

На правах рукописи



Ануфриев Андрей Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ГЕНЕРАТОРОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ
ДЛЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2018

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика и автомобильное электрооборудование ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель:	доктор технических наук, доцент Макаричев Юрий Александрович ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Электромеханика и автомобильное электрооборудование»
Официальные оппоненты:	Казakov Юрий Борисович доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», заведующий кафедрой «Электромеханика» Вавилов Вячеслав Евгеньевич кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» доцент, ведущий научный сотрудник кафедры «Электромеханика»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов

Защита диссертации состоится 18 декабря 2018 г. в 10ч. на заседании диссертационного совета Д 212.217.04 по адресу: 443100, Самара, ул. Первомайская, 18, Самарский государственный технический университет, корпус 1, ауд. 4а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18) и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» <https://samgtu.ru>

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.217.04; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru

Автореферат разослан « » _____ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.217.04
кандидат технических наук



Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

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%. В России этот показатель составляет 4,8%. Единичная мощность агрегатов морского и наземного базирования достигает 4,5-5 МВт. Такие установки не только решают проблему производства экологически чистой возобновляемой энергии, но и успешно конкурируют с традиционными методами генерирования электроэнергии.

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.

Основы теории электрических генераторов малой мощности, используемых в автономных возобновляемых энергоустановках, и ее практического воплощения заложили российские и зарубежные ученые: Артюхов И.И., Елистратов В.В., Грачев П.Ю., Кирпичникова И.М., Костырев М.Л., Николаев В.Г., Соломин Е.В., S. Nonak, K. Yamazaki и др.

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, и генераторов малой мощности.

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.

Однако, из-за ряда специфических особенностей, до настоящего времени существует ряд проблем анализа и синтеза генераторов с постоянными

магнитами, в том числе, и для ВЭУ номинальной мощностью менее 100 киловатт, не нашедших своего решения.

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 проектирования синхронных генераторов с постоянными магнитами, учитывающих особенности их функционирования в комплексах ВЭУ. Поэтому, научный анализ и обоснованный выбор конструктивной схемы специализированного синхронного генератора, основанный на структурной оптимизации, является актуальной научной и практической задачей

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. 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.
3. Разработать имитационные модели системы синхронный генератор – нагрузка с учетом уточненной математической модели для определения выходных параметров и характеристик генератора при работе в комплексе ВЭУ.
4. 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.

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 исчисления, оптимизационного проектирования и физического моделирования.

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:

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.
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.
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.

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*.

Личный вклад соискателя заключается в выполнении основного объема исследований, изложенных в работе, в анализе, обработке, обобщении результатов и формулировке выводов, а также в личном участии в апробации результатов и подготовке основных публикаций, в расчете и проектировании экспериментальных образцов генераторов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Многокритериальная оптимизация структуры и конструктивных типов генераторов, применяемых в энергоустановках с нестабильной частотой вращения и отдаваемой мощностью, основанная на принципе доминирования Парето.
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.
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 страниц, иллюстрирована 59 рисунками и 17 таблицами. Библиографический список включает 104 наименования.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулирована цель исследований автора, 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.

Основные параметры, которые определяют качество генератора малой мощности, приводимого во вращение нестабилизированными по частоте тихоходными двигателями, были сформулированы в следующем порядке:

- стоимость единицы мощности генератора с учетом привода;
- удельная мощность на единицу массы;
- КПД в номинальном режиме и в режимах ненормальных значений частоты вращения и мощности;
- наличие или отсутствие мультипликатора;
- наличие или отсутствие скользящих контактов;
- необходимость источника реактивной мощности;
- возможность размещения основного оборудования не в гондоле, а на поверхности земли.

Для формулировки задачи были определены параметры 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 откликом (исходом) y в соответствие приведены численные оценки. Сравнение исходов заключается в сравнении соответствующих им действительных чисел. Исход y_i более предпочтительный, чем y_j , если $f(y_i) > f(y_j)$ при решении задачи максимизации. Если $f(y_i) = f(y_j)$, 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 использовалось отношение доминирования Парето R_p

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

Принцип Парето состоит в том, что оптимальный исход необходимо искать только среди множества недоминируемых элементов $P(Y)$. Иначе все-

гда 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 были рассмотрены следующие типы генераторов, пригодных для решения поставленной задачи:

- асинхронный генератор с короткозамкнутым ротором (АГ);
- синхронный генератор с электромагнитным возбуждением, бесщеточный;
- индукторный генератор (ИГ);
- синхронный генератор с постоянными магнитами (быстроходный с мультипликатором);
- синхронный генератор с постоянными магнитами (тихоходный прямого привода).

