

На правах рукописи



Киселев Александр Викторович

**МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СИНХРОННЫЙ
ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ПИТАНИЯ СКВАЖИННОЙ АППАРАТУРЫ
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Специальность 05.09.01 –
«Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена на кафедре «Электромеханические комплексы и материалы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Рапопорт Олег Лазаревич

кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Харитонов Сергей Александрович

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Новосибирский
государственный технический университет»,
заведующий кафедрой «Электроники и
Электротехники».

Орлов Юрий Александрович

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Томский государственный
архитектурно-строительный университет»,
заведующий кафедрой «Общей
электротехники и автоматики»

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество

«Научно-производственный центр

«Полюс», г. Томск

Защита состоится «19» июня 2014 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, уч. корп. 8, ауд. 217.

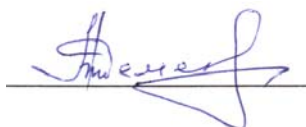
С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>

Автореферат разослан « » июня 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.269.11

кандидат технических наук, доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эффективность освоения новых нефтегазовых месторождений в значительной мере зависит от совершенства техники и технологии бурения скважин с большими отклонениями стволов от вертикали и с горизонтальными участками сравнительно большой протяженности. Бурение таких скважин осуществляется, как правило, с применением телеметрических систем контроля забойных параметров непосредственно в процессе бурения, разработанных рядом ведущих отечественных и западных компаний (НПП "ВНИИГИС", НПП «Самарские горизонты», Schlumberger, Sperry-Sun, Baker Hughes и другие) и имеющих уже общепринятую аббревиатуру (MWD – Measurement While Drilling–«Измерение в процессе бурения» и LWD–Logging While Drilling–«Каротаж в процессе бурения»).

Применение забойных телеметрических систем (ЗТС) позволяет увеличить коэффициент извлечения нефти (КИН) и добиться снижения затрат на строительство и эксплуатацию скважин — основополагающих характеристик качества разработки месторождения.

Одним из способов передачи данных телесистемой на земную поверхность является беспроводной способ, работающий по электромагнитному каналу связи. Для трансляции данных по электромагнитному каналу связи в состав забойной телесистемы включают диэлектрический разделитель и источник электрической энергии. Диэлектрический разделитель необходим для создания диполя. Изолированный отрезок диполя может достигать размеров порядка 20 м. Передача данных осуществляется путём подключения к диполю источника переменного напряжения с частотой 5-10 Гц.

Известно, что в качестве первичного источника электрической энергии забойных телеметрических систем применяют синхронные генераторы с магнитоэлектрическим возбуждением. В частности, трехфазный синхронный генератор с ротором на постоянных высококоэрцитивных магнитах и беспазовым статором, работающий на нагрузку через мостовой выпрямитель и преобразователь частоты.

Нагрузка скважинного генератора (СГ) носит нестационарный характер, особенно при формировании выходного тока после выпрямителя с помощью автономного инвертора напряжения (АИН). Работа генератора на такую нагрузку сопровождается сложными переходными процессами, приводящими к перегрузке генератора и изменению формы его выходного тока и напряжения.

Также переходные процессы могут вызвать размагничивание постоянного магнита скважинного генератора. Исследование этих процессов в генераторе, а также их влияния на работу элементов телеметрической системы является актуальной задачей. Следует отметить, что отказы скважинного генератора как источника питания телеметрической системы приводят к останову технологического процесса, что связано с большими экономическими потерями.

В развитие теории проектирования и эксплуатации бесконтактных электрических машин (БЭМ) большой вклад внесли отечественные и зарубежные учёные: А.И. Бертинов, В.А. Балагуров, В.В. Апсит, Т.Г. Сорокер, Д.А. Завалишин, Л.М. Паластин, А.А. Дубенский, Н.Я. Альпер, В.И. Радин,

Д.А. Бут, А.Н. Ледовский и др. Большую роль в создании и широком внедрении высокоэффективных БЭМ сыграли работы коллективов под руководством А.Ф. Федосеева, А.Г. Иосифьяна, И.А. Глебова, Н.Н. Шереметьевского, Б.Н. Калугина.

Однако сложность схемы питания скважинной аппаратуры ЗТС с электромагнитным каналом передачи данных и факты её отказов требуют проведения комплексных исследований.

Цель работы. Целью диссертационной работы является исследование магнитоэлектрического генератора, применяемого в качестве первичного источника питания скважинной аппаратуры забойной телеметрической системы и разработка схмотехнических, конструкторских и технологических решений, позволяющих повысить качество работы генератора.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи.

1. Проанализировать условия работы забойной телеметрической системы и разработать требования к первичному источнику питания.
2. Исследовать магнитное состояние элементов скважинного генератора для статического режима.
3. Разработать математическую модель магнитоэлектрического скважинного генератора для исследования работы при совместном включении скважинного генератора, мостового выпрямителя, блока фильтра и автономного инвертора напряжения в динамических режимах.
4. Модернизировать конструкцию магнитоэлектрического скважинного генератора с целью снижения внешних габаритных размеров (радиальный размер).
5. Разработать физические модели модернизированных конструкций скважинного генератора и провести их сравнительные испытания.

Методы исследования. Перечисленные в диссертационной работе задачи решаются методами теории электрических машин, численного моделирования и экспериментальных исследований в лабораторных условиях.

В проведенных исследованиях использованы следующие программные продукты: Mathcad 14, Elcut 5.1, ANSYS: Maxwell 2D и Simplorer. Комплексная математическая модель получена с помощью приложений Maxwell 2D и Simplorer. Данная модель объединяет в себе расчеты полевой и цепной задач и представляет имитационную математическую модель скважинной аппаратуры телеметрической системы.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Создана комплексная математическая модель скважинного генератора, учитывающая совместную работу трехфазного мостового выпрямителя, блока фильтров, автономного инвертора напряжения и нагрузку в динамическом режиме работы. Полученная модель отличается от известных ранее вариантов подробным рассмотрением совместного влияния компонентов телеметрической системы на работу магнитоэлектрического генератора, а также реализацией связанного расчета скважинного генератора с компонентами телеметрической системы и использованием разных программных сред.

2. Разработана математическая модель скважинного генератора в статическом режиме, позволяющая исследовать магнитное состояние всех элементов генератора при различных значениях нагрузки на выходе.

