E}_{22});$$
  
(2.2)

В (2.1) и (2.2) и далее первый индекс при векторах поля обозначает номер области, в которой располагается среда, второй – номер системы координат, в которой он выражен.

**В** – вектор магнитной индукции. (Все векторные величины в уравнениях (2.1), (2.2) и далее, будем обозначать жирным прямым шрифтом);

Е, Н – напряженности электрического и магнитного полей;

**ј** – вектор плотности тока.

Уравнения (2.1) и (2.2) дополним уравнениями связи между векторами поля в различных координатных осях. За границу подвижной и неподвижной систем традиционно примем середину воздушного зазора. Тогда на границе

$$\mathbf{B}_{11} = \mathbf{B}_{22}; \quad \mathbf{H}_{11} = \mathbf{H}_{22}. \tag{2.3}$$

44

Уравнения движения ротора имеет вид

$$M - M_{_{GH}} + J \frac{d\Omega}{dt} = 0$$

$$\Omega = \Omega_0 + \int_0^t (\frac{d\Omega}{dt}) dt$$

$$\varphi = \varphi_0 + \int_0^t \Omega dt \pm 2\pi c$$
(2.4)

где *M* – генераторный момент, включающий момент холостого хода; *M*<sub>вн</sub> – момент приводного двигателя; *J* - момент инерции вращающихся частей; Ω - угловая скорость вращения ротора; нижним индексом "0" сопровождены начальные значения величин.

В области существования магнитного поля генератора все среды можно разделить на диэлектрические, проводящие и ферромагнитные.

Для диэлектрических сред уравнения связи имеют вид

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu}_0 \mathbf{H}; \quad \mathbf{j} = 0, \tag{2.5}$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Для проводящих сред (обмотка)

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}; \quad \mathbf{j} = \gamma \mathbf{E}, \tag{2.6}$$

где  $\gamma$  - удельная электрическая проводимость среды.

Для ферромагнитных электропроводных сред (магнитопровод) уравнения связи наиболее сложны. Даже, если не учитывать начальную намагниченность электротехнической стали и гистерезис, то уравнения связи между **B** и **H** записываются через проекции векторов и тензор магнитной проницаемости

$$||B_i|| = ||\mu_{ik}|| \cdot ||H_k||, \tag{2.7}$$

где *i*,*k* последовательно равны r,  $\propto$ , z в полярных координатах или x, y, z – в ортогональной системе.

Если пренебречь гистерезисом и анизотропией магнитных свойств, вектор **В** совпадает по направлению с вектором **H**, и магнитная проницаемость становится скалярной величиной, зависящей только от величины напряженности (индукции)

$$\mu = \mu(H)$$
, либо  $\mu = \mu(B)$ , где H (B) – модуль напряженности (индукции)  
 $H = \sqrt{H_r^2 + H_{\alpha}^2 + H_z^2},$  (2.8)  
 $B = \sqrt{B_r^2 + B_{\alpha}^2 + B_z^2}.$ 

Уравнения связи между векторами **j** и **E** при анизотропии электропроводимости, часто встречающейся в шихтованных ферромагнитных сердечниках, также будем записывать в виде, когда компоненты вектора плотности тока проводимости **j** связываются с компонентами вектора напряженности электрического поля **E** с помощью тензора электропроводимости

$$\|j_i\| = \|\gamma_{ik}\| \cdot \|E_k\|, \tag{2.9}$$

где ||ү<sub>ik</sub>|| - тензор электропроводности, компоненты которого являются функциями координат

$$\gamma_{ik} = \gamma_{ik}(x, y, z). \tag{2.10}$$

Внешние граничные условия с учетом того, что поле за пределами магнитной системы генератора пренебрежимо мало, могут быть заданы на внешней границе статора уравнением равенства нулю магнитного потенциала A<sub>z</sub>=0.

Запись уравнений трехмерного электромагнитного поля через векторный магнитный потенциал **A** сводит уравнения для индукции и напряженности магнитного поля для анизотропных ферромагнитных сред с токами к известному уравнению Пуассона [69]:

$$rot\left(\frac{1}{\mu}rot\mathbf{A}\right) = -\mathbf{j}.$$

Уравнение Пуассона, будучи записано через проекции на оси координат, приводит к системе из трех дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка. Математическая модель двумерного поля по сравнению с трехмерным полем существенно упрощается. В этом случае введение как скалярного, так и векторного магнитного потенциалов сокращает в два раза число подлежащих определению неизвестных параметров магнитного поля.

Составляющие вектора индукции магнитного поля в двумерной постановке определяются по формулам

$$B_r = \frac{1}{r} \frac{\partial A_z}{\partial \alpha}; \quad B_\alpha = -\frac{\partial A_z}{\partial r}.$$

2.2.2. Численное моделирование электромагнитного поля генератора Математическая модель электромагнитного поля, основанная на системе уравнений (2.1...2.10), в рамках принятых допущений и начальных значений, описывает работу генератора в установившихся и переходных режимах работы с достаточной полнотой. Трудность заключается в том, что аналитически эту систему уравнений для конкретной конфигурации электрической машины и заданных токов, решить без существенных упрощающих допущений невозможно [29,31].

С развитием компьютерных технологий и совершенствованием математических методов решение этой задачи стало возможным приближенными численными методами, в которых операции дифференцирования и интегрирования заменяются операциями над числами, переходом от исходных непрерывных дифференциальных уравнений к системе алгебраических с конечным числом элементов [17,29,31,43,44,76].

Постановка задачи расчета электромагнитного поля СГ сведена к статической двумерной, плоскопараллельной (геометрия расчетных областей, свойства сред и параметры источников поля неизменны по оси *z*). Остальные допущения перечислены выше. Учет составляющих параметров, обусловленных торцевыми зонами магнитной системы и лобовых частей производился традиционными классическими методами.

47

В двумерной плоскопараллельной задаче отличными от нуля являются только компоненты плотности тока по оси  $z - \mathbf{j}_z$  и векторного магнитного потенциала  $\mathbf{A}_z$ , будем обозначать их просто как *j* и *A*.

С учетом этого, для плоскопараллельного поля уравнение Пуассона в правосторонней ортогональной системе координат запишется в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu_{y}} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu_{x}} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left( \frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right)$$
(2.11)

В уравнении (2.11) компоненты магнитной проницаемости μ<sub>x</sub> и μ<sub>y</sub> для ферромагнитных участков задаются как функции магнитной индукции (нелинейная задача).

Источниками поля в задаче являются постоянные магниты и токи фаз, заданные через плотности тока в пазах. Векторы плотности тока направлены по оси *z* перпендикулярной плоскости модели. Знак и значение токов определялись распределением тока статора по пазам в зависимости от величины и характера нагрузки.

Модель исследуемого генератора представляет собой совокупность областей с неизменными физическими свойствами (Табл. 2.2).

Область	Удельная электропро- водность, о	Плотность тока, ј	Магнитная проницае- мость, µ	Остаточная намагничен- ность, <i>Н</i>
Постоянные магниты	$\sigma_{\pi M}$	0	$\mu_{\pi M}$	H=f(B)
Магнитопровод статора	$\sigma_{Fe}$	0	$\mu_i = f(B_i)$	0
Магнитопровод ротора	$\sigma_{Fe}$	0	$\mu_i = f(B_i)$	0
Пазы статора	$\sigma_{Cu}$	j <sub>k</sub>	μ <sub>0</sub>	0
Изоляция паза	0	0	$\mu_0$	0
Воздушный зазор	0	0	μ <sub>0</sub>	0
Окружающее пространство	0	0	μ <sub>0</sub>	0

Таблица 2.2 – Физические свойства областей модели

Геометрическая модель генератора импортировалась из файлов Auto-CAD, полученных по результатам предварительного расчета. Модель автоматически разбивалась на элементы расчетной сетки, в узлах которой определялись значения вектора магнитного потенциала А. По рассчитанным значениям магнитного потенциала определялись компоненты векторов индукции и напряженности магнитного поля

$$B_{x} = \frac{\partial A}{\partial y}; B_{y} = -\frac{\partial A}{\partial x};$$
$$H_{x} = \mu_{x}^{-1}B_{x}; H_{y} = \mu_{y}^{-1}B_{y},$$

где µ – тензор магнитной проницаемости (нелинейная функция B).

По значениям индукции и напряженности рассчитывались интегральные параметры поля:

- суммарная магнитная сила на единицу длины машины по оси *z* 

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \oint \left( \mathbf{H}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}) + \mathbf{B}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{H}) - \mathbf{n}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{B}) \right) d\mathbf{S}, \qquad (2.12)$$

где интегрирование ведется по поверхности ротора, **n** –вектор нормали к поверхности;

- энергия магнитного поля в заданном объеме

$$W = \int \left( \int_{0}^{B} H(B') dB' \right) dV; \qquad (2.13)$$

- потокосцепление на один виток обмотки

$$\Psi = \frac{\oint AdS}{S},\tag{2.14}$$

где S - площадь поперечного сечения витка обмотки.

- индуктивности и взаимные индуктивности обмоток

$$L = \frac{w\Psi}{I} ; \qquad (2.15)$$

ИЛИ

$$L = \frac{2 \cdot W}{I^2} ; \qquad (2.16)$$

49

$$M_{12} = \frac{w_2 \Psi_2}{I_1}.$$
 (2.17)

## 2.3. Моделирование поля генератора со встроенными магнитами

Как отмечалось выше, численное моделирование поля возможно лишь для конкретного объекта с заданными геометрическими и физическими свойствами. В качестве такого объекта был выбран вариант синхронного генератора с постоянными магнитами на роторе (*Embedded PMSG*), предназначенный для работы в составе ВЭУ малой мощности. Основные параметры генератора приведены в табл.2.3.

Чертеж фрагмента базового варианта магнитной системы генератора приведен в Приложении А.

10	П	n
Nº	Параметр, ед. изм.	Значение
1.	Номинальная мощность, кВт	2,0
2.	Количество фаз	3
3.	Способ соединения фаз статора	Звезда
4.	Количество пар полюсов	6
5.	Номинальное фазное напряжение, В	20,5
6.	Номинальное выпрямленное напряжение, В	48
7.	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	140
8.	Возбуждение	Постоянные магниты N38N
9.	Номинальный коэффициент мощности ( $\cos \phi$ )	0,95
10.	Номинальный ток статора, А	33,6

Таблица 2.3 – Параметры синхронного генератора

Для того чтобы задать физические свойства блоков геометрической модели при работе генератора под нагрузкой, необходимо было определить схему обмотки с соответствующим распределением токов по пазам. На рис.2.4 представлена звезда пазовых ЭДС.



Рисунок 2.4 – Звезда пазовых ЭДС

Угол между соседними пазами, эл.град

$$\gamma = \frac{360 \cdot p}{z} = 40^{\circ},$$

Число лучей в звезде

$$\frac{z}{p} = 9$$

Геометрическая модель представляла собой фрагмент магнитной системы, показанный на рис.2.5 с усечением ее до двух полюсов (для использования граничных условий симметрии).

Физические свойства постоянных магнитов в модели были заданы кривой размагничивания с учетом направления вектора намагниченности ортогонально к рабочей поверхности магнитов.

Чередование фаз обмотки в геометрической модели принято в соответствии с рис.2.4.



Рисунок 2.5 – Геометрическая модель

Граничные условия в виде нулевого магнитного потенциала на внешней поверхности машины и условий симметричности были заданы на соответствующих гранях геометрической модели.

## <u>Режим холостого хода.</u>

Для режима холостого хода токи в обмотках генератора равны нулю и, соответственно, единственным источником поля являются постоянные магниты.

Решение данной задачи позволило определить индукцию  $B_{\delta}$  и магнитный поток  $\Phi_{\delta}$  в воздушном зазоре (амплитудные значения и гармонический состав). Кроме этого, по картине магнитного поля при холостом ходе находим коэффициент рассеяния постоянных магнитов и коэффициент насыщения магнитной цепи [9].

Моделирование проводилось в программных комплексах Ansys Maxwel [80] и ELCUT [65] в постановке магнитостатической задачи с общепринятыми допущениями. Картина поля, полученная в ходе решения, показана на рис.2.6.

Результаты моделирования поля представлены так же на рисунках 2.7-2.9.



Рисунок 2.6 – Магнитный поток генератора на холостом ходу



Рисунок 2.7 – Нормальная составляющая магнитной индукции в зазоре под одним полюсом

Основную информацию о поле в воздушном зазоре несет нормальная составляющая магнитной индукции. Именно она индуктирует ЭДС в обмотке статора. Картина распределения нормальной составляющей магнитной индукции на двойном полюсном делении и спектральный анализ индукции в зазоре показаны на рис.2.8, 2.9.

Из анализа гармонического состава следует, что кроме первой гармоники поля в кривой индукции присутствуют нечетные гармоники с номерами

3,5,7,9,11,15,19 и выше. Их амплитуды составляют от 12 до 3% от амплитуды первой гармоники, уменьшаясь с ростом порядкового номера.



Рисунок 2.8 – Картина поля (магнитная индукция) на двойном полюсном

делении



Рисунок 2.9 – Гармонический состав кривой индук-

#### ции в воздушном зазоре

Значения некоторых интегральных параметров магнитного поля машины на холостом ходу приведены в табл.2.4. По этим значениям можно судить о

рациональности использования участков магнитной цепи и делать выводы о направлениях ее оптимизации.

