

на правах рукописи

КАРАНКЕВИЧ Андрей Геннадьевич

**ГЕРМЕТИЧНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ
СКВАЖИННОЙ АППАРАТУРЫ**

05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2004

Работа выполнена на кафедре электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Муравлев Олег Павлович

Официальные оппоненты: -доктор технических наук, профессор
Бекишев Р.Ф.
-кандидат технических наук, старший
научный сотрудник Абдрахманова Т.Б.

Ведущая организация: ГНУ НИИ АЭМ при ТУСУР, г. Томск.

Защита диссертации состоится 22 декабря 2004 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета К212.269.03 в 331 аудитории 8 корпуса Томского политехнического университета (634034, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ

Автореферат диссертации разослан « » ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент _____ Ю.Н. Дементьев

Актуальность работы. Развитие передовых промышленных технологий с возросшими потребностями в новых источниках электрической энергии, а также ужесточение требований по качеству вырабатываемого напряжения и тока автономными электромашинными установками инициировало интерес к разработке и оптимизации существующих видов электрических машин. Такие устройства необходимы для электропитания комплексов, не имеющих централизованного энергоснабжения. Например, удаленные сейсмологические и метеорологические станции, радиопередатчики устройств распределенного контроля, а также ретрансляторы средств мобильной связи и многое др. Также существует ряд промышленных объектов и устройств, где в соответствии с технологическим процессом необходимо применять автономные источники питания. Так, например, герметичный синхронный генератор может применяться при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин на нефть и газ; стартер – генераторное устройство находит применение для питания автомобиля; маломощный тихоходный генератор используется для питания буйка в речном пароходстве и т.п. Создание таких устройств во многих случаях требует герметичного исполнения магнитной системы.

В диссертационной работе проводится разработка герметичного электромашинного источника питания забойной инклинометрической системы, применяемого при бурении наклонно-направленных и горизонтальных скважин на нефть и газ.

В ходе эксплуатации забойных телесистем специалисты отмечают недостаточную продолжительность работы скважинного прибора. Регламентный период работы прибора ограничен низкой надежностью автономного электромашинного синхронного генератора, применяемого в качестве источника питания забойной телесистемы. Данный недостаток связан с негерметичным исполнением конструкции электрической машины, что приводит к механическим разрушениям устройства. Буровой раствор, содержащий абразивные частицы, попадая во внутреннюю полость электрической машины, приводит к разрушению деталей магнитной системы и изоляции обмотки якоря. В результате этого, при проведении буровых работ периодически необходимо поднимать всю буровую колонну на поверхность земли и производить текущий ремонт или замены скважинного генератора, что влечет за собой простой оборудования и увеличение затрат при построении новой скважины.

Улучшить показатели надежности и решить вышеописанную проблему предлагается посредством использования новой конструкции скважинного источника питания выполненного на базе дискового генератора. Предполагается увеличение времени безотказной работы скважинного генератора за счет герметичного исполнения магнитной системы электрической машины. Применение генератора дисковой конструкции дает возможность наряду с высокими энергетическими показателями данной машины **установить** немагнитные экраны между ротором и статором, защищающие активные эле-

менты магнитной системы (постоянные магниты, изоляцию обмоток) от разрушающего воздействия агрессивной среды [2, 8].

Задачей разработки нового электромашинного генератора является исследование электромагнитных процессов, протекающих в электрической машине при малом количестве полюсов и стержней статора. Именно в оптимизации зубцовой зоны и в снижении зубцового эффекта с анализом динамических характеристик машины просматривается основное направление исследовательской работы. Также не достаточно изученным является влияние величины воздушного зазора на выходные параметры, вследствие объемного распределения характеристик магнитного поля в рабочем воздушном зазоре электрической машины с аксиальным магнитным потоком. Данное исследование необходимо проводить с использованием методов и алгоритмов, позволяющих анализировать параметры трехмерных магнитных полей и моделировать на базе их характеристики машины при изменении угла положения ротора относительно статора машины. Построение, таким образом, динамических характеристик способствует более глубокой проработке конфигурации активной зоны, а значит и разработке скважинного генератора с наилучшими энергетическими показателями при условии герметичного исполнения магнитной системы.

В целом, разработанные математические модели и результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы при создании герметичных электромашинных источников питания с применением электрической машины дисковой конструкции.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-1128.2004.8.

Целью работы является разработка и исследование электромашинного синхронного генератора дисковой конструкции, предназначенного для электропитания скважинного прибора. В связи с этим решаются следующие задачи:

- разработка математических моделей для исследования трехмерного магнитного поля дискового генератора;
- проведение комплекса теоретических исследований для поиска наилучших размеров геометрии магнитной системы;
- создание программного комплекса, позволяющего наглядно моделировать стационарные и квазистационарные электромагнитные процессы в нелинейных магнитных системах;
- разработка конструкции скважинного генератора;
- изготовление макетного образца дискового генератора для экспериментальной оценки результатов теоретических исследований.

Научной новизной является:

1. Разработана полевая модель электромеханического устройства на основе расчета трехмерного магнитного поля для моделирования динамических режимов работы дисковых генераторов, которая позволяет прово-

дить исследование дисковых электрических машин с большим воздушным зазором.

2. Создана трехмерная статическая математическая модель магнитного поля для оценки влияния геометрических характеристик магнитной системы на энергетические показатели дискового генератора.
3. Определены наилучшие геометрические размеры активной части с целью получения наибольших удельных показателей мощности дискового генератора.
4. Исследован характер распределения магнитного поля в зубце статора дискового генератора при статической нагрузке для оценки неоднородности магнитного поля, определения потоков рассеяния и влияния геометрических характеристик статора на энергетические параметры дискового генератора.

Практическую ценность представляют следующие результаты исследовательской работы:

1. Разработана перспективная конструкция герметичного дискового генератора для автономных источников питания.
2. Предложена методика расчета стационарного магнитного поля, которая позволяет исследовать магнитное поле в активном объеме электрических машин.
3. Разработан алгоритм полевой модели электромеханического устройства для моделирования и исследования динамических режимов работы.
4. Создан программный комплекс моделирования статических и динамических электромагнитных процессов, который позволяет проводить исследования дискового генератора для автономных систем электропитания.