3. На основе комплексного математического моделирования системы «синхронный генератор – преобразователь – нагрузка» определены величины возникающих перенапряжений и влияние модуляционных процессов на выходные данные скважинного генератора.

Практическая ценность работы заключается в следующем.

1. Комплексная математическая модель может быть использована для исследования вновь разрабатываемых систем с магнитоэлектрическими синхронными генераторами (МЭСГ), работающими на полупроводниковые преобразовательные устройства.

2. Разработаны рекомендации по расчётам размеров конструктивных элементов МЭСГ, обеспечивающие лучшее использование магнитной системы и необходимые выходные показатели генератора в условиях ограничения по габаритным размерам.

3. Проведена оптимизация размеров активной части магнитоэлектрического генератора на основе математической модели магнитного состояния СГ и разработана методика расчета генератора при ограниченных внешних габаритах.

4. Определены рекомендуемые соотношения частоты напряжения скважинного генератора и основной (выходной) частоты автономного инвертора напряжения для улучшения работы блоков скважинной аппаратуры.

5. Созданы макетные образцы скважинных генераторов и проведены экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность разработанных рекомендаций и результатов проектирования.

Основные научные положения работы, выносимые на защиту

1. Комплексная математическая модель скважинного генератора, включающая все компоненты телеметрической системы.

2. Математическая модель скважинного генератора, позволяющая получить распределение и значение индукции магнитного поля в поперечном сечении СГ, а также математическая модель скважинного генератора модернизированной конструкции с разной длиной активной части ротора

3. Результаты анализа магнитного состояния конструкций скважинного генератора с числом полюсов ротора $2p=4$ и разными способами намагничивания постоянных магнитов.

4. Экспериментальные исследования для оценки адекватности математических моделей.

Реализация и внедрение результатов работы.

Результаты диссертационной работы используются при проектировании и изготовлении скважинных генераторов в филиале ООО «Технологическая Компания Шлюмберже» г. Томск. Разработанные в диссертационной работе математические модели и рекомендации по проектированию магнитоэлектрических генераторов используются в учебном процессе Национального исследовательского Томского политехнического университета

при подготовке бакалавров по направлению 140400 «Электромеханика» и магистров по направлению 140400 «Технология проектирования и производства электромеханических преобразователей энергии» по дисциплинам: «Учебно-исследовательская работа студентов», «Электромеханические элементы автоматики», а также в выпускных квалификационных работах студентов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях.

1. XVI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2010 г.).

2. XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2011 г.).

3. V Юбилейная международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2011 г.).

Публикации. По результатам проведённых исследований опубликовано 5 печатных работ, 2 из них – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Для одной из предложенных конструкций скважинного генератора получен патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 154 страницах машинописного текста, содержит 30 иллюстраций, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 95 наименований и 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задач по исследованию работы скважинного генератора забойной телеметрической системы в условиях реального характера нагрузки. В частности, при работе магнитоэлектрического генератора совместно с мостовым выпрямителем и автономным инвертором напряжения.

В первой главе приведена классификация забойных телеметрических систем, рассмотрены наиболее распространенные способы передачи информации с забоя на земную поверхность. Указаны требования, предъявляемые к ЗТС, и к первичному источнику питания забойной телеметрической системы. Проведён критический обзор существующих источников питания ЗТС.

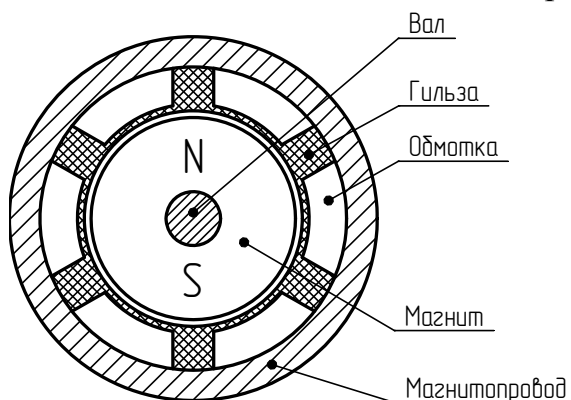


Рис. 1. Поперечный разрез активной части скважинного генератора

В результате проведения аналитического обзора патентов, являющихся достоверным и актуальным источником информации в области техники и технологии, обоснован выбор конструктивного исполнения скважинного генератора, и материалов для его изготовления.

На рисунке 1 представлена рассматриваемая конструкция скважинного генератора с числом полюсов ротора $2p=2$ в разрезе.

Проанализированы результаты работ, ранее сделанных по данной тематике. Поставлены основные задачи исследования.

Во второй главе разработана математическая модель, позволяющая исследовать магнитное состояние скважинного генератора в статическом режиме.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма решения задачи магнитостатики в среде ELCUT

Моделирование магнитного состояния скважинного генератора реализовано в программном продукте ELCUT отечественного производства. Этот продукт известен с 1990 года и представляет собой интегрированную диалоговую систему, предназначенную для инженерного моделирования двумерных электромагнитных, тепловых и механических полей методом конечных элементов. Для решения поставленных задач использовалось приложение «Магнитостатика».

Последовательность шагов решения задач магнитостатики в среде ELCUT имеет вид, изображенный на рисунке 2.

Моделирование проводилось с учётом следующих допущений.

1. В качестве материала магнитопровода статора использовалась электротехническая сталь с нелинейной характеристикой намагничивания, поэтому моделирование выполнялось в нелинейной постановке задачи. Источником магнитного поля служил постоянный магнит (в нашем случае из высококоэрцитивного сплава неодима (Nd), железа (Fe), и бора (B)).

2. При решении задач магнитостатики в среде ELCUT использовалось уравнение Пуассона для векторного магнитного потенциала A ($B = \text{rot } A$, B – вектор магнитной индукции). В рассматриваемых моделях вектор индукции B всегда лежал в плоскости xu , а вектор плотности стороннего тока j и векторный потенциал A перпендикулярны к ней. Отличными от нуля являлись компоненты j_z и A_z в заданной плоскопараллельной постановке задачи.

Для плоскопараллельных задач уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где μ_x, μ_y – компоненты тензора магнитной проницаемости;

H_{cx}, H_{cy} – составляющие коэрцитивной силы;

j – плотность тока.

