

На правах рукописи

УДК 621.313.32



Иванов Николай Сергеевич

МНОГОПОЛЮСНЫЕ СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
ОБРАЩЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Специальность 05.09.01

Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» ФГБОУВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель:	Ковалев Константин Львович доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Геча Владимир Яковлевич Доктор технических наук, зам. ген. дир. по научной работе ОАО «Корпорация ВНИИЭМ»
Ведущая организация:	Савенко Валерий Ананьевич Кандидат технических наук, зам. гл. конструктора ОАО «Аэроэлектромаш» ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново

Защита состоится «18» декабря 2014 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при ФГБОУВПО «МАИ (НИУ)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское ш., д.4, Ученый совет МАИ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Отзывы на автореферат в количестве двух экземплярах, заверенных печатью, просим отправлять по указанному адресу.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 года.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 212.125.07  
к.т.н.



Степанов В.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современный уровень потребления электроэнергии определяет повышенные требования к электромеханическим преобразователям. Появление таких новых материалов, как высококоэрцитивные постоянные магниты и высокотемпературные сверхпроводники, позволяет увеличить удельную мощность до 2-3 кВт/кг для традиционных электрических машин и до 4-6 кВт/кг для специальных электрических машин аэрокосмической техники. Темпы роста потребления электроэнергии определяют увеличение генерирующих мощностей. Развитие перспективных транспортных систем, таких как более электрифицированный самолет (БЭС) и полностью электрифицированный самолет (ПЭС), так же увеличивает требования к удельной мощности современных электромеханических преобразователей. Однако, дальнейшее увеличение мощности единичной электрогенерирующей установки зачастую невозможно лишь за счет увеличения массы и габаритов электрического генератора.

Разработка новых типов электромеханических преобразователей (ЭМП), особенно на основе современных высокотемпературных сверхпроводящих материалов (ВТСП), требует, в первую очередь, разработки соответствующих методик расчета и проектирования таких ЭМП.

Большая часть генераторов, используемых в преобразовании механической энергии в электрическую, представляют собой синхронные генераторы различного исполнения.

В настоящее время большое распространение получили синхронные генераторы с постоянными магнитами, благодаря высокому КПД, надежности и простоте конструкции. В то же время генераторы, включенные непосредственно в сеть, требуют регулирования. Для обеспечения регулирования применяются синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением.

Основные преимущества синхронной машины обращенной конструкции:

1. Возможность выполнения конструкций, которые не могут быть реализованы при использовании ЭМП традиционной конструкции;
2. Увеличенный кинетический момент ротора;

3. Возможность реализации криогенных ЭМП обращенной конструкции с существенно более высокими показателями удельной мощности.

В литературе широко рассмотрены вопросы расчета и проектирования синхронных машин, как с электромагнитным возбуждением, так и с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) традиционной конструкции (с неподвижным якорем на статоре и вращающимися обмотками возбуждения, или ПМ индуктора в роторе). В литературе отсутствуют данные о сопоставительном анализе машин обращенной конструкции с возбуждением от ПМ и от обмоток возбуждения, не приведены оценки эффективности использования тех или иных типов машин (с ПМ или с электромагнитным возбуждением) обращенной конструкции, отсутствуют методики оценки эффективности использования того или иного типа машин с точки зрения мощности единичного агрегата. В частности вопросы аналитических методик, позволяющих проводить оценку рационального использования в качестве источника магнитодвижущей силы (МДС) ПМ или обмоток возбуждения, выполненных из электротехнических обмоточных проводов, или из сверхпроводящих проводов, освещен недостаточно полно.

Современный уровень развития сверхпроводниковых технологий делает возможным разработку электрических машин обращенной конструкции с улучшенными массогабаритными показателями.

В этой связи тема диссертационной работы является актуальной.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы является разработка аналитических методик расчета многополюсных синхронных электрических машин обращенной конструкции с магнитоэлектрическим и электромагнитным возбуждением.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработать аналитической методики расчета синхронных электрических машин обращенной конструкции с возбуждением от постоянных магнитов;
- разработать аналитической методики расчета синхронных электрических машин обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением, в том числе на основе сверхпроводников;

– провести сопоставительный анализ машин обращенной конструкции с возбуждением от ПМ и обмоток возбуждения;

**Методы исследований.** При решении задач диссертации использовались методы математической физики, теории поля, электромеханики и прикладной сверхпроводимости; численные методы решения уравнений в частных производных (метод конечных элементов). Для решения уравнений и построения диаграмм использовался пакет математического моделирования MathCAD 11; для решения задач методом конечных элементов использовался пакет прикладных программ Elcut Professional 5.4; эскизное проектирование было осуществлено на базе пакета Компас-3D V12; для построения графиков использовалась программа Grapher 7.0.

**Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:**

– разработана новая методика электромагнитного расчета синхронных машин обращенной конструкции с возбуждением от постоянных магнитов, основанная на решении задач о распределении двумерных магнитных полей в активной зоне машины;

– разработана новая методика расчета синхронных машин обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением, включая возбуждение на основе высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) проводов, основанная на решении задач о распределении двумерных магнитных полей в активной зоне машины;

– получены аналитические методики, учитывающие магнитные свойства материалов, структуру и геометрию активной зоны, число пар полюсов и обмоточные параметры;

– выведен критерий сравнения и проведен сравнительный анализ синхронных машин обращенной конструкции с возбуждением от ПМ и электромагнитным возбуждением.

