

**Разработка прототипов технических и технологических решений для создания  
комбинированных роторов высокоскоростных турбогенераторов с возбуждением от  
постоянных магнитов**

Работа проведена в 2017 г. в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 гг.» в период с 01 января 2017 г. по 31 декабря 2017 г.

Соглашение о предоставлении субсидии № 14.577.21.0169 от 27.10.2017г. (Этап 3).

Научный руководитель проекта: зав. кафедрой, д.т.н. Драгунов Виктор Карпович

Ответственный исполнитель: доцент, к.т.н. Гончаров Алексей Леонидович

## **1. Цель прикладного научного исследования и экспериментальной разработки**

Разработка методики проектирования и технологии изготовления роторов высокоскоростных турбогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов, необходимых для создания отечественных установок малой мощности, превосходящих зарубежные аналоги по показателям удельной мощности.

## **2. Основные результаты ПНИЭР**

В 2017 году в рамках 3 этапа в период с 01 января 2017 г. по 31 декабря 2017 г. в соответствии с Планов-графиком исполнения обязательств выполнялись следующие работы:

- разработана программа и методика исследовательских испытаний магнитной системы макета ротора высокоскоростного турбогенератора;
- разработана программа и методика исследовательских испытаний бандажа макета ротора высокоскоростного турбогенератора;
- разработана программа и методика магнитных испытаний макета ротора высокоскоростного турбогенератора;
- разработана эскизная конструкторская документация на стенд и технологическую оснастку для магнитных испытаний экспериментальной партии макетов ротора высокоскоростного турбогенератора;
- разработана эскизная конструкторская документация на стенд для натурных испытаний экспериментальной партии макетов ротора высокоскоростного турбогенератора;
- проведены натурные испытания экспериментальной партии макетов ротора высокоскоростного турбогенератора;
- разработаны технические требования и предложения по разработке, производству и эксплуатации роторов высокоскоростных турбогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов с учетом технологических возможностей и особенностей промышленного партнера;
- разработан проект технического задания на проведение ОКР по теме «Создание опытного образца высокооборотного турбогенератора с комбинированным ротором с возбуждением от постоянных магнитов»;
- проведено обобщение и сделаны выводы по результатам ПНИЭР;
- изготовлена экспериментальная партия бандажей макета ротора высокоскоростного турбогенератора;
- проведены исследовательские испытания экспериментальной партии магнитных систем макета ротора высокоскоростного турбогенератора;
- выполнена сборка экспериментальной партии макетов ротора высокоскоростного турбогенератора;
- проведены магнитные испытания экспериментальной партии макетов ротора высокоскоростного турбогенератора;
- проведены исследовательские испытания части экспериментальной партии бандажей макета ротора высокоскоростного турбогенератора;

- разработано технико-экономическое обоснование разработки роторов высокооборотных турбогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов;
- разработана программа и методика натурных испытаний экспериментальной партии макетов ротора высокоскоростного турбогенератора;
- изготовлен стенд и технологическая оснастка для магнитных испытаний экспериментальной партии макетов ротора высокоскоростного турбогенератора;
- изготовлен стенд для натурных испытаний экспериментальной партии макетов ротора высокоскоростного турбогенератора.

При этом были получены следующие результаты:

Анализ результатов исследования различных вариантов конструкций роторов электрических машин на первом этапе исследования показал, что наилучшими показателями обладают составные конструкции роторов с комбинированным бандажом; такие конструкции обеспечивают наилучшие магнитные характеристики роторов турбогенераторов; при этом по сравнению с традиционно применяемой безвальной конструкцией объем дорогостоящих постоянных магнитов значительно меньше, что обеспечивает более низкую стоимость ротора электрической машины. На предшествующих этапах выполнения ПНИЭР была разработана математическая модель макета ротора высокоскоростного турбогенератора и проведена ее верификация. Расхождение измеренных и рассчитанных значений индуктивности не превышает 1 %, рассчитанные значения потокоцепления фаз, создаваемого постоянным магнитом ротора, отличаются от значений, определённых экспериментально, не более чем на 2 %.

Проведены электромагнитные и прочностные расчеты и определены характеристики материалов банджа, а также магнитные параметры банджа и магнитной системы макета ротора высокоскоростного турбогенератора, выбраны марки материалов для изготовления деталей макета ротора. В качестве материала парамагнитной части банджа предлагается использовать прецизионный сплав марки 36НХТЮ, а для ферромагнитных деталей банджа использовать сталь марки 12Х11Н2МФАБ (ЭП517). На основании выполненных расчетов разработана методика проектирования макетов ротора высокоскоростного турбогенератора. Разработаны эскизные конструкторские документации на магнитную систему, бандж и макет ротора высокоскоростного турбогенератора. Разработаны предварительные проекты технологии изготовления экспериментальной партии макетов банджа и магнитных систем макета ротора высокоскоростного турбогенератора, изготовлена экспериментальная партия магнитных систем в количестве 10 шт.