Методы исследования. При исследовании электромагнитных процессов, протекающих в магнитной системе дискового генератора, в настоящей работе использовались: теория электрических машин, метод интегрирования по источникам поля, трехмерные математические модели электромагнитного поля, метод простых итераций и метод Зейделя для решения систем нелинейных уравнений, а также эксперименты с макетными образцами дискового электромашинного генератора.

Все исследования проведены с применением современных ПЭВМ.

Апробация работы. Результаты проведенных исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих конференциях:

- VII научно-техническая конференция Сибирского химического комбината, (г. Северск, 2002г.);
- IX международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные техника и технологии” (г. Томск, 2003г.);
- международная научно-техническая конференция “Электроэнергетика, Электротехнические системы и комплексы” (г. Томск, 2003г.);

- международная научно-техническая конференция с международным участием “Электротехника, Электромеханика и электротехнологии” (г. Новосибирск, 2003г.);
- всероссийская научно-техническая конференция “Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии” (г. Омск, 2003г.);
- научно-техническая конференция “Технология и автоматизация атомной энергетики” (г. Северск, 2003г.);
- X юбилейная международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Современные техника и технологии” (г. Томск, 2004г.).

Публикации. Общее количество публикаций по теме диссертации – 10, из них: 1 статья в центральном издании, 9 опубликовано в трудах и сборниках конференций.

Реализация результатов работы. Основные результаты исследований и разработок, проведенных в диссертационной работе, внедрены в ООО «Томск Нефтегазинжиниринг» и используются при разработке и совершенствовании электромашинных источников питания для геофизической скважинной аппаратуры. Разработанная компьютерная программа для расчета трехмерных магнитных полей используется в ООО ПФК “Экси-Кей” Центр магнитных технологий при исследовании и разработке устройств магнитной обработки воды, оптимизации магнитной системы и улучшении технико-экономических показателей. Также созданная программа используется в учебном процессе при подготовке студентов в Северском государственном технологическом институте по специальности 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов».

Структура и объем диссертации. Работа состоит из пяти разделов и заключения, содержащих 112 страниц машинописного текста, 8 таблиц и 35 рисунка, списка литературы из 114 наименований и приложений.

В первом разделе обоснована актуальность задач разработки и исследования дисковых электромашинных генераторов. Сформулирована цель, поставлены основные задачи, описана научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, приведена краткая аннотация выполненной работы по разделам.

Во втором разделе проведен обзор существующих малогабаритных автономных генераторов, изложены основные вопросы выбора конструкции и последующего проектирования магнитной системы скважинного генератора.

Обзор литературы и последних патентов показал, что в настоящее время проблеме созданию автономных маломощных генераторов уделяется большое внимание. В данной работе выбран малогабаритный магнитоэлектрический синхронный генератор с постоянными магнитами, который может

быть применен для питания геофизической скважинной аппаратуры в тяжелых условиях эксплуатации.

Для повышения эффективности вскрытия нефтяных пластов буровыми компаниями в настоящее время достаточно широко применяются современные технические средства, способствующие построению кустов и разбуриванию стволов старых скважин. Данные технологии успешно применяются с началом бурения горизонтальных и наклонно-направленных скважин, построение которых затруднительно без использования автоматизированного оборудования повышающего уровень инженерного сопровождения буровых работ. Одним из наиболее перспективных направлений автоматизации при построении скважин специального профиля является применение забойных инклинометрических телесистем способных непрерывно отслеживать траекторию движения буровой колонны.

В общем случае, принцип действия забойных телесистем основан на определении характеристик, описывающих траекторию движения скважины и турбобура. Данные характеристики определяются инклинометрическим оборудованием скважинного прибора, включаемого в состав компоновки низа буровой колонны. Полученная информация по беспроводному каналу связи транслируется со скважинного прибора на поверхность земли, где происходит расшифровка, регистрация и обработка полученных данных [8].

При эксплуатации забойных телесистем отмечается низкая надежность синхронного генератора, применяемого в качестве источника питания инклинометрической и передающей аппаратуры. Недостаток связан с негерметичным исполнением конструкции электрической машины. Присутствие высокого давления бурового раствора, содержащего абразивные частицы, механических вибраций приводит к увеличению технологических зазоров в сальниковых уплотнителях генератора, что влечет за собой попадание буровой жидкости внутрь электрической машины, следствием этого является разрушение изоляции обмотки и магнитной системы.

Синхронный генератор выполнен по классической схеме с радиальным направлением магнитного потока в воздушном зазоре. Магнитное поле генератора создается постоянными магнитами, расположенными на роторе электрической машины. Статор машины содержит двухфазную обмотку, у которой одна из фаз выполнена силовой для питания излучателя скважинного прибора, а вторая подключена к электронным блокам инклинометра. Выводы статорной обмотки соединяются с разъемом наконечника, через который осуществляется электропитание инклинометра скважинного прибора. Для обеспечения устойчивой передачи данных на поверхность земли генератор должен вырабатывать электрическую мощность не менее 250 Вт.

Для решения поставленной задачи предложена дисковая конструкция скважинного генератора (рис. 1), выполненная на базе аксиальной машины, которая наряду с перечисленными достоинствами торцевых генераторов позволяет повысить выходную мощность и исключить силы одностороннего магнитного тяжения. В предлагаемой конструкции генератор состоит из

двух вращающихся роторов 6, выполненных в виде двух дисковых магнитопроводов и статора 8, расположенного между ними. Герметичность статора достигается установкой в воздушном зазоре немагнитной перегородки 7 (экрана), препятствующей попаданию бурового раствора в полость статора и предотвращающей разрушение изоляции обмотки агрессивной средой.