**Практическая ценность работы.**

– Разработаны методики расчета распределения двумерных магнитных полей в синхронных электрических машинах обращенной конструкции.

– Разработаны методики поверочного и проектного расчета обращенной синхронной электрической машины с электромагнитным возбуждением и на основе ПМ;

– Сформулирован критерий оценки целесообразности применения ВТСП проводов при проектировании ЭМП обращенной конструкции;

– На основе решения задач о распределении двумерных магнитных полей получен критерий, позволяющий проводить оценку целесообразности применения ОВ или ПМ в индукторе машин обращенной конструкции.

#### **Реализация результатов.**

Материалы диссертации используются в курсах лекций по дисциплинам «Электромеханика», «Криогенные и сверхпроводниковые электроэнергетические установки», «Основы научных исследований», читаемых в МАИ, внедрены в ряд НИР и НИОКР, а также вошли в методические пособия по курсовому и дипломному проектированию, предназначенные для студентов электромеханических и энергетических специальностей.

#### **Апробация работы.**

Основные результаты обсуждались и докладывались на:

1. Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике-2012». 17-20 апреля 2012 г., МАИ, г. Москва;
2. Международном межотраслевом молодежном научно-техническом форуме «Молодежь и будущее авиации и космонавтики-2012» (результаты отмечены дипломом третьей степени), г. Москва;
3. Двадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», 27-28 февраля 2014 г., МЭИ, г. Москва;
4. Девятой Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия -2014», 16-17 апреля 2014 г., ИГЭУ, г. Иваново;
5. Конкурсе докладов по тематике РНК СИГРЭ, 17 апреля 2014 г., ИГЭУ, г. Иваново.
6. Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике-2014», 22-24 апреля 2014 г., МАИ, г. Москва

#### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 3 работы в журналах, входящих в перечень ВАК.

#### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем основного текста диссертации – 139 страниц, включающих 60 рисунков, 14 таблиц. Список литературы состоит из 87 наименований.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Аналитическая методика расчета синхронных машин обращенной конструкции с возбуждением от ПМ, учитывающая полюсность машины, геометрию и структуру активной зоны, а также параметры постоянных магнитов индуктора.

2. Аналитическая методика расчета синхронной машины обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением, включая возбуждение на основе современных ВТСП проводов, учитывающая геометрию активной зоны машины, число пар полюсов и параметры ОВ.

3. Критерий оценки целесообразности применения ОВ или ПМ в индукторах синхронных машин обращенной конструкции, основанный на полученном значении МДС обмотки возбуждения, эквивалентном значению МДС ПМ.

4. Критерий оценки целесообразности применения ВТСП проводов в обмотке возбуждения при проектировании ЭМП обращенной конструкции.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены области применения синхронных машин обращенной конструкции, определены цели, задачи, методы исследований и основные научные результаты, выносимые на защиту, изложена научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** проводится краткий обзор областей применения многополюсных синхронных машин обращенной конструкции с возбуждением от ПМ и с электромагнитным возбуждением. Указана возможность их применения в составе гидроэлектростанций, ветроэнергетических установок (ВЭУ), в качестве моторколес различного назначения, в качестве мотор-генераторов кинетических накопителей энергии. Отмечены возможные пути реализации перспективных более электрифицированного и полностью электрифицированного самолета на основе применения синхронных машин с использованием эффекта сверхпроводимости.

Приведены основные преимущества и недостатки рассматриваемых машин. Так магнитоэлектрические многополюсные синхронные машины обладают следующими преимуществами:

- высокая надежность и простота конструкции из-за отсутствия вращающейся обмотки на роторе и возбuditеля;
- сниженные эксплуатационные расходы;
- высокий КПД и уменьшенный нагрев из-за отсутствия потерь на возбуждение и в скользящем контакте;
- имеют меньшие по величине радиопомехи, благодаря отсутствию скользящих контактов;
- имеют малую постоянную времени.

Однако такие синхронные генераторы не допускают глубокого регулирования выходного напряжения, имеют относительно низкий предел перегрузочной способности. Вместе с тем машины с электромагнитным возбуждением позволяют осуществлять более глубокое регулирование выходного напряжения путем изменения потока возбуждения.

Также в главе проведен анализ научных публикаций по методикам расчета магнитных полей и параметров многополюсных электрических машин. Показано, что вопросы, связанные с расчетом и проектированием электрических машин обращенной конструкции в литературе рассмотрены недостаточно подробно.

**Во второй главе** представлена аналитическая методика расчета многополюсных синхронных электрических машин обращенной конструкции с постоянными магнитами. В рассматриваемой конструкции индуктор находится на вращающейся втулке, в которой закреплены постоянные магниты, а внутренний якорь с  $m$ -фазной  $p$ -полюсной обмоткой неподвижен. Конструктивная схема синхронной машины обращенной конструкции с ПМ приведена на рисунке 1а. Расчетная схема приведена на рисунке 1б.



