

На правах рукописи

ФЕДИЙ Константин Сергеевич

**НИЗКОСКОРОСТНОЙ ТОРЦЕВОЙ СИНХРОННЫЙ
ГЕНЕРАТОР АВТОНОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Красноярск – 2007

Работа выполнена в Политехническом институте
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель	кандидат технических наук, доцент, Встовский Алексей Львович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Христинич Роман Мирославович
	кандидат технических наук, доцент Жуков Сергей Павлович
Ведущая организация:	Красноярский государственный аграрный университет (КрасГАУ)

Защита состоится 14 ноября 2007 года в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, корпус «А», ауд. 224

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Автореферат кандидатской диссертации размещен на официальном сайте ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». (<http://www.sfu-kras.ru/science/dissertations>).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба отправлять по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ПИ СФУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.099.07
факс (3912) 43-06-92 (для кафедры ТЭС)
e-mail: boiko@krgtu.ru

Автореферат разослан «13» Октября 2007 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

Е. А. Бойко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Проблема дефицита электроэнергии во многих районах нашей страны может быть решена развитием малой энергетики с использованием богатых водных ресурсов.

На территории Красноярского края, обладающего колоссальными гидроресурсами (включая не только большие, но и малые реки), возможно применение свободнопоточных микроГЭС мощностью до 30 кВт и выше.

Турбина свободно-поточной микроГЭС в зависимости от скорости реки и мощности установки вращается с частотой от 80 – 120 об/мин. Производство свободно-поточных микроГЭС сдерживается из-за их относительно высокой стоимости и низкой надежности, вследствие отсутствия герметичного низкоскоростного генератора малой мощности. Анализ надежности микро ГЭС и ветроэнергетических установок показывает, что большая часть повреждений вызывается выходом из строя генератора и мультипликатора (механизма, повышающего обороты рабочего колеса от 80-120 об/мин до необходимых 750-1000 об/мин серийно выпускаемых генераторов). Эти же элементы составляют определенную часть стоимости всей установки.

Применение низкоскоростных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для микро ГЭС и ВЭУ является актуальным с точки зрения обеспечения хороших массогабаритных показателей, простоты конструкции, отсутствием скользящих контактов, с возможностью выполнять генератор низких скоростей вращения, что обуславливает низкую стоимость и высокую надежность. Применение низкоскоростных генераторов упрощает конструкцию мультипликатора, а в ряде случаев позволяет обходиться без него.

Область применения торцевых машин не ограничивается только автономными микро ГЭС и ВЭУ. Начиная с 50-х годов нашего столетия торцевые машины заняли ведущие позиции в технике электроснабжения транспортных средств (авиация и космическая техника, железнодорожный и другие виды транспорта), в ряде промышленных приводов.

Анализ литературных источников свидетельствует о большом интересе исследователей к торцевому типу машин.

В тоже время торцевая конструкция не позволяет воспользоваться известными методами и методиками расчета цилиндрической электрической машины и требует разработки частных подходов к расчету таких видов машин. Низкоскоростная конструкция торцевого генератора вызывает необходимость размещения постоянных магнитов многополюсного ротора, обмоточных структур статора при ограничении радиального габарита машины, обеспечении качества выходного напряжения, формировании достаточно жесткой внешней характеристики. Предлагаемая оригинальная конструкция ротора с постоянными магнитами, при достаточно высокой технологичности, не позволяет регулировать магнитный поток, что требует ограничения сопротивлений статорной обмотки, в частности индуктивного сопротивления пазового рассеяния. Все это говорит о необходимости проведения математического моделирования электромагнитного поля в машине с постоянными магнитами, с целью создания инженерной мето-

дики расчета машины с постоянными магнитами, отличающейся относительной простотой, гибкостью, универсальностью в сочетании с низкой погрешностью.

Кроме того, опыт проектирования и изготовления торцевых синхронных генераторов показывает необходимость применения современного подхода к моделированию основных физических процессов с использованием детальных твердотельных трехмерных моделей (САД системы) и решения задач оптимизации геометрии низкоскоростного торцевого синхронного генератора (НТСГ). Настоящая работа посвящена исследованию такого типа машин.

Цель работы – совершенствование конструкции низкоскоростного торцевого синхронного генератора, на основе исследования электромагнитного поля в активном объеме машины путем сочетания численных методов расчета и современных компьютерных технологий.

Задачи исследования:

1. На основе анализа существующих конструкций обосновать выбор малогабаритного герметичного генератора и способы повышения его энергетической эффективности;
2. Разработать математическую модель для исследования активных зон торцевого генератора с постоянными магнитами;
3. Разработать методику исследования НТСГ с помощью современных программных систем конечно-элементного анализа;
4. Провести комплекс теоретических исследований для оптимизации геометрии магнитной системы методом Соболя-Статникова и разработать программное обеспечение в среде Delphi для твердотельного моделирования;
5. Изготовить макетный образец торцевого генератора и экспериментально оценить результаты теоретических исследований.

Объект исследования: низкоскоростной торцевой синхронный генератор с возбуждением от продольно намагниченных постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов (РЗМ).

Предмет исследования: электромагнитные поля и процессы в активном объеме торцевого синхронного генератора и способы снижения массы и габаритов, повышения энергетических показателей машины.

Научной новизной является:

1. Математическая модель НТСГ, разработанная на основе аналитического исследования магнитного поля, позволяющая осуществлять расчет электромагнитного поля с учетом нелинейности характеристик ферромагнитных материалов;
2. Методика расчета и исследования активной зоны торцевого синхронного генератора с постоянными магнитами с помощью пакета конечно элементного анализа ANSYS;
3. Постановка и решение задачи оптимизации геометрии торцевого синхронного генератора на базе созданной математической модели по критерию минимума массы активных материалов и максимуму перегрузочной способности при заданном напряжении.

Практическую ценность представляют следующие результаты работы:

1. Разработана оригинальная конструкция герметичного торцевого генератора, обеспечивающая высокую энергетическую эффективность автономных источников питания;

2. На основе комплексных теоретических исследований определена оптимальная (по минимуму массы и высоким энергетическим показателям) геометрия электромагнитной системы НТСГ;

3. Разработана методика расчета стационарного электромагнитного поля, являющаяся основой проектирования предлагаемого торцевого синхронного генератора.

4. По разработанной методике электромагнитного расчета спроектированы и изготовлены опытно-промышленные образцы торцевого генератора, конструкция которого защищена патентом (Положительное решение о выдаче патента РФ от 29.05.07. Торцевая электрическая машина. Номер заявки №2006121299 от 15.06.06).

Достоверность научных результатов подтверждена удовлетворительным совпадением результатов численного моделирования, полученных с помощью разработанной математической модели низкоскоростного торцевого синхронного генератора, с результатами натуральных экспериментов, проведенных на опытном образце.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель электромагнитного поля торцевого синхронного генератора, позволяет по известным геометрическим размерам и характеристикам материалов статора и ротора найти мгновенное распределение индукции и напряженности, позволяющее определять выходные характеристики и мощность.

2. Для получения распределения индукции в активной зоне машины наиболее рациональным представляется применение программного комплекса ANSYS.

3. Решение задачи многокритериальной оптимизации торцевого синхронного генератора методом Соболя-Статникова, обеспечивает получение оптимальной геометрии по критерию минимума массы активных материалов и максимума перегрузочной способности при заданном напряжении.