3. Источники поля во всех рассмотренных конструкциях были заданы в блоках модели. В рассматриваемом случае под источниками поля понимались распределенные токи, а также постоянные магниты, намагниченность которых задавалась величиной коэрцитивной силы.

Источник, заданный в конкретной точке плоскости xu , описывает ток, проходящий через эту точку в направлении третьей оси. Пространственно распределенный ток описывается посредством плотности электрического тока. Плотность тока в катушке может быть получена по формуле:

$$j = \frac{n \cdot I}{S}, \quad (2)$$

где n – количество витков катушки;

I – полный ток;

S – площадь поперечного сечения катушки.

4. Граничные условия. На внутренних и внешних границах области принималось условие Дирихле. Это условие, задавало на части границы известный векторный магнитный потенциал A_0 в вершине или на ребре модели. Это граничное условие определяло поведение нормальной составляющей индукции на границе. В рассмотренных моделях граничное условие использовалось для указания полного затухания поля на удаленной от источников границы.

5. Намагничивающая сила рассматривалась в ELCUT как кусочно-постоянная функция координат, ее вклад в уравнение эквивалентен поверхностным токам, протекающим по границам постоянных магнитов в направлении ортогональном плоскости модели. Плотность такого эффективного тока равна величине скачка тангенциальной компоненты коэрцитивной силы на границе магнита.

С помощью математической модели исследовано магнитное состояние серийного скважинного генератора (рисунок 3), показывающие, что отдельные части конструкции СГ насыщены.

На основании результатов моделирования магнитного состояния серийной конструкции скважинного генератора выполнена оптимизация её внутренних

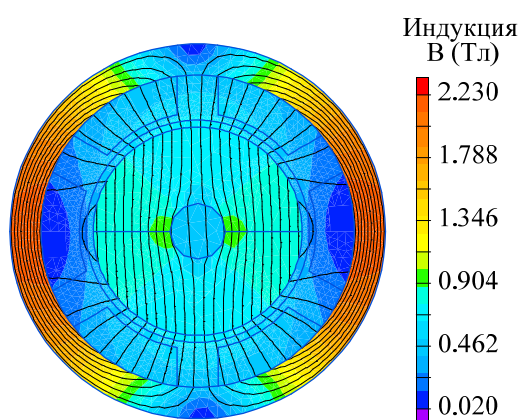


Рис. 3. Распределение магнитного потока в поперечном разрезе серийного скважинного генератора

размеров. В качестве параметра оптимизации, выбрана величина индуцируемого напряжения. Входным фактором стало соотношение внутреннего и внешнего диаметров магнитопровода статора скважинного генератора. Выбор фактора оптимизации основывается на полученном анализе математической модели скважинного генератора.

В процессе поиска оптимального размера толщины ярма магнитопровода

статора определен вариант с толщиной 6 мм. Внешний диаметр статора был сохранен на уровне серийной конструкции и составил $D_c = 54$ мм, внутренний диаметр статора в оптимизированной конструкции равен $D_g = 42$ мм. Выполненная оптимизация внутренних размеров скважинного генератора привела к увеличению фазного напряжения на 8,7 % (1,6 В) относительно серийной конструкции СГ.

Дальнейшее увеличение мощности в двухполюсной конструкции за счёт изменения соотношений размеров магнитопровода статора невозможно по причине ограничения значений коэффициента заполнения обмотки, а также насыщения ярма магнитопровода статора. Поэтому были рассмотрены математические модели скважинного генератора с числом полюсов ротора $2p=4$ с аксиальным и тангенциальным намагничиванием магнитов. Картины распределения магнитного поля в этих конструкциях представлены на рисунке 4.

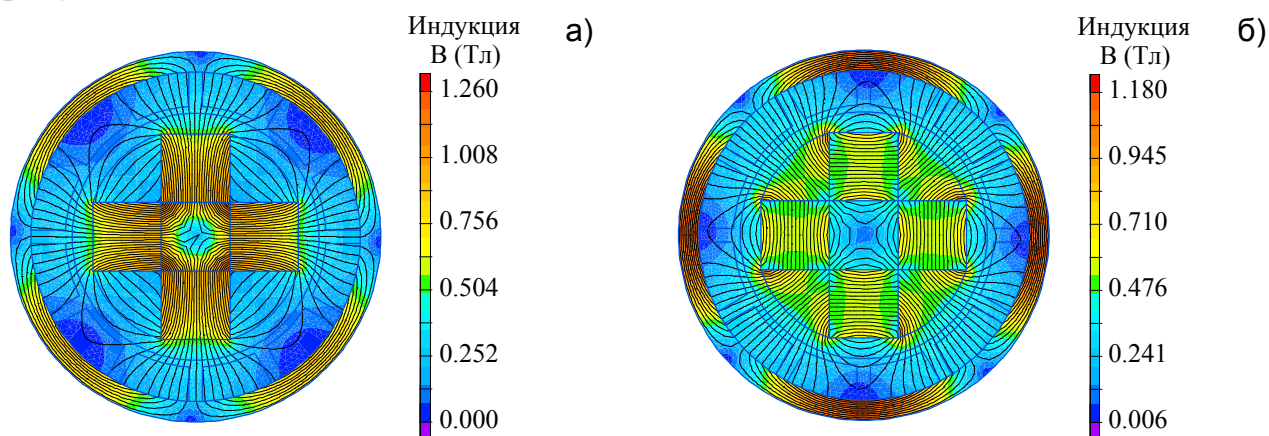


Рис. 4. Распределение магнитного поля при аксиальном (а) и тангенциальном (б) намагничивании (внешний диаметр магнитопровода статора 54 мм)

Анализ результатов моделирования конструкций скважинного генератора с числом полюсов ротора $2p=4$ показал, что для выполнения требований выходной мощности СГ необходимо применять магниты с тангенциальным намагничиванием, которое позволяет получить высокие значения индукции в воздушном зазоре.

Стоит отметить, что дальнейшее увеличение числа полюсов ротора скважинного генератора $2p>4$ показало, что такая конструкция не обеспечивает требуемые выходные показатели. Это объясняется снижением удельного объема постоянного магнита, в силу конструктивного исполнения и технологических требований.

