

Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»

на 2009 – 2013 годы»

(мероприятие 1.2.2, очередь XXV, Лот 3)

Поддержка научных исследований, проводимых научными группами под руководством кандидатов наук по научному направлению

«Энергетика, энергосбережение, ядерная энергетика»

в области «Новые и возобновляемые источники энергии, включая водородную энергетику»

Проект 2012-1.2.2-12-000-2003 Соглашение № 8198 от 06 августа 2012г.

Руководитель проекта: к.т.н. И.Ю. Кручинина

Тема проекта:

«Разработка нового поколения энергетических микротурбогенераторных установок с применением инновационных технологий получения керамики на основе наноразмерных ортофосфатов редкоземельных элементов для турбин и антифрикционных покрытий для снижения потерь трения высокооборотных микротурбогенераторов»

Лекционный курс

«Высокооборотные синхронные машины для децентрализованной энергетики»

Лекционный курс «Высокооборотные синхронные машины для децентрализованной энергетики» разработан на основе материалов диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Кручининой И.Ю. «Высокоиспользуемые электрические машины для современной энергетики: проблемы создания и исследований» и монографии авторов *Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Кручинина И. Ю., Хозиков Ю. Ф.* Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения.

Лекционный курс разработан и рекомендован для реализации новых магистерских программ (по ФГОС 3-го поколения) по направлениям подготовки: 140400.68.09 «Технология проектирования и производства электромеханических преобразователей энергии»; 140400.68.10 «Методы исследования и моделирования процессов в электромеханических преобразователях энергии» кафедры «Электрические машины» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета и для бакалавров и магистров базовой кафедры «Наноматериалы в электромеханических и электротехнических системах» факультета интеллектуальных систем управления и нанотехнологий ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

К началу XXI века возникла новая тенденция в развитии и функционировании отечественной энергетики: все более широкое использование возобновляемых источников энергии, таких как ветер, водные источники, солнечная энергия, энергия бросового тепла, что обусловлено экологическими причинами, удорожанием органического топлива, целесообразностью внедрения автономной и малой энергетики для применения в удаленных районах, в качестве систем энергетической безопасности и резервных агрегатов. Для подобного рода систем требуются специальные генераторы, учитывающие специфику нетрадиционных источников энергии. Выработка энергии на основе таких источников, как правило, происходит при переменной, нестандартной скорости вращения, что вызывает необходимость применения преобразователей частоты для обеспечения стандартных уровней напряжения и частоты. Электроснабжение автономных потребителей, предполагающее высокую надежность, простоту конструкции и обслуживания, обуславливает применение постоянных магнитов в качестве источника возбуждения подобных машин. Кроме того, машины с постоянными магнитами имеют более высокий коэффициент полезного действия (КПД), надежное возбуждение (нет щеточного аппарата), улучшенные выходные характеристики, отличаются быстрым затуханием переходных процессов, у них более простая система охлаждения (нет потерь на возбуждение). В некотором диапазоне частот и мощностей генераторы с постоянными магнитами имеют лучшие массогабаритные показатели. Кроме того, их проще выполнять на высокие частоты вращения.

Проблема создания нового поколения электрических машин многопланова, требует системного подхода для учета большого количества связей и факторов. Выработка новых конструктивных решений для повышения технического уровня разрабатываемого оборудования невозможна без проведения предпроектных прогнозных исследований для определения перспектив развития технических основ разработок, оценки возможности применения новых материалов и совершенствования традиционных и применения инновационных технологий при производстве с целью обеспечения приемлемой себестоимости изделий.

Традиционный подход к проектированию опирается на натурное моделирование с изготовлением экспериментальных образцов для их дальнейших исследований и испытаний. Целесообразность применения новых материалов также определяется по результатам изготовления и испытаний опытных образцов машин, что является естественным, но затратным методом исследований. Учет большого количества факторов при проектировании машин нового типа или специального назначения требует совершенствования используемых методик расчета, повышения адекватности

математических моделей и отработки достоверности исходной информации. Такой подход требует от разработчиков тщательного проектирования с привлечением современных аналитических и численных методов расчета, двух- и трехмерного моделирования, дающих возможность построить достаточно полную модель исследуемой конструкции, провести численный эксперимент для выявления особенностей ее поведения и выполнить обоснованную корректировку узлов и элементов машины. Численный эксперимент на базе современных расчетных методов и вычислительной техники позволяет адекватно задавать размеры и геометрию машины, учитывать нелинейность характеристик постоянных магнитов, реальное распределение токов и другие факторы, а также выполнять многовариантные расчеты, обеспечивая повышение надежности и точности расчетов и оптимизацию конструкции машины на этапе проектирования.