№ п/п	Сечение	Среднее значение магнитной индук- ции по сечению,	Длина линии сечения, м	Среднее значе- ние магнитного потока, Вб
		Тл		
1	Нейтральное сечение	1,0474	0,02565	2.0,00215
	магнита			
2	Воздушный зазор под	0,511	0,079	0,00324
	полюсом			
3	Зубец 3(Рис.2.5)	0,328	0,0088	0,000231
4	Зубец 4	1,337	0,0088	0,000941
5	Зубец 5	1,344	0,0088	0,000946
6	Зубец 6	1,338	0,0088	0,000941
7	Зубец 7	0,314	0,0088	0,000221
8	Мостик насыщения	2,537	0,0018	0,000365
	со стороны разно-			
	именных полюсов			
9	Мостик насыщения	2,147	0,0022	0,000378
	между магнитами од-			
	ного полюса			

Таблица 2.4 – Средние значения индукций и магнитных потоков на холо-

## стом ходу

Моделирование магнитного поля на холостом ходу дает возможность определения потоков рассеяния магнитов для их последующей оптимизации за счет варьирования геометрии, в частности, мостиков насыщения.

Коэффициент рассеяния магнитов для исследуемой машины составил значение

$$k_{\sigma} = \frac{\Phi_{\text{Mar}}}{\Phi_{\delta.\text{cp}}} = 1,33.$$

Основная гармоническая индукции в зазоре, Тл:

$$B_{\delta m01} = 0,772.$$

Первая гармоника магнитного потока в зазоре, Вб:

$$\Phi_{\delta m01} = \frac{2}{\pi} B_{\delta m01} \cdot S_{\delta} = 0,0031.$$

Оптимизация размеров магнитной системы ротора позволяет добиться увеличения рабочего магнитного потока в зазоре, а, следовательно, и выходной мощности генератора, при тех же размерах магнитов.

#### <u> Реакция якоря</u>

При моделировании электромагнитного поля генератора работающего под нагрузкой, необходимо задать распределение токов в обмотке статора по пазам, соответствующее номинальному режиму. Для этого нужно из векторной диаграммы Блонделя определить угол  $\psi$  сдвига между векторами тока и ЭДС от потока возбуждения по продольной оси (осью *d*).

параметры для построения диаграммы Блонделя, в первую очередь индуктивное сопротивление рассеяния  $x_{\sigma}$  и ненасыщенное индуктивное сопротивление по поперечной оси  $x_{qn}$ , можно рассчитать по известным приближенным методикам [46], но точность этих расчетов для рассматриваемого случая может оказаться недостаточной. Это связано со сложной нетрадиционной геометрией магнитопровода ротора, имеющего в своем составе и постоянные магниты, и ферромагнитные участки с глубоким насыщением. Численное моделирование дает более адекватные результаты.

Для моделирования поля якоря воспользуемся традиционным методом двух реакций, предложенным А. Блонделем [79]. Суть метода заключается в допущении о независимости магнитных полей продольной и поперечной реакции якоря друг от друга а насыщение учитывается уточняющими коэффициентами.

В зависимости от характера нагрузки различают три предельных случая реакции якоря (статора).

 осью ротора *q*. Этот режим близок к реальному режиму работы генератора на выпрямительную нагрузку с *R*-*C* фильтром. Коэффициент мощности при этом превышает 0,95.

- 2. Продольная размагничивающая. ЭДС опережает ток статора на четверть периода. Этот случай соответствует чисто индуктивной нагрузке генератора, при этом ток якоря достигает максимума спустя четверть периода после максимума ЭДС, то есть после поворота ротора на угол 90 электрических градусов по направлению его вращения. При этом ось фазы совпадает с продольной осью поля возбуждения.
- Продольная намагничивающая. Случай, противоположный индуктивной нагрузке имеет место при чисто емкостной нагрузке. При этом ток статора опережает ЭДС на четверть периода, и поток реакции якоря имеет продольно-подмагничивающий характер. На практике режим встречается редко.

Реальная нагрузка генератора, как правило, представляет собой смешанный случай, когда кроме активной составляющей в токе нагрузки имеется и реактивная, обычно индуктивная, составляющая. Даже при работе на неуправляемый выпрямитель, коэффициент мощности которого близок к единице, но всё же меньше и имеет значение около 0,95. Кроме этого, необходимо учитывать и собственные индуктивности обмоток генератора.

Для определения влияния реакции якоря на поле постоянных магнитов (возбуждения) моделирование магнитного поля проводилось при продольном и поперечном положении индуктора. Для этого задавались величины токов: в фазе *A* ток равен максимальному относительному значению  $I_A = I_m = 1$ , токи в фазах *B* и *C*  $I_B = I_C = -\frac{1}{2}$ . В результате была получена картина электромагнитного поля *продольной реакции якоря*, представленная на рис. 2.10.

Из картины поля определены направление и величина магнитного потока. В отличие от традиционных синхронных машин поток продольной реакции якоря на своем пути встречает участки занятые постоянными магнитами (1 – на рис.2.10), имеющие весьма малую магнитную проницаемость (для неодимовых магнитов  $\mu_{nm} \simeq 1.05 \mu_0$ ) и участки с глубоким насыщением (2 – на рис.2.10). Этим



Рисунок 2.10 – Продольная реакция якоря. Картина электромагнитного

поля

объясняется парадоксальное, на первый взгляд, соотношение  $x_d < x_q$ . В тради-

ционных явнополюсных машинах это соотношение обратное. На рис. 2.11



# Рисунок 2.11 – Продольная реакция якоря. Нормальная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре

показана форма кривой индукции в зазоре на протяжении одного полюсного деления и её среднее значение. Результаты гармонического анализа кривой нормальной составляющей магнитной индукции представлен на рис.2.12.



Рисунок 2.12 – Продольная реакция якоря. Гармонический состав кривой индукции в воздушном зазоре

#### Поперечная реакция якоря.

Для моделирования поперечной реакции якоря необходимо изменить положение ротора, повернув его на 90 электрических градусов (что соответствует для двенадцатиполюсной машины 15 геометрическим градусам) против часовой стрелки. Результаты расчетов поля поперечной реакции показаны на рис.2.13-2.15.



Рисунок 2.12 – Поперечная реакция якоря. Картина электромагнитного

поля



Рисунок 2.14 – Поперечная реакция якоря. Нормальная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре



Рисунок 2.15 – Поперечная реакция якоря. Гармонический состав кривой индукции в воздушном зазоре

Результаты моделирования и их гармонический анализ позволили опре-

делить параметры поля реакции якоря, приведенные в таблице 2.5

	Обозначе-	Зизиение	Ед.
Параметр	ние	Shatemie	ИЗМ.
Магнитный поток продольной реакции	$\Phi_{ad}$	0,00137	Вб
якоря			
Коэффициент формы поля продольной	k <sub>ad</sub>	0,788	-
реакции якоря			
Максимальное значение магнитной ин-	$B_{adm}$	0,453	Тл
дукции в зазоре от продольной реакции			
якоря			
Первая гармоническая индукции в за-	$B_{adm1}$	0,357	Тл
зоре от продольной реакции якоря			
Первая гармоника магнитного потока	$\Phi_{ad1}$	0,00144	Вб
продольной реакции			
ЭДС продольной реакции якоря	$E_{ad}$	8,8	В
Ненасыщенное индуктивное сопротив-	$x_{ad}$	0,464	Ом
ления продольной реакции якоря			
Магнитный поток поперечной реакции	$\Phi_{aq}$	0,00259	Вб
якоря	*		
Коэффициент формы поля поперечной	kaq	0,893	-
реакции якоря	_		

Таблица 2.5 – Параметры поля реакции якоря

Максимальное значение магнитной ин-	Baqm	0,70	Тл
дукции в зазоре поперечной реакции			
якоря			
Первая гармоническая индукции в за-	$B_{aqm1}$	0,625	Тл
зоре от поперечной реакции якоря			
Первая гармоника магнитного потока	$\Phi_{aq1}$	0,00251	Вб
поперечной реакции			
ЭДС поперечной реакции якоря	$E_{aq}$	12,3	В
	-		
Ненасыщенное индуктивное сопротив-	$x_{aq}$	0,808	Ом
ления поперечной реакции якоря			

Результаты моделирования холостого хода и реакции якоря послужили исходными данными для построения диаграммы Блонделя. Из диаграммы был определен синус угла  $\psi$  между вектором тока и вектором ЭДС холостого хода

$$\sin \psi = \sqrt{\frac{1}{1 + \left[ \left( \cos \varphi + r_a^* \right) / \left( \sin \varphi + x_{qn}^* \right) \right]^2}} = 0,86;$$

 $\psi = 59,3^{\circ}$  электрических.



Рисунок 2.16 – Диаграмма Блонделя

Из диаграммы

 $\varphi = 18^\circ$ ,  $\cos \varphi = 0.95$ ,  $\theta = 45^\circ$ .

#### Работа под нагрузкой

Следующим этапом расчета является численное моделирование магнитного поля в номинальном нагрузочном режиме. Эта задача решалась при сдвиге осей поля возбуждения (ось *d*) и оси фазы *A*-*X* обмотки якоря на угол 59,3 электрических градусов. Этому углу соответствует сдвиг продольной оси d ротора на геометрической модели на угол  $\psi' = 9,9^{0}$  (геометрических) – рис.2.17. На рисунке показана картина магнитного поля для момента времени, когда ток в фазе *A* максимальный.



Рисунок 2.17 – Магнитное поле машины под нагрузкой

Результатом решения полевой задачи стало определение интегральных параметров генератора, значения которых приведены в таблице 2.6.

Параметр	Обозначение	Значение	Ед. изм.
Магнитный поток в воздушном за-	$\Phi_{\delta}$	0,00297	Вб
зоре			
Индукция в магните на нейтраль-	$B_m$	0,95	Тл
ной линии			
Напряженность поля в магните	$H_m$	616000	A/m
Амплитуда первой гармоники	$B_{\delta m1}$	0,74	Тл
поля в зазоре			
Первая гармоника потока	$\Phi_{\delta 1}$	0,00281	Вб
ЭДС обмотки якоря	$E_{\delta}$	28,4	В
Напряжение	U	20,5	В

Таблица 2.6 – Параметры синхронного генератора

На основании проведенного моделирования определены основные параметры генератора, рассчитаны уточненные значения геометрических размеров и обмоточных данных, спроектирован и изготовлен опытный образец, результаты испытаний которого приведены в гл.5.

# 2.4. Выводы к главе 2

- 1. Для низкоскоростных многополюсных СГ прямого привода с нестабильной частотой вращения предпочтение следует отдать генераторам с радиальной системой возбуждения от высококоэрцитивных магнитов, расположенных на поверхности ротора или в специальных пазах шихтованного магнитопровода (Embedded PMSG).
- Аналитический расчет магнитной системы со встроенными магнитами без численного моделирования поля, не может обеспечить приемлемой точности из-за необходимости учета глубокого насыщения магнитных мостиков между одноименнополюсными и разнополюсными магнитами.
- 3. Предложенная математическая модель СГ с постоянными магнитами сочетает в себе расчет магнитного поля численными методами сов-

местно с анализом векторных диаграмм. Математическая модель служит основой для оптимизационного проектирования и уточненных поверочных расчетов генератора.

# 3. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА

Одним из основных требований к ВЭУ малой мощности является её автономность и возможность функционирования в автоматическом режиме. Для этого современные комплексы ВЭУ комплектуются системами автоматического управления (САУ), построенными, как правило, на базе микропроцессорной и силовой преобразовательной техники [13, 14, 57, 93, 94]. Синтез системы, её конфигурация, подбор элементной базы осуществляется на основе характеристик используемого генератора. Поэтому в работе была поставлена задача математического моделирования статических и динамических характеристик исследуемого генератора. Многие из этих характеристик могут быть получены экспериментально, но некоторые, например, характеристики внезапного короткого замыкания (КЗ), в эксперименте определить без опасности повреждения генератора или ротора ВЭУ, невозможно.

Моделирование генераторной установки проводилось в программной среде *Ansys Maxwell*, имеющей кроме мощного математического ядра широкий набор сервисных функций, позволяющий получать гибкие математические модели различных электромеханических преобразователей, в том числе, синхронных генераторов с постоянными магнитами [80].

#### 3.1. Статические характеристики генератора

Ansys Maxwell позволяет моделировать внешнюю электрическую цепь, набранную из стандартных пассивных (резисторы, конденсаторы, индуктивности) и активных примитивов (источники напряжения и тока разной формы). Таким образом, может быть установлена реакция генератора на подключение нагрузки разного рода и величины. В исследовании принимались следующие допущения:

- геометрическая модель исследуемого объекта плоскопараллельная;

- частота вращения генератора постоянная;

- момент инерции вращающихся частей генератора равен нулю;

- трехфазная нагрузка генератора симметрична, а компоненты, входящие во внешнюю цепь идеальны.

В качестве внешней цепи генератора моделировались три типа нагрузки: активная, индуктивная и емкостная. На рис.3.1 представлена внешняя цепь генератора с чисто активной нагрузкой.



Рисунок 3.1 – Схема замещения обмотки статора и нагрузки

Нагрузка подключена к генератору по схеме «звезда», *LA-X, LB-Y, LB-Z* – обмотки генератора, *Coil\_Resistance* – активное сопротивление обмоток (из исходных данных), *Load\_Resistance* – сопротивление нагрузки, которое в процессе моделирования задавалось как независимая переменная. Кроме того, для контроля фазных и линейных напряжений и токов в цепь включены соответствующие виртуальные измерительные приборы. Для индуктивной и емкостной цепей были изменены типы элементов нагрузки. Величина нагрузки регулировалась изменением активных (реактивных) сопротивлений в автоматическом режиме, для чего во вкладке Optimetrics—>Рагаmetric была добавлена переменная (сопротивление нагрузки) и шаг изменения.