Для расширения функциональных возможностей телеметрической системы, повышения показателей резки боковых стволов скважины и унификации рассматриваемого СГ с ЗТС разных производителей необходима конструкция скважинного генератора для работы с забойной арматурой диаметром 3,5' и менее. Для этого был разработан скважинный генератор с внешним диаметром статора 46 мм. Внешний диаметр статора серийного генератора составляет 54 мм.

Результаты моделирования скважинного генератора с внешним диаметром магнитопровода статора 46 мм показали, что величина фазного напряжения при номинальном значении нагрузки составляет 15 В (80 % от величины фазного напряжения серийного СГ), а для уверенной передачи сигнала на поверхность считывающих устройств, генератор при номинальном режиме работы должен обеспечивать фазное напряжение величиной не ниже 17 В. Этот факт являлся обязательным условием при разработке нового типоразмера генератора. В результате имеющихся расчетных данных модели, потребовалось повышение выходной мощности генератора.

Проведя анализ возможных способов увеличения выходной мощности СГ, было предложено увеличить длину магнита на роторе с 140 мм до 180 мм. Величина удлинения ротора соответствует прямолинейному участку вылета лобовых соединений обмотки статора. Полученное увеличение имеет пропорциональное соотношение по обе стороны магнитопровода статора. Конструкция с увеличенной длиной активной части ротора представлена на рисунке 5. Пунктирной линией выделено предлагаемое увеличение активной зоны ротора СГ.

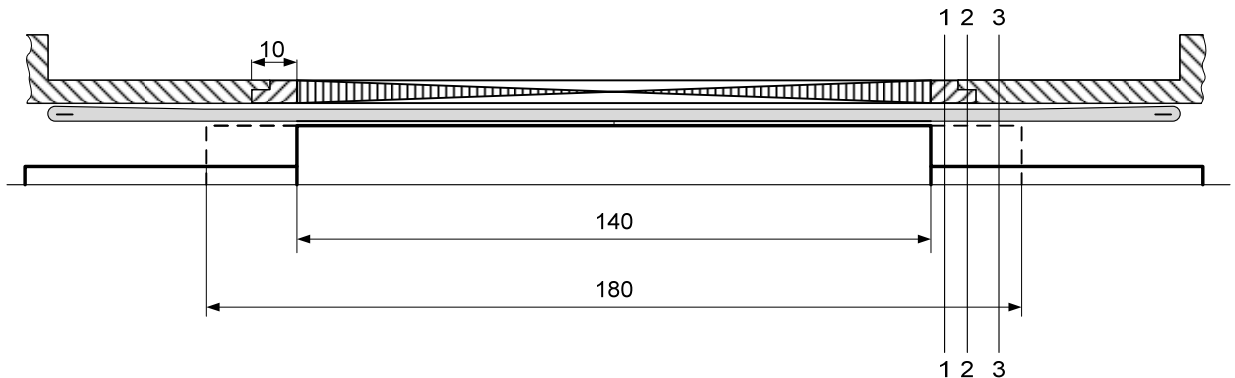


Рис. 5. Схема увеличения активной зоны ротора скважинного генератора с уменьшенным внешним диаметром статора

Суммарная величина приращения напряжения за счёт удлинения длины ротора складывалась из нескольких напряжений разных участков. Так как скважинный генератор измененной конструкции в сборе имеет закрытое исполнение, а его конструктивные элементы выполнены из материалов с разными магнитными свойствами, то для верной оценки приращения напряжения рассмотрено три участка увеличенной области ротора:

1. Участок нажимной шайбы с внешним диаметром 46 мм.
2. Участок нажимной шайбы с внешним диаметром 42 мм.
3. Участок расположения лобового соединения в подшипниковом щите.

В конструкции скважинного генератора с уменьшенным внешним диаметром статора (46 мм) значение приращения напряжения за счёт увеличения длины магнита ротора составило 27 % (4 В). Полученное значение приращения напряжения является достаточным для компенсации снижения при переходе на меньший внешний диаметр статора СГ.

Третья глава посвящена разработке комплексной математической модели, включающей в себя скважинный генератор, мостовой выпрямитель,

блок фильтров, автономный инвертор напряжения и нагрузку.

Для разработки этой модели использовался диалект языка многоаспектного моделирования объектов различной физической природы (VHDL – VHDL-AMS), реализованный в современном программном комплексе электромагнитного и схемного моделирования от компании ANSYS.

Для выполнения комплексных исследований работы скважинного прибора телеметрической системы были задействованы следующие приложения ANSYS: Maxwell 2D и Simplorer.

В приложении Maxwell 2D выполнено моделирование электромагнитного поля скважинного генератора. Модель рассмотрена в двумерном пространстве с учетом допущений, принятых при моделировании в среде ELCUT. Модель приложения Maxwell 2D динамически связана с приложением Simplorer для организации потока данных системного уровня, основанных на электромагнитных процессах.

С помощью приложения Simplorer были созданы и объединены в единую схему блоки скважинного прибора (СП) ЗТС, посредством которых происходит выпрямление, фильтрация и формирование выходного сигнала.

Стоит отметить, что конечный образ комплексной модели создавался в приложении Simplorer. Однако процесс моделирования был связан потоком данных системного уровня со всеми задействованными приложениями и учитывал совместную работу этих приложений.

В результате была разработана комплексная модель скважинного прибора телеметрической системы. Версии программных продуктов на момент создания модели являлись последними и имели функции совместимости для выполнения комплексных расчетов. Схема комплексной математической модели представлена на рисунке 6.