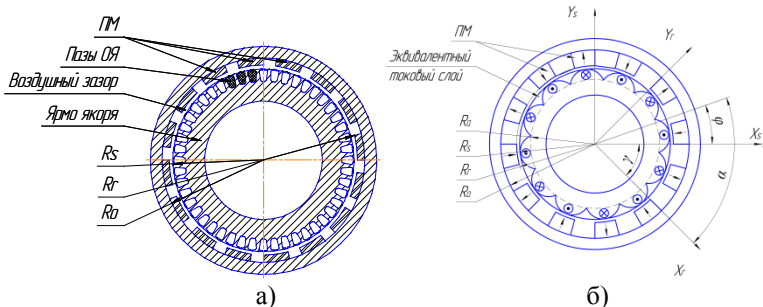


Рисунок 1. Конструктивная схема обращенной синхронной машины с ПМ

При постановке задачи расчета двумерных магнитных полей принимаются следующие основные допущения:

1. Многофазная обмотка якоря заменяется эквивалентным токовым слоем, расположенным на радиусе  $R_a$  ( $R_r > R_a > R_s$ ) с линейной плотностью  $J_0$ , синусоидально распределенной по угловой координате  $\varphi$ . В этом случае выражение для эквивалентного токового слоя  $m$ -фазной  $p$ -полюсной обмотки якоря может быть записано как

$$J = J_0 \sin(p\varphi) \delta(\rho - R_a), \quad (1)$$

где  $\delta(\rho - R_a)$  – дельта-функция,  $J_0 = m i_m W_a K_a / \pi R_a$  – линейная плотность тока,  $W_a$  – число витков фазы обмотки якоря (ОЯ),  $i_m$  – амплитудное значение тока статора,  $K_a$  – обмоточный коэффициент.

2. Вектор намагниченности всех постоянных магнитов  $M$  имеет только радиальную компоненту ( $M\{0, M\rho\}$ ). На рисунке 2а показана форма кривой радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре, полученная МКЭ и приближение реального распределения ступенчатой функцией. Пространственная зависимость магнитной индукции  $B$  в области с ПМ от угла по окружности зазора в первом приближении может быть представлена в виде знакопереющейся ступенчатой функции с периодом  $2\tau$  (рисунок 2б). Здесь  $\tau$  – полюсное деление,  $\Delta = \alpha_p \tau$  – область, занятая ПМ (область полюсного перекрытия),  $\alpha_p$  – коэффициент полюсного перекрытия,  $B_r$  – остаточная индукция ПМ.

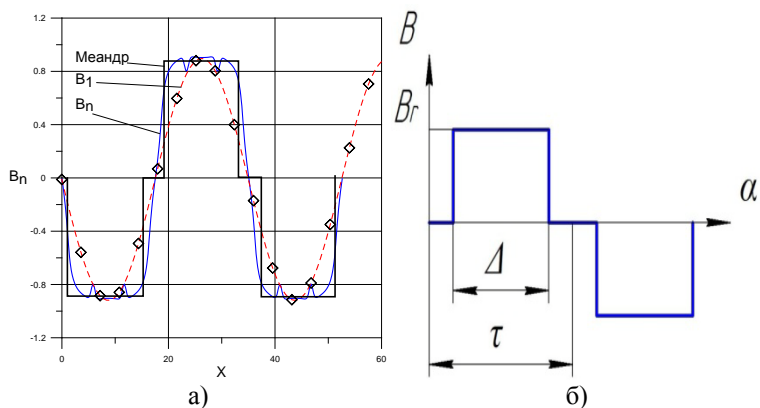


Рисунок 2. а – форма кривой радиальной составляющей магнитной индукции в воздушном зазоре, б – пространственная зависимость магнитной индукции  $B$  в области с ПМ

Раскладывая распределение  $B$  в ряд Фурье, можно получить выражение для амплитуды первой гармоники ряда.

В данной постановке принимается следующее допущение: отсутствие потоков рассеяния, что обуславливает сохранение потока по радиальной компоненте. В этом случае намагниченность ПМ может быть задана как:

$$M = M_0 \frac{R_r}{\rho} \cos(\alpha), \quad (2)$$

где  $M_0 = 4/\pi B_r \sin(\pi\Delta/2\tau)$ , так как предполагается, что магнит находится в магнитопроводе с малым зазором и индукция ПМ равна остаточной магнитной индукции;  $B_r$  – остаточная магнитная индукция ПМ.

3. Ярмо якоря и ярмо индуктора считается ненасыщенным, т.е. их относительная магнитная проницаемость принимается равной бесконечности ( $\mu_{\text{я}} \rightarrow \infty, \mu_{\text{и}} \rightarrow \infty$ ).

4. Машина считается достаточно длинной,  $\tau/L_s \ll 1$  (здесь  $\tau$  – полюсное деление,  $L_s$  – активная длина машины).