4. Предложенная конструкция эффективного автономного маломощного герметичного генератора с концентрацией магнитного потока обеспечивает наибольшую эффективность по стоимостным и энергетическим показателям.

Апробация работы. Основные научные и практические результаты докладывались автором и обсуждались на межрегиональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь Сибири - науке России», (Красноярск, 2004 г); на 11 международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТПУ 2005г), межрегиональной научно-практической конференции «Инновационное развитие регионов Сибири», (Красноярск, 2006 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 1 статья в издании по перечню ВАК, 1 решение о выдаче патента РФ на полезные модели, 7 публикаций в межвузовских сборниках научных трудов, сборниках международных и межрегиональных научно-практических конференций и семинаров.

Структура и объем диссертации: Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы и двух приложений. Содержит 157 страницы, из которых 143 стр. – основной текст, иллюстрируется 70 рисунками, 2 стр. – приложения, 12 – библиографический список из 126 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении определены основные тенденции развития микроГЭС, а также ветроэнергетических установок (ВЭУ), обоснована актуальность использования в автономных электрических станциях малой мощности с низкооборотным первичным двигателем в качестве источников электрической энергии торцевых синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов. Сформулированы цель диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность поставленных задач.

В первой разделе проведен обзор существующих малогабаритных автономных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, с позиции использования их в указанных установках и рассмотрены проблемы, связанные с их применением.

Выбор торцевой конструкции генератора с постоянными магнитами в качестве объекта исследования определен важными преимуществами торцевых электрических машин перед машинами классической конструкции. Это связано с простотой конструкции, отсутствием скользящих контактов, возможностью многопакетного исполнения, лучшим охлаждением активной части из-за расположения тепловыделяющих узлов вблизи периферийных поверхностей машины. Малый осевой габарит генератора с возбуждением от постоянных магнитов дает возможность обеспечить конструктивную совместимость их с рядом механизмов, компактность и удобство эксплуатации и сборки.

В основу НТСГ положен предложенный В.М. Казанским в качестве обмоточной структуры активный распределенный слой (АРС) статора, а возбуждение осуществляется от продольно намагниченных постоянных магнитов на основе редкоземельных материалов.

Торцевая электрическая машина содержит два статора 1 (рис. 1) смонтированных на подшипниковом щите 2 машины, закрепленном в корпусе 3, и ротор. Ротор включает составной диск 4, и ступицу 5. Диск 4 закреплен на ступице 5, соединенной с валом 6, который установлен в подшипниках 7 и 8 подшипниковых щитов 2 и 9. Основой диска 4 ротора является кольцо 10 (рис. 2), на котором по периметру закреплены радиально ориентированные магнитомягкие полюсы 11, имеющие в радиальном направлении форму трапеции, обращенной меньшим основанием к кольцу, и - двояковогнутого шестиугольника в поперечном сечении. Между полюсами 11 размещены постоянные магниты 12 (рис. 2,

3), имеющие в поперечном сечении форму выпуклого неправильного шестиугольника, сопряженную с поверхностями двух соседних полюсов в радиальном и осевом направлениях, для фиксации магнитов на диске ротора, так, что соседние магниты обращены друг к другу одноименными полюсами.

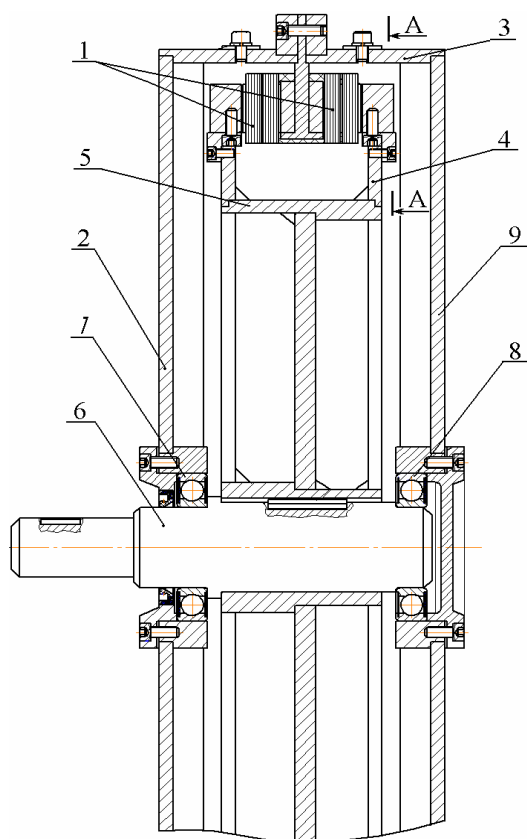


Рис. 1 – Торцевая электрическая машина.

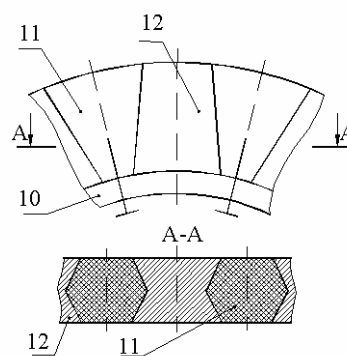


Рис. 2 – Ротор НТСГ.

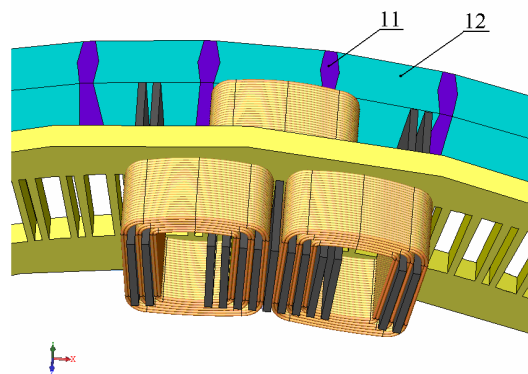


Рис. 3 – Статор и ротор НТСГ.

Также в разделе проведен сравнительный анализ численных и аналитических методов моделирования магнитного поля в электрических машинах. Показано, что для решения определенного класса задач целесообразно применять аналитический метод конечных элементов. Выбор метода конечных элементов обусловлен следующими критериями: возможен расчет магнитного поля с учетом нелинейности характеристик ферромагнитных материалов; высокая эффективность решения полевой задачи и сравнительно несложное определение интегральных характеристик магнитной системы; составление расчетных уравнений производится только для элементов магнитной системы, т.е. возможно описание открытых магнитных систем.

Второй раздел посвящен разработке математической модели и теоретическому исследованию магнитного поля возбуждения торцевого синхронного генератора с концентрацией магнитного потока. Поставлена и решена задача расчета магнитного поля возбуждения торцевого синхронного генератора с концентрацией магнитного потока методом конечных элементов.

Исходными данными для решения являются развертка машины с постоянными магнитами (рис. 4), семи зонная расчетная модель, а также общие решения уравнений магнитостатики для дискретно-однородной полосы с постоянными магнитами в виде рядов по кусочным функциям и для однородных полос

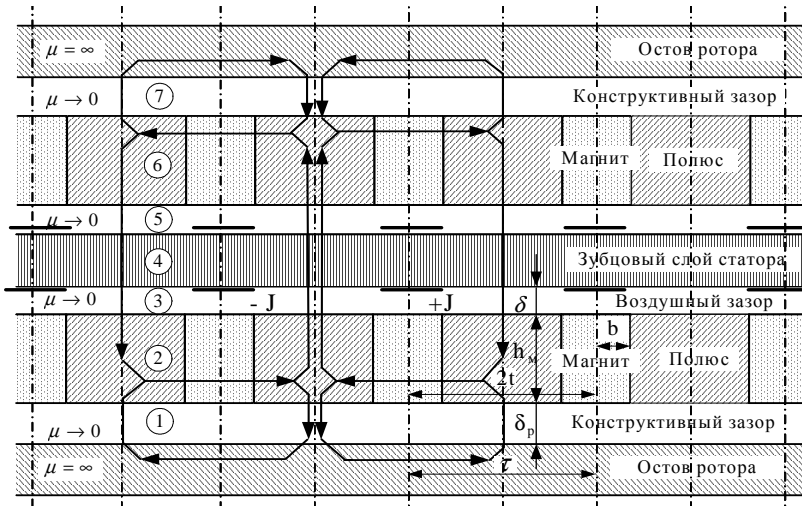


Рис. 4 – Развертка машины с постоянными магнитами.