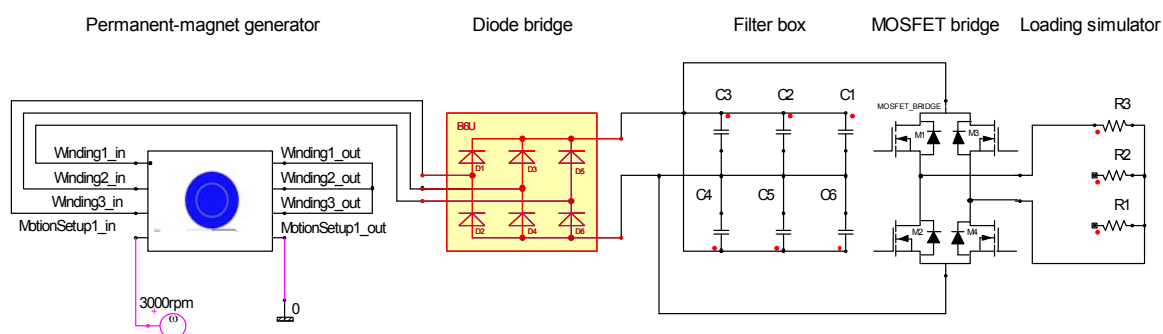


Рис. 6. Комплексная математическая модель скважинной аппаратуры телеметрической системы

Расчет комплексной модели «синхронный генератор – преобразователь – нагрузка» позволяет получить следующие данные:

- распределение магнитного поля и значение магнитной энергии в требуемом сечении скважинного генератора;
- величину индуцируемой ЭДС и напряжение в каждой фазе обмотки статора;
- параметры обмотки статора;

- состояния и характеристики электронных блоков (выпрямления, фильтрации, формирования сигнала) рассматриваемой системы;
- показания виртуальных приборов.

Известно, что наличие в электрической схеме скважинного прибора автономного инвертора напряжения накладывает ряд особенностей на работу магнитоэлектрического генератора:

1. В якорных обмотках генератора возникают перенапряжения;
2. Появляются пульсации тока с частотой выходного сигнала скважинного прибора, а также кратной частоте выходного сигнала.

Причиной возникновения пульсаций напряжения и тока в статорных обмотках скважинного генератора является работа АИН на однофазную нагрузку. В случае работы системы на трехфазную нагрузку пульсации были бы сглажены за счёт равномерного распределения нагрузки. Однако трехфазная система нагрузки не может быть использована в схеме передачи информации рассматриваемой забойной телеметрической системы.

В схеме преобразования с АИН для снижения потерь от высших гармоник выбирают оптимальное соотношение между несущей частотой (частота шимирования) и основной (выходной) частотой. В литературе отмечены оптимальные соотношения частот, которые лежат в пределах $\varepsilon \geq 8 \div 10$,

$$\text{где} \quad \varepsilon = \frac{f_{\text{ШИМ}}}{f_{\text{ВЫХ}}} \quad (3)$$

$f_{\text{ШИМ}}$ – несущая частота (частота шимирования);

$f_{\text{ВЫХ}}$ – основная (выходная) частота.

Режимы с $\varepsilon < 6$ нежелательны, так как при этом резко возрастают потери в системе с АИН.

В современных автономных инверторах напряжения отношение несущей частоты к основной частоте имеет значение равное $\varepsilon = 1000$ и выше. Организация такого отношения частот осуществляется за счёт применения полевых транзисторов. В АИН рассматриваемого скважинного прибора отношение частот превышает значение $\varepsilon \geq 4000$.

Однако стоит отметить, что отношение частот напряжения и тока скважинного генератора (источника питания ЗТС) к основной частоте АИН (частоте выходного сигнала) составляет несколько единиц в зависимости от режима работы ЗТС.

$$\gamma = \frac{f_U}{f_{\text{ВЫХ}}} \quad (4)$$

где f_U – частота напряжения скважинного генератора;

$f_{\text{ВЫХ}}$ – основная (выходная) частота инвертора.

Так при номинальном режиме работы рассматриваемой телеметрической системы данное отношение лежит в пределах: $\gamma = 5 \div 80$. Изменение этого соотношения оказывает влияние на работу скважинного генератора.

С целью выявления и анализа, процессов в скважинном генераторе телеметрической системы, а также поиска удовлетворительного соотношения частот источника питания и несущей частоты автономного инвертора напряжения рассмотрено несколько вариантов расчёта комплексной модели скважинного прибора, при различных режимах работы АИН. Исследования были проведены для частот: $f_{БЛХ} = 2.5; 5; 10; 20; 40; 50$ Гц.

Результатами моделирования стали зависимости напряжений и токов статорных обмоток скважинного генератора, а также временные зависимости напряжения на блоке фильтров и нагрузке скважинного прибора; тока в нагрузке.

Расчёт связанной модели для номинального режима работы ($f_{БЛХ} = 10$ Гц, $f_{ШИМ} = 40$ кГц) скважинного прибора выявил следующее зависимости напряжений и токов в обмотках генератора (рисунки 7 и 8).

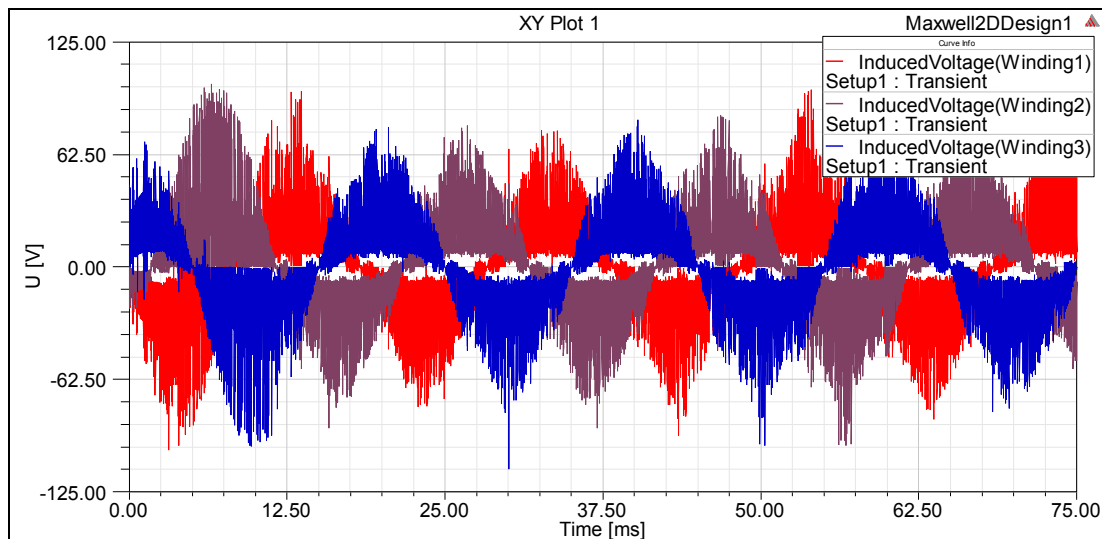


Рис. 7. Изменение напряжения в обмотках скважинного генератора при номинальном режиме работы телеметрической системы