На рис.3.2 представлены внешние характеристики синхронного генератора при работе на нагрузку разного характера, полученные по результатам моделирования. По оси абсцисс отложено сопротивление фазы внешней цепи в относительных единицах. За базовую величину сопротивления нагрузки принято активное сопротивление, при котором ток генератора равен номинальному. По оси ординат отложено фазное напряжение в абсолютных единицах (B).

Внешние характеристики генератора представлены в виде зависимости  $U = f(Z_{\mu \epsilon})$ , определяемой программой *Ansys Maxwell*. Традиционная для внешних характеристик зависимость  $U = f(I_{\mu \epsilon})$  приведена в главе 5 в разделе, посвященном экспериментальным исследованиям машины.



Рисунок 3.2 – Внешние характеристики. 1 – нагрузка *x*<sub>c</sub>; 2 – нагрузка *R*; нагрузка *x*<sub>L</sub>.

Вид полученных характеристик традиционный: падение напряжения при индуктивной нагрузке больше, чем при активной за счет размагничивающего действия реакции якоря, а при подключении емкостной нагрузки за счет подмагничивания напряжение на генераторе растет ростом тока нагрузки. Маркером отмечены напряжения на выводах генератора при номинальном токе нагрузки (33,6 A).

При номинальной активной нагрузке ( $R_{_{Hz}}^* = 1 \, o.e.$ ) напряжение генератора составило 25,6 вольта, что на 5,1 В больше номинального значения. Это объясняется в первую очередь тем, что номинальный режим рассчитывался на

работу генератора с коэффициентом мощности  $\cos \varphi = 0,95$  (активно-индуктивная нагрузка, соответствующая неуправляемому выпрямителю). При работе на управляемый выпрямитель напряжение будет снижаться из-за уменьшения значений коэффициента мощности.

Результаты моделирования рабочего режима представлены в виде графика зависимости угла нагрузки синхронного генератора  $\theta$ , эл. град., от величины активного сопротивления нагрузки (*Load\_Resistance*), выраженного, как и в первом случае, в относительных единицах (Рис.3.3).



Рисунок 3.3 – Зависимость угла нагрузки  $\Theta$  синхронного генератора от сопротивления нагрузки

При номинальной активной токовой нагрузке значение угла нагрузки составило 40,4 эл. град. Это значение отличается от величины угла нагрузки, полученного во второй главе методом построения диаграммы Блонделя ( $\theta = 44$  эл.град.) на 3,6<sup>0</sup> (8%). Различие объясняется тем, что векторная диаграмма строилась для коэффициента мощности  $\cos \varphi = 0,95$ , а моделирование проводилось для чисто активной нагрузки.

Значение номинального угла нагрузки 40,4<sup>0</sup> свидетельствует о значительном запасе по статической перегружаемости генератора. Для её оценки были рассчитаны зависимости электромагнитного момента (*Torgue*, Hм) от нагрузочного сопротивления (*Load\_Resistance*) – активного, индуктивного и емкостного, выраженного в относительных единицах (Рис.3.4).



Рисунок 3.4 – Зависимости электромагнитного момента от сопротивления

нагрузки. 1 – R; 2 – L; 3 – C.

Угловая характеристика момента, построенная в соответствии с выражением

$$M_{s} = m \frac{U \cdot E_{0}}{x_{d} \omega_{1}} \sin \theta + m \frac{U^{2}}{2\omega_{1}} \left( \frac{1}{x_{q}} - \frac{1}{x_{d}} \right) \sin(2\theta), \qquad (3.1)$$

показана на рис.3.5.



Рисунок 3.5 – Угловые характеристики момента генератора

Отличительной особенностью угловой характеристики исследуемого генератора от традиционных явнополюсных синхронных машин является то, что реактивный момент  $M_p$  имеет обратную полярность из-за того, что  $x_q > x_d$  (см. главу 2). Следствием этого является смещение точки максимального момента  $M_m$  в зону угла  $\theta > 90^0$ .

Статическая перегрузочная способность генератора

$$\frac{M_m}{M_{HOM}} = 1,78$$

что обеспечивает устойчивую работу генератора в динамических режимах.

Исследование энергетической эффективности генератора заключалось в моделировании нагрузочного режима. Результаты в виде зависимости потребляемой механической мощности

$$P_{Mex} = \frac{2\pi \cdot n \cdot M_s}{60} + \Delta p_0, \qquad (3.2)$$

и отдаваемой активной электрической мощности

$$P_{\rm eff} = mU_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos\varphi,$$

71



для случая активной нагрузки ( $\cos \varphi = 1$ ) представлены на графиках рис.3.6.



Коэффициент полезного действия генератора, рассчитанный прямым отношением полезной мощности к потребляемой составил значение

$$\eta = \frac{P_{_{\mathcal{I}\mathcal{I}}}}{P_{_{Mex}}} = 0,83.$$
(3.3)

ГОСТ 11828-86 [23] допускает для машин подобного класса мощности рассчитывать КПД косвенным методом – через определение потерь. Значения потерь были получены по результатам моделирования поля машины. КПД генератора, рассчитанный по этому методу, составил

$$\eta = \frac{P_{_{\mathfrak{I}}\mathfrak{I}}}{P_{_{\mathfrak{I}}\mathfrak{I}} + \Delta P_{_{\mathfrak{I}}\mathfrak{I}} + \Delta P_{_{\mathcal{M}}\mathfrak{I}} + \Delta P_{_{\mathcal{M}}\mathfrak{I}}} = 0,823.$$

Сравнение этих значений с результатами эксперимента даны в главе 5.

## 3.2. Динамические характеристики

Для построения САУ ВЭУ необходимо в качестве исходных параметров иметь достоверные динамические характеристики генератора. При моделировании переходных процессов в исследуемом генераторе также использовался программный комплекс *Ansys Maxwell*. Допущения при моделировании были
такими же, как и при моделировании статических характеристик (см. раздел 3.1).

В качестве иллюстрации результатов моделирования на рис.3.7 и 3.8 представлены расчетные кривые фазных напряжений (1) и токов (2) при подключении к клеммам генератора в момент времени t = 0 номинальных по току нагрузок – индуктивной и емкостной, соответственно.



Рисунок 3.7 – Переходный процесс при включении индуктивной нагрузки



Рисунок 3.8 – Переходный процесс при включении емкостной нагрузки

Время переходного процесса и в первом, и во тором случае, не превышает одного периода (T = 70 мс). Значение максимума амплитуды тока при подключении индуктивной нагрузки достигает 49 A (1,46  $I_{\text{ном}}$ ), а для емкостной нагрузки 70 A (2,1 $I_{\text{ном}}$ ). Эти значения должны приниматься за исходные при настройке токовой защиты и при выборе номинальных параметров силовых элементов полупроводникового преобразователя.

Работа генератора при различных значениях активной нагрузки иллюстрируется кривыми 1-3 на рис.3.9.



Рисунок 3.9 – Фазное напряжение при изменении активной нагрузки генератора. 1 – холостой ход; 2 – *I* = 0,1*I*<sub>ном</sub>; 3 – *I* = *I*<sub>ном</sub>

На рис.3.9 представлены зависимости фазного напряжения от времени при изменении нагрузки. Здесь кривая I – соответствует напряжению генератора без нагрузки, 2 – напряжение при 1/10 нагрузки и 3 – напряжение при номинальной нагрузке. Из графиков напряжений видно, что напряжение холостого хода повторяет вид кривой магнитной индукции на холостом ходу (см. рис. 2.7). Кривые трапецеидальной формы с характерными зубцовыми пульсациями. С увеличением нагрузки верхняя сторона трапеции вырождается в пик (кривая 3), что объясняется перераспределением магнитной индукции в воздушном зазоре в результате воздействия реакции якоря (поперечной) при активной нагрузке. Под нагрузкой один край полюса подмагничивается, а другой – размагничивается. В результате индукция в зазоре имеет максимум на стороне подмагниченного края. Причем видно, что площади полуволн напряжения несколько различаются (см. кривую напряжения холостого хода I и при номинальной нагрузке 3). Это объясняется различным влиянием размагничивающего и подмагничивающего потока из-за эффекта насыщения стали. Кроме того, из рис. 3.9 видно, что с увеличением нагрузки фазное напряжение генератора сдвигается относительно кривой холостого хода на некоторый угол  $\Theta$  – угол нагрузки синхронного генератора.

Значение угла нагрузки 40 эл. град. при номинальном режиме совпадает с полученным по математической модели ранее.

Важнейшими динамическими параметрами любого генератора являются параметры, характеризующие режим короткого замыкания (КЗ). Ударные токи однофазных и трехфазных КЗ в несколько раз превышают номинальные значения, и могут вызывать негативные последствия, как в самой электрической машине, так и в механическом приводе генератора. Ударные и установившиеся токи КЗ необходимо знать для выбора силовых элементов сопряженных преобразователей и элементов защиты.

Для моделирования внезапного однофазного короткого замыкания во внешнюю цепь модели был добавлен ключ, закорачивающий нагрузку одной фазы (рис.3.10).



Рисунок 3.10 – Схема замещения при моделировании однофазного ко-

### роткого замыкания

В момент времени  $T_{\kappa_3} = 100$  мс ключ *Short Circuit*, закорачивающий нагрузку фазы A-X замыкается. Короткое замыкание происходит в момент времени, когда напряжение (и ток) фазы A максимальные. Нагрузка генератора – активная, номинальная. При этом ток фазы *A* резко возрастает и в пике достигает значения (рис.3.11)  $Iy_{\kappa_3} = 76,7$  A.

Ударное значение тока КЗ превышает амплитуду номинального тока в 1,75 раза, а действующее значение – в 2,47 раза.



Рисунок 3.11 – Токи однофазного КЗ фазы A в момент U<sub>A кз</sub>=U<sub>m</sub>. 1 –  $i_{A}$ ; 2 –  $i_{B}$ ; 3 –  $i_{C}$ .

Более тяжелый случай однофазного КЗ происходит при прохождении фазного напряжения и тока через ноль. Результат моделирования представлен на рис.3.12.



Рисунок 3.12 – Однофазное короткое замыкание при прохождении фазного напряжения фазы *А* через ноль

Как видно из графиков при коротком замыкании в момент времени, когда напряжение переходит через ноль, максимальное значение тока фазы Aувеличилось на 8,77 % по сравнению с предыдущим случаем. Амплитудное значение ударного тока составляет  $I_{1\kappa зmax} = 83,4$  А. Таким образом ударный ток в короткозамкнутой фазе в 1,9 раза больше амплитуды номинального тока и в 2,7 раза больше действующего номинального тока. Установившийся ток K3 составляет 1,61 $I_{HOM}$ . Так как нагрузка активная, а индуктивность фазы маленькая, то переходные процессы в обмотке заканчиваются достаточно быстро – в рассмотренном случае переходный процесс завершился за менее чем один период.

Моделирование трехфазного короткого замыкания проводилось по схеме замещения внешней цепи и генератора, представленной на рис.3.13. Основной целью было определение токов КЗ в динамике и ударных моментов на валу генератора.



Рисунок 3.13 – Схема замещения внешней цепи синхронного генератора при моделировании трехфазного короткого замыкания

Расчет токов внезапного трехфазного КЗ показал, что максимальный ударный ток наблюдается в фазе, напряжение которой в момент замыкания переходит через ноль (рис.3.14). В рассматриваемом примере, это ток фазы *A*.





Ударный ток в фазе А достигает 145,7 А, что в 3,4 раза больше номинального значения. Установившийся ток симметричного трехфазного КЗ в 2,33 раза больше номинального. Важное значение для практики имеет определение ударных значений динамических моментов при КЗ. На рис.3.15 и 3.16 приведены графики мгновенных значений электромагнитного момента при однофазном и трехфазном КЗ исследуемого генератора.



Рисунок 3.15 – Момент на валу генератора при однофазном коротком замыкании

Как видно из графиков переходные процессы при однофазном коротком замыкании при переходе напряжения через ноль (1) и максимум (2) значительно различаются. Наиболее тяжелым случаем является однофазное короткое замыкание при переходе напряжения через ноль. При этом электромагнитный момент имеет явно выраженный максимум в первый полупериод напряжения после замыкания. Во время броска значение максимального момента составило  $M_{max} = 360$  Hм (1,9  $M_{HOM}$ ). Далее при установившемся процессе однофазного короткого замыкания момент гармонически изменяется в пределах от 125 до 338 Hм, что вызовет повышенные вибрации ротора ВЭУ, небезопасные для его механической прочности.

На рис.3.16 представлены переходные процессы момента на валу для случая трехфазного и однофазного коротких замыканий при переходе напря-

жения через ноль. Максимальный бросок момента наблюдается во время трехфазного КЗ, который составляет М<sub>3max</sub> = 486 Нм, что в 2,52 раза превышает номинальный момент.



Рисунок 3.16 – Момент на валу синхронного генератора при трехфазном коротком замыкании (1) и при однофазном замыкании (2)

Максимальный бросок момента и тока достигает наибольшего значения в первый полупериод напряжения, что предъявляет высокие требования к быстродействию систем защиты.

Импульсные значения генераторного момента при трехфазном КЗ и периодические колебания его при однофазном КЗ необходимо учитывать при механическом расчете ротора ветроколеса.

#### 3.3. Выводы к главе 3

Моделирование исследуемого синхронного генератора с постоянными магнитами в программной среде *Ansys Maxwell* позволило сделать следующие выводы:

- Статические характеристики генератора (внешние, моментные и угловые) с точностью не ниже 8% соответствуют рассчитанным методом конечных элементов, что говорит об адекватности математической модели.
- 2. Динамические характеристики генератора, полученные в ходе математического моделирования, служат основой для синтеза систем автоматического управления и защиты комплекса ВЭУ.
- 3. Расчет токов и динамических моментов в режимах короткого замыкания определил требования к быстродействию систем защиты и их настройкам.