С учетом принятых допущений, задача о распределении стационарных двухмерных магнитных полей в активной зоне

электрической машины обращенной конструкции с постоянными магнитами в роторе описывается системой уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \bar{B} = 0, \\ \operatorname{rot} \bar{H} = J_0 \delta(\rho - R_a). \end{cases} \quad (3)$$

С соответствующими граничными условиями на границе раздела сред с различными магнитными проницаемостями:

$$[H_{\tau}] = 0, [B_n] = 0. \quad (4)$$

Вводя векторный магнитный потенциал  $A$  ( $B = \operatorname{rot}(A)$ ), задача о распределении стационарных двумерных магнитных полей в синхронной машине обращенной конструкции с постоянными магнитами сводится к решению уравнения Пуассона относительно  $A$ :

$$\Delta A = \mu_0 J_0 \sin(p\phi) \delta(\rho - R_a). \quad (5)$$

На основе решения уравнения (5) были получены алгебраические выражения для векторного магнитного потенциала в различных областях машины. Структура решения для векторного магнитного потенциала в активной зоне машины обращенной конструкции с возбуждением от ПМ имеет вид:

– в воздушном зазоре:

$$A_{\delta} = \frac{\mu_0 m_i m_w K_a}{2p\pi} \left\{ \begin{aligned} & \left[ \left( \frac{\rho}{R} \right)^{-p} + a \frac{\rho^{2p}}{p} + a \frac{R^{2p}}{p} \frac{s}{\rho^p} + \frac{R^p}{\rho^p} \right] \sin(p\phi) + \\ & + c \frac{\rho^{2p}}{p} + \frac{R^{2p}}{\rho^p} \cos(p\phi) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

– в области ПМ:

$$A_m(\rho, \phi) = \frac{M_0 R_r}{p} \sin(p\phi + p\gamma) + \left[ d_1 \rho^p + d_2 \rho^{-p} \right] \sin(p\phi) + \left[ d_3 \rho^p + d_4 \rho^{-p} \right] \cos(p\phi) \quad (7)$$

где  $a_p, c_p, d_1, d_2, d_3, d_4$  – неизвестные константы, определяемые из граничных условий. Их явный вид приведен в данной работе в главе 2.

Главное индуктивное сопротивление  $X_a$  может быть найдено через энергию магнитного поля в активной зоне машины от токов статора при нулевых значениях намагниченности ПМ ротора ( $M_0=0$ ), которая записывается как  $W = 1/2 \int J A dV$ . После

интегрирования получаем выражение для энергии магнитного поля в активной зоне машины. Энергия одной фазы  $W_1$  находится как отношение полной энергии к числу фаз ( $W_1 = W/m$ ).

Используя соотношения  $W_1 = LI_c^2/2$ ,  $X_a = \omega L$ ,  $I_c = i_m/\sqrt{2}$  – действующее значение тока статора, получим выражение для главного индуктивного сопротивления  $X_a$ :

$$X_a = 2\omega L_s \frac{mW_a^2 K_a^2 \mu_0}{\pi p} \begin{pmatrix} -2 & -2 \\ R_1 + R \\ -2 & -2 \\ R_1 - R \end{pmatrix} \quad (8)$$

Действующее значение ЭДС ротора  $E_0$  может быть найдено через поток от постоянных магнитов ротора при нулевых токах статора, используя соотношения  $E_0 = \pi\sqrt{2}K_a W_a f\Phi_m$ ,  $\Phi_m = 2/\pi \tau L_s B_m$ ,  $\tau = \pi/p R_s$ . В итоге, ЭДС холостого хода запишется как:

$$E_0 = \pi 2\sqrt{2}K_a W_a fL_s \frac{1}{p} \frac{R_r M_0 (R_1 - 1)R}{R_1 - R} \quad (9)$$

На рисунке 3 приведены зависимости главного индуктивного сопротивления, ЭДС холостого хода и электромагнитной мощности от числа пар полюсов и размеров ОБ, построенные на основе полученных аналитических соотношений. Из рисунка 3 видно, что и  $E_0$ , и  $X_a$  убывают с ростом числа пар полюсов. Это обусловлено увеличением относительного зазора  $\bar{R} = (R_s/R_r)^p$  с ростом числа пар полюсов и, соответственно, увеличением потока рассеяния.

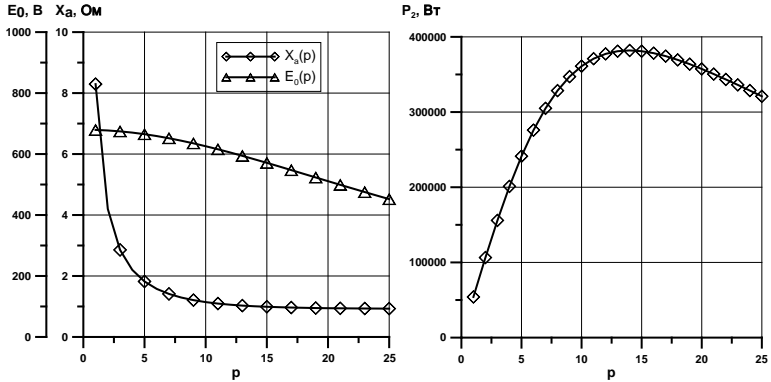


Рисунок 3. Влияние числа пар полюсов на ЭДС и  $X_a$ (слева), на  $P_2$  (справа)

На основе векторной диаграммы синхронной машины получены угловые характеристики исследуемой машины. На рисунке 3 представлена зависимость выходной мощности машины от тока якоря для различного значения намагниченности ПМ в роторе. Из рисунка 4 видно, что с ростом намагниченности ПМ становится выше и мощность машины. Это говорит о перспективности применения ВТСП криомагнитов с высокими значениями захваченных магнитных полей в роторе, т.к. в этом случае возможно увеличить перегрузочную способность данного класса машин в несколько раз.

