

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.2.02

УДК 621.313

С.А. Ганджа¹, Д.С. Аминов^{1,2}, Б.И. Косимов^{1,2}

¹Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), ЮУрГУ (НИУ) Челябинск, Россия

²Институт энергетики Таджикистана, Бохтар, р-н Кушониён, Республика Таджикистан

РАЗРАБОТКА ВОДОПОГРУЖНОГО ГИДРОГЕНЕРАТОРА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ЭНЕРГИИ МАЛЫХ И СРЕДНИХ РЕК

Современная энергетика развивается в направлении уменьшения доли в общем энергобалансе мощных источников генерации и увеличения доли распределённой генерации малой и средней мощности, в частности альтернативных источников. В этой тенденции следует отметить увеличение количества малых и средних гидроэлектростанций (мини-ГЭС). Это объясняется тем, что энергетический потенциал малых и средних рек России и ближнего зарубежья по разным оценкам в несколько раз превышает этот показатель для больших рек. Для эффективного использования этого потенциала следует идти не по пути создания ряда стандартных мини-ГЭС, а по пути разработки проектных систем, ориентированных на гибкое производство, которые изготавливали бы гидрогенераторы для конкретного места реки с учетом ее особенностей по параметрам водотока и рельефа. **Цель исследования:** разработка проектной системы для гибкого производства по созданию энергоэффективных мини-ГЭС на базе вентильных машин комбинированного возбуждения. **Методы:** метод конечных элементов для решения задач электромагнитного анализа, метод трехмерного твердотельного моделирования. **Результаты:** разработанная проектная система позволит осуществлять синтез оптимальной геометрии в соответствии с техническим заданием заказчика. В статье представлена только часть такого исследования, в частности, дано описание подсистемы синтеза водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения. Подсистема построена на основе программы Ansys Electronics Desktop и позволяет проводить комплексный анализ электрической машины и системы управления к ней. Эффективность работы подсистемы показана на анализе генератора комбинированного возбуждения 3 кВт, 220 В, 350 об/мин. **Практическая значимость:** созданная проектная система позволяет спроектировать энергоэффективную мини-ГЭС на любые требуемые параметры с учетом установки ее в конкретное место на малых и средних реках. Цифровой двойник, реализуемый этой системой, во многом снижает технические риски при производстве реального образца.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, гидрогенератор, генератор комбинированного возбуждения, обращенная конструкция, бесконтактный токоподвод, цифровой двойник.

S.A. Gandzha¹, D.S. Aminov^{1,2}, B.I. Kosimov^{1,2}

¹National Research South Ural State University SUSU, Chelyabinsk,
Russian Federation

²Institute of Energy of Tajikistan, Bokhtar, Kushoniyon district,
Republic of Tajikistan

DEVELOPMENT OF WATER SUBMERSIBLE GYRO GENERATOR OF COMBINED EXCITATION FOR ENERGY DEVELOPMENT OF SMALL AND MEDIUM RIVERS

Modern energy is developing in the direction of decreasing the share of powerful generation sources in the overall energy balance and increasing the share of distributed generation of small and medium power, in particular alternative sources. In this trend, an increase in the number of small and medium-sized hydroelectric power stations (mini-hydroelectric power stations) should be noted. This is because the energy potential of small and medium-sized rivers in Russia and neighboring countries, according to various estimates, is several times higher than that for large rivers. For the effective use of this potential, one should go not along the path of creating a number of standard mini-hydroelectric power stations, but along the path of developing design systems focused on flexible production that would produce hydrogenerators for a specific place of the river, taking into account its features in terms of the flow and relief. **Purpose:** development of a design system for the creation of energy-efficient mini-hydroelectric power stations based on combined excitation valve machines for flexible production. **Methods:** finite element method for solving electromagnetic analysis problems, three-dimensional solid-state modeling method. **Results:** the developed design system will allow the synthesis of optimal geometry in accordance with the technical specifications of the customer. Only part of such a study is presented in the article, in particular, a description is given of the synthesis subsystem of the combined submersible water submersible hydrogenerator. The subsystem is based on the Ansys Electronics Desktop program and allows a comprehensive analysis of the electrical machine and its control system. The efficiency of the subsystem is shown in the analysis of the combined excitation generator 3 kW, 220 V, 350 rpm. **Practical relevance:** the created design system allows you to design an energy-efficient mini-hydroelectric power station for any required parameters, taking into account its installation in a specific place on a small and medium river. The digital double implemented by this system largely reduces the technical risks in the production of a real sample.