по гладким собственным тригонометрическим функциям. Уравнения магнито-статики для любой зоны машины имеют вид:

$$H_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad H_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y};$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0;$$

$$V_x = V_o(x) + \mu_x(x)H_x;$$

$$V_y = \mu_y(x)H_y.$$

где $\mu_x(x)$, $\mu_y(x)$ – ступенчатые функции координаты x ;

H_x, V_x – компоненты векторов магнитной индукции и напряженности по оси x ; H_y, V_y – по оси y ; $V_o(x)$ – функция остаточной индукции магнита.

Структура активного объема торцевой электрической машины, используемая для построения расчетной модели, представлена в общепринятом виде поперечным разрезом на рис. 3.

Выражение для составляющей вектора магнитной индукции в воздушном зазоре (зона 3, 5) расчетной модели, полученная из решений уравнений магнито-статики имеет вид:

$$B_{3y} = \mu_o \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \mu_o \sum_k \left(M_k \cdot \frac{k \cdot \pi}{\tau} \operatorname{ch} \frac{k \cdot \pi}{\tau} \cdot \delta \cdot \sin \frac{k \cdot \pi}{\tau} \cdot x \right) = C_{3y} \cdot \sin \frac{k \cdot \pi}{\tau} \cdot x, \quad (1)$$

где M_k – постоянные интегрирования определяемые из условия непрерывности потенциала, τ – полюсное деление по среднему диаметру, δ – величина воздушного зазора.

Поле возбуждения B_{3y} , созданное магнитами ротора и поле реакции якоря B_{4y} относительно неподвижны, а поле реакции якоря является периодическим, с периодом равным периоду поля возбуждения. Пространственно эти поля сдвинуты друг относительно друга на внутренний угол нагрузки Θ . Тогда поле реакции якоря этой же поверхности будет описываться выражением:

$$B_{4y}(x, y) = \sum C_{4y} \sin \left(\frac{k \pi}{\tau} \cdot x + k \Theta \right), \quad (2)$$

где C_{4y} – постоянная интегрирования являющаяся функцией настила тока:

$$J = \frac{u_{нсл} \cdot I_{\phi}}{t_l}. \quad (3)$$

где $u_{нсл}$ – число проводников в пазу статора, t_l – зубцовый шаг статора по внутреннему диаметру.

Соотношение для фазного тока статора может быть получено из уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа для одной из фаз.

$$\dot{I}_\phi \cdot z_H = \dot{I}_\phi \cdot (r_a + j \cdot x_L) - j\omega\dot{\psi} . \quad (4)$$

где \dot{I}_ϕ – ток фазы статора; r_a – активное сопротивление фазы статора; x_L – индуктивное сопротивление лобового рассеяния, неучтенное в модели (рис. 3); $\dot{\psi}$ – потокосцепление в активной зоне фазы; z_H – сопротивление нагрузки.

Составляющая $j\omega\dot{\psi}$ в соответствии с законом электромагнитной индукции определяется:

$$j\omega\dot{\psi}_\phi = \int_0^\tau j \cdot \omega \cdot W_\phi \cdot B_y \cdot l_\delta \cdot dx . \quad (5)$$

где B_y – сумма векторов магнитной индукции реакции якоря B_{4y} (2) и ротора B_{3y} (1); W_ϕ – число витков фазы статора; l_δ – активная длина пакета статора.

Подставив в (5) выражение вектора магнитной индукции реакции якоря B_{4y} (2) и ротора B_{3y} (1) решаем уравнение (4) относительно тока. После несложных преобразований выражение для фазного тока статора примет вид:

$$\dot{I}_\phi = - \frac{j \cdot \omega \cdot W_\phi \cdot B_{3y} \cdot l_\delta \cdot \tau}{r_a + j \cdot x_L + j \cdot \omega \cdot W_\phi \cdot l_\delta \cdot \tau \cdot \mu_0 \cdot u_{нсл} \cdot Y \cdot (X + Z) - z_H} \quad (6)$$

$$\text{где } Y = \frac{\operatorname{sh}\left(\pi \cdot \frac{h_M + \delta}{\tau}\right) \cdot \sin\left(k \cdot \pi \cdot \frac{x}{\tau}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x + \Theta \cdot \tau}{\tau}\right)}{t_l \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{x}{\tau}\right) \cos(\Theta) \cdot \left(\operatorname{ch}\left(\pi \cdot \frac{\delta}{\tau}\right)^2 - 1\right)}$$

$$X = \operatorname{ch}\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot (h_M + \delta)\right) \cdot \left(\operatorname{ch}\left(\pi \cdot \frac{\delta}{\tau}\right)^2 - 1\right), \quad Z = \operatorname{sh}\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot (h_M + \delta)\right) \cdot \operatorname{sh}\left(\pi \cdot \frac{\delta}{\tau}\right),$$

здесь h_M – высота магнита.

Так как числитель представляет собой ЭДС магнитного поля ротора, тогда синхронное индуктивное сопротивление равно:

$$x_d = j \cdot \omega \cdot W_\phi \cdot l_\delta \cdot \tau \cdot \mu_0 \cdot u_{нсл} \cdot Y \cdot (X + Z) + j \cdot x_L , \quad (7)$$

Электромеханическая мощность, развиваемая ротором синхронной машины с беспазовым статором, равна приращению действительной части потока вектора Пойнтинга при переходе через границу ротор – воздушный зазор. Учитывая, что на граничной поверхности касательные составляющие напряженности магнитного поля равны $\dot{H}_{3x} = \dot{H}_{4x}$, а $\dot{E}_4 - \dot{E}_3 = v \dot{B}_{yp}$ для первой гармоники можно записать:

$$P = 2p \cdot l_\delta \cdot v \cdot \operatorname{Re} \int_0^{\tau/2} B_{yp} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot b}{\tau} + \Theta\right) \cdot H dx . \quad (8)$$

Используя это выражение, аналитически рассчитывается номинальное значение мощности P_H , подставлением в выражение (8) значение угла Θ , рассчитанного при номинальном значении фазного тока I_ϕ . Угловая характеристика

торцевого синхронного генератора и позволяет проанализировать влияние геометрических параметров на перегрузочную способность генератора.

Экспериментальные данные, показали, что расчетная математическая модель гарантирует хорошую сходимость расчетных и экспериментальных характеристик проектируемого генератора.

Расчетная и экспериментальная угловая характеристики активной мощности генератора $P = 2$ кВт представлены на рис. 5.



Рис. 5 – Угловые характеристики генератора

В третьем разделе проведен анализ степени неоднородности магнитного поля торцевого синхронного генератора и его моделирование методом конечных элементов (МКЭ) с помощью специализированного комплекса ANSYS.