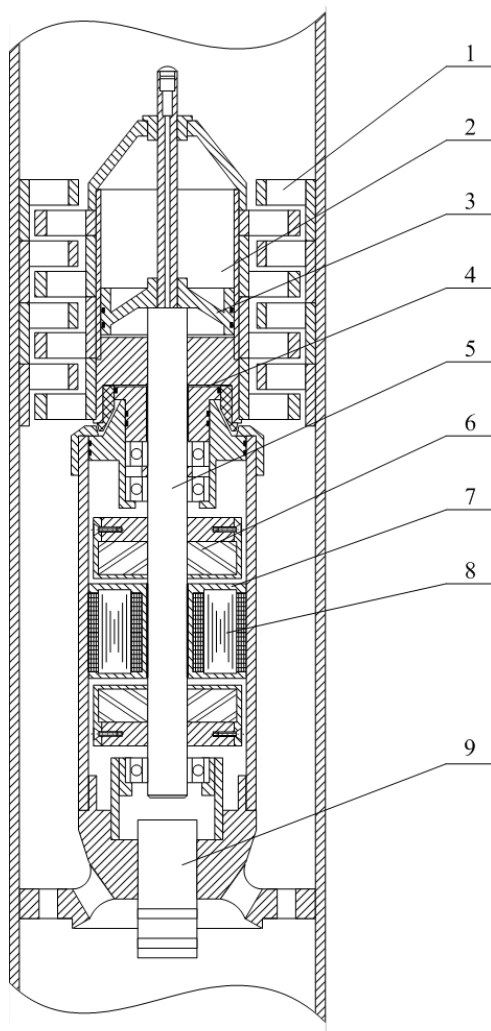


Рис. 1. Конструкция скважинного генератора:

- 1 - гидротурбина; 2 - масляный контейнер; 3 - поршневой компенсатор;
4 - торцевое уплотнение; 5 - вал электрической машины; 6 - ротор;
7 - немагнитная перегородка; 8 - статор; 9 - разъем

На магнитопроводах ротора установлены аксиально намагниченные высококоэрцитивные постоянные магниты 3 с чередующейся полярностью, создающих аксиальный магнитный поток (рис. 2). Из-за использования двух-роторной конструкции повышается выходная мощность. Магнитопроводом статора являются ферромагнитные стержни 2, закрепленные между изоляционными пластинами.

Для надежного крепления магнитов в ярмо ротора устанавливается цилиндрическая арматура из немагнитного материала. Снаружи полюсная

система надежно закрывается обечайкой, которая прикрепляется болтовыми соединениями к ярму ротора.

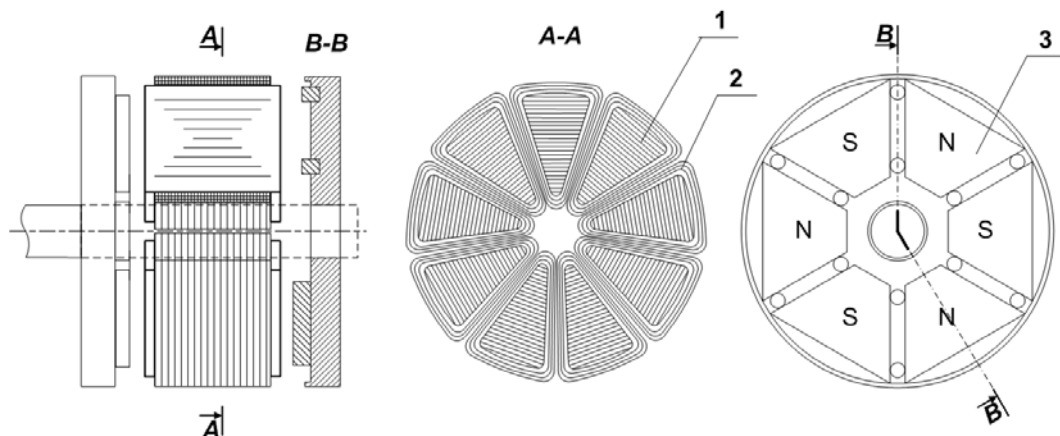


Рис. 2. Дискная конструкция скважинного генератора:
1 – статорная обмотка; 2 – стержень; 3 – постоянные магниты

Немагнитная перегородка закрывает активную зону статора и этим препятствует попаданию бурового раствора со стороны ротора электрической машины. Для максимального заполнения активного объема статора стержни магнитопровода 1 имеют трапециидальное сечение. На стержни уложена обмотка статора 2. Для выравнивания температурного поля и создания динамических усилий, противодействующих буровому раствору, образовавшиеся полости статора машины заполняются трансформаторным маслом.

На основании проведенного анализа определены задачи исследований.

В третьем разделе представлен анализ методов расчета электромагнитных полей, на основе которого был выбран метод интегрирования по источникам поля. Описаны методика и алгоритмы программы расчета трехмерного магнитного поля дискового генератора.

Выбор метода интегрирования по источникам поля обусловлен следующими критериями: возможен расчет трехмерного 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.

Метод интегрирования по источникам поля заключается в решении общего интегрального выражения напряженности через намагниченность элементов магнитной системы [5, 6, 7, 9]:

$$\vec{H}(q) = \frac{J_{cm}}{4\pi} \int_V \frac{[d\vec{l}_g, \vec{r}_{gq}]}{r_{gq}^3} dS_g - \frac{1}{4\pi} \text{grad}_q \int_V \frac{\vec{M}_p \vec{r}_{pq}}{r_{pq}^3} dV_p, \quad (1)$$

где $\bar{H}(q)$ – напряженность магнитного поля в вакууме, А/м; $\bar{dl}_g$ – вектор, равный по модулю элементарному участку тока и совпадающий с ним по направлению, м; J_{cm} – плотность стороннего тока, А/м²; $\bar{M}_p$ – намагниченность элементарного объема dV_p , А/м; $\bar{r}_{gq}$ – радиус-вектор, проведенный от участка элементарного тока $\bar{dl}_g$ в точку наблюдения q , м; $\bar{r}_{pq}$ – радиус-вектор, проведенный из элементарного намагниченного объема dV_p в точку наблюдения q , м; r_{gq}, r_{pq} – модуль соответствующего радиус-вектора, м; dS_g – площадь поперечного сечения элементарного проводника, м².