В курсе изложены основные вопросы проектирования синхронных электрических машин, в том числе высокооборотных, с возбуждением от постоянных магнитов. Особое внимание уделяется выбору магнитных материалов, характеристикам применяемых материалов и перспективам использования новых типов магнитных материалов, полученных методами нанотехнологий.

ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
«Высокооборотные синхронные машины
для децентрализованной энергетики»,

кафедра «Электрические машины» электромеханического факультета
ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургского государственного политехнического
университета
новая магистерская программа (по ФГОС 3-го поколения) по направлениям
подготовки: 140400.68.09 «Технология проектирования и производства
электромеханических преобразователей энергии»; 140400.68.10 «Методы
исследования и моделирования процессов в электромеханических
преобразователях энергии»

базовая кафедра «Наноматериалы в электромеханических и
электротехнических системах» факультета интеллектуальных систем
управления и нанотехнологий ФГАОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического приборостроения» по
направлению 140400 Электроэнергетика и электротехника.

бакалавры, 1 курс магистратуры
(24 лекционных часа)

I. СОДЕРЖАНИЕ КУРСА

1. Возможности и перспективы децентрализованной энергетики на основе газотурбинного цикла
2. Малоразмерные газотурбинные установки (МГТУ)
3. Концепция высокооборотного мини-турбогенератора для МГТУ
4. Механические ограничения для высокооборотных турбогенераторов
5. Математическая модель синхронной машины с постоянными магнитами (СМПМ)
6. Расчет электромагнитного поля синхронной машины с постоянными магнитами
7. Переходные процессы в синхронной машине с возбуждением от постоянных магнитов. Расчет моментов при пуске
8. Многофазные синхронные машины возбуждением от постоянных магнитов
9. Потери энергии и к.п.д. СМПМ
10. Применение новых материалов для высокооборотных мини-турбогенераторов
11. Размерный параметрический ряд высокооборотных мини-турбогенераторов
12. Проекты высокооборотных мини-турбогенераторов

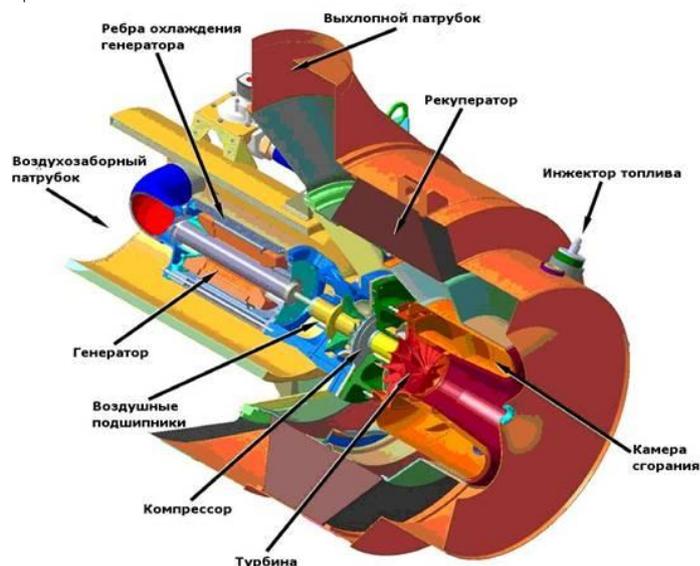
II. Развернутый план лекционного курса
«Высокооборотные синхронные машины
для децентрализованной энергетики»

1. Возможности и перспективы децентрализованной энергетики на основе газотурбинного цикла (2 часа).



- *Газопоршневые и газотурбинные ТЭЦ малой энергетики.*
- *Описание газотурбинной технологии.*
- *Основные типы современных энергетических газотурбинных установок.*
- *Основные характеристики и особенности эксплуатации газотурбинных энергетических установок.*
- *Достоинства газотурбинных энергетических установок.*
- *Требования к топливу.*
- *Градация по мощностям.*
- *Российские и зарубежные производители.*
- *Опыт эксплуатации газотурбинных энергетических установок.*
- *Сравнение характеристик газотурбинных энергетических установок.*
- *Когенерация как основной путь развития автономных теплоэлектростанций.*

2. Малоразмерные газотурбинные установки (2 часа).