### 4. ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМАХ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ЗНАЧЕНИЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ И ОТДАВА-ЕМОЙ МОЩНОСТИ

## 4.1. Закономерности изменения главных размеров и параметров генератора в зависимости от мощности и частоты вращения.

До наступления эры компьютеризации процесс проектирования и создания электрической машины проходил несколько стадий.

На первой проектировщик вчерне определял размеры, параметры и основные характеристики нескольких вариантов конструктивных решений машины, руководствуясь теоретическими и практическими знаниями, накопленными в данной области.

Второй этап подразумевал параметрическую оптимизацию конструкции, глубокие расчеты, а в ряде случаев изготовление макетов и моделей узлов с последующими их экспериментальными исследованиями.

В настоящее время появились мощные средства компьютерного моделирования, позволяющие в большинстве случаев исключить затратное как по средствам, так и по времени, физическое моделирование при создании новых объектов, не снижая качества проекта.

Однако численное компьютерное моделирование должно базироваться на строгих теоретических законах, адекватно отражающих физические принципы функционирования электрической машины.

Классические зависимости главных размеров электрических машин от электромагнитных нагрузок других параметров получены в трудах Арнольда (Arnold) [82], Рихтера (Richter) [102], Видмара (Vidmar) [103], Шуйского [79], Домбровского[30, 31], Копылова [46] и других основоположников теории электрических машин.

В них определены машинные постоянные Эссена, Арнольда и Видмара, определяющие соответствующие ряды геометрически подобных машин.

Так постоянная Эссена *С* определяет плотность энергии в единице активного объема машины, Вт<sup>-</sup>с/м<sup>3</sup>.

$$C = \frac{P_n}{n \cdot D^2 \cdot l_\delta},\tag{4.1}$$

где  $P_n$  - номинальная активная мощность;

*n* – частота вращения;

*D* – диаметр расточки статора;

 $l_{\delta}$  – активная длина машины.

В случае машин переменного тока, в том числе и синхронных генераторов, для определения главных размеров решающее значение имеет не активная мощность, а полная расчетная электромагнитная мощность *S*, B<sup>·</sup>A:

$$S = \frac{E}{U} \cdot \frac{P_n}{\eta \cdot \cos\varphi}.$$
(4.2)

Здесь E и U - ЭДС и напряжение якоря;

 $\eta$  – КПД;

 $\cos \varphi$  – коэффициент мощности.

Она и определяет машинную постоянную Арнольда [30]

$$C_A = \frac{D^2 \cdot l_{\delta} \cdot n}{S} = \frac{1}{\pi^2 \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot A},\tag{4.3}$$

или при синусоидальном распределении кривой поля в зазоре и учетом известных соотношений

$$S = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi^2}{2} \cdot k_{o\delta} \cdot D^2 \cdot l_{\delta} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot \frac{f}{p}.$$
(4.4)

Здесь *k*<sub>об</sub> – обмоточный коэффициент;

А – линейная нагрузка;

 $B_{\delta}$  – индукция в зазоре;

f – частота;

*р* – число пар полюсов.

При условии постоянства линейной нагрузки и индукции в зазоре получается геометрический ряд подобных машин (ряд Арнольда). Основные закономерности этого ряда известны [30]. Отметим лишь, что относительные значения основных потерь в обмотке статора обратно пропорциональны мощности в степени 2/3.

$$\Delta p^*_{\scriptscriptstyle \mathfrak{I}} = \frac{\Delta p_{\scriptscriptstyle \mathfrak{I}}}{S_n} \sim \frac{1}{S^{2/3}},$$

а относительные значения основных магнитных потерь меняться не будут, так как индукция остается постоянной

$$\Delta p^*_{cm.o} = \frac{\Delta p_{cm.o}}{S_n} = const.$$

Здесь и далее в качестве базовой величины при расчете относительных значений принята полная номинальная мощность  $S_n$ , B·A.

Основные электрические потери при удельном электрическом сопротивлении  $\rho$  и длине витка  $l_a$  на первом этапе проектирования определяются выражением

$$\Delta p_{y_a} = \rho \cdot j \cdot A \cdot \pi \cdot D \cdot l_a / 2. \tag{4.5}$$

Здесь j – плотность тока в обмотке;

длина витка  $l_a = 2(l_{\delta} + l_{\mu}); l_{\mu} - длина лобовой части.$ 

Относительные потери с учетом (4.4)

$$\Delta p_{\mathfrak{M}}^* = \frac{\Delta p_{\mathfrak{M}}}{S_n} = \frac{\sqrt{2} \cdot \rho \cdot j \cdot p}{\pi \cdot k_{o\delta} \cdot D \cdot B_{\delta} \cdot f} \cdot (1 + \frac{l_{\mathfrak{M}}}{l_{\delta}}).$$
(4.6)

Кроме основных потерь в обмотке в крупных сильно нагруженных машинах необходимо учитывать добавочные электрические потери. Для рассматриваемого класса машин малой мощности с всыпными обмотками этими потерями можно пренебречь.

Выражение (4.6) в дальнейшем будем использовать для минимизации основных электрических потерь.

*Основные потери в зубцах и ярме статора.* Потери в зубцах [46]

$$\Delta p_{z} = k_{z} \cdot p_{1/50} \cdot \left(B_{\delta} \cdot k_{B} \cdot t / b_{z}\right)^{2} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot b_{z} \cdot h_{n} \cdot z \cdot l_{\delta} \cdot k_{c} \cdot \gamma.$$
(4.7)

Потери в ярме [46]

$$\Delta p_a = k_a \cdot p_{1/50} \cdot \left(B_\delta \cdot k_B \cdot \tau / h_a\right)^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot h_a \cdot \pi \left(D + 2h_a + h_a\right) \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma, (4.8)$$

где  $k_z$ ,  $k_a$  – коэффициенты, учитывающие возрастание потерь из-за технологического воздействия на лист статора;  $p_{1/50}$  – удельные потери в стали при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц;  $k_B$  – коэффициент формы поля;  $b_z$  – ширина зубца;  $h_a$  – высота спинки статора;  $k_c$  –коэффициент заполнения стали;  $\gamma$  – плотность стали; для большинства из рассматриваемого класса машин, принимают  $\beta$  =1,3...1,5 [46].

С учетом (4.4) удельные потери в стали зубцов и ярма определятся выражениями:

$$\Delta p_z^* = \frac{k_z \cdot k_B^2 \cdot k_c \cdot \gamma}{\sqrt{2} \cdot 50^{1.5} \cdot k_{o\delta}} \cdot p_{1/50} \frac{B_\delta \cdot f^{0.5} \cdot t \cdot h_n}{A \cdot b_z \cdot \tau}.$$
(4.9)

$$\Delta p_a^* = \frac{k_a \cdot k_B^2 \cdot k_c \cdot \gamma}{\sqrt{2} \cdot 50^{1.5} \cdot k_{oo}} \cdot p_{1/50} \frac{B_\delta \cdot f^{0.5} \cdot \tau}{A \cdot h_a} \left(1 + \frac{2h_a + h_a}{D}\right). \tag{4.10}$$

*Механические потери*  $\Delta p_{MX}$  во вращающейся электрической машине складываются из потерь на трение ротора о воздух, включая вентиляционные потери, потерь в подшипниках, и, если таковые имеются, потерь на трение щеток.

Потери на трение о воздух пропорциональны квадрату окружной скорости [79]

$$\Delta p_{ms} \simeq c_0 \cdot D \cdot (l_{\delta} + 0, 6 \cdot \tau) \cdot v_a^2,$$
  
где  $c_0 \approx 10 \,\mathrm{Bt/m^3}$ , [79].

В рассматриваемом классе тихоходных машин, где *v*<sub>*a*</sub> не превышает значений 1...3 м/с, этот вид потерь в относительных единицах не превышает

$$\Delta p_{m_{\theta}}^* \leq 0,0005 \text{ o.e.}$$

85

Это позволяет в дальнейших расчетах КПД этим видом потерь пренебречь без существенной потери точности.

Потери на трение в подшипниках качения в тихоходных машинах определяются через момент трения и угловую частоту вращения [4]

$$\Delta p_{mn} = 2\pi \cdot n \cdot M_{mp} \tag{4.10}$$

Момент трения в подшипниках качения складывается из двух составляющих [91]: момента от силы механической нагрузки на подшипник  $M_{\rm HF}$  и момента сопротивления смазочного материала  $M_{\rm cm}$ 

$$M_{mn} = M_{\mu_2} + M_{cM}.$$
 (4.11)

Момент трения от нагрузки

$$M_{_{H2}} = \mu_1 \cdot F_1 \cdot D_{_{DW}},\tag{4.12}$$

где  $\mu_I$  – коэффициент трения.

 $\mu_l = 0,0002...0,0004$  для роликовых подшипников;

$$\mu_1 = k_1 (F_0 / C_0)^k,$$

где  $k_1 = 00,0010; k = 0,33;$ 

 $F_0 = \sqrt{F_{pa0}^2 + F_{oc}^2}$  – эквивалентная механическая нагрузка от радиальной и осе-

вой сил;

Со – статическая грузоподъемность подшипника;

 $D_{pw}$  – диаметр окружности по центру тел качения.

Момент трения от гидродинамических потерь в смазочном материале [91]

$$M_{_{CM}} = 5,87 \cdot 10^{-8} \cdot \mu_{_{CM}} \cdot (v \cdot n)^{\frac{2}{3}} \cdot D_{_{pw}};$$
(4.13)

 $\mu_{c_{M}} = 3...5$  для радиально упорных подшипников;

v – кинематическая вязкость смазки, м<sup>2</sup>/с;

*n* – частота вращения, об/с.

Таким образом, механические потери в подшипниках рассчитываются по выражению

$$\Delta p_{mn} = 2\pi n \cdot \left[ \mu_1 \cdot F_1 + 5,87 \cdot 10^{-8} \cdot \mu_{cm} (\nu \cdot n)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot D_{pw}, \qquad (4.14)$$

где значения составляющих момента вычисляются по полуэмпирическим формулам.

Однозначно, что потери в подшипниках пропорциональны частоте вращения в степени, больше единицы. Так в [46] эта зависимость для некоторых типов машин определяется кубической, а у Шуйского [79] – квадратичной.

Следует отметить, что для тихоходных машин рассматриваемого класса доля механических потерь в общей сумме потерь невелика и влияние методики их расчета на точность определения КПД не существенно.

Выражения 4.4 –4.14 могут быть использованы для предварительного анализа КПД и оптимизации ещё на ранней стадии проектирования – при выборе электромагнитных нагрузок и определении основных размеров.

# 4.2. Потери и КПД в функции подведенной мощности и частоты вращения.

Исходными данными любого электромагнитного расчета служат заданные номинальные параметры машины: мощность и частота вращения. Для генераторов, предназначенных работать в условиях непостоянства входной мощности и частоты приводного двигателя (ветрогенераторы, генераторы микро ГЭС) за номинальный режим принимается режим максимальной частоты вращения и отдаваемой мощности. Этот режим характеризуется, как правило, максимальным перегревом активных частей и максимальными механическими нагрузками на ротор. Он же определяет требуемые главные размеры машины, необходимые для обеспечения заданной выходной мощности.

Традиционные электрические машины, как двигатели, так и генераторы, длительно работают с выходной мощностью близкой к номинальной. Поэтому они проектируются таким образом, чтобы максимум КПД находился в точке, близкой к номинальной мощности. Точнее, в зоне полезной мощности, составляющей (0,7-0,8) $P_{\rm H}$  (Puc.4.1). Это объясняется тем, что номинальная мощность электрических машин в электроприводах выбирается обычно с некоторым запасом с расчетом на возможные перегрузки.



Рисунок 4.1 – Типичная характеристика КПД электрической машины общепромышленного назначения

Другой причиной, по которой максимум КПД смещают влево от номинальной точки, является то, что такие машины имеют меньшую массу дорогих проводниковых материалов (меди) за счет увеличения относительного объёма магнитопровода. Такие машины проектировщики называют «стальными», в отличие от «медных» машин, в которых относительная масса обмотки больше, что дает возможность снизить долю потерь в меди за счет увеличения магнитных потерь. «Стальные» машины, как правило, получаются дешевле в производстве, чем «медные».

Максимум КПД определяется известным из теории электрических машин соотношением [19]

$$\Delta p_{\mu 2} = \Delta p_0,$$

где  $\Delta p_{_{_{HZ}}} = \Delta p_{_{_{3Л}}} + \Delta p_{_{\partial}}$  – переменные потери, зависящие от нагрузки генератора;  $\Delta p_{_{\partial}}$  – добавочные потери.  $\Delta p_0 = \Delta p_{_{MZ}} + \Delta p_{_{MX}} + \Delta p_{_{G}} -$ постоянные потери, не зависящие от нагрузки генератора;

 $\Delta p_{_{M2}}$  – магнитные потери;

 $\Delta p_{_{MX}}$  – механические потери;

 $\Delta p_{s}$  – потери на возбуждение (для машин с электромагнитным возбуждением).

Отличием генераторов ВЭУ малой мощности является частая работа в неноминальном режиме. Ветровая нагрузка очень непостоянна и максимальная скорость ветра, обеспечивающая номинальную частоту вращения генератора и, соответственно, номинальную входную мощность бывает относительно редко.

Так по данным [61] среднегодовая частота распределения ветра в средней полосе имеет вид кривой, близкой к нормальному распределению (рис. 4.2). Аналогичные зависимости приводятся и другими авторами [66, 67, 73]. Отличие состоит лишь в среднем и максимальном значении силы ветра и расположении модальной точки.