Применение при разработке специализированного программного обеспечения Solid Works 2006 для создания геометрических моделей позволяет быстро и наглядно оценить результаты расчетов.

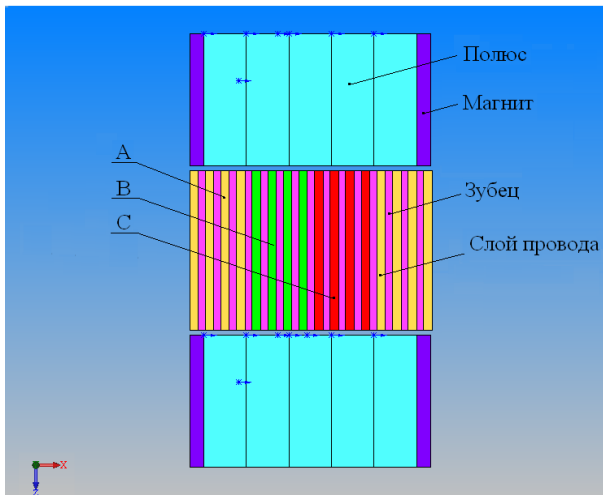


Рис. 6.- Трехмерная расчетная модель.

При решении трехмерной полевой задачи обычный пользовательский компьютер не в состоянии произвести расчет сетки магнитной системы генератора с большим количеством элементов без ее преобразования.

Расчетная модель (рис. 6) была упрощена по сравнению с реальной конструкцией приведенной на рисунках 1,2 за счет проведения исследования одной фазы модели с $P_H = 1000$ Вт, $p = 12$, а также за счет замены слоев провода в обмоточном модуле распределенной обмотки статора намотанных на пластины геометрическими объемами прямоугольной формы.

При построении КЭ модели материалы постоянных магнитов и электротехнических сталей задавались с использованием В-Н характеристик. При этом В-Н характеристики РЗМ приняты линейны, а магниты однородными, изотропными, равномерно намагниченными. Таким образом, КЭ модели не используют допущения о бесконечной магнитной проницаемости магнитопровода и построены

В большинстве проводимых исследований в среде ANSYS пользователи сводят свою задачу к плоско-параллельной модели. Такое моделирование наиболее простое и, наименее трудоемкое. Однако при таком подходе нет полной картины распределения магнитного поля. В данном же случае применение плоско-параллельной задачи невозможно из-за специфически сложной геометрической модели.

При решении трехмерной полевой

на основе реальной геометрической конфигурации исследуемых электрических машин. В связи с этим, полученные МКЭ решения можно считать «точными». Такое предположение позволяет сопоставить результаты расчетов по формулам с результатами расчетов МКЭ, и перейти к анализу погрешности аналитических решений. Для оценки точности аналитического решения использованы значения магнитной индукции в зазоре машины.

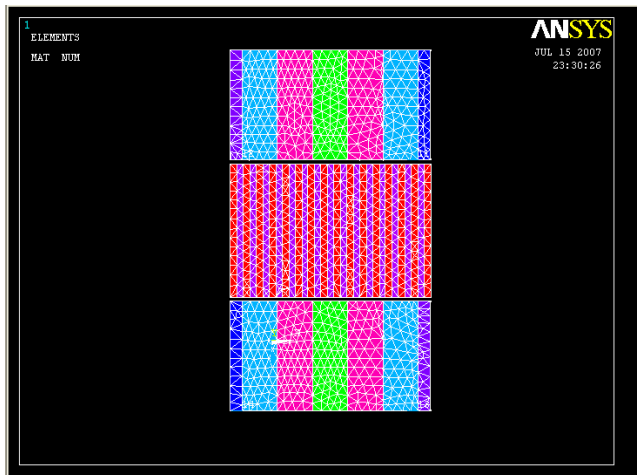


Рис. 7 – Конечно элементная модель.

Преобразованная геометрическая модель, полученная в результате конструирования активной зоны синхронного генератора, в конечно-элементную модель представлена на рис. 7. Полученная модель используется как основа для конечно-элементного анализа и реализации решения.

Наличие зубцов статора приводит к тому, что кривая магнитной индукции имеет волнообразный характер и ЭДС, индуцируемая в проводнике, лежащем в пазу якоря, имеет такой же вид.

Для сравнения качества выходного напряжения в зависимости от числа зубцов в статоре проведен анализ изменения магнитной индукции генераторов ($P = 1000 \text{ Вт}$, $p = 12$) с различным исполнением магнитной системы таблица 1.

Таблица 1. – Исследуемые магнитные системы.

Вариант	D_i , м	Z	X_{Π} , Ом	B_{δ} , Тл	P_{MAX} , Вт	U_{ϕ} , В	G_M , кг
1	0,229	216	45,256	0,668	1148	199,11	0,449
2	0,343	324	7,52	0,659	229,48	0,629	
3	0,458	432	2,405	0,638	5,301	226,56	0,809

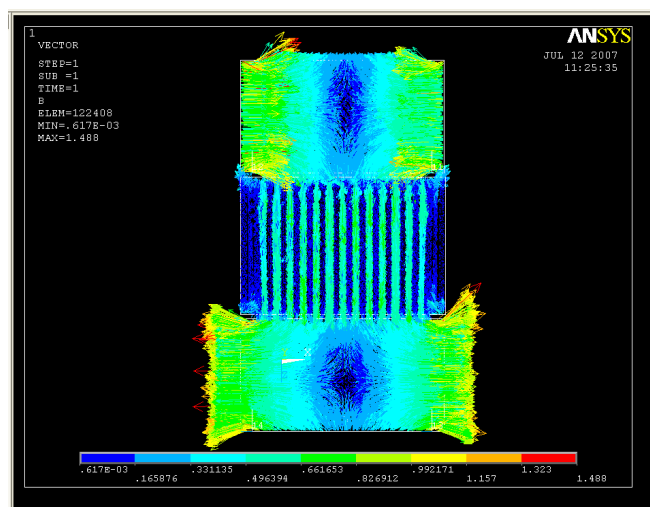


Рис. 8 – Распределение магнитной индукции в фазе статора.

Исследование неоднородности магнитного поля в торцевом синхронном генераторе выполнено на основе рассмотрения изменения магнитной индукции вдоль поверхности полюсов ротора и статора на одну фазу машины. Распределение магнитной индукции в фазе статора с числом зубцов $Z = 324$ представлено на рис.7.

Анализ рис. 8 показывает, что результаты расчета магнитной индукции в зазоре МКЭ соответствует аналитическим решениям. Полученные результаты, несмотря на упрощение расчетной трехмерной модели, имеют хорошую сходимость с двухмерной математической моделью, разброс получен-

ных результатов, несмотря на упрощение расчетной трехмерной модели, имеют хорошую сходимость с двухмерной математической моделью, разброс получен-

ных результатов составляет не более 5%, что подтверждает правильность математического аппарата для проектирования ТСГ. Так же подтверждается теоретическое заключение о том, что в машине с продольно намагниченными магнитами большая часть поля вытесняется в область рабочего зазора.

На основе полученных данных была вычислена относительная погрешность расчета. Полученные значения магнитной индукции в зазоре и погрешностей рассчитанных генераторов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. – Относительная погрешность методов расчета.