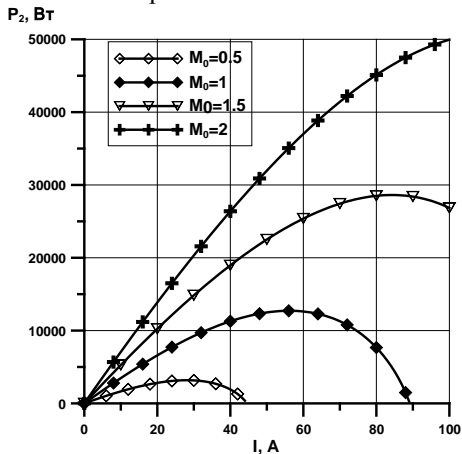


Рисунок 4. Зависимость выходной мощности машины от тока якоря при различной величине намагниченности ПМ в роторе

На основе теоретических результатов, полученных в главе 2, разработана методика проектного расчета основных параметров синхронной машины обращенной конструкции с возбуждением от ПМ.

**В третьей главе** представлена аналитическая методика расчета многополюсных синхронных электрических машин обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением.

Конструктивная и расчетная схемы неявнополюсной многополюсной синхронной машины обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением представлены на рисунке 5.

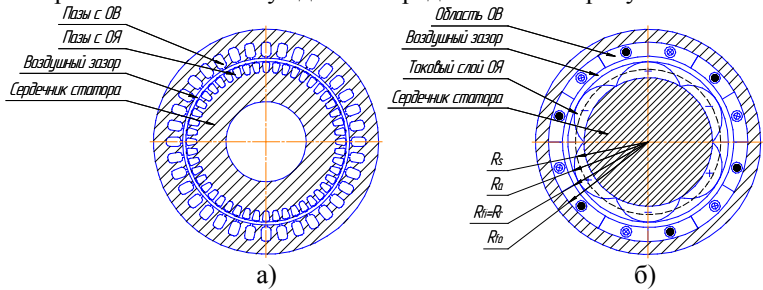


Рисунок 5. Схема обращенной многополюсной синхронной машины: а – конструктивная, б – расчетная

При постановке задачи расчета двумерных магнитных полей принимаются те же основные допущения, что и в главе 2. При этом обмотка возбуждения заменяется кольцевой зоной с равномерно распределенной знакопеременной плотностью тока.

С учетом сделанных допущений задача о распределении двумерных магнитных полей может быть сведена к уравнению Пуассона:

$$\Delta A = \mu_0 J \Pi + \mu_0 J_0 \sin(p\phi) \delta(\rho - R_a), \quad (10)$$

где  $J$  – плотность тока в обмотке возбуждения;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума,  $\delta(\rho - R_a)$  – дельта функция;  $\Pi$  – ступенчатая функция, учитывающая влияние воздушных промежутков между полюсами обмотки возбуждения;  $J_0 = \frac{m i_m W_a K_a}{\pi R_a}$  – линейная плотность тока,  $W_a$  – число витков фазы ОЯ,  $i_m$  – амплитудное значение тока статора,  $K_a$  – обмоточный коэффициент.

Для векторного магнитного потенциала  $A$ , в силу принципа суперпозиции, распределение магнитных полей в активной зоне машины может быть представлено как:

$$A = A_s + A_r. \quad (11)$$

Здесь:  $A_s$  – решение от токового слоя статора,  $A_r$  – решение от токов ротора. При этом  $A_s$  и  $A_r$  удовлетворяют соответствующим граничным условиям на границах раздела сред с различными магнитными проницаемостями.

На основе решения уравнения Пуассона были получены выражения для векторного магнитного потенциала в различных областях машины:

– область обмотки возбуждения (решение от токового слоя якоря):

$$A_{sf} = (t_1 \sin(p\varphi) + t_2 \cos(p\varphi))\rho^p + (t_3 \sin(p\varphi) + t_4 \cos(p\varphi))\rho^{-p},$$

– область воздушного зазора (решение от токового слоя якоря):

$$A_{s\delta} = \frac{\mu_0 m i_m W_a K_a}{2p\pi} \left\{ \left[ \left( \frac{\rho}{R_s} \right)^{-p} + a_p \rho^p + a_p \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} + \frac{R_s^p}{\rho^p} \right] \sin(p\phi) + \right. \\ \left. + c_p \left( \rho^p + \frac{R_s^{2p}}{\rho^p} \right) \cos(p\phi) \right\}$$

– область обмотки возбуждения (решение от токов обмотки возбуждения)

$$A_f = \frac{2\mu_0 w_f i_f}{\pi(R_{fo}^2 - R_{fi}^2)} \frac{k_f}{p(p+2)} \times \\ \times \left\{ \left[ \left( \frac{R_{fo}}{\rho} \right)^{-p+2} \frac{2+p}{2-p} - \left( \frac{R_{fi}}{\rho} \right)^{p+2} \frac{2-p}{2-p} \right] \rho^2 + \frac{\rho^p}{R_{fo}^{2p}} \left( R_{fo}^{p+2} - R_{fi}^{p+2} \right) \right\} \sin(p\varphi) + \\ + (e_1 \sin(p\varphi) + e_2 \cos(p\varphi))\rho^p + (e_3 \sin(p\varphi) + e_4 \cos(p\varphi))\rho^{-p}$$

– область воздушного зазора (решение от токов обмотки возбуждения):

$$A_{\delta r} = \frac{2\mu_0 w_f i_f k_f}{\pi(R_{fo}^2 - R_{fi}^2) p} \times$$

$$\times \left( \frac{R_{fo}^{-p+2} - R_{fi}^{-p+2}}{2-p} + \frac{1}{R_{fo}^{2p}} \frac{R_{fo}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}}{2+p} \right) \rho^p \sin(p\varphi) +$$

$$+ (f_1 \sin(p\varphi) + f_2 \cos(p\varphi)) \rho^p + (f_3 \sin(p\varphi) + f_4 \cos(p\varphi)) \rho^{-p}$$

На основе решения уравнения Пуассона были построены картины распределений магнитных полей, образованных токами индуктора и токовым слоем якоря.