Кривая нормального распределения описывается выражением

$$p(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_v} \cdot e^{\frac{-(v-m_v)^2}{2\sigma_v^2}}$$
(4.15)

*m*<sub>v</sub> – математическое ожидание;

 $\sigma_v$  – среднеквадратическое отклонение.

Для того чтобы воспользоваться выражением (4.15) при расчете энергетической эффективности генератора ВЭУ необходимо знать зависимости мощности ветроколеса в функции от скорости ветра. Эти зависимости для каждого типа ветроустановок индивидуальны. В настоящей работе по ряду критериев, приведенных в первой главе, для рассматриваемого класса мощностей и частот вращения оптимальным был признан синхронный генератор с многополюсной системой возбуждения от постоянных магнитов. Многополюсный низкоскоростной генератор наилучшим образом согласуется с ветроколесом имеющим вертикальную ось вращения (ротор Дарье).





1 – западные районы Казахстана [61] m<sub>v</sub>=5,5 м/с; 2 – северное побережье европейской части [73] m<sub>v</sub>=7 м/с; 3 – степные районы Самарской и Саратовской областей m<sub>v</sub>=6,5 м/с;.

Такая конструкция позволяет располагать генераторную часть на поверхности земли, что существенно упрощает доступ к ней при монтаже, обслуживании и ремонте. Исследования, проведенные автором совместно со специалистами НПО «Шторм» (г. Самара), позволили получить энергетические характеристики трех типов ВЭУ малой мощности. На рисунках 4.3-4.5 приведены эти характеристики.







Стационарная ВЭУ Dpotopa=3,6м UAБ=48B, 1000Вт

Рисунок 4.4 – Энергетические характеристики стационарной ВЭУ 1000 Вт.



Рисунок 4.5 – Энергетические характеристики стационарной ВЭУ 2000 Вт.

Для всех типоразмеров характерна кубическая зависимость отдаваемой механической мощности (для генератора это потребляемая мощность) от скорости воздушного потока. При скоростях ветра 10 м/с и выше рост отдаваемой мощности замедляется. Это связано с особенностью работы ВЭУ с ротором Дарье – при превышении номинальной скорости ветра, частота вращения ротора стабилизируется и в дальнейшем увеличивается незначительно. Это положительное свойство ротора Дарье позволяет в ВЭУ малой мощности отказаться от тормозных устройств, защищающих установку от угонных скоростей.

Анализ зависимостей мощности ветроколеса от скорости воздушного потока показывает, что они хорошо аппроксимируются полиномами третьего порядка вида

$$P_1 = A \cdot v^3 + B \cdot v^2 + C \cdot v \tag{4.16}$$

Значения коэффициентов аппроксимации приведены в табл.4.1.

### Таблица 4.1

$P_{\text{HOM}}, B_{\text{T}}$	A	В	С
450	0,042	4,23	-12,9
1000	0,129	11,7	-34,4
2000	0,206	20,3	-65,1

Коэффициенты аппроксимации в уравнении линии тренда (4.16)

Статистический анализ показывает, что достоверность аппроксимации  $R^2$  для всех вариантов не менее 0,98, что говорит об адекватности кубической полиномиальной зависимости мощности от скорости ветра для исследуемых установок.

Учитывая очевидную корреляционную зависимость коэффициентов *А*,*В* и *С* от значений мощности установки можно предложить аналитические интерполяционные формулы для их расчета. Для этого воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК) [47]. Уравнения линейных аппроксимаций приведены на рис.4.6-4.8. Достоверность линейной аппроксимации не менее 0,96. Полученные уравнения могут быть использованы не только для интерполяции результатов, но и для экстраполяции в пределах рассматриваемого класса машин.



Рисунок 4.6 – Линейная аппроксимация по МНК коэффициента A. $R^2 = 0.96$  –достоверность аппроксимации.



Рисунок 4.7 – Линейная аппроксимация по МНК коэффициента B.  $R^2 = 0.98$  –достоверность аппроксимации.



Рисунок 4.8 – Линейная аппроксимация по МНК коэффициента C.  $R^2 = 0.99$  –достоверность аппроксимации.

Проведем анализ прогнозируемой выработки электроэнергии на примере ВЭУ номинальной мощностью 2000 Вт (Рис.4.3). Для этого совместим диаграмму распределения плотности вероятностей средней силы ветра для степных районов Самарской и Саратовской областей с энергетической характеристикой ВЭУ2000 (рис.4.9).



Рисунок 4.9 – Зависимость мощности ВЭУ 2000 от скорости ветра и плотности вероятности по интервалам интенсивности ветра.

Разобьем диапазон средних значений скорости ветра на четыре интервала:

- 1) 0-4 м/с слабый;
- 2) 4 8 м/с умеренный;
- 3) 8 12 м/с сильный;
- 4) более 12 м/с очень сильный.

Вероятностные периоды времени в течение года соответствующие этим интервалам скорости ветра, будут определяться интегралами вида

$$T_{i} = \int_{v_{i-1}}^{v_{i}} p(v) \cdot dv = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{v}} \int_{v_{i-1}}^{v_{i}} e^{-\frac{(v-m_{v})^{2}}{2\sigma_{v}^{2}}} \cdot dv.$$
(4.17)

Геометрической интерпретацией интеграла (4.17) является площадь криволинейной трапеции, ограниченной кривой p(v) на интервале  $[v_{i-1}, v_i]$ . Результаты вычисления определенных интегралов (4.17) сведены в таблицу 4.2 и представлены в виде графиков на рис.4.10.

Таблица 4.2.

Вероятностные периоды средней скорости ветра и соответствующей мощности и выработанной энергии.

№ интер- вала, <i>і</i>	<i>v</i> ср, м/с	Ti, o.e.	<i>Рсрі</i> , Вт	Эі, кВт час	Эi, %
1	0-4	0,22	80	154,2	2,0
2	4-8	0,41	300	1077	13,9
3	8-12	0,29	1800	4573	58,8
4	>12	0,08	2800	1962	25,3
Σ	-	1,00	-	7766	100,0

Вероятностные значения энергии, выработанной ВЭУ за каждый период времени в течении года, были рассчитаны по выражению (4.18)

$$\mathcal{P}_{i} = \int_{T_{i-1}}^{T_{i}} P_{1} \cdot dt \approx P_{1cp.i} \cdot (t_{i} - t_{i-1}), \quad \text{Дж.}$$
(4.18)

Для приближенных расчетов *P*<sub>1*cp.i*</sub> – среднее значение мощности ВЭУ для середины выбранного интервала скорости ветра.

Количество энергии, выраженное в процентах от суммарной годовой вы-

работки 
$$\sum_{i=1}^{n} \mathcal{P}_{i}$$
:  
 $\mathcal{P}_{i\%} = \frac{\mathcal{P}_{i}}{\sum_{i=1}^{n} \mathcal{P}_{i}} \cdot 100\%.$  (4.19)

На диаграмме рис.4.10 в графическом виде показаны соотношения периодов времени для выбранных интервалов средних скоростей ветра. А на рис.4.11 диаграмма вероятностных объёмов энергии, по каждому интервалу средних скоростей ветра.







Рисунок 4.11 – Диаграмма расчетной выработки электроэнергии ВЭУ в зависимости от средней скорости ветра.

$$1 - vcp = 0 - 4 \text{ M/c}; 2 - vcp = 4 - 8 \text{ M/c}; 3 - vcp = 8 - 12 \text{ M/c}; 4 - vcp > 12 \text{ M/c/}$$

Из анализа приведенных диаграмм следует, что более половины расчетной выработки электроэнергии (58,8%) ВЭУ дает при скорости ветра от 8 до 12 м/с, и еще 25,3% при v>12 м/с (сумма 84,1%). Несмотря на то, что умеренные ветры дуют 41% по времени за год, выработка электроэнергии ВЭУ при такой скорости ветра не превышает 14% от годовой. Поэтому очевидно, что для повышения энергоэффективности генератора при его проектировании необходимо минимизировать потери в режимах работы при частоте вращения, соответствующей скорости ветра, превышающей 8 м/с и полной электрической нагрузке. Это означает, что точку максимума КПД нужно «сдвинуть» в сторону перегрузки генератора и больших частот вращения.

Для этого нужно изменить соотношение постоянных и переменных потерь.

### 4.3. Оптимизация соотношения постоянных и переменных потерь в генераторе.

Главным лимитирующим фактором при проектировании генератора является перегрев его активных частей. На этапе определения главных размеров и расчета зубцово-пазового слоя точное определение картины теплового поля невозможно из-за недостатка исходных данных. Поэтому, в первом приближении можно воспользоваться интегральными параметрами, характеризующими тепловое состояние машины при различных нагрузках и частотах вращения. В качестве такого интегрального параметра часто выбирают средний перегрев активных частей генератора над температурой окружающего воздуха в установившемся режиме [46]

 $\Delta \theta = \Delta \theta_{\lambda} + \Delta \theta_{\alpha}.$ 

 $\Delta \theta_{\lambda}$  – перепад температуры обмотки над температурой корпуса. Он в основном определяется перепадом температуры в изоляции паза и лобовых частей

$$\Delta \theta_{us} = \frac{\rho_{\theta} \cdot A \cdot j \cdot k_f \cdot t \cdot b_{us}}{\lambda_{us} \cdot \Pi},$$

 $\lambda_{u_3}$  – коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/м град;

П – периметр паза, м.

Среднее превышение температуры обмотки статора

$$\Delta \theta_{\lambda} = \frac{\Delta \theta_{u_{3}} \cdot l_{\delta} + \Delta \theta_{\pi} \cdot l_{\pi}}{l_{\delta} + l_{\pi}};$$

 $\Delta \theta_n$  – превышение температуры в лобовых частях.

Превышение температуры корпуса:

$$\Delta \theta_{\alpha} = \frac{\Sigma \Delta p}{\alpha \cdot S_{oxn}}, cpa\partial,$$

где α - коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности машины, Вт/м<sup>2</sup>град;

 $S_{\text{охл}}$  – поверхность охлаждения, м<sup>2</sup>.

Очевидно, что средний перегрев активных частей не может гарантировать от превышения температуры сверх допустимой в локальных областях, но на стадии выбора оптимальных соотношений постоянных и переменных потерь этот критерий может быть принят в качестве параметра лимитера. Естественно, что на более поздних этапах проекта картина температурных полей должна уточняться, например, методами численного моделирования.

Определим исходные допущения при сравнении вариантов расчетов по предложенной математической модели.

- Для корректного сравнения вариантов примем, что наружные размеры машины D<sub>н</sub> и L<sub>н</sub> не изменяются.
- Намагничивающая сила (НС) возбуждения и величина воздушного зазора постоянны.
- 3. Технологический коэффициент заполнения паза медью *k*<sub>зм</sub> не зависит от размеров паза.
- 4. Активные материалы магнитной системы и обмотки одни и те же для

всех вариантов.

5. Сумма потерь в номинальном режиме при номинальной частоте вращения для всех вариантов расчетов неизменна.

В качестве варьируемых переменных примем основные размеры паза  $h_{\Pi}$ и  $b_{\Pi}$ , высоту спинки статора  $h_a$ , линейную нагрузку A и связанную с ней соотношением

$$j = \frac{A \cdot t_1}{h_n \cdot b_n \cdot k_{_{3M}}} \tag{4.20}$$

плотность тока в обмотке.

Отметим, что изменение плотности тока в обмотке при неизменных значениях других варьируемых переменных соответствует изменению режима токовой нагрузки генератора, а не новому варианту машины, так как число витков фазы *w* при заданной НС возбуждения, определяется фиксированным значением фазного напряжения генератора и других параметров, заданных в ТЗ

$$w = \frac{U_1}{4,44 \cdot k_E \cdot \Phi_\delta \cdot f \cdot k_{o\delta}}.$$
(4.21)

Перераспределение видов потерь обеспечивается изменением соотношений зубцово-пазового слоя и вызванных этим перераспределением значений индукций в зубцах и спинке статора с одной стороны, и изменением тока паза или плотности тока в обмотке за счет изменения сечения паза (Рис.4.10).

Обозначим сумму потерь, не зависящих от нагрузки (постоянные потери) -  $\Delta p_0$ 

$$\Delta p_0 = \Delta p_z + \Delta p_a + \Delta p_{MX}. \tag{4.22}$$

 $\Delta p_{z}, \Delta p_{a}$  – основные магнитные потери в зубцах и ярме;  $\Delta p_{MX}$  – механические потери.



Рисунок 4.10 – Зубцово-пазовый слой СГ.

Потери, зависящие от нагрузки,  $\Delta p_{_{H2}}$ , состоят из электрических потерь в обмотке  $\Delta p_{_{3Л}}$  и добавочных потерь  $\Delta p_{_{\partial}}$ 

$$\Delta p_{_{H2}} = \Delta p_{_{3,1}} + \Delta p_{_{\partial}}. \tag{4.23}$$

Введем коэффициент *β* определяющий отношение переменных потерь в номинальном режиме к постоянным потерям

$$\beta = \frac{\Delta p_{_{H2,HOM}}}{\Delta p_0}.$$
(4.24)

Если обозначить через  $k_{_{HP}} = I/I_{_{HOM}}$  – коэффициент нагрузки, то КПД генератора

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p_0 \left(\frac{1 + \beta \cdot k_{_{H2}}^2}{k_{_{H2}}}\right)},\tag{4.25}$$

а его максимум из условия

$$\frac{d\eta}{dk_{_{_{HZ}}}}=0$$

определится известным выражением [79]

$$\beta \cdot k_{\mu 2} = 1. \tag{4.26}$$

То есть для того, чтобы максимум КПД соответствовал номинальной нагрузке  $k_{\mu \epsilon} = 1$  должно выполняться известное соотношение равенства постоянных и переменных потерь ( $\beta = 1$ ).