Решение уравнения (1) производится численным методом. При этом пространство, занимаемое намагниченным веществом, разбивается на малые объемы ΔV_i , в пределах каждого из которых плотность тока и намагниченность считаются постоянными и сосредоточенными в центре элементарного объема. После преобразований выражения (1) система расчетных уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned} H_{xq} &= \frac{J_c}{4\pi V_o} \int \frac{(dl_{y_{nqz}} - dl_{z_{nqy}})}{r_{nq}^3} dS_n - \frac{I}{4\pi} \sum_{i=1}^m \left[M_{xi} \frac{\partial}{\partial x} \int \frac{r_{pqx}}{r_{pq}^3} dV_p + M_{yi} \frac{\partial}{\partial x} \int \frac{r_{pqy}}{r_{pq}^3} dV_p + M_{zi} \frac{\partial}{\partial x} \int \frac{r_{pqz}}{r_{pq}^3} dV_p \right], \\ H_{yq} &= \frac{J_c}{4\pi V_o} \int \frac{(dl_{z_{nqx}} - dl_{x_{nqz}})}{r_{nq}^3} dS_n - \frac{I}{4\pi} \sum_{i=1}^m \left[M_{xi} \frac{\partial}{\partial y} \int \frac{r_{pqx}}{r_{pq}^3} dV_p + M_{yi} \frac{\partial}{\partial y} \int \frac{r_{pqy}}{r_{pq}^3} dV_p + M_{zi} \frac{\partial}{\partial y} \int \frac{r_{pqz}}{r_{pq}^3} dV_p \right], \\ H_{zq} &= \frac{J_c}{4\pi V_o} \int \frac{(dl_{x_{nqy}} - dl_{y_{nqx}})}{r_{nq}^3} dS_n - \frac{I}{4\pi} \sum_{i=1}^m \left[M_{xi} \frac{\partial}{\partial z} \int \frac{r_{pqx}}{r_{pq}^3} dV_p + M_{yi} \frac{\partial}{\partial z} \int \frac{r_{pqy}}{r_{pq}^3} dV_p + M_{zi} \frac{\partial}{\partial z} \int \frac{r_{pqz}}{r_{pq}^3} dV_p \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где m – количество разбиений на элементарные объемы намагниченного вещества; $r_{pqx}, r_{pqy}, r_{pqz}, r_{nqx}, r_{nqy}, r_{nqz}$ – проекции радиус-векторов $\bar{r}_{pq}$ и $\bar{r}_{nq}$ на оси декартовой системы координат; dl_x, dl_y, dl_z – проекции элемента длины проводника $\bar{dl}$; M_{xi}, M_{yi}, M_{zi} – проекции вектора намагниченности $\bar{M}_i$ малого объема ΔV_i ; H_{xq}, H_{yq}, H_{zq} – проекции вектора напряженности поля в точке наблюдения q .

При принятии незначительных допущений, что проводники обмотки разбиваются на векторы конечной длины $\Delta \bar{l}_j$ совпадающие с осью соответствующего проводника и направленные по току, система уравнений (2) после дифференцирования по частным производным и перехода к конечным разностям в матрично-векторной форме принимает вид:

$$h_q = h_{cm} - A \cdot m, \quad (3)$$

где $h_q = [H_x(q), H_y(q), H_z(q)]^T$ – вектор проекций напряженности магнитного поля в точке наблюдения q ; $h_{cm} = [H_x^{cm}(q), H_y^{cm}(q), H_z^{cm}(q)]^T$ – вектор проекций напряженности поля, создаваемого сторонним током в точке на-

блюдения q ; A – матрица коэффициентов, в которой первый индекс переменной обозначает номер точки и показывает, по какой оси рассматривается влияние намагниченности, а второй – точку оси, на которую это воздействие создаётся; $\overline{B}_{qi}$ – вектор индукции магнитного поля в пределах ΔV_i , совпадающий по направлению с $\overline{H}_{qi}$; $m = [M_{x_1}, M_{y_1}, M_{z_1}, \dots, M_{z_n}]^T$ – вектор компонент намагниченности, модуль которого определяется по характеристике материала $B = f(H)$:

$$\overline{M}_{qi} = \frac{\overline{B}_{qi}}{\mu_o} - \overline{H}_{qi}. \quad (4)$$

При расчете вектор намагниченности высокоэнергетических магнитов принимается постоянным и совпадающим с направлением первоначального намагничивания.

Алгоритм расчета стационарного магнитного поля дискового генератора содержит следующую последовательность действий [4]:

1. Описание расчетной области, которое заключается в разбиении магнитной системы на элементарные объемы с последующим определением их координат.
2. Расчет напряженности поля по (4) в точках q_i , расположенных в центре тяжести элементарных объёмов ΔV_i магнитопровода, а затем посредством метода простых итераций находится вектор намагниченности. Выход из итерационного процесса осуществляется при выполнении условия $\Delta \geq G$ (G – разность между текущим и предыдущим значениями намагниченности вещества; Δ – заданная точность в абсолютных значениях). Также условием завершения итерационного процесса может служить уравнение Максвелла $\text{div} B = 0$.
3. Определение интегральных характеристик магнитного поля выполняется путем разбиения занимаемого исследуемой областью пространства на элементарные трубки магнитного потока, в пределах которых магнитное поле считается однородным. В результате интегрирования распределенных характеристик магнитного поля в исследуемой области пространства возможно определение магнитного потока, магнитного напряжения, потокосцепления обмотки и электромагнитных сил.

Магнитный поток пронизывающий произвольную поверхность определяется по следующему выражению:

$$\Phi = \int_S B_n dS, \quad (5)$$

где B_n – нормальная составляющая индукции магнитного поля, Тл; dS – элементарная площадь, м².

Потокосцепление обмотки определяется соотношением:

$$\Psi = \sum_{k=1}^{w_k} \Phi_k, \quad (6)$$

где w_k – число витков в катушке; Φ_k – магнитный поток, пронизывающий k -ый виток (диаметр провода полагается много меньше размеров витка), Вб.

Приведенная стационарная модель магнитного поля позволяет проводить исследование трехмерного магнитного поля электромеханических устройств любой конфигурации с учетом нелинейности характеристик $B(H)$ посредством метода интегрирования по источникам поля.

При построении полевой модели электромеханического устройства описание расчетной области и определение интегральных характеристик производится аналогично статической модели.

Алгоритм данной модели содержит следующую последовательность действий: 1) ввод исходных данных: угол поворота ротора α , описание расчетной области магнитной системы, задание магнитных характеристик материалов; 2) итерационный расчет по определению первичных и вторичных источников магнитного поля по системе уравнений (3) при начальном положении ротора $\alpha_r=0$; 3) итерационный расчет по определению вторичных источников магнитного поля по системе уравнений (3) при повороте ротора на некоторый угол $\alpha_r=\alpha_1$, расчет поля в исследуемой области магнитной системы и определение ее интегральных характеристик; 4) определение изменения ЭДС по выражению

$$E = \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (7)$$

На основании ЭДС и известной нагрузки в цепи генератора, находится ток I в обмотке генератора. 5) итерационный расчет по определению вторичных источников магнитного поля при повороте ротора на следующий угол $\alpha_r=\alpha_2$ и т.д.