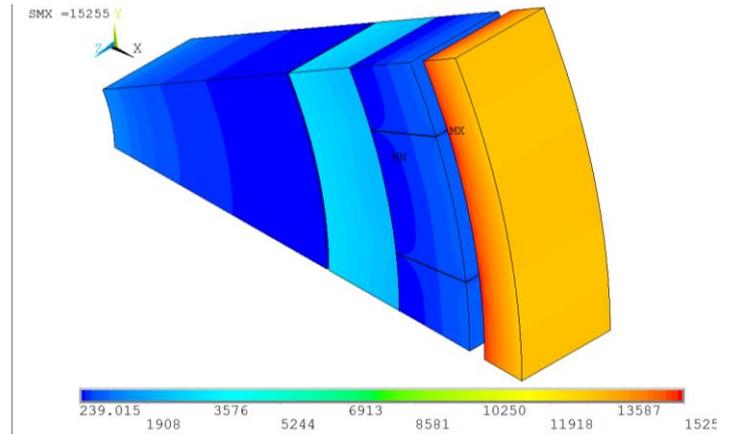
- *Путь развития. МГТУ на рынке России.*
- *Концепция МГТУ. Преимущества МГТУ.*
- *Описание конструкции.*
 - *Турбогенератор.*
 - *Камера сгорания.*
 - *Рекуператор.*
 - *Система утилизации тепла с котлом утилизатором.*
 - *Маслосистема.*
 - *Топливная система.*
 - *Силовая электроника.*
 - *Цифровая система автоматического управления с полной ответственностью типа FADEC (FUUL AUTHORITY DIGITAL ELECTRONIC CONTROL).*
 - *Система воздушного охлаждения.*
- *Преимущества микротурбинных установок.*
- *Технические характеристики.*

3. Концепция высокооборотного минитурбогенератора для МГТУ (2 часа).



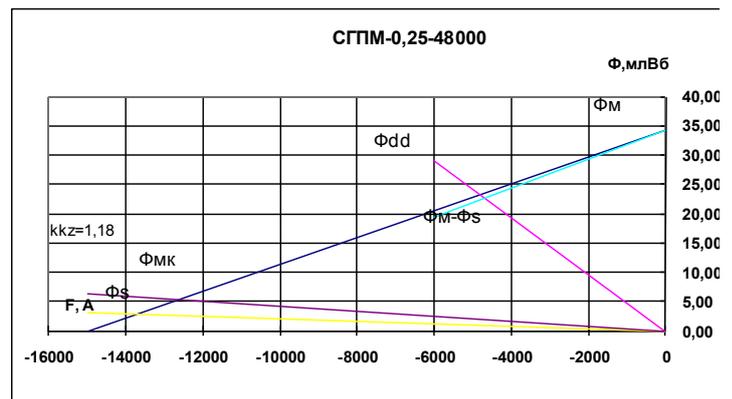
- *Технические требования к минитурбогенератору для МГТУ.*
- *Параметры современных высокоэнергетических магнитов.*
- *Факторы, определяющие характеристики и параметры синхронной машины с постоянными магнитами.*
- *Выбор основных геометрических размеров турбогенератора.*
- *Выбор диаметра ротора.*
- *Выбор фазности, полюсности и уровня питающего напряжения.*
- *Выбор числа зубцов статора.*
- *Выбор линейной нагрузки и индукции в воздушном зазоре.*
- *Влияние объема магнитов на параметры генератора.*

4. Механические ограничения для высокооборотных турбогенераторов (2 часа).



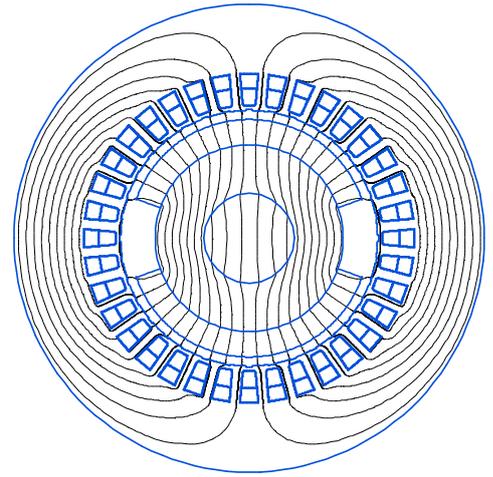
- *Конструкция ротора с радиальным намагничиванием постоянных магнитов.*
- *Критерии прочности бандажного цилиндра ротора. Обеспечение монолитности конструкции.*
- *Решение контактной задачи теории упругости методом конечных элементов.*
- *Исследования напряженно-деформированного состояния и контактных давлений по поверхностям сопряжения. Прочностные расчеты магнитной системы ротора.*
- *Зависимость основных геометрических размеров генератора от допустимых тангенциальных механических напряжений.*
- *Проблемы при выборе натягов и посадок.*
- *Расчет критических частот вращения.*

5. Математическая модель синхронной машины с постоянными магнитами (2 часа).