Для генераторов, работающих в нестационарных режимах как по мощности, так и по частоте вращения, это соотношение ( $\Delta p_0 = \Delta p_{_{H2}}$ ) выгодно с точки зрения энергоэффективности нарушать. Для того, чтобы сместить максимум КПД в сторону больших нагрузок и больших частот вращения необходимо, чтобы значения  $\beta$  были меньше единицы.

В этом случае энергоэффективность СГ повышается для режимов, соответствующих скоростям ветра 8 м/с и более, которые обеспечивают, как было показано выше, более 84% среднегодовой выработки электроэнергии ВЭУ.

Проиллюстрируем это на двух конкретных примерах.

1. ВЭУ номинальной мощностью 2 кВт с номинальной частотой вращения ротора *n*=140 об/мин.

Для наглядности приведем результаты расчетов КПД генератора для двух крайних соотношений коэффициента *β*.

В первом варианте номинальные переменные потери превалируют на порядок над постоянными:

 $\beta = 11,5; \Delta p_0 = 41,7Bm; \Delta p_{H2,HOM} = 480Bm; \Sigma \Delta p = 522Bm.$ 

Во втором варианте постоянные и переменные потери в номинальном режиме практически одинаковы:

 $\beta = 0,96; \Delta p_0 = 266Bm; \Delta p_{_{H2.HOM}} = 256Bm; \quad \Sigma \Delta p = 522Bm.$ 

Результаты расчетов, полученных по математической модели, описанной во второй главе, представлены на графиках рис.4.13.



Рисунок 4.13 – Кривые КПД «стального» (1-4) и «медного» (5-8) генераторов. ВЭУ2000.

Полученные кривые рассчитывались для различных частот вращения. Для всех кривых наблюдается смещение максимума КПД вправо для  $\beta$ =0,96 по сравнению с  $\beta$ =11,5.

Особо следует отметить, что при перегрузках ( $k_{\rm Hr}>1$ ) значение КПД значительно выше у варианта генератора с  $\beta$ =0,96, чем у генератора с  $\beta$ =11,5.

Расчет перегрева для всех частот вращения показывает отсутствие превышения средней температуры обмотки для класса изоляции В, за исключением режима перегрузки в 40% ( $k_{Hr}$ =1,4), рис.4.14. Для всех частот вращения, за исключением n=140 об/мин, остается запас по превышению температуры обмотки не менее 15%, причем для вариантов машины с  $\beta$ =0,96 этот запас больше в среднем на 8...12%, чем у сравниваемого варианта.



Рисунок 4.14 – Средний перегрев обмотки при изменении коэффициента нагрузки в зависимости от коэффициента соотношения постоянных и переменных потерь при разных частотах вращения. ВЭУ2000.

2. Еще более наглядные результаты получаются для СГ номинальной мощностью 8 кВт с номинальной частотой вращения 350 об/мин.

Эти результаты представлены на графиках рис.4.15 и диаграмме рис. 4.16.



Рисунок 4.15 – Кривые КПД «стального» (1-3) и «медного» (4-6) генераторов. ВЭУ8000.



Рисунок 4.16 – Средний перегрев обмотки при изменении коэффициента нагрузки в зависимости от коэффициента соотношения постоянных и переменных потерь при разных частотах вращения. ВЭУ8000.

Смещение максимумов кривой КПД в сторону максимальных нагрузок в варианте со значениями  $\beta = 0,44$ ;  $\Delta p_0 = 524Bm$ ;  $\Delta p_{_{H^2.HOM}} = 233Bm$  по сравнению с вариантом, у которого  $\beta = 4$ ;  $\Delta p_0 = 152Bm$ ;  $\Delta p_{_{H^2.HOM}} = 605Bm$  сопровождается существенным ростом КПД в зоне высоких нагрузок ( $k_{_{H^2}} \ge 1$ ) и максимальных частот вращения.

Напомним, что рассматривались варианты, у которых сумма потерь в номинальном режиме одинаковая  $\Sigma \Delta p = 757 Bm$ .

Запас по перегреву при частотах вращения, отличных от номинальной при  $k_{_{_{H2}}} \ge 1$  больше в машинах с меньшим значением коэффициента  $\beta$ .

В заключении можно сделать вывод, что «медные» машины (машины с большим объемом меди у которых за счет этого преобладают постоянные потери над переменными) для систем с нестабильной частотой вращения и отдаваемой мощностью, предпочтительнее по энергоэффективности «стальных» (машин с преобладанием электрических потерь).

Для того, чтобы доказать этот постулат с конкретными цифрами, был проведен анализ энергоэффективности СГ ВЭУ на основе расчетных данных о выработке электроэнергии в зависимости от кривой плотности вероятностей средних значений скорости ветра.

КПД синхронного генератора ВЭУ8000 с отношением постоянных потерь к переменным  $\beta = 0,44$  при нагрузке превышающей номинальную на 10-25% и скорости ветра 8 м/с и выше, превышает КПД генератора с  $\beta = 4$  не менее, чем на 3,5%. Напомним, что речь идет о вариантах генераторов с постоянной суммой потерь в номинальном режиме. Только за счет перераспределения потерь получается дополнительная прибавка в годовой выработке электроэнергии для исследуемого генератора в количестве 932 кВт часа, а для генератора ВЭУ 2000 – 233 кВт час.

Кроме выигрыша в количестве выработанной электроэнергии при номинальной частоте вращения и её превышении, наблюдается и дополнительная прибавка в выработке энергии при пониженных частотах (слабом ветре). Эта величина в абсолютных числах не так значительна, как при сильном ветре, изза меньшего объёма произведенной энергии для этих режимов, но эта прибавка все же заметна в её общем количестве (см. табл.4.3).

Таблица 4.3. КПД СГ при перераспределении постоянных и переменных потерь и прирост выработки электроэнергии при пониженных частотах вра-

	Пара-				
Тип	метр	n=пном	n=0,5пном	n=0,25пном	
	КПД для				
	β <b>=0,9</b> 6	0,78	0,72	0,612	
ВЭУ	КПД, для				
2000	β=11,5	0,78	0,652	0,491	$\Sigma\Delta$ Э, кВт час
	$\Delta$ Э, кВт				
	час	0	73,2	18,6	91,9
	КПД для				
	β <b>=0,</b> 44	0,914	0,904	0,873	
ВЭУ	КПД для				
8000	β=4	0,914	0,861	0,768	$\Sigma\Delta$ Э, кВт час
	$\Delta$ Э, кВт				
	час	0	185,2	64,8	250,0

щения.  $k_{\mu 2} = 1$ 

### 4.4. Выводы к главе 4.

1. Основную долю в годовой выработке электроэнергии, до 84%, ВЭУ обеспечивает в периоды времени, когда скорость ветра превышает 8 м/с. Поэтому, при проектировании целесообразно обеспечить максимум КПД СГ для частот вращения ротора, соответствующих таким значениям скорости ветра.

2. В генераторах предназначенных для работы в условиях переменной частоты приводного двигателя и отдаваемой мощности, например, в ВЭУ или микро ГЭС, известное соотношение равенства постоянных и переменных потерь, обеспечивающее максимум КПД в номинальном режиме, целесообразно не соблюдать. Для повышения энергоэффективности установки генератор следует проектировать так, чтобы точка максимума КПД смещалась в зону максимальных нагрузок и частот вращения – вправо от номинальной точки.

3. Для того чтобы максимум КПД был в зоне максимальных нагрузок и частот вращения, необходимо обеспечить снижение доли переменных потерь в номинальном режиме в общей сумме потерь, за счет увеличения объема меди в пазу (снижения плотности тока), что, естественно, приведет к увеличению доли магнитных потерь.

4. Расчеты показывают, что только за счет перераспределения постоянных и переменных потерь при их неизменной сумме для номинального режима, годовая выработка электроэнергии ВЭУ возрастает не менее чем на 3,5%.

5. При слабом ветре и пониженных частотах вращения для коэффициента нагрузки от 0,75 до 1,2 кривые КПД «медных» машин также идут выше, чем у «стальных», что дает некоторый выигрыш в общем количестве вырабатываемой электроэнергии и для этих режимов. Лишь при недогрузке генератора ( $k_{\rm Hr} < 0,75$ ) «стальные» машины эффективнее «медных».
# 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬ-НЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

### 5.1. Промышленная реализация.

Теоретические положения и рекомендации по проектированию синхронных генераторов с ПМ, предложенные автором в настоящей работе, были использованы при разработке и промышленном внедрении ВЭУ малой мощности в ходе выполнения работ по договору НИР «Разработка методики электромагнитного расчета синхронного вентильного генератора для ветроэлектростанции», выполняемой кафедрой ЭМАЭ СамГТУ по заданию НПО «Шторм» г.Самары.

Основная проблема НИР заключалась в разработке и оптимизации электрической части ВЭУ с целью повышения ее энергетической и экономической эффективности.

За основу была принята компоновка ВЭУ с вертикальной осью вращения и ротором Дарье. Привод генератора безредукторный, прямой. Достоинства и недостатки этой конструкции проанализированы в первой главе работы. После определения конструктивной схемы последовал однозначный выбор типа генератора – синхронная многополюсная машина с возбуждением от постоянных магнитов. В техническом задании предусматривалось создание ВЭУ на различную номинальную мощность под роторы ветроколеса трех типоразмеров: мобильная ВЭУ 450 Вт, D<sub>ротора</sub>=1,5 м; стационарная ВЭУ 1 кВт, D<sub>ротора</sub>=3,6 м и стационарная ВЭУ 2 кВт, D<sub>ротора</sub>=4,2 м. Четвертым был генератор для ВЭУ 8 кВт с повышенной частотой вращения ротора (350 об/мин). Генераторы должны были проектироваться на различную мощность, но при максимальной унификации узлов. Главным условием было использование одного типоразмера листов статора и ротора генератора. Это наложило дополнительные ограничения на варьируемые параметры при оптимизации машины.

В результате, с участием автора были спроектированы, изготовлены и испытаны четыре синхронных генератора с ПМ с номинальными параметрами, приведенными в табл.5.1.

Тип	БРИД 324	БРИД 325	БРИД 322	БРИД 8
Номинальная мощность, кВт	0,45	1,0	2,0	8,0
Номинальная частота враще- ния, об/мин	130	115	135	350
Номинальное выпрямленное напряжение, <i>Ud</i> , B	24	48	48	-
Фазное напря- жение перемен- ного тока <i>U</i> ф, В	-	-	-	220
Номинальный фазный ток нагрузки, <i>І</i> ф, А	-	-	-	12,8
Максимальная частота враще- ния, <i>n<sub>max</sub></i> , об/мин	135*	135*	140*	350*
Максимальная отдаваемая мощность при n <sub>max</sub> , кВт	0,5	1,25	2,5	8,0

Таблица 5.1 – Номинальные параметры генераторов

\*Ограничение параметрами ветроколеса.

Во всех генераторах была использована одна конструктивная схема: многополюсный ротор с встроенными постоянными магнитами из материала Nd-Fe-B марки N38N. Конструкция ротора показана на рис.5.1

Магниты располагаются в специальных пазах (1) шихтованного магнитопровода (*Embedded PMSG*).

Статор генераторов традиционной конструкции с полузакрытыми трапецеидальными пазами и зубцами с параллельными стенками. Обмотка статора петлевая, двухслойная с дробным числом пазов на полюс и фазу. На рис.5.3 показана намотка обмотки статора генератора.



Рисунок 5.1 – Сборка ротора генератора БРИД 322



Рисунок 5.2 – Намотка обмотки статора генератора

Испытания генераторов производились как в полевых условиях в составе ВЭУ (Рис.5.3), так и на испытательном участке НПО «Шторм» (Рис. 5.4).



Рисунок 5.3 – Монтаж ВЭУ 1 кВт с генератором БРИД 325 в полевых

условиях.



Рисунок 5.4 – Испытательная установка для определения параметров и характеристик генераторов.

Испытательная установка состояла из приводного асинхронного электродвигателя с частотным регулированием 1, понижающего редуктора 2, карданной трансмиссии 3 и испытуемого генератора 4. Нагрузкой генератора были ТЭНы со ступенчатым регулированием сопротивления, которые подключались через неуправляемый мостовой выпрямитель.

## 5.2. Результаты испытаний генераторов

Внешние характеристики генератора БРИД 322 определялись на испы-

тательной установке, вид которой показан на рис.5.4. Активная нагрузка подключалась после неуправляемого выпрямителя и изменялась ступенчатым переключением резисторов. Частота вращения ротора генератора поддерживалась постоянной асинхронным двигателем с частотным регулированием.

Таблица 5.2 – Внешние характеристики генератора БРИД 322 (Эксперимент, активная нагрузка).

n=135	Ud, B	55,2	50,3	49,8	48	40,1
об/мин	Id, A	0	14,2	29,3	43,1	53,1
n=70	Ud, B	27,6	24	24,9	25,1	20,1
об/мин	Id, A	0	12,3	27,3	40,9	50,8
n=20	Ud, B	7,8	6,5	5,1	-	-
об/мин	Id, A	0	11,9	20,2	-	-



Рисунок 5.5 – Внешние характеристики (расчет и эксперимент).

Экспериментальные токоскоростные характеристики генератора БРИД 322 для номинального напряжения Ud =48 В и пониженного напряжения Ud =24 В приведены на графиках рис.5.6.