Вариант	Аналитический	Метод конечных элементов	Относительная погрешность, %
1	0,668	0,691	3,329
2	0,659	0,661	0,303
3	0,648	0,638	1,557

Результаты расчета качественно отражают значительную неоднородность поля в роторе и статоре синхронного генератора и этим подтверждают необходимость рассмотрения трехмерного распределения магнитной индукции в зазоре (рис. 8) при проектировании машин с постоянными магнитами.

Дальнейшее решение поставленной задачи сводится к рассмотрению распределения нормальной составляющей вектора магнитной индукции в зубцах статора исследуемой фазы (фаза А) для трех вариантов. Полученные результаты конечно-элементного расчета для магнитной индукции в фазе статора с числом зубцов $Z = 324$ представлены на рис. 9.

Анализ кривых распределения магнитной индукции показал, что с увеличением числа зубцов в фазе, форма кривой наиболее близка к синусоидальной, что свидетельствует о качестве выходного напряжения (рис. 9). Однако увеличение зубцов в статоре зачастую не оправдано из-за значительного увеличения массогабаритных показателей и соответственно массы дорогостоящих материалов.

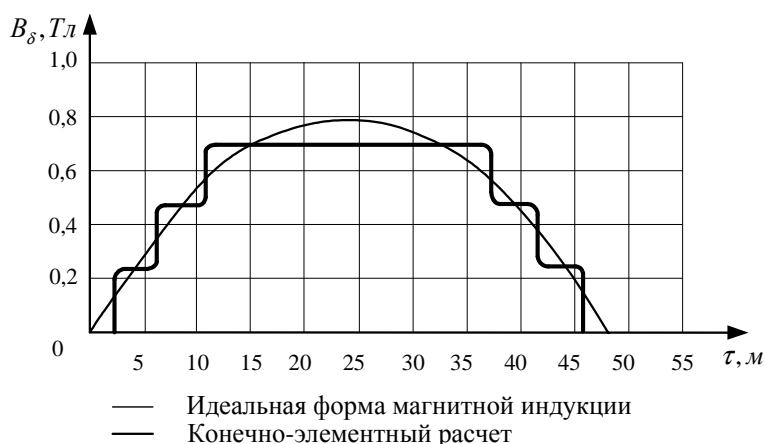


Рис. 9 – Кривые распределения индукции в фазе статора .

Выполнение генератора с малым активным диаметром не оправдано из-за увеличения высоты зубца статора и, как следствие, значительного влияния сопротивления пазового рассеяния на энергетические показатели машины. В связи с этим возникает необходимость поиска компромисса между энергетическими и массогабаритными показателями ТСГ.

Принимая во внимание, что для получения генератора на низкие частоты вращения, возникает необходимость в увеличении числа полюсов машины и, как следствие, в увеличении количества магнитов в роторе. Поэтому возникает

необходимость в определении оптимального диапазона скоростей генератора в зависимости от массы магнитов.

Кривая зависимости частоты вращения от массы магнитов в роторе для генератора мощностью $P_H = 1000 \text{ Вт}$ представлена на рис.10.

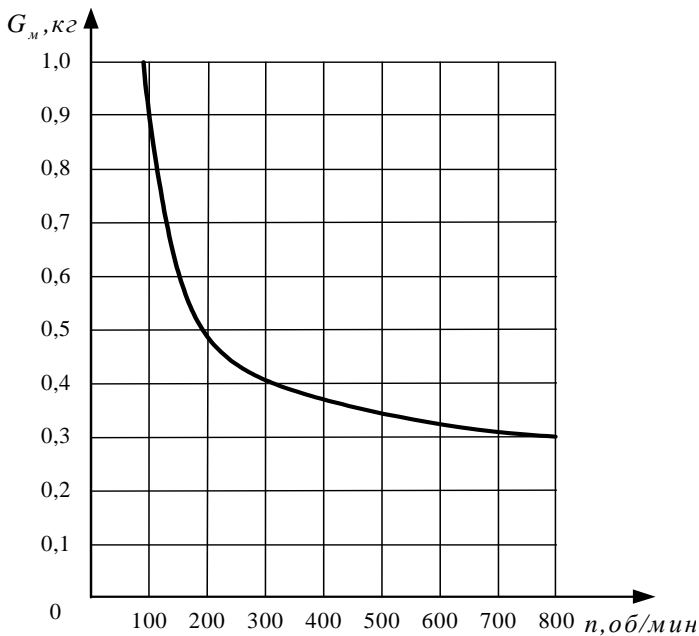


Рис. 10 – График зависимости частоты вращения от массы магнитов

Из графика зависимости частоты вращения ТСГ от массы магнитов видно что в диапазоне скоростей от 800 до 187,5 об/мин (от $p=2$ до $p=8$) масса магнитов в роторе изменяется от 0,31 до 0,52 кг т.е. увеличение массы магнитов в роторе всего лишь на 0,21 кг позволяет снизить число оборотов более чем в 4 раза, тогда как, при проектировании генератора на более низкие обороты от 187,5 до 93,75 об/мин (от $p=8$ до $p=16$) происходит резкое увеличение массы магнитов от 0,52 до 1 кг, что ведет не только к значительному увеличению радиального размера и массы генератора, но и к

существенному возрастанию стоимости проектируемой машины.

Таким образом, с целью получения удовлетворяющих массогабаритных, энергетических и стоимостных показателей возникает необходимость, в детальном подходе к выбору постоянных магнитов, в исследовании их режимов работы, а также в применении методов оптимизации геометрических параметров генератора.

Проведенный обзор существующих материалов, используемых при изготовлении постоянных магнитов, показал, что наиболее перспективными для системы возбуждения ТСГ являются спеченные магниты Nd-Fe-B.

Специфические свойства этих магнитов в сочетании с проведенным исследованием диаграммы магнитов позволили добиться повышения КПД и снижения удельной массы, а также обусловили появление новых типов конструктивного исполнения торцевого генератора, в частности машины с совокупностью чередующихся продольно намагниченных магнитов.

В четвертом разделе на основе полученных результатов приведена разработанная инженерная программа многокритериальной оптимизации методом Соболя-Статникова и экспериментальные исследования торцевого синхронного генератора с постоянными магнитами.

Целью поиска оптимальных геометрических параметров торцевого синхронного генератора является выбор наилучшего варианта, что подразумевает наличие критерия оптимальности – количественной оценки оптимизируемого показателя качества низкоскоростного торцевого синхронного генератора. К показателям качества НТСГ можно отнести: массогабаритные показатели, технологичность, надежность, качество вырабатываемой электроэнергии, суммарные

затраты на изготовление и эксплуатацию и т.д.

Расчетная модель реализована в САЕ-среде в форме приложения, реализующего расчет дифференциальных параметров электромагнитного поля в активном объеме машины и выходных ее характеристик: полезной мощности, внешней характеристики как функциональных зависимостей от реальной геометрии машины. Расчетная модель включает блок оптимизации, позволяющий сформулировать критериальные ограничения и критерии качества для конкрет-

ного случая, выполнить поиск с учетом их оптимального решения, а также построить твердотельную модель по выходным оптимизационным параметрам, позволяющую автоматически выполнять рабочие чертежи генератора. Интерфейс расчетной модели (рис. 11) реализован в соответствии со стандартами *Windows*, включает все виды меню, контейнеры кнопок, построитель графиков и другие стандартные средства.