Используя подход, реализованный в главе 2, были определены основные характеристики машины:

– ЭДС холостого хода

$$E_0 = 2\pi \sqrt{2} K_a W_a f L_s G R_s^p \frac{1}{2+p} \frac{2R_{fo}^{2p}}{R_{fo}^{2p} - R_s^{2p}} \times$$

$$\times \left( \frac{2+p}{2-p} R_{fi}^{-p+2} R_1 + R_{fo}^{-p+2} R_2 \right),$$

$$\text{где } G = \frac{2\mu_0 w_f i_f k_f}{\pi(R_{fo}^2 - R_{fi}^2) p}, \quad R_1 = \frac{R_{fo}^{-p+2} - R_{fi}^{-p+2}}{R_{fi}^{-p+2}},$$

$$R_2 = \frac{R_{fo}^{p+2} - R_{fi}^{p+2}}{R_{fo}^{p+2}}, \quad k_f - \text{обмоточный коэффициент ОВ; } i_f - \text{ток}$$

ОВ;  $w_f$  – полное число витков всей ОВ.

– главное индуктивное сопротивление



$$X_a = 4f \frac{L_s W_a^2 K_a^2 \mu_0 m}{p} \left( \frac{R_{fo}^{2p} + R_s^{2p}}{R_{fo}^{2p} - R_s^{2p}} \right) \quad (13)$$

На основе полученных аналитических соотношений проведен анализ влияния полюсности машины и высоты ОВ на основные характеристики и мощность машины (рисунок 6). Из рисунка 6 видно, что с увеличением полюсности машины ЭДС и главное индуктивное сопротивление резко снижаются, а увеличение высоты ОВ приводит к увеличению мощности, но при некотором значении внешнего радиуса ОВ характер зависимости меняется, и выходная мощность начинает убывать.

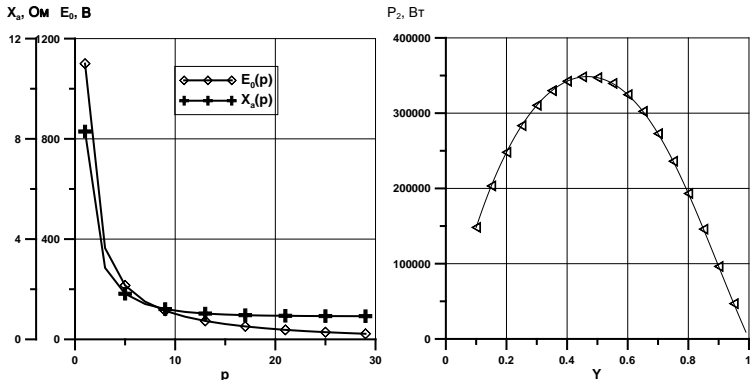


Рисунок 6. Влияние числа пар полюсов на ЭДС и  $X_a$  (слева) и величины ОВ на мощность (справа) машины

Используя аналитические соотношения, полученные в главах 2 и 3, проведено сопоставление основных параметров машин с возбуждением от ПМ и с электромагнитным возбуждением. Рассмотрев две машины с одинаковой геометрией активной зоны, равным числом пар полюсов, эквивалентными обмоточными параметрами статоров и равной интенсивностью охлаждения якоря, получено выражение для оценки минимального значения МДС ОВ машины с электромагнитным возбуждением, которая необходима для достижения заявленного уровня мощности машины с ПМ:

$$F = \frac{M_0 (R_o^{2p} - R_r^{2p}) (2+p) \pi (R_o^2 - R_r^2)}{4 \mu_0 K_f R_o^{2p} R_r \left( R_1 \frac{2+p}{2-p} + \left( \frac{R_o}{R_r} \right)^{-p+2} R_2 \right)} \quad (14)$$

Выражение (14) позволяет определить минимальную величину МДС, которую необходимо создать, чтобы выходная мощность генератора с электромагнитным возбуждением была равна мощности машины с постоянными магнитами в заданных габаритах при той же частоте вращения. Используя выражение (14), можно оценить целесообразность перехода к электромагнитному возбуждению и, в частности, к возбуждению на основе ВТСП проводов.

Установив связь МДС возбуждения двух типов машин, можно установить при каких режимах работы каждая из них будет обладать наибольшей мощностью. Для этого были выбраны три машины с разными размерами активной зоны, и было проведено сравнение выходной мощности машины с ПМ и с ОВ в генераторном режиме в зависимости от числа пар полюсов (рисунок 7). Исследования проводились при различном токе возбуждения машины с электромагнитным возбуждением.