Рисунок 5.6 – Токоскоростные характеристики (эксперимент)

Начало токоотдачи для выходного напряжения 48 В происходит при частоте вращения 81 об/мин. Такая частота вращения соответствует скорости ветра 6,6 м/с. Для пониженного напряжения 24 В токоотдача начинается с частоты вращения 32 об/мин (*v*<sub>ветра</sub>=3,6 м/с).

Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных дает расхождение не более 8% по значению выпрямленного напряжения для всех частот вращения.

Некоторые результаты натурных испытаний ВЭУ были приведены в главе 4 (см. графики рис.4.2...4.4). Эти результаты так же подтвердили адекватность математической модели генератора и аналитических принципов, лежащих в ее основе.

### 5.3. Сравнительные технические характеристики генераторов

В табл.5.3 и на диаграммах рис.5.7 и 5.8 приведены основные выходные параметры разработанных генераторов в сравнении с аналогами.

Более низкие значения КПД генератора БРИД-324 объясняются не только

его меньшей номинальной мощностью, но и тем, что этот генератор был спроектирован на базе унифицированных деталей и узлов более мощного и оптимизированного генератора БРИД-322. В нем были использованы сердечники статора и ротора, геометрия которых не соответствует оптимальным параметрам, полученным по математической модели. Изготовление неоптимального по техническим параметрам генератора обосновано экономическими факторами при его производстве.

	Gekon, Герма-				НПО "Шторм", Россия	
Производитель	ния	КНР		Франция		
Тип, марка	АГ с редукто- ром 2400Е- A/ZG	SAV-0,5 kW	SAV-5 kW	Falcon Euro-2 kW	БРИД-324	БРИД-322
Рном, кВт	2,3	0,5	5	2	0,45	2
Мген <b>, КГ</b>	17,5	140*	440*	180*	18,8	34,2
Тредук, К <b>Г</b>	23	0	0	0	0	0
mΣ, κΓ	40,5	140	440	180	18,8	34,2
ηген, %	86,8	85	85	85	78,1	85,7
ηустановки <b>,</b> %	82,5	85	85	85	78,1	85,7
n, об/мин	3100	120	120	140	130	135
Удельная мощ- ность, кВт/кг	0,0568	0,0036	0,011	0,0111	0,0239	0,0585

## Таблица 5.3 – Выходные параметры генераторов

\*С массой привода



Рисунок 5.7 – Диаграмма удельной по массе мощности генераторов



Рисунок 5.8 – Диаграмма сравнения КПД генераторов

По результатам исследований характеристик спроектированных и изготовленных генераторов можно констатировать, что они по основным выходным параметрам соответствуют, а по некоторым превосходят, аналоги отечественных и зарубежных производителей.

## 5.4. Выводы к главе 5

- Методика проектирования синхронного генератора малой мощности, отличающаяся от известных получением более широкого диапазона максимальных значений КПД при изменении частоты вращения, предложенная автором, послужила основой при разработке и изготовлении гаммы генераторов для мини ВЭУ мобильного и стационарного исполнения.
- 2. В процессе производства генераторов была подтверждена техническая

реализуемость предложенных решений. Экспериментальные исследования с достаточной точностью (расхождение с расчетными характеристиками не более 8%) подтвердили адекватность математических моделей, предложенных автором.

 Энергоэффективность разработанных генераторов обеспечивается не только значением максимального КПД, но и расширением зоны высоких значений КПД при изменении их частоты вращения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена задача повышения энергетической эффективности синхронных генераторов малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов за счет совершенствования алгоритмов расчетов, методов анализа и оптимизационного проектирования.

В ходе решения поставленной задачи в диссертации получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Методом многокритериальной структурной оптимизации, основанном на принципе доминирования Парето, определены объективные количественные параметры сравнения для различных типов генераторов, применяемых в энергоустановках с нестабильной частотой вращения и отдаваемой мощностью. Доказано, что для тихоходных ВЭУ с ротором Дарье оптимальным является использование многополюсных генераторов прямого привода с возбуждением от постоянных магнитов.

2. Математическая модель СГ с возбуждением от постоянных магнитов, предназначенная для оптимизационного расчета, отличающаяся от известных, совмещением численного расчета магнитного поля с анализом векторных диаграмм рабочего режима, учитывающая особенности магнитной системы ротора со вставными магнитами и насыщающимися мостиками, а также действие продольной и поперечной реакции якоря при работе под нагрузкой.

3. Имитационные модели системы синхронный генератор – нагрузка с учетом уточненной математической модели для определения выходных параметров и характеристик генератора при работе в комплексе ВЭУ, разработанные автором, позволяют определить значения установочных параметров системы релейной защиты и САУ ВЭУ.

4. Доказано, что основную долю в годовой выработке электроэнергии, до 84%, ВЭУ обеспечивает в периоды времени, когда скорость ветра пре-

119

вышает 8 м/с. Поэтому, при проектировании целесообразно обеспечить максимум КПД СГ для частот вращения ротора, соответствующих таким значениям скорости ветра.

5. В генераторах предназначенных для работы в условиях переменной частоты и отдаваемой мощности, например, в ВЭУ или микро ГЭС, известное соотношение равенства постоянных и переменных потерь, обеспечивающее максимум КПД в номинальном режиме, соблюдать нецелесообразно. Для повышения энергоэффективности генератор следует проектировать так, чтобы точка максимума КПД смещалась в зону максимальных нагрузок и частот вращения.

6. Впервые аналитическим методом и численной параметрической оптимизацией определены рациональные соотношения постоянных и переменных потерь в генераторе, обеспечивающее прирост выработки электроэнергии ВЭУ за счет более эффективного ее использования в «неноминальных» режимах по частоте вращения и нагрузки. Для того чтобы максимум КПД был в зоне максимальных нагрузок и частот вращения, необходимо обеспечить снижение доли переменных потерь в номинальном режиме в общей сумме потерь, за счет увеличения объема меди в пазу (снижения плотности тока).

7. Расчеты показывают, что только за счет перераспределения постоянных и переменных потерь при их неизменной сумме для номинального режима, годовая выработка электроэнергии ВЭУ возрастает не менее чем на 3,5%.

8. Созданные образцы СГ с ПМ, предназначенные для использования в ВЭУ малой мощности, подтвердили достоверность теоретических положений и эффективность рекомендаций, изложенных в диссертационной работе. Генераторы серии БРИД, разработанные с участием автора, по основным выходным параметрам соответствуют, а по некоторым превосходят аналоги отечественных и зарубежных производителей.

120

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Абдрахманов А. С. Ветроэнергетические установки и станции Текст. / А. С. Абдрахманов, А. В. Якимов, Ю. Г. Назмеев. - Казань: КГЭУ, 2003. - 64 с.
- 2. Аветисян Д.А., Соколов В.С.. Хан В.Х. Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. –М.: Высшая школа, 1980 -208 с.
- 3. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279с.
- 4. Анурьев В.И. Справочник конструктора машиностроителя. В 3-х т. Т. 2 5е изд.,–М.: Машиностроение, 1979. 559 с.
- Ануфриев А.С., Алимбеков М.Н., Макаричев Ю.А. Особенности проектирования генераторных ветроустановок малой мощности. Актуальные проблемы энергетики АПК: материалы VIII международной научно-практической конференции/Под общ. ред. Трушкина В.А. – Саратов: ООО «ЦеСАин», ISBN 978-5-906689-54-2. 2017. – с. 13-15
- Ануфриев А.С., Алимбеков М.Н., Макаричев Ю.А.. Анализ систем запуска газотурбинного двигателя магистрального газоперекачивающего агрегата. Ашировские чтения: Сб. трудов Международной научно-практической конференции. / Отв. редактор В.В. Живаева. – Самара: Самар. гос. техн. унт, 2017 – С. 682-686.
- Ануфриев А.С., Иванников Ю.Н., Макаричев Ю.А.. Особенности проектирования синхронных генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок. Энергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конф-ии, 2017, Самара. – Т 3. Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – С. 159-160.
- Ануфриев А.С., Макаричев Ю.А. Анализ энергоэффективности ветроустановок малой мощности. Актуальные проблемы энергетики АПК: Материалы IX международной научно-практической конференции/Под общ. ред.

Трушкина В.А. – Саратов: ООО «ЦеСАин», 2018. ISBN 978-5-906689-80-1. С.140-141.

- Ануфриев А.С., Макаричев Ю.А., Зубков Ю.В., Певчев В.П. Математическая модель синхронного генератора ветроэнергетической установки малой мощности. Вестник Самарского государственного технического университета Серия «Технические науки» –№ 3(55) – 2017. С.66-74.
- Ануфриев А.С., Макаричев Ю.А.. Критериальный анализ параметров генераторов малой мощности. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. №2 (62), 2018. с.42-47.
- Ануфриев А.С., Певчев В.П. Моделирование процесса соударения якоря с индуктором в импульсном электромагнитном сейсмоисточнике. Вестник Самарского государственного технического университета Серия «Технические науки» –№ 2(58) – 2018. С.77-82
- Ануфриев А.С., Ю.В. Зубков, Макаричев Ю.А. Энергоэффективность генератора ветроэнергетической установки в условиях изменяющейся частоты вращения. Вестник Самарского государственного технического университета Серия «Технические науки» –№ 1(57) 2018. С.77-82
- Артюхов И.И., Бочкарев Д.А. Автономная система электроснабжения на основе генератора с изменяемой частотой вращения вала Научное обозрение. 2014. № 3. С. 178-183.
- 14. Артюхов И.И., Степанов С.Ф., Бочкарев Д.А., Ербаев Е.Т. Особенности построения автономных систем электропитания на основе генераторов с изменяемой скоростью вращения вала. Вопросы электротехнологии. 2015. № 1 (6). С. 58-64.
- Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами – М.: Энергия, 1964. – 400 с.
- Бальзанников М.И., Елистратов В.В. Возобновляемые источники энергии. Аспекты комплексного использования. Самара, Изд. СамГАСУ, 2008, 260 с.

- 17. Бахвалов И.С. Численные методы.- // М.: Наука, 1975. -632 с.
- Беспалов В. Я., Горягин В. Ф., Дунайкина Е. А. О целесообразности изменения типов номинальных режимов работы электрических машин. Электротехника,1990, №6, с.32-36.
- Беспалов В.Я, Котеленец Н.Ф. Электрические машины. // Москва: Академия, 2013г.
- Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. М.: Издательский центр «Академия», 2005. -336 с.
- Ганага С.В., Кудряшов Ю.И., Николаев В.Г. Сравнительный анализ экономических показателей ВИЭ и традиционных источников энергии. Малая энергетика, №1–2, 2005, с.13–21
- Горелов Д.Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор). Теплофизика и аэромеханика, 2010, том 17, №3. с.325-333.
- 23. ГОСТ 11828-86. Машины электрические вращающиеся. Общие методы испытаний (с Изменениями N 1, 2). М.: ИПК Издательство стандартов, 2003
- ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва.: Стандартинформ, 2014
- 25. ГОСТ Р 51990 2002 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика.
  Установки ветроэнергетические. Классификация. Введ. 2003 07 01.
   М.: Изд-во стандартов, 2003. 7с.: ил.
- ГОСТ Р 50 605 81 94 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэлектрические. Требования к испытаниям Текст.-Введ. 1995-01-01.-М.: Изд-во стандартов, 1996.- 19 е.: ил.
- 27. Григораш О.В. Системы автономного энергоснабжения / Григораш О.В.,
  Н.И. Богатырев, Н.Н. Курзин. Краснодар; Б/И, 2001. 333 с.

- Гром Ю. И. Новая ветро-дизельная электрическая установка. / Ю. И. Гром, В. А. Захаренко, А. Н. Лазарев и др. Энергосбережение. -2005.-№5.-С. 62-66.
- 29. Демирчян К.С., Чечурин В.Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. – М.: // Высш. шк., 1986. - 240с.
- 30. Домбровский В.В. и Хуторецкий Г.М. Основы проектирования электрических машин переменного тока. Л., «Энергия», 1974. 504 с.
- 31. Домбровский В.В. Справочное пособие по расчету электромагнитного поля в электрических машинах. – Л.: Энероатомиздат, 1983. -256 с.
- 32. Елистратов В.В. Возобновляемая энергетика. СПб, Изд-во Политехн. унта, 2011, 239с.
- 33. Елистратов В.В. Electrical Energy Sector Overvien. Wind Energy International 2011/2012/ WWEA 2011/ Bonn. p.457., p.253-256.
- 34. Елистратов В.В., Акентьева Е.М., Борисенко М.М., Кобышева Н.В., Сидоренко Г.И., Стадник В.В. Климатические факторы возобновляемых источников энергии. СПб.: Наука, 2010. - 235с.: ил.
- 35. Зедгенидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. –М.: Наука, 1976. - 390 с.
- Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. М.: Энергия, 1980. – 982 с.
- 37. Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные поля и процессы в электрических машинах и их физическое моделирование. М.: Энергия, 1969.
- Иванов-Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.
- Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В. и др. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. // М.,: Энергоатомиздат, 1986. -216с.
- 40. Инкин А.И. Электромагнитные поля и параметры электрических машин. Новосибирск: ООО «Издательство ЮКЭА». 2002. – 464 с.