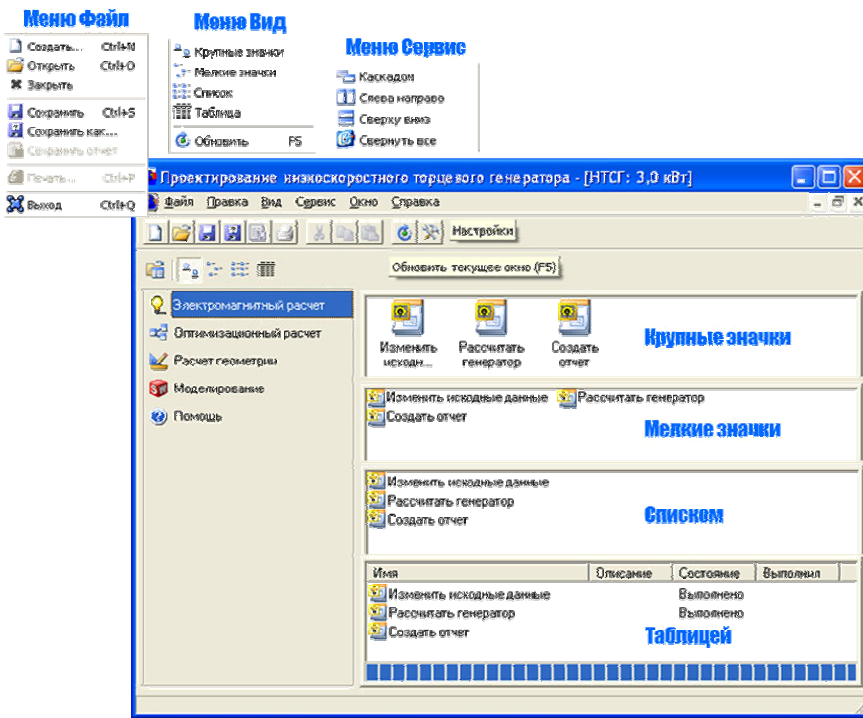


Рис. 11 – Интерфейс расчетной модели

Приложение позволяет вводить данные, читать их из файла, сохранять протоколы расчетов в виде документов, выводить их на печать, передавать подсистеме конструирования генератора и твердотельного моделирования. Ввод данных защищен от ошибок пользователя стандартными средствами и специальными алгоритмами.

Расчетная модель позволяет сформировать выходной поток данных:

- энергетические характеристики (мощность, КПД, напряжение, ток статорной обмотки);
- массогабаритные показатели, необходимые для производителя машины (массы электротехнической стали, обмоточной меди, магнитов)
- массогабаритные показатели, необходимые для потребителя (общая масса машины ее габаритные размеры);
- геометрические параметры машины (внутренний активный диаметр, активная длина статора и ротора, диаметр обмоточного провода, количество витков обмотки статора, размеры магнита, высота ярма статора и ротора, воздушный зазор);
- конструктивные параметры машины (число пазов, число полюсов, размеры полюсов и магнитов ротора, количество зубцов в обмоточном модуле).

Варьируемыми параметрами для синтеза НТСГ выбраны: внутренний активный диаметр D_i , активная длина машины l_δ , рабочий зазор δ , индукция в зазоре машины B_δ , плотность тока в проводниках обмотки статора j .

Качественные характеристики и количественная величина влияния каждого из перечисленных варьируемых параметров на характеристики генератора зависят от того, какое значение имеют при этом остальные параметры.

На первом этапе пользователь устанавливает значения параметрических ограничений. Программа автоматически формирует множество решений, удовлетворяющих заданным ограничениям.

На втором этапе, основываясь на коллекции допустимых решений, назначаются критерии качества и приоритеты, которые устанавливают весомость каждого из критериев. Далее программа автоматически выполняет проверку полученного множества на непустоту. При положительном результате проверки, на выходе получается ранжированная коллекция, с минимальным количеством решений, удовлетворяющих всем ограничениям и критериям качества.

После минимизирования коллекции, пользователь выбирает из неё окончательные варианты и сохраняет их в файле или передает на моделирование.

Сравнение результатов полученных методами многокритериальной оптимизации и однофакторного анализа, приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Сравнительный анализ методов оптимизации.

Выходные параметры	Соболь-Статников	Однофакторный анализ	%
Воздушный зазор, м	0,001	0,001	0
Индукция в воздушном зазоре, Тл	0,69	0,7	1,429
Активная диаметр, м	0,36	0,349	3,152
Активная длина, м	0,039	0,04	2,5
Плотность тока, А/мм ²	4,1	4,5	8,889
Напряжение, В	226,818	222,481	0,728
Мощность, Вт	4541	4164	9,054
Масса генератора, кг	30,069	32,377	7,676
Масса магнитов, кг	1,4256	1,513	6,131
Наружный диаметр, м	0,4467	0,4383	1,916
Индуктивное сопротивление, Ом	4,198	5,335	21,312

Из таблицы 3 видно, что применение метода Соболя-Статникова не только позволило снизить массу дорогостоящих магнитов и суммарную массу практически на 8%, но и увеличить энергетические показатели машины на 9% за счет снижения влияния индуктивного сопротивления пазового рассеяния.

После оптимизационного расчета выходной поток данных, формируемый математической моделью электромагнитного поля, может быть сохранен в файле обмена данными или передан в среду проектирования ТСГ.

Среда проектирования ТСГ реализует алгоритмы конструирования элементов генератора. Кроме основного функционала SolidWorks2006, приложение использует библиотеку API, параметризацию, уравнения связи параметров и таблицы параметров.

Конструирование статора начинается с расчета параметров эскиза (рис. 12) и твердотельной модели обмоточного модуля (рис. 13) по формулам (9) и (10):

$$\begin{cases} a = \sqrt{tn^2 + Di^2} * \sin\left(\frac{3 * \frac{180}{p * m} - 2 \arctg\left(\frac{tn}{Di}\right)}{2}\right), \\ b = De * \sin\left(\frac{3 * \frac{180}{p * m} - 2 \arcsin\left(\frac{tn}{De}\right)}{2}\right) \end{cases}, \quad (9)$$

где tn - толщина пакета, рассчитываемая по формуле:

$$tn = \frac{Z1}{6 * p} * (bz1 + dn * z_{sl} + 0,2), \quad (10)$$

m - число фаз; p - число пар полюсов; Di - активный внутренний диаметр; De - активный наружный диаметр; $Z1$ - число зубцов статора; $bz1$ - толщина зубца статора; dn - диаметр изолированного провода; z_{sl} - число слоев провода в пазу.

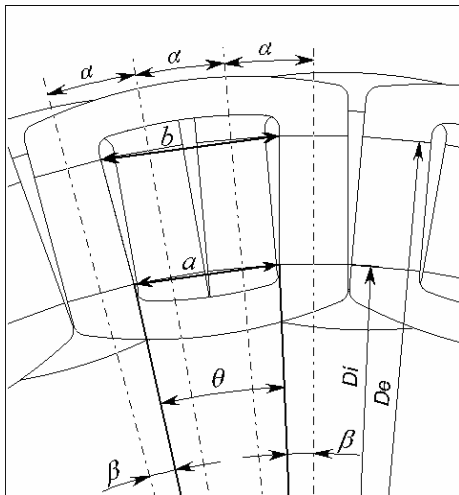


Рис. 12. – Эскиз статора.