Коллекторные генераторы постоянного тока из анализа сразу были исключены, ввиду их известных недостатков, связанных с высокой стоимостью, малым ресурсом и ненадежностью коллекторно-щеточного узла.

Методом многокритериальной структурной оптимизации с использованием принципа доминирования Парето был проведен критериальный анализ указанных типов и конструкций генераторов и на его основе по численному обобщенному параметру был определен тип генератора, имеющий в формулировке Парето лучший исход. Им оказался многополюсный синхронный генератор прямого привода с возбуждением от постоянных магнитов.

На основе анализа были 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 магнитоприводе ротора (Рис.1). 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.

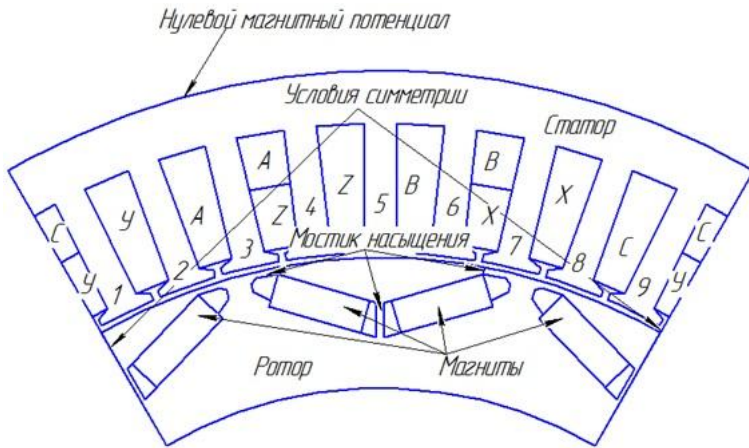


Рис. 1 – Магнитная система генератора со встроенными магнитами

Главная сложность при расчете такой магнитной системы, заключается в выборе размеров этих 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 Blondеля явнополюсной машины.

Результатом численного моделирования магнитного поля на холостом ходу и реакции якоря стали кривые индукции в воздушном зазоре (рис.2...3), картины магнитного поля машины и значения сосредоточенных параметров для построения векторной диаграммы Blondеля (рис.4), из которой был определен синус угла ψ между векторами тока нагрузки и ЭДС холостого хода

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

Значение угла ψ необходимо знать для определения значений фазового сдвига токов обмотки статора при заданной нагрузке с учетом действия реакции якоря.