- К проблеме расширения использования ветроэнергетики в европейском регионе России. / В. Ж. Арене, А. А. Вертман, В. Б. Иванов, Е. М. Шелков // Малая энергетика. 2006. № 1-2. С.98-105.
- 42. Казаков Ю.Б. Энергоэффективность асинхронных двигателей при вариациях режимных и конструктивных параметров / Ю.Б. Казаков, В.Б. Андреев, В.П. Сухинин. Под общ. Ред. Ю.Б. Казакова / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2011. –132 с.
- Калиткин Н. Н., Карпенко Н. В., Михайлов А. П., Тишкин В. Ф., Черненков М. В. Математические модели природы и общества. Москва, Наука, Физматлит, 2004, 360стр.
- 44. Калиткин Н. Н. Численные методы. М., Наука, 1978. 569 с.
- 45. Копылов И.П. Электрические машины. М.:Высшая школа, 2000 г., с. 607.
- 46. Копылов И.П., Клоков Б.К. и др. Проектирование электрических машин.3-е изд.,-М.: Высш.шк., 2002.-757с.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. // М.: Наука, 1978. -831 с.
- Круг Г. К., Сосулин Ю.А., Фатуев В. А. Планирование эксперимента в задачах идентификации и экстраполяции. – М.: Наука, 1977. – 207 с.
- Куневич А. В., Подольский А. В. Сидоров И. Н. Ферриты: Энциклопедический справочник. Магниты и магнитные системы. Том 1. Издательство Лик, 2004 г.
- 50. Литвиненко А. М. Проектирование ветроэлектрогенераторов. / А. М. Литвиненко, А. В. Тикунов. Воронеж: Кварта, 2003. 96 с.: ил.
- Ляхтер В. М. Развитие ветроэнергетики. / В. М. Ляхтер // Малая энергетика.
   2006. №1-2. С. 23-38.
- 52. Макаричев Ю.А., Овсянников В.Н. Метод расчета коэффициента рассеяния беспазового моментного двигателя с постоянными магнитами. Известия ВУЗОВ. Электромеханика, №6, 2007. с.38-41.

- 53. Многофункциональная установка для индивидуального потребителя Текст.
  / Е. Н. Гембарский, А. В. Пильганчук, Г. Е. Гембарский, В. А. Повержук // Энергетика и электрификация. 2000. - №12. - С. 41-43.
- 54. Нейман Л.Р., Димирчян К.С. Теоретические основы электротехники., т.1,2.
   Л.: Энергоиздат, 1981.
- 55. Николаев В.Г. Методология ресурсного и технико-экономического обоснования использования ветроэнергетических установок. Дисс. на соискание уч. степени доктора тех-х наук. Москва, 2011, 273 с.
- 56. Николаев В.Г. Ресурсное и технико-экономическое обоснование широкомасштабного развития и использования ветроэнергетики в России. "Атмограф", 2011. 502 с.
- 57. Николаев А.И. Отопление индивидуального жилого дома энергией ветра // Механизация и электрификация сельского хозяйства № 4 1994 18 с.
- 58. Николаев В. Г. Современное состояние и тенденции развития мировой ветроэнергетики. / В. Г. Николаев, С. В. Ганага // Малая энергетика.-2006.-№1-2.-С. 104-111.
- 59. Новак Ю.И. Эффективность использования ветроэлектростанций в северных районах Российской Федерации. Тезисы доклада на 1Х-м Международном симпозиуме «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред», 2003.
- 60. Новак Ю.И., Забегаев А.И., Горбунов Ю.Н., Забегаев Н.И., Соболь Я.Г., Демкин В.В. Способ управления ветроэнергетической установкой. Патент РФ № 2075638, зарегистрирован 20.03.97 г.
- 61. Орынбаев С.А. Совершенствование автономной ветроэнергетической установки малой мощности горизонтально-осевого типа. Диссертация на соискание ученой степени доктора философии (PhD). Алматы, 2015. 142 с.
- 62. Постоянные магниты. [Электронный ресурс].
   https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE

<u>%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9\_%D0%BC%D0%B0%D0</u> %B3%D0%BD%D0%B8%D1%82 (дата обращения 15.01.2018)

- 63. Постоянные магниты. Справочник под ред. Ю. М. Пятина, М., Энергия, 1980 г.
- 64. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 7
   «Физика сплошных сред». М.: Мир, 1966
- 65. Руководство *Elcut*. Производственный кооператив ТОР.- Санкт-Петербург.-2010.-345с.
- 66. Соломин Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ-Вертикаль // Альтернативная энергетика и экология, 2010 № 1.С. 10-15
- Соломин Е.В., Сироткин Е.А., Серадская О.В., Троицкий А.О. Обзор мировой ветроиндустрии за 2000-2016 годы. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2017;(10-12); с.33-44.
- Справочник по электрическим машинам: В 2 под. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клоковат.1 М.: Энергоатомиздат, 1988 456 с.
- 69. Тамм И.Е. Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов. 10-е изд., -М.,: // Наука. 1989.- 504 с.
- Тамм И. Е. Собрание научных трудов в двух томах. Москва: // Наука, 1975.
- 71. Тан Тхун Аунг. Исследование и разработка индукторного гидрогенератора.
   Дисс. на соискание уч. ст. канд. техн-х наук. ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ».
   М.: 2014; 137 с.
- 72. Таранов М.А., Воронин С.М. Оптимизация параметров ветроэнергетической установки для фермерских хозяйств // Механизация и электрификация сельского хозяйства 2000 №5 с. 37-39.
- 73. Твайделл Дж., Уэйр А.. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ.М.: Энергоатомиздат, 1990

- 74. Телегин В.В. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения предприятий ограниченной мощности с использованием альтернативных источников энергии. Дисс. на соискание уч. степени кандидата тех-х наук. Липецк, 2014, 179 с.
- 75. Торопцев Н. Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. М.: НТФ "Энергопрогресс", 2004. — 88 с.; ил. [Библиотечка электротехника, приложение к жур- налу "Энергетик". Вып. 7(67)].
- Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. Численные методы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 400 с.
- 77. Харитонов В.П. Особенности развития ветроэнергетики // Электроснабжение 2001 №3. 50-52 с.
- Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. СПб.: БХВ Петербург, 2005.–416с.:ил.
- 79. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. // Л.,:Энергия. 1968.-732 с.
- 80. ANSYS CFX 14.5. User's Manual, 2014.
- 81. Anufriev A.S., Makarichev Yu.A., Ivannikov, Y.N., Didenko, N., Gazizulina, A. Low - power wind generator. International Conference on Information Networking Volume 2018-January, 19 April 2018, Pages 671-672. 32nd International Conference on Information Networking, ICOIN 2018; Holiday Inn Chiang Mai Chiang Mai; Thailand; 10 January 2018 - 12 January 2018; Номер категории CFP18150-USB; Код 136093
- 82. Arnold La Cour/ Die Wichselstromtechnik. Berlin. Springer Verlag. Band 1;
  1910; Band 2, 1910; Band 3; 1912; Band 4; 1913; Band 5; 1912.
- Bernard Chabot , With a Focus on the Contribution From Renewables and on CO2 Emissions. Analysis of the Global Electricity Production up to 2014. электронный ресурс. URL: <u>http://cf01.erneuerbareenergien. schluetersche.de</u> (дата обращения 15.05.2017)

- 84. Elistratov V.V. Wind turbine with spiral blades. / V. V. Elistratov, E. N. Bykov:
   Ecobaltika'2006. Book of proceedings. St.-Petersburg, 2006. -168 p.
- 85. GSR2015\_Onlinebook\_low1.2015... электронный ресурс. URL: <u>http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015\_Online-book\_low1.pdf</u> (дата обращения 15.05.2017)
- 86. Harrington E.C. Indust.Quality Control, 1965, 21. №10.
- 87. <u>http://ao-electromash.ru/</u>. Каталог продукции НП ЗАО "Электромаш" (Дата обращения 20.11.2017)
- 88. <u>http://elib.spbstu.ru/dl/2/3468.pdf/view</u> Елистратов В. В. Возобновляемая энергетика [Электронный ресурс]: монография / В.В. Елистратов; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Электрон. текстовые дан. (1 файл: 12,1 Мб). Санкт-Петербург, 2013.
- 89. <u>http://energy-ds.ru/catalog/generating/vetrogeneratory/vetrogeneratory-falcon-euro-1-20kvt/75kw.html</u>. Каталог Группы компаний «EDS Group» (Дата обращения 20.11.2017)
- 90. <u>http://evrotek.spb.ru/catalog/generatory</u>. Евротек. Каталог продукции. Генераторы и электростанции. (Дата обращения 25.11.2017)
- 91. <u>http://sprav-constr.ru/index.html</u>. Справочник конструктора. (дата обращения 5.02.2018)
- 92. <u>http://www.driveka.ru/files/lists/Products/1810\_Files\_1509603120\_Hydro-power-selection-guide-C3G-C4G.pdf</u>. MarelliMotori. Италия. (Дата обращения 20.11.2017)
- 93. <u>http://www.m-energy.ru/card\_prod.php</u> Каталог продукции Geko, Германия.(Дата обращения 20.11.2017)
- 94. <u>http://www.rid-international.de/ru</u>. Каталог продукции R.I.D. GmbH. Германия. (Дата обращения 25.11.2017)
- 95. <u>http://www.vetrogenerator.ru/index.html</u>. ООО "МикроАрт". Ветрогенераторы. (дата обращения 15.01.2018)

- 96. <u>https://sanktpeterburg.v-p-k.ru/generatory</u>. Электрогенераторы (автономные электростанции и генераторы электричества. (Дата обращения 25.11.2017)
- Jorn Madslien. Floating wind turbine launched, BBC NEWS, London: BBC, s.5 June 2009
- 98. Lema, Adrian and Kristian Ruby, «Between fragmented authoritarianism and policy coordination: Creating a Chinese market for wind energy», Energy Policy, Vol. 35, Isue 7, July 2007
- 99. MirEnergii.ru. Альтернативная энергия. электронный ресурс. URL: <u>https://mirenergii.ru/energiyavetra/osobennosti-besshumnogo-vertikalnogo</u>
- 100. Rakebrandt-Gräßner P. Offshore Windenergie: Forschungsplattformen in Nordund Ostsee. / P. Rakebrandt-Gräßner // Wind Kraft & Natürliche Energien Journal. - 2001. - №4. - S. 54-55.
- 101. Renewableenergyworld электронный ресурс. URL: <u>http://www.renewableen-ergyworld.com/articles/ print/volume-13/issue-4/wind-power/btm-wind-market-report.html</u> (дата обращения 15.05.2017)
- 102. Richter. Hauptabmessungen elektrischer Maschinen und iHre Materialausnutzung/ ETZ-A, 73 (1952), 705s.
- Vidmar. Der wirtschaftliche Aufbau der elektrischen Maschinen. Berlin.
   Springer Verlag, 1918. 611 s.
- 104. Windkraft überflügelt erstmals die Energiegewinnung aus Wasserkraft Text. //
   VDI. Nachr. 2003. №5. S. 24.

ПРИЛОЖЕНИЯ



Фрагмент магнитной системы генератора

## Приложение Б



Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное объединение

## «Шторм»

С.Л.Буряшкин

ИНН 6315641584 / КПП 631601001

443110, Россия, г. Самара, ул. Осипенко д.2 «Б» к.98 (юридический адрес) 443068, г.Самара, Московское шоссе, 34А, корп.35, ком.22 (адрес места нахождения НПО) Тел./факс: (846) 267-48-51 www. <u>storm-samara.ru</u> mailbox@storm-samara.ru

Исх.№ 124 от 17.09.2018

#### АКТ

об использовании результатов кандидатской диссертационной работы

#### Ануфриева Андрея Сергеевича

Комиссия в составе: председатель – генеральный директор-главный конструктор Буряшкин Сергей Львович, члены комиссии: начальник КБ№1 Ротонос Денис Сергеевич, ведущий инженер-конструктор Бикеев Анатолий Филиппович, ведущий специалист по САУ и ПЧ Кабаков Владимир Алексеевич, составили настоящий Акт о том, что результаты диссертационной работы Ануфриева А.С. «Повышение эффективности магнитоэлектрических генераторов малой мощности для ветроэнергетическиз установок», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использовались в проектно-конструкторской деятельности НПО «Шторм» при разработке ветрогенераторов малой и средней мощности.

**УТВЕРЖДАН** 

Ген.лиректор

На основании теоретических положений диссертационной работы А.С. Ануфриева были спроектированы, изготовлены, испытаны и внедрены в производство генераторы с магнитоэлектрическим возбуждением БРИД для ветроэнергетических установок.

При разработке генераторов ВЭУ на НПО «Шторм» использовались математические модели, методика проектирования и рекомендации по выбору конструктивных схем, изложенные в диссертации.

Использование указанных результатов работы позволило повысить эффективность автономных энергоустановок и их конкурентоспособность.

Председатель комиссии: \_\_\_\_\_\_Буряшкин С.Л. Члены комиссии: \_\_\_\_\_\_Ротонос Д.С. \_\_\_\_\_\_Бикеев А.Ф. \_\_\_\_\_\_Кабаков В.А.

## Приложение В



Акт

Использования результатов диссертационной работы Ануфриева А.С. "Повышение эффективности магнитоэлектрических генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок" в учебном процессе.

Мы, нижеподписавшиеся, декан электротехнического факультета А.С. Ведерников, заведующий кафедрой ЭПА А.В. Стариков составили настоящий акт о том, что

Программы расчета и оптимизации синхронных генераторов с постоянными магнитами, разработанные А.С. Ануфриевым, используются в курсовом и дипломном проектировании студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Макетный образец синхронного генератора с постоянными магнитами (авторы разработки д.т.н. Ю.А. Макаричев и аспирант А.С. Ануфриев) используется в лабораторных работах по курсу «Специальные электрические машины».

Названные программы и макетный образец, способствуют более полному усвоению передовых технологий в области электромашиностроения студентами старших курсов электротехнического факультета.

Декан ЭТФ

К.т.н., доцент

Заведующий кафедрой ЭПА Д.т.н., доцент

А.С. Ведерников

А.В. Стариков