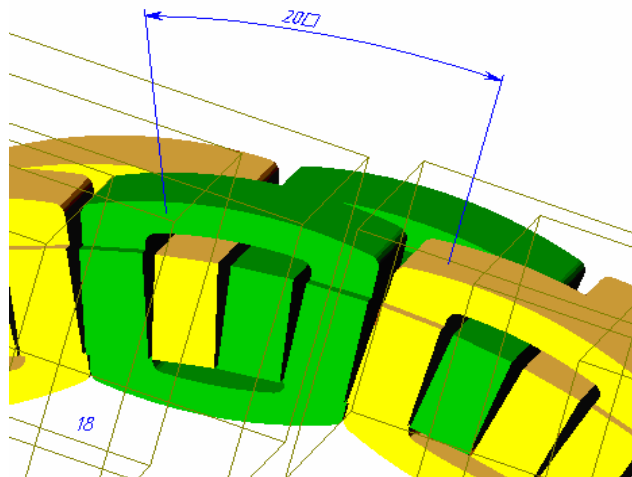


Рис. 13 – Твердотельная модель статора.

После того, как обмоточный модуль сформирован, конструируются элементы сборки, имеющие зависимые от него параметры. Одним из таких элементов является сборка обмоточных модулей, показанных на рис. 13. Обмотки статора формируются как сборка двух однотипных обмоточных модулей в круговой массив этого компонента с числом элементов, соответствующим числу полюсов торцевого синхронного генератора.

Использование приложения, реализованного в САЕ-среде и метода многокритериальной оптимизации Соболя-Статникова, позволило не только выявить оптимальное сочетание геометрических параметров генератора, с учетом заданных КПД и мощности генератора, но и многократно сократить сроки проектирования на этапе от технического задания до комплекта рабочей документации, при сокращении численности разработчиков на изделие, включающее в себя несколько тысяч компонентов (сокращение трудоемкости по сравнению с нормативной в 3–7 раз).

Используя созданное приложение, был проведен анализ влияния геометрических параметров на индуктивное сопротивление пазового рассеяния. Результаты исследования показали, что наибольшее влияние на нелинейность характеристик оказывает величина индукции в рабочем зазоре B_δ и активная длина статора l_δ , при этом влияние остальных параметров имеет вполне определенную зависимость.

Анализ изменения индуктивного сопротивления пазового рассеяния X_{II} от активной длины пакета статора l_δ (рис. 14) показал, что вид кривой обусловлен уменьшением высоты зубца h_{z1} , вследствие уменьшения числа проводников в пазу статорной обмотки $U_{псл}$. Разработанная программа электромагнитного расчета ТСГ построена таким образом, что после предварительного расчета числа проводников фазы статора происходит округление полученного результата до ближайшей четной величины, обусловленной условием построения обмоточного модуля. Это изменение происходит скачком, что определяет скачкообразное изменение X_{II} при увеличении индукции.

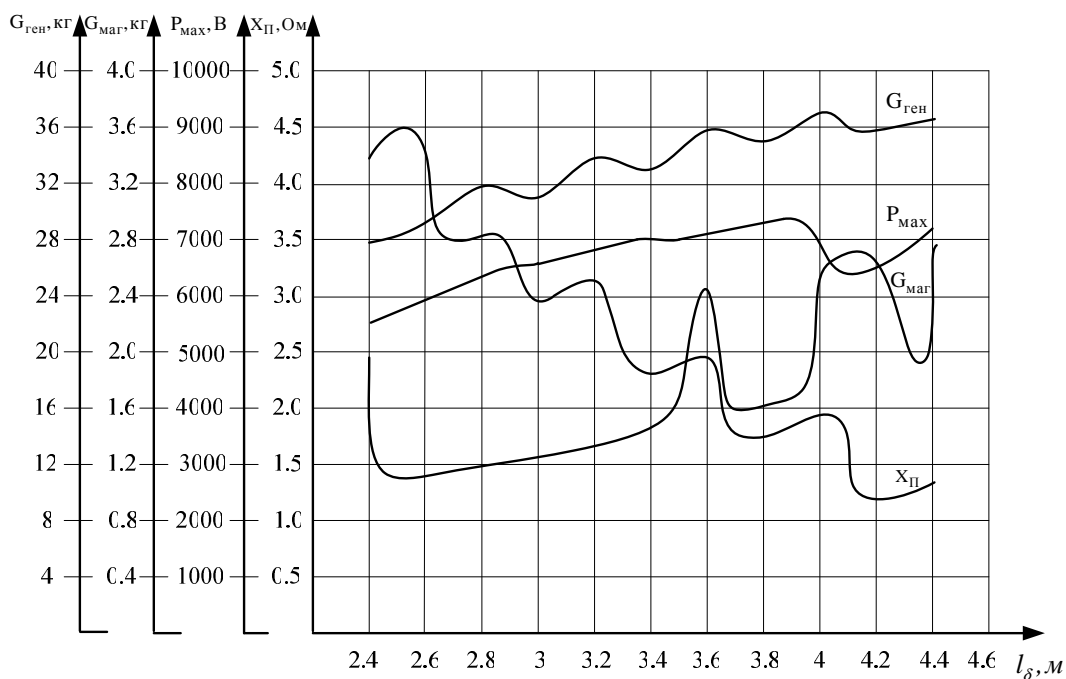


Рис. 14. – Влияние геометрических параметров на сопротивление пазового рассеяния.

С увеличением активной длины пакета статора l_δ увеличивается магнитный поток Φ_δ , число витков фазы статора уменьшается W_1 и как следствие уменьшается число проводников в пазу статора. Таким образом, после каждого округления и уменьшения числа проводников в пазу статора на 2 происходит скачкообразное снижение уточненного числа витков, что объясняет ступенчатый вид характеристик $X_{II} = f(l_\delta)$.

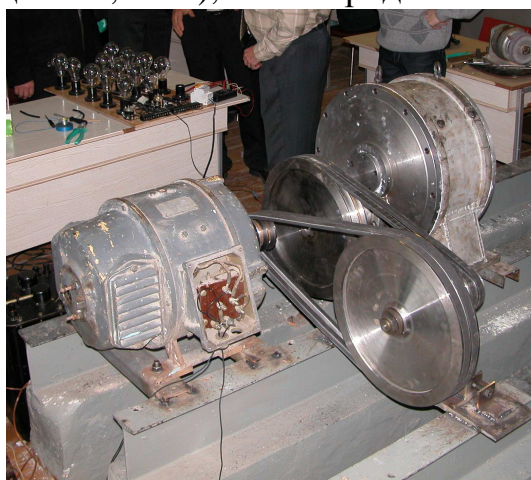
Непропорциональность изменения числа витков и увеличения индукции приводит к возрастанию массы магнитов G_m , за счет увеличения высоты магнитов h_m , и соответственно полюсов.

Уменьшение числа витков в свою очередь приводит к снижению ЭДС E_0 и выходного напряжения U_1 машины.

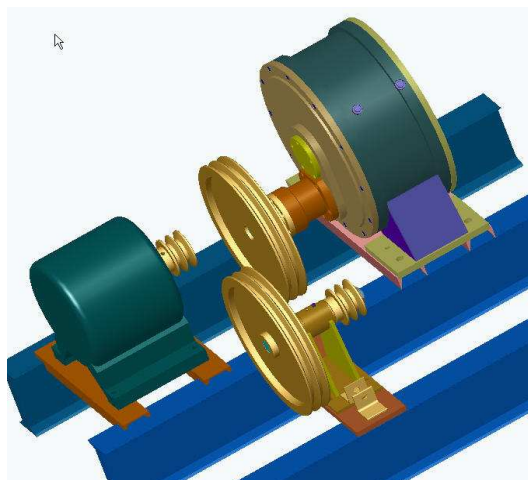
Для дальнейших исследований и оценки адекватности результатов теоретических расчетов был сконструирован и испытан макетный образец генератора с аксиальным магнитным потоком со следующими номинальными данными:

Мощность $P_H, Вт$	Напряжение $U_H, В$	Частота $f, Гц$	Число полюсов $2p$.
2000	220	50	20

Цель стендовых испытаний: проверка работоспособности торцевого синхронного генератора: снятие внешней характеристики и выходных параметров (мощности, тока), его вибродиагностика рис. 15.