На заключительном этапе работ была изготовлена экспериментальная партия банджей, проведены их испытания и собрана экспериментальная партия макетов ротора высокоскоростного турбогенератора. Макеты ротора успешно выдержали натурные испытания на созданном испытательном стенде и подтвердили правильность принятых при выполнении ПНИЭР конструкторских и технологических решений. На основании проведенных исследований разработаны Технические требования и предложений по разработке, производству и эксплуатации продукции с учетом технологических возможностей и особенностей промышленного партнера, разработан проект Технического задания на проведение ОКР по теме: «Создание опытного образца высокооборотного турбогенератора с комбинированным ротором с возбуждением от постоянных магнитов», проведено технико-экономическое обоснование целесообразности дальнейших разработок по тематике ПНИЭР, сделаны обобщения и выводы по результатам ПНИЭР.

Новизна разработанных решений заключается в использовании комбинированного банджа, сочетающего в своей конструкции магнитные и немагнитные элементы, соединённые посредством электронно-лучевой сварки (ЭЛС). ЭЛС обеспечивает минимальные размеры переходных зон от магнитного материала к немагнитному. На разработанный способ ЭЛС получен патент № 2635445 от 28.12.2016 «Способ электронно-лучевой сварки разнородных ферро- и парамагнитных материалов». В 2017 году подано 2 заявки на изобретение:

- № 2017146323 «Комбинированный ротор высокоскоростной электрической машины» от 27.12.2017;

- № 2017146324 «Катодный блок сварочной электронной пушки» от 27.12.2017.

Результаты проекта, полученные на отчетном этапе, полностью соответствуют требованиям Технического задания и Плана-графика исполнения обязательств.

### **3. Область применения результатов проекта**

Полученные в результате проекта технические и технологические решения будут использованы при создании высокооборотных турбогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов работающих в диапазоне частот вращения от 50 до 150 тысяч об/мин., предназначенных для проектирования и изготовления на производственных мощностях индустриального партнера мультитопливных энергетических энергоустановок, вырабатывающих от 10 до 60 кВт электрической энергии и 20-60 кВт тепловой энергии для систем децентрализованного энергоснабжения. Системы и комплексы децентрализованного энергоснабжения, в частности, удалённых и труднодоступных районов; установки распределённой когенерации, объединённые в кластеры, позволяющие решить задачу снабжения теплом и электроэнергией небольших посёлков, особенно в Сибири и на Дальнем Востоке; объекты распределённой энергетики на базе местного возобновляемого биотоплива (дрова, опилки, отходы переработки древесины и т. п.); специальные объекты, обеспечивающие обороноспособность страны, объекты, обеспечивающие безопасность в условиях климатических и техногенных катастроф, в чрезвычайных ситуациях, когда надёжность электро- и теплоснабжения потребителей уже не может быть обеспечена только средствами централизованных систем электроснабжения.

В целях коммерциализации (практического использования) результатов интеллектуальной (научно-технической) деятельности, полученных в рамках проекта ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» совместно с АО «НИИЭМ» осуществляют подготовку к проведению ОКР на тему «Создание опытного образца высокооборотного турбогенератора с комбинированным ротором с возбуждением от постоянных магнитов» в соответствии с разработанным на 3 этапе проекта Техническим заданием. Права на использование РИД будут переданы Индустриальному партнеру в виде неисключительной лицензии сроком на 5 лет. Лицензионный договор будет заключен в срок до 31 мая 2018 года между ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» и АО «НИИЭМ», являющимся Индустриальным партнером по Соглашению, будет заключен Лицензионный договор на передачу неисключительного права на использование изобретения «Способ электронно-лучевой сварки разно родных ферро – и парамагнитных материалов», охраняемого патентом № 2635445 (дата приоритета 28.12.2016, опубл. 13.11.2017). Лицензионные договоры на передачу неисключительного права на использование изобретений «Комбинированный ротор для высокоскоростной электрической машины» (заявка № 2017146323 от 27.12.2017) и «Катодный блок сварочной электронной пушки» (заявка №2017146324 от 27 12.2017) будут заключены между ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» и АО «НИИЭМ» после прохождения процедуры экспертизы заявок в ФИПС и получения охранных документов.

### **4. Оценка перспектив продолжения работ по проекту**

Результаты работы, полученные на третьем заключительном этапе выполнения Соглашения, полностью соответствуют Техническому заданию и Плана-графика и дают основание полагать, выполнены все поставленные задачи, а результаты ПНИЭР найдут широкое применение в промышленности.

Комиссия Минобрнауки России признала обязательства по Соглашению на отчетном этапе исполненными надлежащим образом.