Из рисунка 7 видно, что при неизменной частоте вращения ротора мощность машины с электромагнитным возбуждением при малом числе пар полюсов может быть выше, чем для машины с возбуждением от ПМ, но с увеличением полюсности ее значение быстро падает и при  $p > 2$  оказывается ниже мощности машины с ПМ. Увеличение тока возбуждения выше расчетного значения ( $i_f = 66.3$  А) позволяет при малой полюсности добиться увеличения мощности машины с ОВ и превзойти мощность машины с ПМ. Также видно, что при расчетном значении силы тока возбуждения, мощность двух машин совпадает при  $p = 1$ .

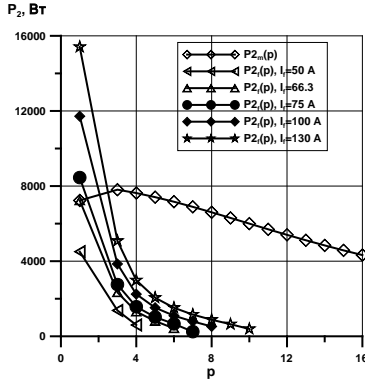


Рисунок 7. Влияние числа пар полюсов на мощность машин с электромагнитным и магнитоэлектрическим возбуждением

Сравнительный анализ по перегрузочной способности двух типов машин одинаковой конструкции с равной линейной нагрузкой якоря показал целесообразность перехода к электромагнитному возбуждению при уровне тока в обмотках возбуждения близких к 100 А, что достижимо только при использовании ВТСП обмоток возбуждения ротора и криогенном охлаждении до температур жидкого азота и ниже. Проведенные в главе расчетно-теоретические исследования показали, что синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением на основе ВТСП проводов имеют в несколько раз большую мощность по сравнению с магнитоэлектрическими машинами при малом числе пар полюсов и при больших частотах вращения ротора.

**В четвертой главе** представлены результаты численного моделирования магнитных полей и основных параметров машин обращенной конструкции. А также сопоставление результатов расчета машин обращенной конструкции, полученных по аналитическим методикам, разработанным в главах 2 и 3, и конечно-элементному анализу в пакете Elcut 5.4. Построенные в главах 2 и 3 методики позволяют проводить предварительный расчет параметров синхронных машин. Для учета реальной геометрии активной зоны, насыщения, полей рассеяния и пр. необходимо использовать численные методы расчета магнитных полей.

Проверочный расчет проводился по следующему алгоритму. Вначале, используя исходные данные, выполнялся аналитический расчет, в ходе которого были определены индукция в зазоре  $B_m$ ,

ЭДС холостого хода  $E_o$ , главное индуктивное сопротивление  $X_a$  по соотношениям, полученным в главах 2 и 3. Также были определены параметры обмотки якоря, которые позволяют в данных габаритах получить требуемые значения выходного напряжения и мощности. По полученным значениям геометрических размеров генератора строилось поперечное сечение СГ, которое импортировалось в программу для численного моделирования.

В результате численного моделирования были получены картины распределения магнитных полей в активной зоне машины. Пример распределения показан на рисунке 8. Также определены значения индукции в зазоре, ЭДС холостого хода,  $X_a$  и мощность машины с учетом реальной геометрии и нелинейных свойств ферромагнитных материалов.

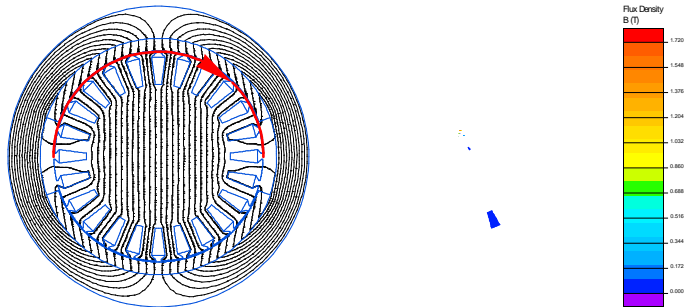


Рисунок 8. Пример распределения магнитных полей в активной зоне машины, полученных в ходе численного моделирования

На основе полученных в ходе моделирования в ППП «Elcut Professional» значений магнитного потока  $\Phi_o$  и главного индуктивного сопротивления  $X_a$  было проведено сравнение результатов численного моделирования и аналитических расчетов (см. таблицу 1). Было установлено, что аналитическая методика, разработанная в главе 2, обладает погрешностью 20% для малых размеров обращенных электрических машин и 5% для больших ЭМП.

Таблица 1. Сравнение результатов численного моделирования и аналитического расчета.

Параметр	Аналитический расчет	Численное моделирование	Погрешность
$B_{\delta_{max}}$ , Тл	0,824	0,792	4%
$E_0$ , В	484	459	5%
$X_a$ , Ом	0,743	0,667	11%
$P_2$ , кВт	235	223	5%
	Средняя погрешность:		6%

Хорошая сходимость результатов, полученных методом конечных элементов и по аналитической методике позволяет сделать вывод о том, что разработанные аналитические методики могут быть использованы на раннем этапе проектирования электрических машин обращенной конструкции.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получено аналитическое решение задач о распределении двумерных магнитных полей в активной зоне многополюсных синхронных электрических машин обращенной конструкции с постоянными магнитами и с электромагнитным возбуждением. Полученные аналитические решения учитывают геометрию активной зоны машины, число пар полюсов, обмоточные параметры и параметры индуктора.