(а)



(б)

Рис. 15 – Стенд для испытаний генератора
(а) фото, (б) твердотельная модель.

В таблице 4 приведены рабочие характеристики генератора (значения напряжений, тока мощности, частоты и коэффициента мощности), полученных при стендовых испытаниях.

Таблица 4 – Экспериментальные характеристики генератора

№ замера	$U_\Phi, В$	$I_\Phi, А$	$P_{A\Phi}, Вт$	$P_{B\Phi}, Вт$	$P_{C\Phi}, Вт$	$P_{3\Phi}, Вт$	f	$\cos \varphi$
1	245	0	0	0	0	0	53	-
2	235	1,7	380	376	380	1136	50	0,98
3	225	2,7	595	590	595	1780	50	0,979
4	222	3,05	668	663	667	1998	50	0,986
5	220	3,6	808	806	809	2423	50	0,978
6	205	3,95	889	890	886	2665	50	0,988

Испытания подтвердили работоспособность конструкции. Получены результаты весьма близкие к расчетным. Расхождение с расчетными характеристиками в рабочем режиме не превышает 7 %. Перегрузочная способность генератора оказалась ниже расчетной на 12 %, что объясняется прежде всего погрешностями технологии производства опытного образца и высокими значениями индуктивных сопротивлений пазового рассеяния. Более точный учет послед-

них требует уточнений в электромагнитной модели генератора. Температура обмоток во время испытаний не превышала допустимые 85° и составила 75° , что подтверждает правильность выбранных тепловых параметров и позволит в дальнейшем уменьшить сечение (а следовательно, и массу) проводников обмотки статора.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. На основе анализа существующих конструкций обоснован выбор малогабаритного герметичного низкоскоростного торцевого синхронного генератора повышенной энергетической эффективности;
2. Разработана математическая модель расчета электромагнитного поля в объеме торцевой синхронной электрической машины с применением слоистых расчетных моделей и кусочно-непрерывных собственных функций, для исследования активных зон торцевого генератора с постоянными магнитами;
3. На основании решения уравнений магнитостатики и уравнения равновесия для одной из фаз аналитические выражения для магнитной индукции реакции якоря, фазного тока и синхронного индуктивного сопротивления, необходимые для расчета (выходных внешней и угловой) характеристик генератора.
4. Разработана методика исследования НТСГ с применением программного комплекса ANSYS, основанного на методе конечных элементов, позволяющего не только уменьшить затраты при разработке новых изделий, сократить объем дорогостоящих стендовых испытаний (или отказаться от них).
5. С помощью разработанного программного комплекса в пакете ANSYS был проведен расчет нескольких торцевых синхронных генераторов с различным числом зубцов в фазе статора. Для сравнения качества выходного напряжения, проведены исследования и определена зависимость изменения магнитной индукции от величины воздушного зазора для возможности выбора в каждом конкретном случае их значений, с целью получения удовлетворяющих энергетических показателей.
6. Используя созданное приложение, реализованное в САЕ-среде, и метода многокритериальной оптимизации Соболя-Статникова, проведен комплекс теоретических исследований для оптимизации геометрии магнитной системы по критерию минимума массы активных материалов и максимума перегрузочной способности при заданном напряжении, разработано программное обеспечение в среде Delphi для твердотельного моделирования
7. Формируемый математической моделью электромагнитного поля выходной поток геометрических и энергетических показателей НТСГ, является компонентом среды его проектирования, реализующей алгоритмы конструирования элементов генератора, многократно сокращающие сроки проектирования на этапе от технического задания до комплекта рабочей документации.
8. Исследована зависимость требуемой массы магнитов от частоты вращения ротора, с целью получения оптимальных массогабаритных, энергетических и стоимостных показателей.

9. Результатами проведенных натурных испытаний подтверждены правильность выбранных методов и адекватность созданных математических моделей. Расхождение экспериментально полученных данных с расчетными характеристиками в рабочем режиме не превышают 12 %.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Головин, М. П. Разработка конструкции и технологии производства микроГЭС, изготовление опытной партии. Отчет по проекту, регистрационный № 0120.0503869/ М. П. Головин, А. Л. Встовский, **К. С. Федий** и др.// Красноярск, 2005г. – 268 С.
2. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2006121299 Торцевая электрическая машина. / М. П. Головин, А. Л. Встовский, **К. С. Федий**, Е. А. Спирин. - Заявлено 15.06.06. – 7 С.
3. **Федий, К. С.** Генератор возобновляемых источников энергии. / **К. С. Федий**, А. Л. Встовский. // Молодежь сибиря - науке России. Сборник материалов Межрегиональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Красноярск 2004 г. – С. 215–217.
4. **Федий, К.С.** Некоторые особенности расчета электрических машин с постоянными магнитами. / **К.С. Федий**, А.Л. Встовский. // Межвуз. сб. науч. тр. Оптимизация режимов работы электротехнических систем. - Красноярск, ИПЦ КГТУ 2004. – С. 15 – 18.
5. **Федий, К. С.** Математическое моделирование синхронного генератора торцевой конструкции. /**К. С. Федий**// В сб. тр. XI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. - ТПУ 2005. – С. 172 – 175.
6. **Федий, К.С.** Современные технологии проектирования низкоскоростного синхронного генератора для свободнопоточной микроГЭС. / М.П. Головин, А.Л. Встовский, С.С. Кузьмин, К.С. Федий // В сб. Инновационное развитие регионов Сибири: Материалы Межрегиональной научно-практической конференции, - Красноярск: ИПЦ КГТУ 2006. – С. 271–275.
7. **Федий, К.С.** Анализ и расчет синхронных машин с возбуждением от постоянных магнитов./К.С. Федий, А.Л. Встовский. // В межвуз. сб. статей. Оптимизация режимов работы электротехнических систем.- Красноярск 2006 г. – С. 272–276.
8. **Федий, К. С.** Свободнопоточные микроГЭС, как эффективный вариант энергоснабжения удаленных территорий. /**К.С. Федий**, М. П. Головин, Л. Н. Головина, Н. А. Колбасина, В. Д. Мокеев. // Труды КГТУ №3. Красноярск ИПЦ КГТУ, – 2006. – С. 252–256.
9. **Федий, К. С.** Поиск оптимальных электромагнитных параметров торцевого синхронного генератора./ **К.С. Федий** Н.В. Атрохова Д. И. Морозов// CAD/CAM/CAE/CALS Бюллетень №2(8) 2006г. – С. 15–19.
10. **Федий, К.С.** Оптимизационный синтез геометрических параметров торцевой синхронной машины./ **К.С. Федий**, Н.В. Атрохова, Д.И. Морозов// «Известия Вузов Электромеханика» №5 – 2007г. – С. 24–29.

Федий Константин Сергеевич
**Низкоскоростной торцевой синхронный генератор
автономных источников электроснабжения**

Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Подписано в печать 11.10.2007. Заказ № _____.

Формат 60×90/16. Усл. Печ. Л. 1. Тираж 100 экз.

Типография Политехнического института
ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»