Окончание численного расчета производится по отработке заданного угла поворота ротора α .

Итерационный расчет по определению первичных и вторичных источников состоит в определении вектора намагниченности элементов магнитной системы.

Приведенная полевая модель электромеханического устройства позволяет моделировать динамические режимы работы, проводить анализ выходных характеристик электромашинных генераторов, исследовать дисковые электрические машины с большим воздушным зазором для моделирования герметичных автономных источников питания, проводить поиск наилучших геометрических соотношений магнитной системы.

Стационарная модель магнитного поля и полевая модель электромеханического устройства позволяют провести полное исследование работы дискового генератора в различных режимах и действующих факторах.

В четвертом разделе приведены результаты теоретических исследований магнитного поля торцевой машины.

Расчетные области полюсной системы одного ротора и магнитопровода статора с разбиением магнитной системы на элементарные объемы показаны на рис. 3, а, б.

С помощью разработанного программного комплекса был проведен расчет нескольких дисковых генераторов с различным исполнением магнитной системы.

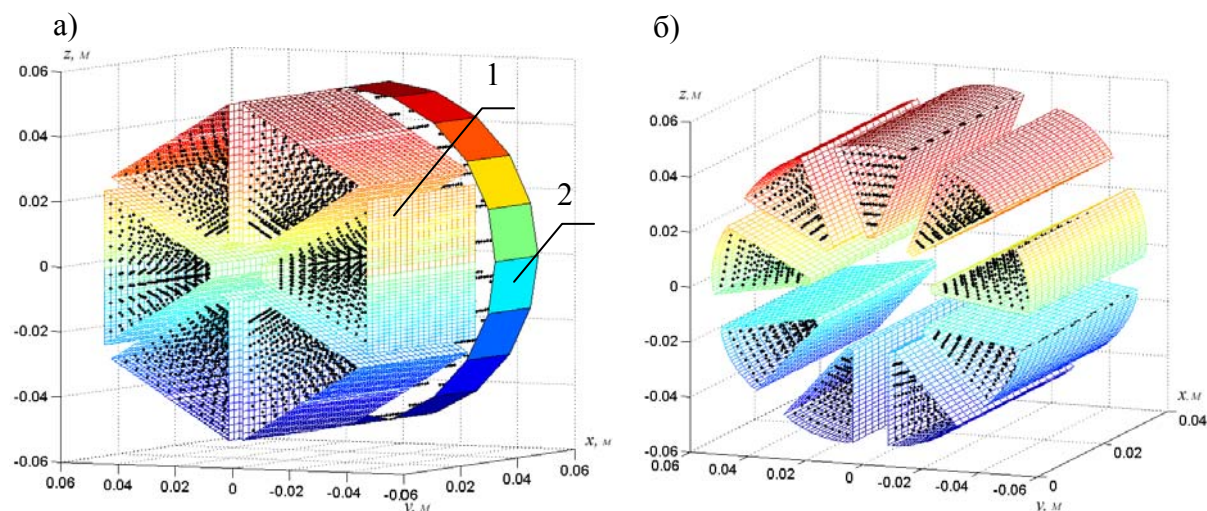


Рис. 3. Расчетная область полюсной системы (а) и магнитопровода статора (б): 1 – полюс машины; 2 – ярмо ротора

Исследование неоднородности магнитного поля в стержне статора дискового генератора выполнено на основе рассмотрения изменения характеристик поля вдоль аксиальных и радиальных размеров статора машины. Неравномерность электромагнитного поля в активной зоне машины оказывает существенное влияние на характеристики дискового генератора. В связи с этим, при проектировании машин с аксиальным потоком необходимо учитывать неоднородность поля в магнитопроводе посредством расчета объемных магнитных полей.

На рис. 4 представлена картина распределения магнитного поля внутри стержня торцевого генератора при величине МДС поля якоря $F_a = 900$ А/м.

Плоскость, проходящая через точку $x = 0$ и $x = 0.04$ м, соответствует границе раздела сред (воздушный зазор – ферромагнитный стержень). Если зубцы не насыщены и отсутствует МДС поля якоря, то силовые линии магнитного поля распределены параллельно длине зубца, причем на картину магнитного поля не оказывает существенного влияния изменение ширины зубца и величины воздушного зазора, потоки рассеяния незначительны. С увеличением МДС возрастает неоднородность магнитного поля, а при $F_a = 620$ А/м в центральном сечении зубца происходит разворот векторов поля в сторону, противоположную основному магнитному потоку.

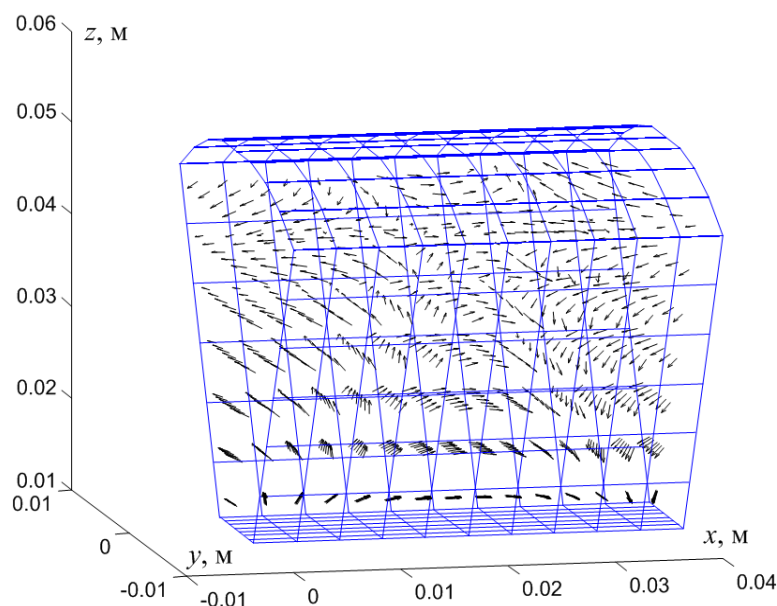


Рис. 4. Магнитное поле в стержне дискового генератора, при величине МДС поля якоря $F_a = 900$ А/м

Результаты расчета качественно отражают значительную неоднородность поля в стержне машины и этим подтверждают необходимость рассмотрения трехмерного распределения параметров магнитного поля при проектировании электрических машин с аксиальным магнитным потоком.