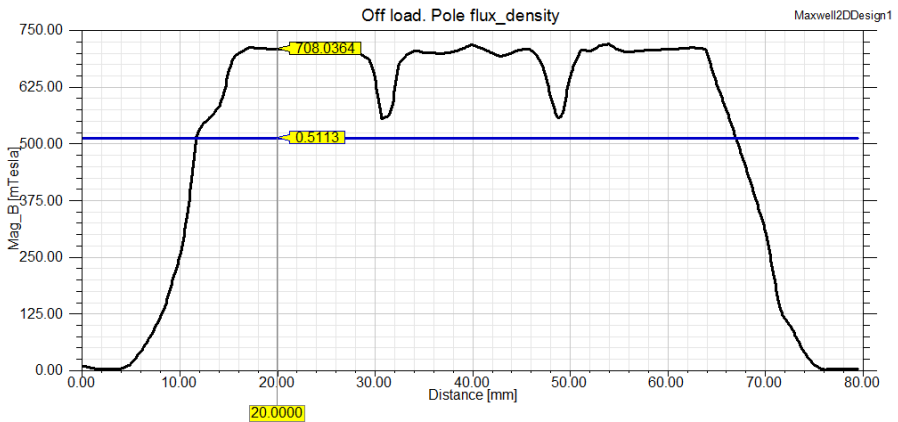


Рис. 2 – Нормальная составляющая магнитной индукции в зазоре под одним полюсом

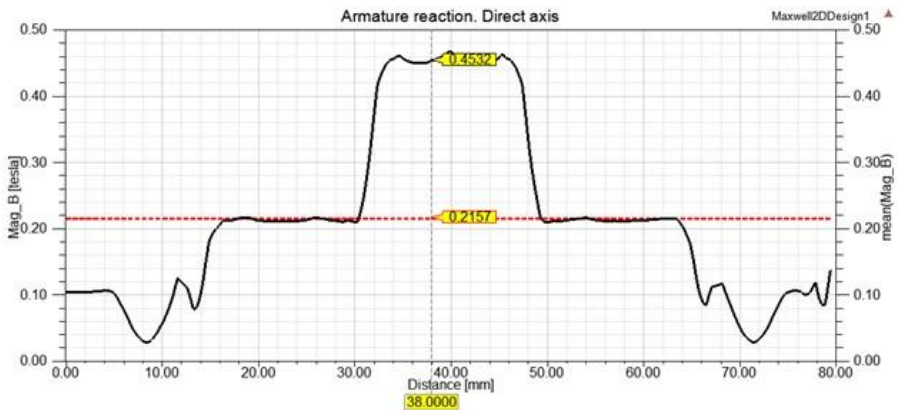


Рис.3 – Продольная реакция якоря. Нормальная составляющая магнитной индукции в воздушном зазоре

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.

Предложенная математическая модель СГ с постоянными магнитами сочетающая в себе расчет магнитного поля численными методами совместно с анализом векторных диаграмм, служит основой для оптимизационного проектирования и уточненных поверочных расчетов генератора.

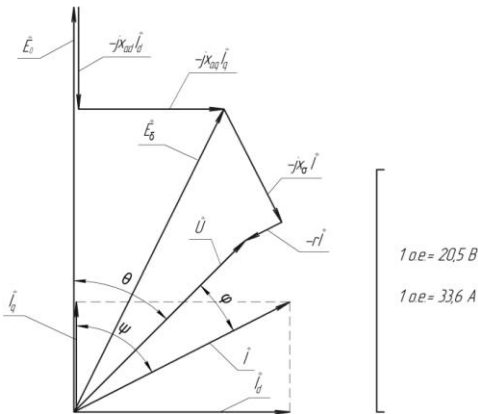


Рис. 4 – Диаграмма Blondеля генератора

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 (Рис.5).

В ходе исследования были получены статические (внешние, угловые и токоскоростные) характеристики. Пример внешних характеристик генератора для разных типов нагрузки показан на рис.6.

на рис.6.

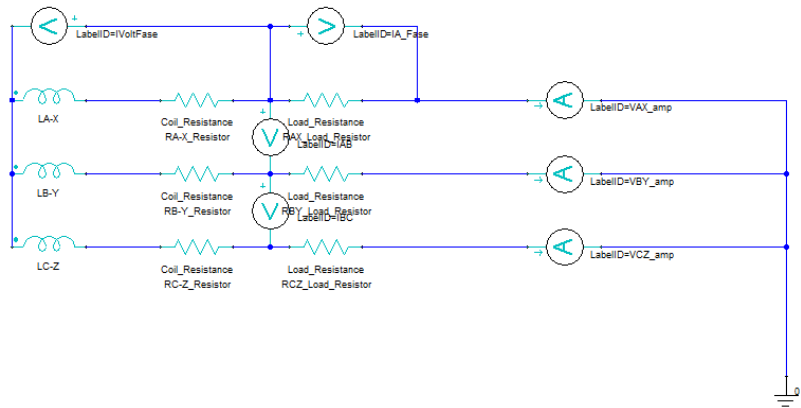


Рис.5 – Схема моделирования генератора и нагрузки

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.

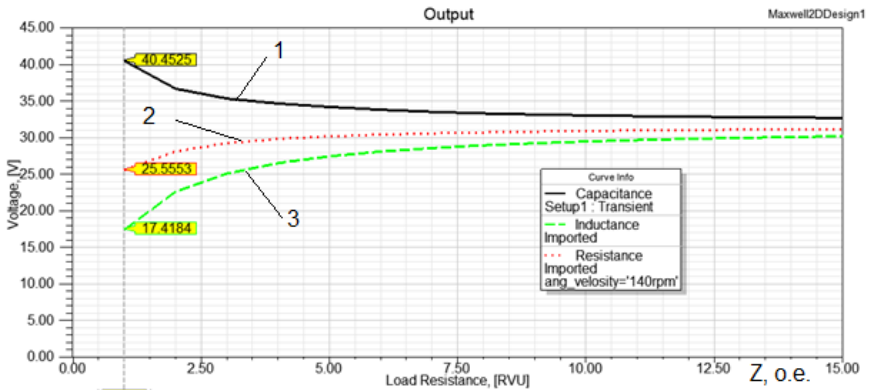


Рис.6 – Внешние характеристики.

1 – нагрузка x_c ; 2 – нагрузка R ; нагрузка x_L .