Keywords: alternative energy, hydrogenerator, combined excitation generator, reversed design, non-contact current supply, digital double.

Введение. Во всех ведущих странах потребление электроэнергии непрерывно растет. При этом можно проследить следующую тенденцию: количество вновь вводимых мощных электростанций (атомных электростанций, гидроэлектростанций, тепловых электростанций) сокращается при неуклонном росте малой и средней распределенной генерации. Во многом это объясняется экономическими факторами, такими как большие затраты на строительство линий электропередач в отдаленные районы, эксплуатационным и моральным износом старого оборудования. Но в этой тенденции можно увидеть и техническую

целесообразность. Крупные аварии мощных энергосистем, таких как Саяно-Шушенская ГЭС, Чернобыльская и Фокусимская атомные станции, показали недостаточно высокую надежность централизованного электроснабжения, а также тяжелые последствия выхода мощных энергосистем из строя. Если бы эти мощности были бы распределены на большее количество станций, надежность всей энергосистемы была бы гораздо выше. В какой-то степени современную энергосистему можно сравнить с Интернетом, где большое количество источников разной мощности включено в единую сеть.

Одним из динамически развивающихся источников распределенной генерации являются объекты альтернативной энергетики. Существенный вклад в баланс альтернативной энергетики вносят гидроэлектростанции малой и средней мощности (мини-ГЭС).

Предварительные расчеты показывают, что энергетический потенциал малых и средних рек России и стран ближнего зарубежья во многом превосходит этот показатель для больших рек [1–6]. При этом малая гидроэнергетика в меньшей степени влияет на окружающую среду. Следует принять во внимание и незначительные капитальные затраты, связанные с установкой небольших гидрогенераторов, особенно в удаленных и труднодоступных местах. Современное развитие систем накопления электроэнергии дает новый импульс в развитии этой отрасли.

Мини-ГЭС имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с другими источниками альтернативной энергетики. Погруженные в воду, они используют энергию естественного потока воды, не нанося экологического вреда окружающей среде. Немаловажным фактором является эстетика. Мини-ГЭС, находясь на глубине, не нарушает природный ландшафт водоема и внешний вид окружающей природы в отличие от вертоэнергетических установок и солнечных батарей.

Для того чтобы мини-ГЭС были энергоэффективны, необходимо решить следующую серьезную научно-техническую проблему. Природные ландшафты рек очень разнообразны. Реки имеют разную глубину, рельеф, скорость течения. Проектировать типовой ряд мини-ГЭС по мощности можно, но при этом они не будут приспособлены к данному месту установки и будут работать не на максимуме КПД и других энергетических показателей. Возникает задача создания гибкого производства и разработки мини-ГЭС для конкретной реки и конкретного места установки. Для этого необходимо создать проектную

систему по разработке таких мини-ГЭС. Авторы в течение ряда лет занимаются этой проблемой. Некоторые результаты этой работы, а именно создание в проектной системе гидрогенератора комбинированного возбуждения, представлены в данной статье.

Краткий анализ типов гидрогенераторов малой и средней энергетики. Выбор типа генератора является наиболее важным компонентом создания вышеназванной проектной системы. Рассмотрим различные типы электрических машин применительно к гидрогенераторам мини-ГЭС.

По способу монтажа гидрогенераторы можно подразделить на работающие вне водной среды и водопогружные. Отдадим предпочтение водопогружным генераторам [7]. Основными их преимуществами являются простота монтажа, экологичность (они не создают искусственные запруды) и эстетичность для окружающей среды (их не видно над поверхностью воды). Среди ведущих стран, занимающихся этой проблемой, следует выделить США, Канаду, Японию, Китай, ведущие европейские страны [8–11].