Исследование магнитного поля вдоль стержня статора выполнено по величине результирующего магнитного потока Φ_p . Для определения Φ_p , стержень статора разбивается на элементарные участки, в пределах которых интегрируются распределенные параметры магнитного поля. В результате на рис. 5 представлены зависимости результирующего потока $\Phi_p = f(L_z)$ при нескольких значениях МДС поля якоря.

Оценка влияния геометрических характеристик статора на энергетические параметры дискового генератора проводилась на основе определения характера влияния основных размеров магнитопровода статора на величину магнитного потока в стержне машины, по которому можно судить об энергетических показателях генератора. Нахождение последнего определяется как среднее значение нормальной составляющей потока по нескольким поперечным сечениям стержня равномерно распределенным в аксиальном направлении. В результате расчетов получено, что наибольшее влияние на энергетические показатели генератора оказывают: длина стержня L_z , ширина паза b_o , ширина стержня статора b_z и величина воздушного зазора δ .

На рис. 6 приведена поверхность, отражающая мощность машины при изменении относительной ширины и абсолютной длины стержня.

Относительная ширина стержня статора определяется по выражению:

$$b^* = \frac{b_z}{\tau_z} = \frac{R_z}{R_{vn}},$$

где b_z – ширина стержня статора, м; τ_z – зубцовое деление машины, м.

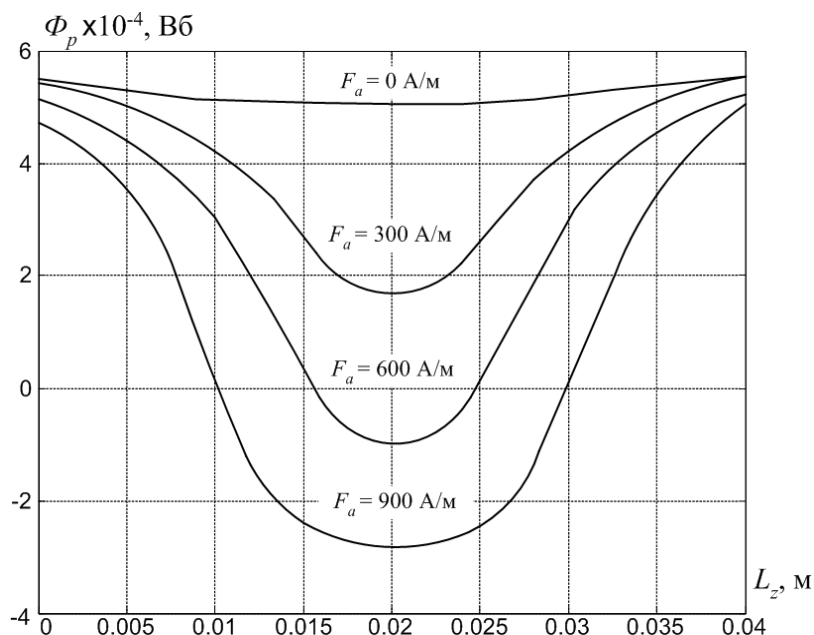


Рис. 5. Изменение величины основного магнитного потока по длине стержня статора

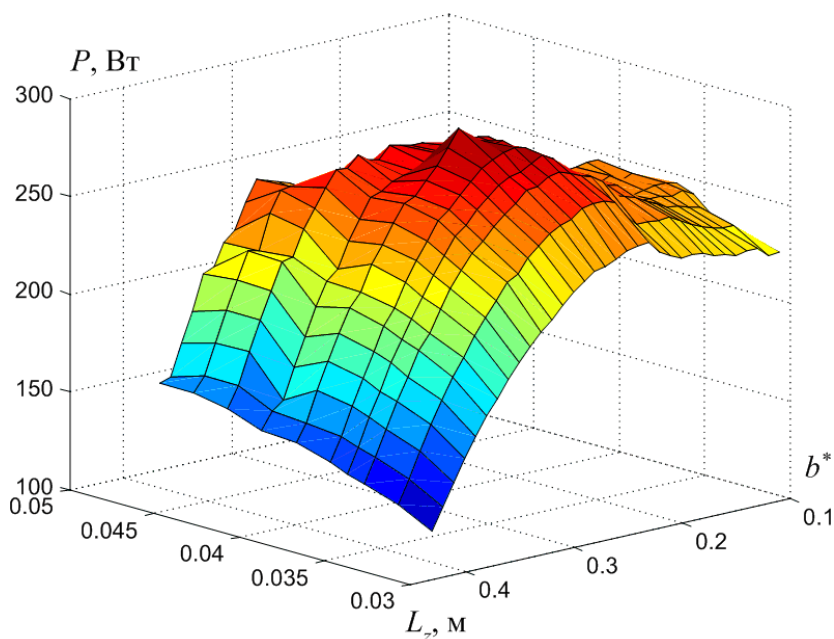


Рис.6. Поверхность, отражающая мощность машины при изменении относительной ширины и абсолютной длины стержня

В результате проведенных исследований установлено максимальное значение выходной мощности генератора с внешним диаметром 0.1 м со следующей конфигурацией геометрии статора: длина стержня $L_z = 0,038$ м; относительная ширина стержня $b^* = 0,18$.

С целью сравнения характеристик электрической машины при двух способах изготовления магнитопровода статора (шихтованный и цельноме-

таллический) с помощью полевой модели электромеханического устройства были получены кривые выходного напряжения. Зависимости получены с помощью расчета стационарного и квазистационарного трехмерного магнитного поля.

Сравнение характеристик при различном материале магнитопровода статора показывает, что в цельнометаллических стержнях присутствуют потери от вихревых токов; величина потерь составляет 16 %. Однако применение цельнометаллических стержней в маломощных дисковых магнитоэлектрических генераторах может быть оправдано из-за простоты и низкой стоимости изготовления, если массогабаритные и энергетические показатели не принимаются за основной критерий проектирования электрической машины.