Угловая характеристика момента, построенная в соответствии с выражением

$$M_s = m \frac{U \cdot E_0}{x_d \omega_1} \sin \theta + m \frac{U^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin(2\theta),$$

показана на рис.7.

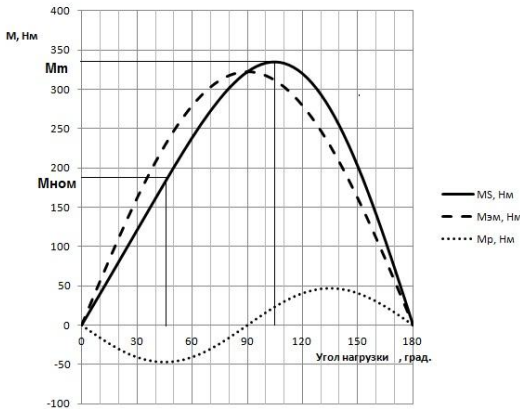


Рис.7 – Угловые характеристики момента генератора

Для построения САУ ВЭУ необходимо в качестве исходных параметров иметь достоверные динамические характеристики генератора. При моделировании переходных процессов в исследуемом генераторе использовался

программный комплекс *Ansys Maxwell*. Допущения при моделировании были такими же, как и при моделировании статических характеристик.

В качестве иллюстрации результатов моделирования на рис.8 представлены осциллограммы токов генератора при однофазном коротком замыкании фазы *A* для наиболее тяжелого случая, когда напряжение в момент КЗ проходит через ноль.

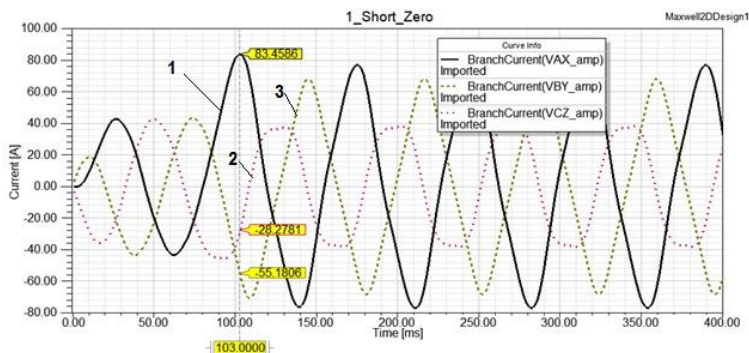


Рис.8 – Однофазное короткое замыкание при прохождении фазного напряжения фазы *A* через ноль

Как видно из графиков при коротком замыкании в момент времени, когда напряжение переходит через ноль, значение ударного тока в короткозамкнутой фазе в 1,9 раза больше амплитуды номинального тока и в 2,7 раза больше действующего номинального тока. Установившийся ток КЗ составляет $1,61 I_{\text{ном}}$. 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.

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 за год для каждой из этих ВЭУ.

В качестве примера на рис.9 представлены диаграмма распределения плотности вероятностей средней силы ветра для степных районов Самарской и Саратовской областей и энергетическая характеристика ВЭУ2000, номинальной мощностью 2 кВт.

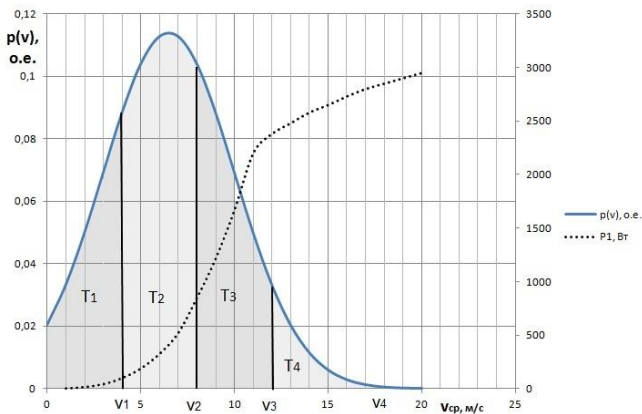


Рис.9 – Зависимость мощности ВЭУ 2000 от скорости ветра и плотности вероятности по интервалам интенсивности ветра

Диапазоны средних значений скорости ветра традиционно делятся 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

$$T_i = \int_{v_{i-1}}^{v_i} p(v) \cdot dv = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_v} \int_{v_{i-1}}^{v_i} e^{-\frac{(v-m_v)^2}{2\sigma_v^2}} \cdot dv.$$

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

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

$$\beta = \frac{\Delta p_{нз.ном}}{\Delta p_0}.$$

КПД генератора в «неноминальных» режимах с учетом этого коэффициента

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta p_0 \left(\frac{1 + \beta \cdot k_{nc}^2}{k_{nc}} \right)}$$

Для того, чтобы максимум КПД соответствовал номинальной нагрузке $k_{nc} = 1$ 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 ($\Delta p_0 = \Delta p_{nc}$) выгодно с точки зрения энергоэффективности нарушать. Для того чтобы сместить максимум КПД в сторону больших нагрузок и больших частот вращения необходимо, чтобы значения β 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% прогнозируемой среднегодовой выработки электроэнергии ВЭУ.