2. На основе полученных решений о распределении магнитных полей найдены аналитические выражения для расчета основных параметров синхронных электрических машин обращенной конструкции с ПМ и с электромагнитным возбуждением, их зависимость от геометрии ротора, в частности от толщины ПМ, полюсности машины и коэрцитивной силы магнитов.

3. На основе полученных аналитических решений построены угловые характеристики магнитоэлектрических

синхронных машин обращенной конструкции, которые показывают, что применение ВТСП криомагнитов в роторе позволяет увеличить перегрузочную способность данного класса машин в несколько раз.

4. Проведенные теоретические исследования показали целесообразность увеличения числа пар полюсов магнитоэлектрической синхронной машины обращенной конструкции, а так же высоты ПМ магнитов индуктора, до определенного предела, так как это позволяет увеличить мощность машины.

5. Разработана методика предварительного расчета основных параметров синхронной машины обращенной конструкции с ПМ.

6. Полученные в ходе расчетов параметров синхронных электрических машин обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением данные показали, что существует оптимум максимальной мощности по значению МДС, связанный с потоками рассеяния, что позволяет проводить экспертные оценки МДС при заданных размерах машины.

7. На основе анализа полученных аналитических решений сформулирован критерий сравнения машин обращенной конструкции с электромагнитным возбуждением и от ПМ по максимальной мощности (перегрузочной способности). Получено аналитическое выражение для данного критерия, позволяющее проводить сопоставление машин обращенной конструкции по значению МДС.

8. Полученные аналитические соотношения, а также проведенные расчетные исследования показали, что для двух машин с одинаковой геометрией активной зоны и обмоточными параметрами при неизменной частоте вращения ротора мощность машины с электромагнитным возбуждением при малом числе пар полюсов ( $p \leq 2$ ) может быть выше, чем для машины с возбуждением от ПМ, но с увеличением полюсности ее значение резко падает и при  $p > 2$  оказывается ниже мощности магнитоэлектрической машины.

9. Сравнительный анализ по перегрузочной способности двух типов машин одинаковой конструкции с равной линейной нагрузкой якоря показал целесообразность перехода к электромагнитному возбуждению при уровне тока в обмотках возбуждения близких к 100 А, что достижимо только при

использовании ВТСП обмоток возбуждения ротора и криогенном охлаждении до температур жидкого азота и ниже.

10. Сформулирован критерий, по которому можно проводить оценку целесообразности применения ВТСП проводов при проектировании ЭМП обращенной конструкции.

11. Проведенные расчетно-теоретические исследования показали, что синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением на основе ВТСП проводов имеют в несколько раз большую мощность по сравнению с магнитоэлектрическими машинами при малом числе пар полюсов и при больших частотах вращения ротора.

12. На основе полученных в ходе моделирования в пакете «Elcut Professional» значений магнитного потока  $\Phi_0$  и главного индуктивного сопротивления  $X_a$  было установлено, что аналитическая методика, разработанная в главе 2, обладает погрешностью 20% для малых размеров обращенных электрических машин и 5% для больших ЭМП.

13. Хорошая сходимость результатов, полученных методом конечных элементов и по аналитической методике позволяет сделать вывод о том, что разработанная аналитическая методика может быть использована на раннем этапе проектирования электрических машин обращенной конструкции.

#### ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Иванов Н.С., Тулинова Е.Е. Разработка синхронных генераторов для ветроэнергетических установок, используемых для электроснабжения аэродромов малой авиации в отдаленных районах России. Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2012» 17-20 апреля 2012 года. Москва. Сборник тезисов докладов. М.: ООО «Принт-салон». С. 42.

2. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Тулинова Е.Е., Иванов Н.С. «Многополюсные синхронные генераторы с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок». Известия РАН. Энергетика. №6, 2012 г.

3. [L. K. Kovalev, K. L. Kovalev, Ye. Ye. Tulinova, N. S. Ivanov](#) Multipolar permanent-magnet synchronous generators intended for wind power plants. [Thermal Engineering](#), December 2012, Volume 59, [Issue 14](#), pp 1035-1043.

4. Н.С. Иванов, Е.Е. Тулинова «Аналитическая методика расчета распределения магнитных полей в активной зоне

синхронного генератора с электромагнитным возбуждением, используемого в автономных электроэнергетических установках». РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА: Двадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (27-28 февраля 2014г., Москва): Тез. докл. в 4 т. Т.2. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. С. 132

5. Иванов Н.С., Тулинова Е.Е. «Сравнительная характеристика СГ с ПМ и электромагнитным возбуждением на основе ВТСП проводов». Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014». 22-24 апреля 2014 г. Москва. Сборник тезисов докладов. С. 110–111.

**В рекомендованных ВАК научных журналах и изданиях.**

1. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Тулинова Е.Е., Иванов Н.С. Многополюсные синхронные генераторы с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок. Электричество, 2013, №8, стр. 2-8;

2. Иванов Н. С., Тулинова Е. Е. Синхронные генераторы обращенной конструкции с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок и малой гидроэнергетики, Труды МАИ, 2013, №68;

3. Ковалев Л.К., Ковалев К.Л, Тулинова Е.Е., Иванов Н.С. Методика расчета распределения магнитного поля в активной зоне синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением в автономных электроэнергетических установках, Электричество, 2014, №5, стр. 12-17.