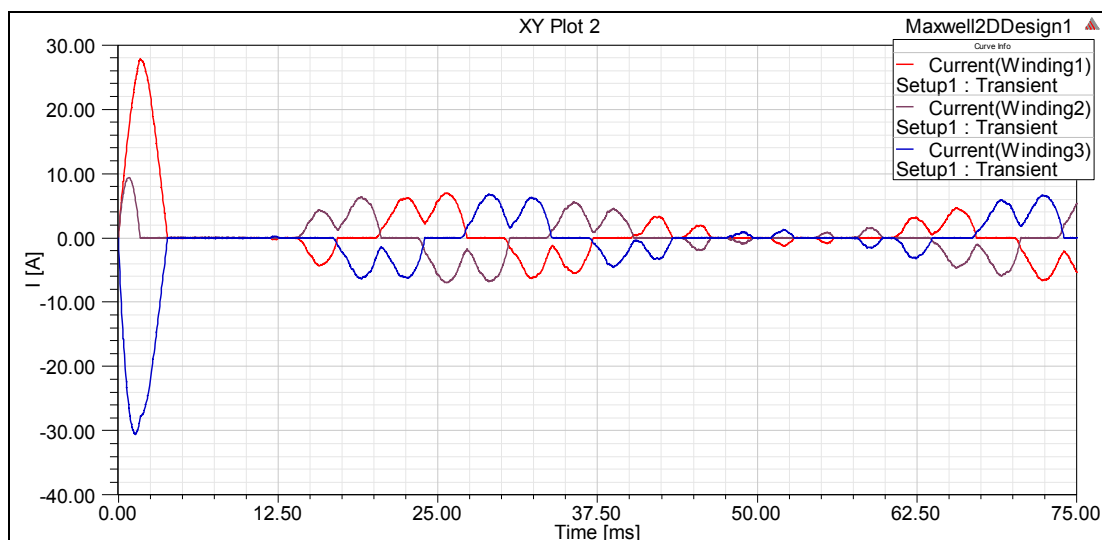


Рис. 8. Изменение токов в статорных обмотках скважинного генератора при номинальном режиме работы телеметрической системы

Расчётные значения фазных токов и напряжений скважинного генератора при работе автономного инвертора напряжения с различными частотами выходного сигнала представлены в таблице 1.

Таблица 1

Несущая частота $f_{ВЛХ}$, Гц	Величина перенапряжения $U_{\max}$, В	Средне-квадратичное значение напряжения $U_{\text{ср.кв.др.}}$, В	Максимальное значение тока $I_{\max}$, А	Средне-квадратичное значение тока $I_{\text{ср.кв.др.}}$, А
2,5	100,5	14,44	4,9	2,11
5	100,3	14,06	6,88	2,7
10	99,3	13,93	7,1	2,69
20	99,7	13,88	7	2,64
40	98,8	13,89	7,5	2,65
50	83,3	13,91	6	2,61

Из таблицы 1 видно, что при увеличении основной частоты АИН происходит снижение максимальной величины перенапряжения. Изменения величины фазного тока при этом остаются в допустимых пределах для рассматриваемого устройства, и не несут негативного воздействия. Значение выходной мощности остается во всех рассмотренных случаях практически неизменным. Из этого следует, что работу скважинной аппаратуры при наличии технической возможности желательно осуществлять на максимально возможной частоте АИН.

Исследование работы скважинного прибора ЗТС на комплексной математической модели показало, что на величину модуляционных процессов в обмотках скважинного генератора и выходное напряжение мостового выпрямителя также влияет изменение емкости силового фильтра.

С целью исследования влияния модуляционных процессов на величину выпрямленного напряжения рассмотрено несколько вариантов математической модели скважинного прибора с различной емкостью силового фильтра. В серийном СП в качестве силового фильтра используется блок конденсаторов суммарной емкостью $C_{\phi} = 1980$ мкф. Ориентируясь на существующий ряд стандартных номиналов, а также на габаритные размеры серийных конденсаторов в качестве блока конденсатора были рассмотрены варианты суммарной емкостью: $C_{\phi} = 1980; 2340; 2820; 3360; 4080; 4920; 6000$ мкф.

Для создания блоков такой емкости можно использовать конденсаторы марок SAMWHA (серия RD), EVOX RIVA (серия PEG 127), YAGEO (серия SE-K) и др. с соответствующим номиналом емкости и классом температуры. Указанные конденсаторы полностью соответствуют требованиям скважиной аппаратуры, в том числе требованиям к массо-габаритным показателям. Результаты рассмотренных математических моделей представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения напряжений на выходе блока фильтров скважинного прибора

Емкость фильтра C_ϕ , мкф	Максимальное напряжение фильтра $U_{\max}$, В	Минимальное напряжение фильтра $U_{\min}$, В	Среднеквадратичное напряжение фильтра $U_{\text{ср.кв.др.}}$, В
1980	30,868	26,491	28,882
2340	30,817	26,645	28,861
2820	30,779	26,760	28,832
3360	30,711	26,887	28,816
4080	30,624	26,956	28,792
4920	30,521	27,055	28,772
6000	30,402	27,144	28,754

Из рассмотренных вариантов емкости силового фильтра наиболее предпочтительным оказался вариант со значением $C_\phi = 6000$ мкф. Расчет на математической модели скважинного прибора с данной емкостью фильтра при номинальном режиме работы показал снижение максимальной величины перенапряжений в статорных обмотках генератора на 5 % в сравнении с емкостью серийного блока фильтров. Одновременно со снижением перенапряжений в статорных обмотках снижается величина пульсаций выходного напряжения, однако низкочастотная составляющая инвертора ($f_{\text{ВЫХ}} = 10$ Гц) присутствует. Данное утверждение подтверждается полученной зависимостью напряжения (рисунок 9) на выходных клеммах блока конденсаторов.