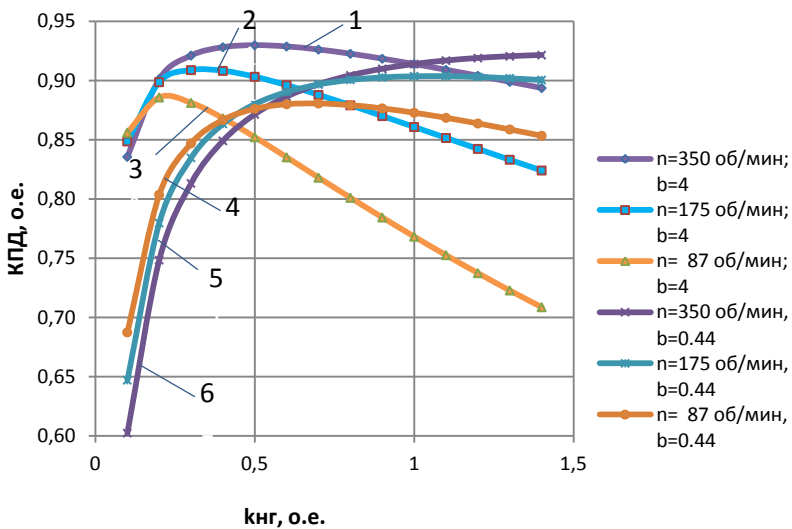


Рис.10 – Кривые КПД «стального» (1-3) $\beta > 1$ и «медного» (4-6) $\beta < 1$ генераторов. ВЭУ8000

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.

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).

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.

На диаграммах рис.11 и 12 приведены удельные выходные параметры разработанных генераторов в сравнении с аналогами. Разработанный генератор БРИД-324 имеет номинальную мощность 0,45 кВт при номинальной частоте вращения 130 об/мин, а генератор БРИД-322 – 2 кВт при 135 об/мин.

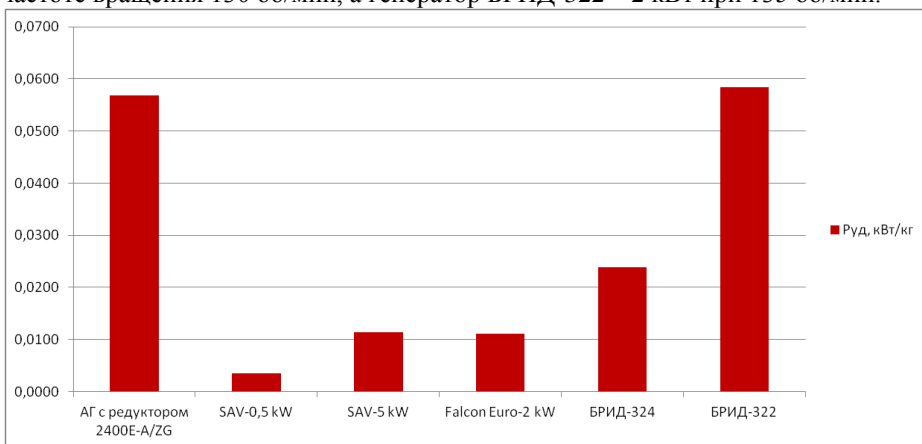


Рис.11 – Диаграмма удельной по массе мощности генераторов АГ с редуктором 2400Е-А/ЗГ(Гекон, Германия); SAV-0,5 kW и SAV-5 kW (КНР); Falcon Euro-2 kW (Франция); БРИД-324 и БРИД-322 (НПО "Шторм", Россия).

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.

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.