Наиболее распространёнными типами применяемых электрических машин являются:

- асинхронные генераторы, работающие с возбуждением от конденсаторов [12–14];
- бесконтактные синхронные генераторы с постоянными магнитами [15–16].

Первый тип генераторов имеет высокую надежность за счет короткозамкнутого ротора. Но без конденсаторных батарей в автономном режиме он работать в принципе не может. Наличие конденсаторных батарей снижает надежность и существенно увеличивает стоимость всей установки.

Синхронные генераторы с постоянными магнитами тоже имеют высокую надежность за счет бесконтактного токоподвода. Но в этих электрических машинах нельзя регулировать магнитный поток. Это приводит к тому, что генератор должен быть спроектирован на широкий диапазон изменения частоты вращения, чтобы обеспечить требуемый уровень выходного напряжения, т.е. генератор должен иметь завышенные габариты и мощность. Кроме этого стабилизация выпрямленного для накопителя напряжения по якорной цепи приводит к дополнительным потерям и удорожанию системы управления.

Наиболее приемлемым вариантом для поставленной цели следует признать синхронный генератор с так называемым комбинированным возбуждением [17]. Этот класс электрических машин содержит два источника для возбуждения: постоянные магниты и обмотку возбуждения. При этом применение мощных постоянных магнитов позволит уменьшить габариты генератора, а возможность регулирования магнитного потока за счет обмотки возбуждения во многом упростит систему по стабилизации выходного напряжения. Известные генераторы комбинированного возбуждения имеют существенные недостатки, которые ограничили их применение [18]. Это дополнительный паразитный воздушный зазор, увеличивающий габариты, и контактный токоподвод, который снижает надежность.

Для разрабатываемой проектной системы была выбрана запатентованная авторами конструкция генератора комбинированного возбуждения, которая лишена этих недостатков [19]. Описание конструкции и принцип действия генератора представлены ниже.

Описание конструкции и принципа действия синхронного генератора комбинированного возбуждения. Особенность генератора заключается в наличии двух источников магнитного поля для возбуждения. Это постоянные магниты и обмотки возбуждения. Такая сложность индуктора технически оправдана. Известно, что магнитные системы с постоянными магнитами имеют меньшие габаритные размеры по сравнению с электромагнитным возбуждением при одинаковом магнитном потоке. Это объясняется тем, что постоянный магнит создает поток своим объемом, т.е. магнитный поток зависит от линейных размеров в третьей степени. При электромагнитном возбуждении магнитный поток зависит от сечения полюса и сечения меди обмотки возбуждения, т.е. от линейных размеров в четвертой степени. Таким образом, применяя мощные высококоэрцитивные магниты, мы можем существенно уменьшить размеры индуктора. Обмотка возбуждения позволяет регулировать суммарный магнитный поток в якорной цепи, добавляя свой поток к потоку постоянных магнитов или вычитая его. На цепь возбуждения приходится от 3 до 8 % общей мощности, поэтому управлять выходным напряжением с помощью обмотки возбуждения очень выгодно. Для этого можно использовать слаботочную электронику. Таким образом, мы имеем возможность уменьшить габариты генератора и упростить систему управления выходным напряжением. Эскиз генератора показан на рис. 1.