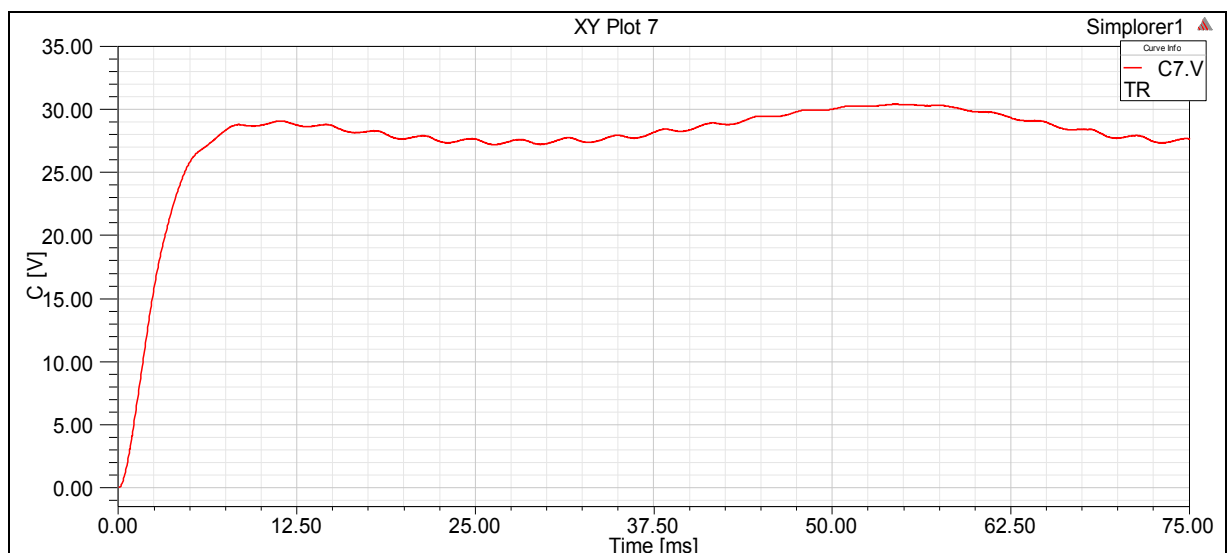


Рис. 9. Напряжение на блоке фильтров скважинного прибора в модели с автономным инвертором напряжения (емкость фильтра $C_\phi = 6000$ мкф)

Исследование модуляционных процессов с помощью комплексной математической модели скважинного генератора в составе забойной телеметрической системы позволяет отметить следующие особенности.

1. Работа скважинной аппаратуры ЗТС характеризуется наличием в статорных обмотках скважинного генератора перенапряжений и модуляции напряжения и тока. Величина перенапряжений и модуляции напряжения и токов зависят от ряда факторов:

- основной (выходной) частоты сигнала АИН;
- величины емкости силового фильтра;
- величины нагрузки скважинного прибора.

2. При действии модуляционных процессов отмечаются временные паузы, во время которых фазные токи имеют низкое значение. В результате эффективное значение фазного тока СГ существенно ниже максимального. На основании этого можно отметить, что существует возможность повышения удельной токовой загрузки МЭСГ.

3. Величина перенапряжений в статорных обмотках скважинного генератора при работе АИН с выходной частотой ниже номинальной ($f_{\text{ВЫХ}} = 10$ Гц) может превышать эффективное значение напряжения в 7 раз. Для снижения величины перенапряжений при наличии технической возможности рекомендуется осуществлять работу ЗТС на максимально возможной основной (выходной) частоте АИН.

4. Наличие модуляционных процессов отмечается на выходных клеммах блока фильтра. Для полной компенсации этих процессов требуется существенное повышение суммарной ёмкости блока фильтров (в $7 \div 8$ раз выше ёмкости серийного блока (ёмкость серийного фильтра $C_{\phi} = 1980$ мкф)) или применение дополнительных фильтрующих блоков.

В четвёртой главе приведены результаты экспериментальных исследований. Представлены разработанные макетные образцы нескольких генераторов, стендовые испытания которых показали данные, подтверждающие результаты моделирования, что являлось основанием для разработки рекомендаций по проектированию МЭСГ.

Расчётная и экспериментальная характеристики скважинного генератора с длиной активной части ротора 140 мм и внешним диаметром статора 46 мм представлены на рисунке 10.

Внешние характеристики макетов скважинных генераторов с длиной активной части ротора 140 и 180 мм и уменьшенным внешним диаметром статора представлены на рисунке 11.

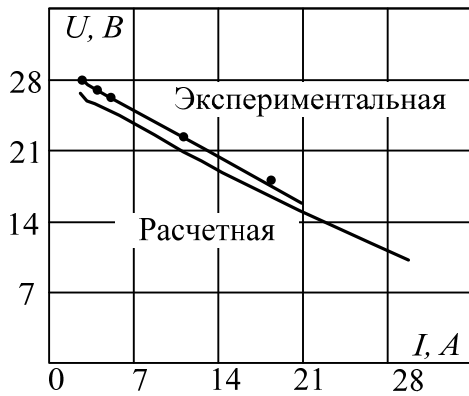


Рис. 10. Внешние характеристики скважинного генератора

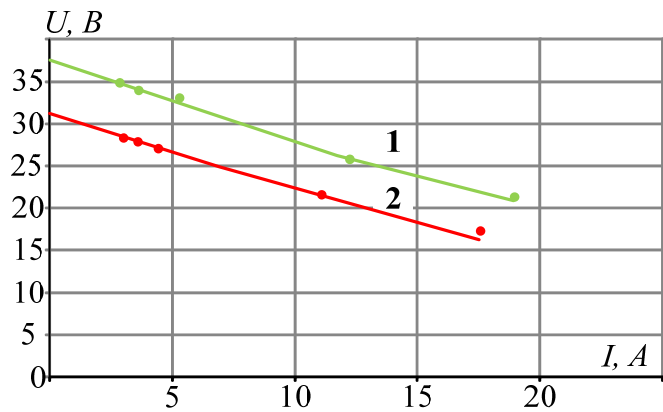


Рис. 11. Внешние характеристики макетов скважинного генератора.

1 – макет с длиной активной части ротора 180 мм;
2 – макет с длиной активной части ротора 140 мм;

В заключении приведены основные выводы по проделанной работе.