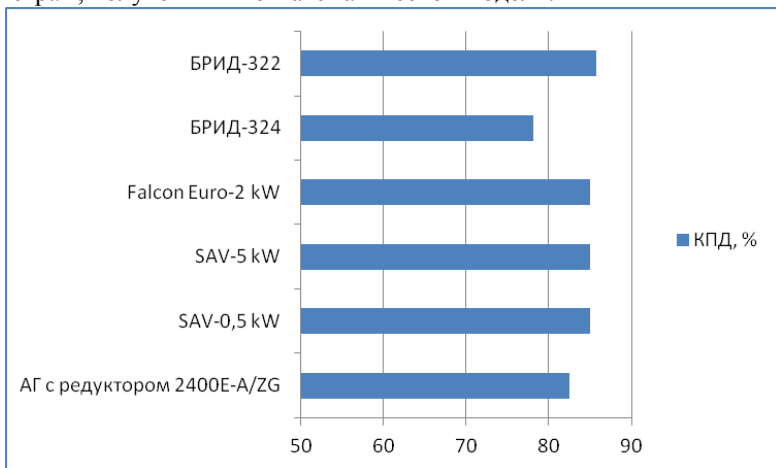


Рис. 12 – Диаграмма сравнения КПД генераторов



Энергоэффективность разработанных генераторов обеспечивается не только значением максимального КПД, но и расширением зоны высоких значений КПД при работе с частотой вращения и нагрузкой, отличными от номинальных.

Результаты экспериментов подтвердили правильность основных теоретических положений диссертации и адекватность математической модели и изготовленных генераторов.

В заключении изложены основные выводы и результаты работы.

Рис.13 – Монтаж ВЭУ 1 кВт с генератором БРИД 325 в полевых условиях.

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 уставок 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 превышает 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, обеспечивающие прирост выработки электроэнергии ВЭУ за счет более эффективного ее использования в «неноминальных» режимах по частоте вращения и нагрузке. 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.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК

1. Макаричев, Ю.А. Математическая модель синхронного генератора ветроэнергетической установки малой мощности / Макаричев Ю.А., **Ануфриев А.С.**, Зубков Ю.В., Певчев В.П. Вестник Самарского государственного технического университета Серия «Технические науки» –№ 3(55) – 2017. С.66-74.
2. Макаричев, Ю.А. Энергоэффективность генератора ветроэнергетической установки в условиях изменяющейся частоты вращения./ Макаричев Ю.А., Ю.В. Зубков, **Ануфриев А.С.** Вестник Самарского государственного технического университета Серия «Технические науки» –№ 1(57) – 2018. С.77-82.
3. Макаричев, Ю.А. Оптимизация энергетических параметров синхронного генератора малой мощности./ Макаричев Ю.А., Овсянников В. Н., Зубков Ю. В., **Ануфриев А.С.** Вестник транспорта Поволжья. №3(69) -2018. С.13-19.
4. Макаричев, Ю.А. Критериальный анализ параметров генераторов малой мощности./Макаричев Ю.А., **Ануфриев А.С.** Известия высших учебных заведений. Электромеханика. №2 (62), 2018. с.42-47.

Статья, входящая в международную базу цитирования Scopus

5. Makarichev, Yu.A. Low - power wind generator./ Makarichev Yu.A., **Anufriev A.S.**, Ivannikov, Y.N., Didenko, N., Gazizulina, A. 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

Статьи, опубликованные в других научных изданиях

6. Ануфриев, А.С. Особенности проектирования генераторных ветроустановок малой мощности./**А.С. Ануфриев**, Ю.А. Макаричев, М.Н. Алимбеков. 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
7. Макаричев, Ю.А. Особенности проектирования синхронных генераторов малой мощности для ветроэнергетических установок / Ю.А. Макаричев, Ю.Н. Иванников, **А.С. Ануфриев** // Энергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конф-ии, 2017, Самара.– Т 3. Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – С. 159-160.
8. Макаричев, Ю.А. Анализ систем запуска газотурбинного двигателя магистрального газоперекачивающего агрегата. / Ю.А. Макаричев, М.Н. Алимбеков **А.С. Ануфриев**. Ашировские чтения: Сб. трудов Международной научно-практической конференции. / Отв. редактор В.В. Живаева. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017 – С. 682-686.
9. Ануфриев, А.С. Анализ энергоэффективности ветроустановок малой мощности. **А.С. Ануфриев**, Ю.А. Макаричев // 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.

Личный вклад автора. В написанных в соавторстве работах [1-5] автору принадлежат разработка математических моделей, расчеты, обобщение результатов моделирования, в [7-9] методика и анализ результатов.

Автореферат отпечатан в соответствие с решением
диссертационного совета Д212.217.04
ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет
протокол № 6 от 12.10.2018г.

Заказ № ____ Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет
Отдел типографии и оперативной полиграфии
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