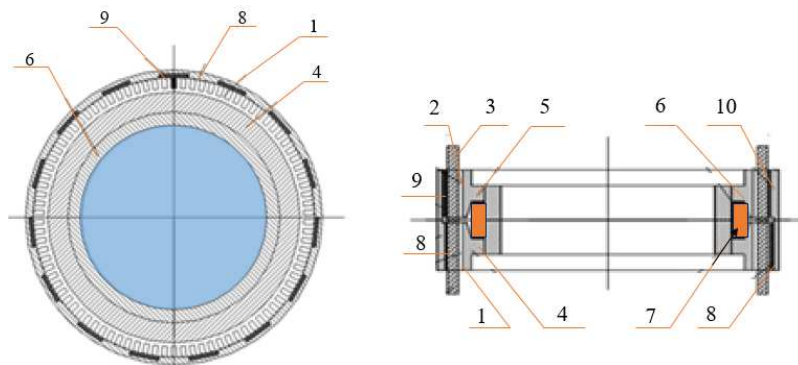


Рис. 1. Эскиз генератора комбинированного возбуждения

Генератор состоит из двух основных частей: статора и ротора. Статор содержит шихтованные из электротехнической стали пакеты 1 и 2 с пазами. Паза пакеты в осевом направлении совпадают. В пазах пакета расположена многофазная обмотка 3. Пакеты крепятся к массивным частям магнитопровода 4 и 5. Части 4 и 5 напрессованы на втулку 6. Между пакетами магнитопровода расположена неподвижная обмотка возбуждения 7. Ротор генератора расположен снаружи статора. Он имеет массивный ферромагнитный полюс 8 и постоянные магниты 9 и 10. Постоянные магниты и полюса чередуются друг с другом и расположены по кругу. Они образуют два кольца, которые охватывают пакеты 1 и 2. Кольца индуктора расположены таким образом, что в осевом направлении напротив полюса 8 расположен постоянный магнит 9 или 10. Магниты 9 и 10 имеют радиальную намагниченность, при этом в одном кольце магниты имеют «южную» намагниченность 9 на поверхности, обращенной к пакету, в другом кольце – «северную» намагниченность 10.

Генератор работает следующим образом. Когда обмотка возбуждения 7 питается постоянным током, она создает магнитный поток, который замыкается по пути: пакет 1, воздушный зазор, массивный полюс 8 первого кольца, задняя часть ротора, массивный полюс 8 второго кольца, воздушный зазор, пакет 2, магнитопровод 5, втулка 6, магнитопровод 4.

Магнитный поток, который создается постоянными магнитами, замыкается по следующему пути: пакет 1, воздушный зазор, «южный магнит» 9, задняя часть ротора, «северный магнит» 10, воздушный зазор, пакет 2, магнитопровод 5, втулка 6, магнитопровод 4.

Направление магнитного потока от постоянных магнитов не меняется, соответственно, не меняется ЭДС вращения, наводимая этим потоком. Направление потока от обмотки возбуждения может меняться. Это зависит от полярности источника питания, к которому обмотка подключена. Соответственно, ЭДС вращения, наводимая от потока обмотки возбуждения, меняет знак и может быть добавлена к результирующей ЭДС или вычитаться из нее.

При изменении скорости вращения вала ротора величина и направление тока в обмотке возбуждения выбираются таким образом, чтобы результирующая ЭДС была постоянной. При этом амплитуда выходного напряжения генератора остается постоянной при изменении частоты вращения в широком диапазоне, что необходимо для автономных источников питания.

Данная конструкция была взята в качестве базовой для проектирования гидрогенераторов малой и средней мощности, которые через выпрямитель работают на накопитель электроэнергии в виде аккумуляторных батарей.

Для проектирования генератора описанной конструкции была создана специальная проектная система. Она состоит из подсистемы синтеза и подсистемы анализа. Подсистема синтеза реализована на основе концепции многоуровневой однокритериальной оптимизации. В основу подсистемы анализа легли хорошо отработанные САД программы по расчету магнитных и тепловых полей. Подсистема синтеза подробно описана в [20–22]. В данных статьях показаны результаты работы подсистемы анализа.

Анализ основных параметров и характеристики гидрогенератора комбинированного возбуждения с применением программного комплекса Ansys Electronics Desktop. В основу создания подсистемы анализа в проектной системе был выбран программный комплекс Ansys Electronics Desktop. Выбор данного программного средства обусловлен сложностью магнитной системы, имеющей два источника возбуждения.