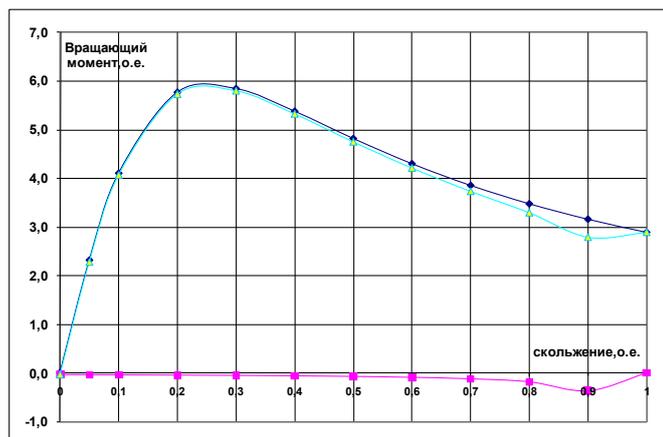
- *Блок ввода исходных данных.*
- *Электромагнитный расчет обмотки статора.*
- *Расчет магнитной цепи постоянных магнитов.*
- *Расчет при нагрузке.*
- *Расчет при коротком замыкании.*
- *Расчет угловых характеристик.*
- *Расчет характеристики холостого хода.*
- *Расчет внешней характеристики.*
- *Вентиляционный расчет.*
- *Тепловой расчет.*

**6. Расчет электромагнитного поля
синхронной машины
с постоянными магнитами
(2 часа).**



- *Общие уравнения магнитного поля в электрических машинах.*
- *Задачи и методы расчета магнитных полей.*
- *Магнитное поле при радиальном намагничивании постоянных магнитов.*
- *Метод конечных элементов.*
- *Режимы холостого хода, нагрузки и короткого замыкания.*
- *Определение индуктивных сопротивлений реакции якоря.*
- *Приближенный расчет параметров.*
- *Сопоставление результатов с численными методами расчета.*

7. Переходные процессы в синхронной машине с возбуждением от постоянных магнитов. Расчет моментов при пуске (2 часа).



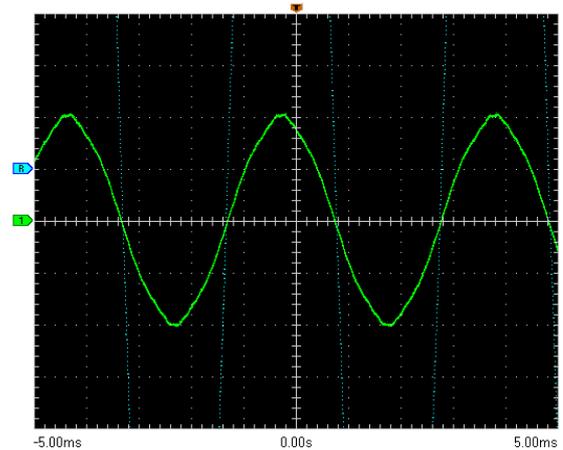
- *Ввод в работу малоразмерной газотурбинной установки.*
- *Требования к работе мини-турбогенератора в режиме стартера.*
- *Особенности пускового режима синхронной машины с постоянными магнитами.*
- *Движущая и тормозная составляющие вращающего момента.*
- *Особенности частотного пуска.*

**8. Многофазные
синхронные машины
возбуждением
от постоянных магнитов
(2 часа).**



- *Анализ выполнения трех-, шести- и девятифазных обмоток для высокооборотных мини-турбогенераторов.*
- *Преимущества и недостатки.*
- *Работа на выпрямительную нагрузку при соединении обмотки статора в одну, две или три звезды.*
- *Исследование электромагнитного поля в расточке при различных вариантах нагрузки.*
- *Анализ кривых распределения магнитной индукции.*
- *Оценка высших гармонических магнитного поля .*
- *Матричные преобразователи.*

9. Потери энергии и к.п.д. СМШМ (2 часа).