В приложениях представлены акты внедрения результатов работы в учебный и производственный процессы, иллюстративные материалы результатов моделирования и расчётов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основные результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Разработанная комплексная математическая модель скважинного генератора в составе телеметрической системы, позволяет учитывать совместную работу скважинного генератора, трехфазного мостового выпрямителя, блока фильтров, автономного инвертора напряжения и нагрузку при работе в динамическом режиме. Модель отличается от известных ранее тем, что в ней реализовано совместное моделирование магнитного состояния скважинного генератора с учётом расчёта электрических цепей скважинной аппаратуры. Данная модель может быть использована для исследования вновь разрабатываемых систем с магнитоэлектрическими синхронными генераторами (МЭСГ), работающих на полупроводниковые преобразовательные устройства.

2. Комплексная математическая модель СГ подтвердила наличие перенапряжений и модуляционных процессов в статорных обмотках скважинного генератора при различных режимах работы телеметрической системы. Модуляционные процессы были отмечены в блоках скважинного прибора, в частности, в блоке фильтров.

3. Проведённые исследования значений перенапряжений и модуляционных процессов напряжения и токов в статорных обмотках скважинного генератора показали, что при снижении основной (выходной) частоты сигнала автономного инвертора напряжения, возрастает величина перенапряжений. Рассмотренный диапазон выходных частот АИН показал, что при частоте ниже 2,5 Гц величина перенапряжений начинает превышать порог 100 В. На уровень модуляционных процессов в блоке фильтров прямое влияние оказывает ёмкость фильтрующих элементов. Результаты моделирования

позволили установить, что для полного устранения модуляции на выходных клеммах блока фильтров требуется повышение суммарной емкости фильтрующих элементов в $7\div 8$ раз выше суммарной емкости серийного блока ($C_\phi = 1980$ мкф).

4. Разработанная математическая модель магнитного состояния серийного скважинного генератора в статическом режиме показала превышение индукции в магнитопроводе статора выше допустимого значения для электротехнических сталей применяемых марок. Величина индукции в ярме магнитопровода статора превышает допустимое значение на 12 %. Что позволяет сделать вывод о неверном соотношении внутренних размеров серийного СГ.

5. На основе полученных результатов моделирования серийной конструкции скважинного генератора была создана математическая модель скважинного генератора двухполюсной конструкции с уменьшенным наружным диаметром магнитопровода статора, с сохранением выходной мощности. Её сохранение было достигнуто за счёт увеличения активной части магнита ротора СГ на длину соответствующую прямолинейному участку вылета лобовых соединений статорной обмотки и составило 40 мм (20 мм с каждой стороны ротора). Расчётное значение приращения напряжения в конструкции с уменьшенным внешним диаметром статора и увеличенной длиной ротора до 180 мм составило чуть больше 27 % (4 В). В результате данного моделирования была создана конструкция скважинного генератора нового типоразмера. Эта конструкция позволяет перейти на забойную арматуру телеметрической системы диаметра 3,5' и менее.

6. Созданные статические модели скважинного генератора с числом полюсов ротора $2p=4$ и разными способами намагничивания ротора позволили установить, что при использовании данной конструкции ротора для сохранения требуемой выходной мощности СГ необходимо использовать магниты с тангенциальным намагничиванием. При использовании данного способа намагничивания становится возможным увеличение выходной мощности СГ за счёт использования постоянных магнитов с более высокими значениями коэрцитивной силы (800-900 кА/м). Также в данной конструкции ротора рекомендуется применять в качестве бандажа карбоновые или кевларовые нити, которые позволяют сократить толщину бандажа и увеличить технологический воздушный зазор, необходимый для циркуляции компенсационной жидкости.

7. Результаты проведённых экспериментальных исследований опытных образцов различных конструкций скважинных генераторов подтвердили адекватность разработанных математических моделей.

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Киселев, А. В. Применение программного продукта ELCUT 5.1 для выбора рациональной геометрии синхронного магнитоэлектрического генератора / А. В. Киселев, О. Л. Рапопорт, А. Б. Цукублин, Ю. В. Ким. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. – № 3. – С. 9–12.

2. Киселев, А. В. Исследование режимов работы системы синхронный генератор – схема питания – нагрузка с применением современных пакетов Maxwell и Simplorer [Электронный ресурс] / О. С. Качин, А. В. Киселев // Наукоеведение. – 2012. – №. 4 – С. 1–8. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/81tvn412.pdf>.

Другие научные публикации по теме диссертации

3. Киселев, А. В. Оптимизация параметров турбогенератора для питания забойной телеметрической системы / Ю. В. Ким, А. В. Киселев, А. Б. Цукублин // Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – С. 429–430.

4. Киселев, А. В. Уменьшение радиального размера турбогенератора для питания забойной телеметрической системы / Ю. В. Ким, А. В. Киселев, А. Б. Цукублин // Современные техника и технологии: сборник трудов XVII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3 т. Т. 1 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 472–473.

5. Киселев, А. В. Применение программы ELCUT для проектирования магнитоэлектрических машин / А. В. Киселев, А. Б. Цукублин // Электромеханические преобразователи энергии: материалы V Юбилейной международной научно-технической конференции, посвященной памяти Г. А. Сипайлова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – С. 76–79.

Патенты

6. Пат. 123600 Российская Федерация, МПК Н 02 К 21/12, Н 02 К 1/27. Синхронная электрическая машина с постоянными магнитами / Рапопорт О. Л., Цукублин А. Б., Киселев А. В. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU). – № 2012123240/07 ; заявл. 05.06.2012 ; опубл. 27.12.2012, Бюл. № 36. – 5 с. : ил.

Личный вклад автора

В работах, написанных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: [1] разработка математических моделей скважинного генератора с числом полюсов ротора $2p=2$ и $2p=4$; [2] разработка комплексной математической модели работы скважинного генератора, работающего совместно с мостовым выпрямителем, блоком фильтров, автономным инвертором напряжения на нагрузку; [3] разработка математической модели скважинного генератора с уменьшенным индуктивным сопротивлением рассеяния; [4] разработка математической модели скважинного генератора с числом полюсов ротора $2p=4$ с уменьшенным внешним диаметром статора; [5] моделирование новой конструкции магнитопровода статора вентильной машины; [6] разработка математической модели конструкции скважинного генератора с новым типом бандажа.