В качестве примера работы подсистемы показан анализ генератора комбинированного возбуждения со следующими параметрами: номинальная мощность 3000 Вт, номинальное фазное напряжение 220 В, номинальная частота вращения 350 об/мин.

Генератор имеет следующие основные размеры и конструктивные параметры: диаметр расточки якоря 345 мм, длина пакета железа якоря 77 мм, число полюсов 16, число зубцов обмотки якоря 48, высота паза 25 мм, ширина паза 7 мм, число витков в фазной обмотке 208, диаметр провода обмотки якоря 1,5 мм, высота постоянного магнита 7 мм, воздушный зазор 1 мм размеры окна под обмотку возбуждения 35×30 мм, число витков обмотки возбуждения 2000, диаметр провода обмотки возбуждения 0,35 мм.

Данная конструкция не входит в перечень типовых электрических машин, предлагаемых ANSYS Electronics Desktop, поэтому для анализа необходимо создать модель с помощью встроенных в программу инструментов.

В основе технологии Solid modeling, используемой в Maxwell, лежит специальный интегрированный в программу графический редактор, позволяющий создавать модели с использованием вложенных в программу примитивов.

Геометрия генератора не имеет плоской симметрии, поэтому для анализа необходимо было создать трехмерную модель.

Встроенные в программу примитивы использовались для создания железа якоря, постоянных магнитов, обмотки якоря. Для построения модели использовалась осевая симметрия, т.е. для расчетов была построена только часть генератора. Это существенно экономит компьютерные ресурсы. Полные характеристики определялись умножением результатов на количество составляющих частей. При этом учитывались условия периодичности.

На рис. 2 представлена 3D-модель, построенная по заданным размерам.

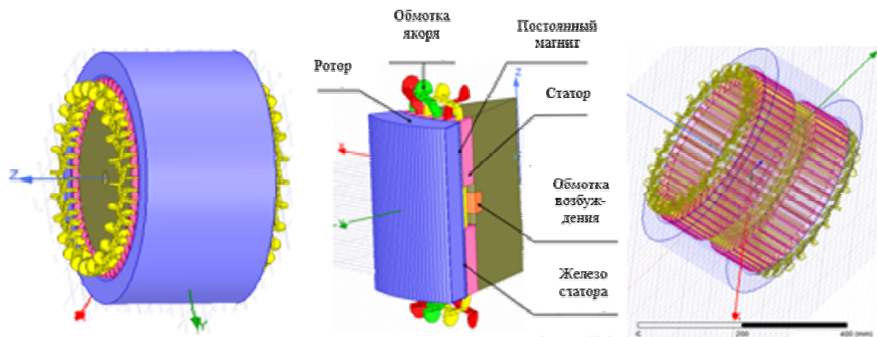


Рис. 2. Результаты создания трехмерной модели

Для решения задачи программа разбивает модель на большое количество конечных элементов. Для каждого элемента формируется система уравнений для локальной матрицы. Глобальная матрица формируется из локальных матриц для решения полевой задачи. Результаты расчета магнитного поля приведены на рис. 3.