- *Потери холостого хода.*
- *Потери в стали, в спинке и зубцах сердечника статора.*
- *Зависимость потерь от материала сердечника.*
- *Холоднокатаные и горячекатаные стали, аморфные материалы.*
- *Механические потери.*
- *Потери в подшипниках и потери трения поверхности ротора о воздух.*
- *Пути снижения потерь холостого хода*
- *Оценка поверхностных потерь в роторе от высших гармонических поля статора и добавочных потерь в сердечнике статора от гармонических поля ротора.*

10. Применение новых материалов для высокооборотных мини-турбогенераторов (2 часа).



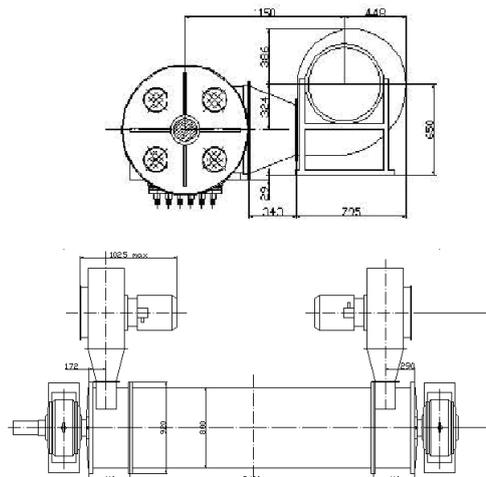
- *Возможности химических и физических нанотехнологий для применения новых материалов в мини-турбогенераторах децентрализованной энергетики.*
- *Немагнитные сплавы для бандажного стакана ротора.*
- *Антифрикционные покрытия ротора.*
- *Аморфные сплавы для сердечника статора.*
- *Высокоэнергетические постоянные магниты.*

11. Размерный параметрический ряд высокооборотных мини-турбогенераторов (2 часа).

$$\begin{aligned}P_{jk} &= a^{4(j-m)} b^{(k-n)} P_{mn} \\D_j &= a^{(j-m)} D_m \\L_{jk} &= a^{(j-m)} b^{(k-n)} L_{mn}\end{aligned}$$

- *Принципы построения размерного ряда.*
- *Размерный ряд для заданной частоты вращения и напряжения.*
- *Закономерности изменения токов, потоков и обмоточных данных.*
- *Закономерности изменения линейной нагрузки и индукции в зазоре.*
- *Закономерности изменения плотности тока при $B_\delta = \text{const}$ и $B_z = \text{const}$.*
- *Необходимые размеры постоянных магнитов.*
- *Размерный ряд при изменении частоты вращения.*

12. Проекты высокооборотных мини- турбогенераторов (2 часа).



- *Турбогенератор для малой энергетики мощностью 6,0 МВт, 12000 мин⁻¹.*
- *Высокооборотной турбогенератор мощностью 1000 кВт для газотурбинной установки ГТУ-1С производства ФГУП «ММПП Салют».*
- *Высокооборотной гелиевый турбогенератор мощностью 420 кВт, 30000 мин⁻¹ для атомных станций малой мощности.*
- *Минитурбогенератор мощностью 250 кВт, 48000 мин⁻¹ для малоразмерной газотурбинной установки МТГ-250 производства ФГУП «УАП Гидравлика».*
- *Сравнение различных систем охлаждения.*
- *Перспективы освоения.*

3. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КУРСА

1. Материальное обеспечение курса, технические средства обучения и контроля

На лекционных занятиях используются компьютеры для обучения методологии проектирования с привлечением современных аналитических и численных методов расчета, двух- и трехмерного моделирования, дающих возможность построить достаточно полную модель исследуемой конструкции, провести численный эксперимент для выявления особенностей ее поведения и выполнить обоснованную корректировку узлов и элементов машины.

При выполнении дипломного проектирования программными средствами типа ELCUT, комплексными пакетами программ ANSYS, CEDRAT и др. моделируются задачи, связанные как с картинками электромагнитных полей, так и с напряженно-деформированным состоянием вращающихся элементов конструкций.