В пятом разделе представлены результаты экспериментальных исследований макетных образцов скважинного генератора. Для проведения исследований было изготовлено и испытано два макетных образца для сравнения энергетических характеристик машины при двух способах изготовления магнитопровода статора. В результате проведенных испытаний определены внешние характеристики генератора при изменении величины воздушного зазора и скорости вращения ротора машины.

На рис. 7 приведены расчетная и полученная экспериментально осциллограммы выходного напряжения трехфазного генератора в режиме холостого хода. Совпадение кривых как по форме, так и по численным значениям удовлетворительное.

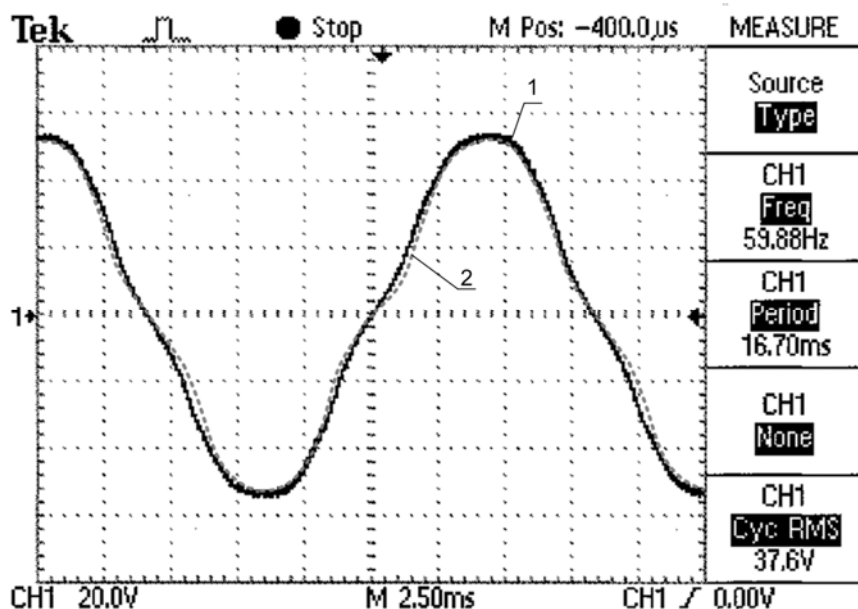


Рис. 7. Осциллограммы выходного напряжения:

- 1 – экспериментальная кривая напряжения;
- 2 – расчетная кривая напряжения

В режиме холостого хода были определены значения ЭДС катушек и слоев секций обмотки якоря, которые дают возможность оценить количест-

венное изменение основного магнитного потока в аксиальном и радиальном направлении машины.

Известно, что свойства постоянных магнитов ухудшаются с повышением температуры, что может привести к значительному снижению выходной мощности генератора. Во время определения экспериментальных выходных характеристик была произведена оценка теплового нагрева магнитной системы дискового генератора при длительной работе с постоянной нагрузкой. Установлено, что при нагрузке 4 Ом и токе в обмотке статора 6,3 А, превышение температуры меди статора не превышает 40° С. Выбор постоянных магнитов осуществляется с большей коэрцитивной силой чем получено при расчетах, примерно в 1,4 раза. Предполагается, что температурная стабилизация магнитного материала при высоких температурах (90 градусов) позволит получить требуемые значения коэрцитивной силы.

На рис. 8 показаны внешние характеристики дискового генератора при изменении воздушного зазора.

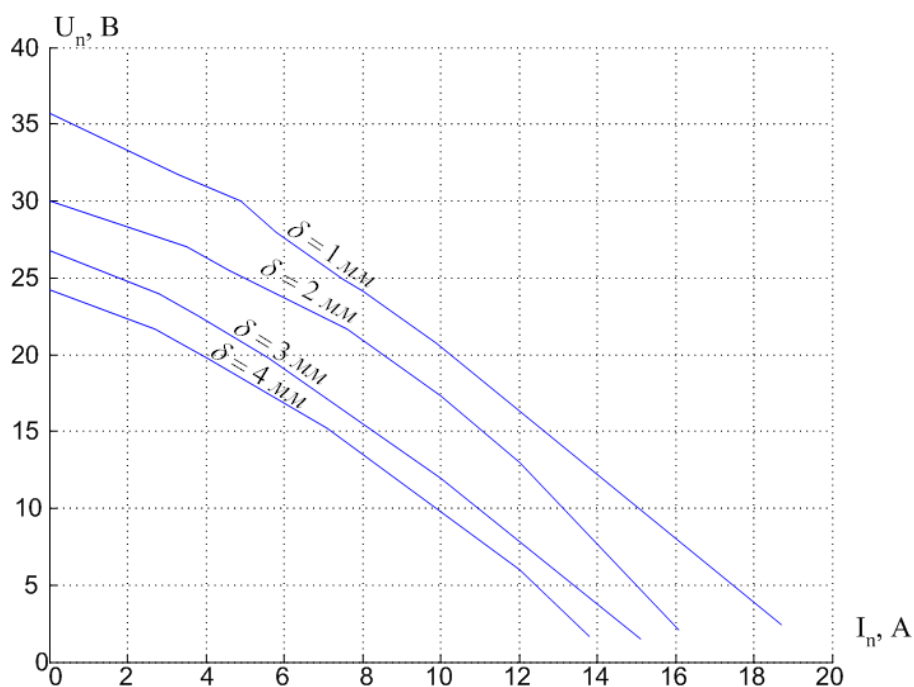


Рис. 8. Внешние характеристики генератора при изменении воздушного зазора

При увеличении воздушного зазора происходит снижение преобразуемой генератором активной мощности в допустимых пределах, что подтверждает возможность установки немагнитного экрана в воздушном зазоре.

Выполненный анализ экспериментальных характеристик при двух способах изготовления магнитопровода статора показал возможность применения цельнометаллических стержней статора, при этом индукционные потери составляют 16,4 %.

Сравнение полученных характеристик при экспериментальном исследовании с результатами теоретических расчетов показало хорошую сходи-

мость, что подтверждает адекватность используемых математических моделей. Предельная погрешность не превышает 10 %.