2. Рекомендуемая литература

Основная литература

1. Данилевич Я.Б., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Хозиков Ю.Ф. Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения. С.-Пб, ; Наука, 2009.-102с.:ил.
2. И.Л. Осин, Ю.Г. Шакарян. Электрические машины. Синхронные машины: Учеб. Пособие для вузов по спец. «Электромеханика» .Под ред. И.П. Копылова.-М.: Высш. Шк., 1990.-304с.:ил.
3. В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. Электрические генераторы с постоянными магнитами.-М.: Энергоатомиздат, 1988.-280с.:ил.
4. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами .-М.: Энергоатомиздат, 1985.-168с.:ил
5. Г.М. Хуторецкий, М.И. Токов, Е.В. Толвинская. Проектирование турбогенераторов.-Л.: .: Энергоатомиздат, Ленингр. Отд-ние1987.-256с.:ил
6. Моделирование двумерных полей в программном пакете ELCUT:Руководство пользователя. ТОР. СПб., 1988, 254с.
7. Я.Б. Данилевич, В.В. Гусаров, И.Ю. Кручинина. Новые материалы – новые возможности для энергетики / //Сб. научно-популярных статей –

- победителей конкурса РФФИ 2006 года. Вып. 10. М., Октопус Природа, 2007.- С.468-475.
8. Современная электромеханика. Проблемы и перспективы: Аналитический обзор / Я.Б. Данилевич, И.З. Богуславский, В.В. Попов, И.Ю. Кручинина; под ред. В.В. Попова - СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. – 114 с.
 9. Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина и др. Перспективные электромеханические преобразователи энергии на основе новых материалов и покрытий // Электротехника. - 2010. - №9. - С.2-9.
 10. Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина Новые материалы для децентрализованной энергетики. // Известия Академии электротехнических наук РФ. - 2011. - №1. - С.3-13.
 11. И.Ю. Кручинина, В.Н. Антипов. Проблемные вопросы создания высокоскоростных мини-турбогенераторов и пути их решения.// Информационно-управляющие системы. - 2012. - №4. - С.25-34.

Дополнительная литература

1. И.Ю. Кручинина. Новые материалы для совершенствования характеристик современных электрических машин // В сб. Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования. - СПб.: 2004. - Вып. 6. - С.110-120.
2. Я.Б. Данилевич, И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозиков. Электродвигатели нового поколения / // Энергия: экономика, техника, экология. - 2004. - №10. - С. 42-44.
3. Данилевич Я.Б., Жабрев В.А., Антипов В.Н., Кручинина И.Ю., Иванова А.В., Хозиков Ю.Ф. Перспективный турбогенератор для децентрализованной (локальной) энергетики/Известия академии наук. Энергетика. №4. 2009.
4. Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов. Быстроходные электрические машины для энергетики: состояние и тенденции развития/Электротехника, 2007, №6.

5. Микротурбогенераторы повышенной мощности: возможности и перспективы / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина, Ю.Ф. Хозиков // Альтернативная энергетика и экология. - 2008.- №1. - С.149-151.
6. Данилевич, Я.Б. Роль децентрализованной энергетики в общей энергосистеме / Я.Б. Данилевич, А.Н. Коваленко, И.Ю. Кручинина // Академия энергетики. - 2008. - - №1. - С.42-45.
7. Перспективный турбогенератор для децентрализованной (локальной) энергетики. / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина и др. // Известия РАН. Энергетика. - 2009. - №4. - С.89-97.
8. Кручинина, И.Ю. Электрические машины для малой энергетики: некоторые проблемы проектирования пазовой зоны статора / И.Ю. Кручинина // Известия РАН. Энергетика. - 2012. - №1. - С.113-119.
9. Аналитический отчет "Энергетические газотурбинные установки и энергетические установки на базе газопоршневых и дизельных двухтопливных двигателей. Часть 1, Энергетические газотурбинные установки" Источник: Информационная система по теплоснабжению, РосТепло.ру, <http://www.rosteplo.ru/>
10. A.S. Nagorny, N.V. Dravid, R.H. Jansen, B.Y. Kenny. Design Aspects of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Applications. NASA/TM-2005-213651.
11. Органосиликатные покрытия быстроходного ротора турбогенератора / Я.Б. Данилевич, В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина, В.В. Московская // Тез. докладов XXI Всеросс. совещания по температуроустойчивым функциональным покрытиям. - СПб.: 2010. - С.22-23.
12. Снижение механических потерь микротурбогенераторов малоразмерных газотурбинных установок / В.Н. Антипов, И.Ю. Кручинина, Т.В. Хамова, В.В. Московская // Тез. докладов Российской конференции – научной школы молодых ученых «Новые материалы для малой энергетики и экологии. Проблемы и решения». - Санкт-Петербург, 2011. - С.29.