В заключении приведены основные результаты выполненных научных исследований, которые состоят в следующем:

1. Анализ литературы и патентов показал, что дисковые магнитоэлектрические генераторы обладают рядом положительных качеств, которые позволяют успешно применять их в маломощных герметичных автономных источниках питания. В качестве объекта исследования выбран дисковый электрический генератор с возбуждением от постоянных магнитов. Генератор выполнен с двумя роторами и расположенным между ними статором.
2. Разработана стационарная модель магнитного поля, которая предназначена для исследования трехмерного магнитного поля дискового генератора. Создана полевая модель электромеханического устройства, разработан алгоритм и программа расчета для исследования работы дисковых генераторов в динамических режимах.
3. Исследовано распределение трехмерного магнитного поля в стержне статора дисковой машины. Проявления неоднородности поля в стержне машины значительны, что подтверждают необходимость рассмотрения трехмерного распределения параметров магнитного поля.
4. Оценен характер влияния основных геометрических размеров магнитопровода статора на энергетические показатели дисковой машины. Проведен анализ изменения энергетических характеристик при изменении воздушного зазора, относительной ширины и абсолютной длины стержня дискового генератора. Установлено максимальное значение выходной мощности генератора со следующей конфигурацией геометрии: внешний диаметр 0.1 м, длина стержня $L_z = 0,038$ м, относительная ширина стержня $b^* = 0,18$.
5. Герметичность дискового электрического генератора достигается установкой немагнитного экрана между статором и ротором. Анализ полученных результатов расчета выходной мощности при увеличении воздушного зазора показал, что допустимо выполнение электрической машины с большим воздушным зазором. Возможна установка немагнитного экрана, толщиной до 2 мм в воздушном зазоре, который препятствует попаданию бурового раствора в полость статора и ротора и существенно повысить время безотказной работы скважинного прибора.
6. Сравнение характеристик при расчете и экспериментальных исследованиях дискового генератора с цельнометаллическими и шихтованными стержнями статора показало допустимость использования монолитного исполнения стержней при изготовлении маломощных дисковых генераторах. Потери от вихревых токов в этом случае составляют: при расчетах 16 %, при экспериментальных исследованиях 16,4 %.

7. Экспериментально определена оптимальная величина сдвига дисков роторов друг относительно друга, которая составляет $15 \div 17$ градусов, при которой форма выходного напряжения близка к синусоидальной. В этом случае также снижаются проявления зубцового эффекта и статического момента сопротивления в 2,5 раза. Снижение энергетических характеристик дискового генератора происходит на $5 \div 7$ %.
8. Разработаны и переданы в ООО “Томск Нефтегазинжиниринг” (г. Томск) программа, алгоритмы, математические модели и результаты теоретических и экспериментальных исследований дисковой конструкции электромашинного генератора, направленные на увеличение безотказной работы за счет герметичного исполнения магнитной системы электрической машины. Разработана и передана в Северский государственный технологический институт (г. Северск) компьютерная программа, предназначенная для расчета трехмерных магнитных полей электромеханических устройств. Данная программа используется студентами специальности 180400 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Разработанная программа для расчета магнитных полей используется в ООО ПФК “Экси-Кей” Центр магнитных технологий при исследовании и разработке устройств магнитной обработки воды.

Автор благодарит научного консультанта, кандидата технических наук Леонова Сергея Владимировича за внимательное отношение к работе и практическую помощь в решении поставленных задач.

Результаты исследований и основное содержание работы отражены в следующих публикациях:

1. Каранкевич А.Г., Щипков А.А., Леонов С.В. Программа расчета магнитных систем из постоянных магнитов и магнитопроводов различной конфигурации // Материалы седьмой научно-технической конференции Сибирского химического комбината. Часть 1. Северск, 2003. – с.248.
2. Каранкевич А.Г. Макеев Л.С., Щипков А.А., Леонов С.В., Первушин А.В. Герметичная электрическая машина для технологических аппаратов // Материалы седьмой научно-технической конференции Сибирского химического комбината. Часть 2. Северск, 2003. – с.152.
3. Каранкевич А.Г., Леонов С.В. Электромашинный генератор для питания геофизической аппаратуры // Современная техника и технологии: Труды 9-ой международной научно-практической конференции. Часть 2. Томск, 2003. – с. 269.
4. Каранкевич А.Г., Леонов С.В., Калаев В.Е. Исследование магнитного поля электрических машин с аксиальным магнитным потоком // Электроэнергетика, Электротехнические системы и комплексы: Материалы международной научно-технической конференции. - Томск, 2003. – с. 120.
5. Каранкевич А.Г., Муравлев О.П., Леонов С.В. Моделирование трехмерного магнитного поля торцевого электромашинного генератора // Электротехника, Электромеханика и электротехнологии: Материалы научно-

технической конференции с международным участием. Новосибирск, 2003. – с. 16.

6. Каранкевич А.Г., Муравлев О.П., Леонов С.В., Лялин А.В., Федянин А.Л., Калаев В.Е. Моделирование трехмерного магнитного поля торцевого электромашинного генератора // Современные тенденции в развитии и конструировании коллекторных и других электромеханических преобразователей энергии: Материалы восьмой всероссийской научно-технической конференции. Омск, 2003. – с. 83.

7. Каранкевич А.Г., Леонов С.В., Калаев В.Е., Мишин М.В., Федянин А.Л. Моделирование динамических процессов электрических машин // Технология и автоматизация атомной энергетики: Материалы отраслевой научно-технической конференции. Северск, 2003.- с. 60.

8. Каранкевич А.Г., Леонов С.В. Торцевое исполнение скважинного электромашинного источника питания инклинометрической системы // НТЖ Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – М.: ОАО “ВНИИОЭНГ”, 2003. – № 4.

9. Karankevich A., Leonov S., Muravlev O. Calculating program of three-dimensional magnetic fields // Proceedings of the 7th Korea-Russia International Symposium, KORUS 2003. – p.268.

10. Каранкевич А.Г., Леонов С.В., Муравлев О.П. Квазистационарная полевая модель аксиальной электрической машины // Современные техника и технологии: Труды 10-ой юбилейной международной научно-практической конференции. Томск, 2004.

Подписано в печать 10.11.2004 г.

Формат бумаги 60ч84/16. Бумага ксероксная.

Плоская печать. Печ. л.

Тираж 100 экз. Заказ 122. Цена свободная.

Изд. СГТИ. Лицензия ИД № 00407 от 02.11.99 г.

636035, Северск, пр. Коммунистический, 65