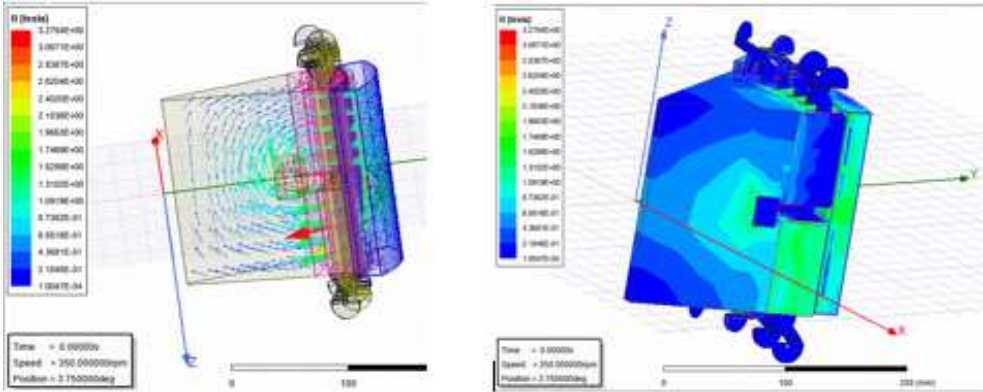


Рис. 3. Вычисление магнитного поля

ANSYS Electronics Desktop позволяет учитывать влияние электронной системы управления на работу электрической машины. Принципиальная схема строится с использованием программы Maxwell Circuit, которая является приложением программы. На рис. 4 показаны трехфазный выпрямитель и регулятор напряжения, который управляет обмоткой возбуждения для стабилизации выходного напряжения генератора. Обмотка возбуждения включена в мостовую схему.

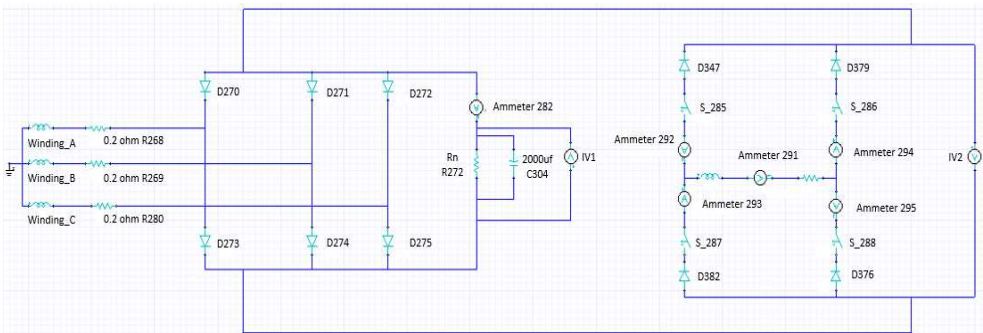


Рис. 4. Электронная схема системы управления

Плечами моста являются ключи, порог срабатывания которых определяется диапазоном стабилизации напряжения. При превышении требуемого выходного напряжения в регуляторе открываются ключи,

которые подключают обмотку возбуждения на подавление ЭДС от постоянных магнитов. При недостаточном напряжении происходит обратный процесс: подключается пара ключей, которые включают обмотку возбуждения на добавление ЭДС к напряжению, которое генерируют постоянные магниты. Таким образом, выходное напряжение стабилизируется в требуемом диапазоне за счет регулирования по цепи возбуждения.

На рис. 5–7 представлены основные характеристики разработанной трехмерной модели генератора. Выходное выпрямленное напряжение под номинальной нагрузкой представлено на рис. 5. Расчетное значение выпрямленного напряжения показывает, что обмотка возбуждения достаточно эффективно стабилизирует напряжение в заданном диапазоне.

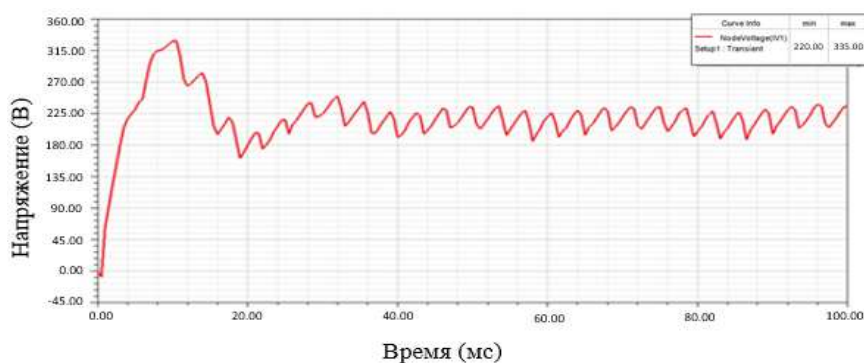


Рис. 5. Зависимости выпрямленного напряжения от времени

Зависимости потокосцеплений основного магнитного потока с фазами якорной обмотки представлены на рис. 6. Они имеют характерный пилообразный характер из-за большого значения коэффициента полюсной дуги.

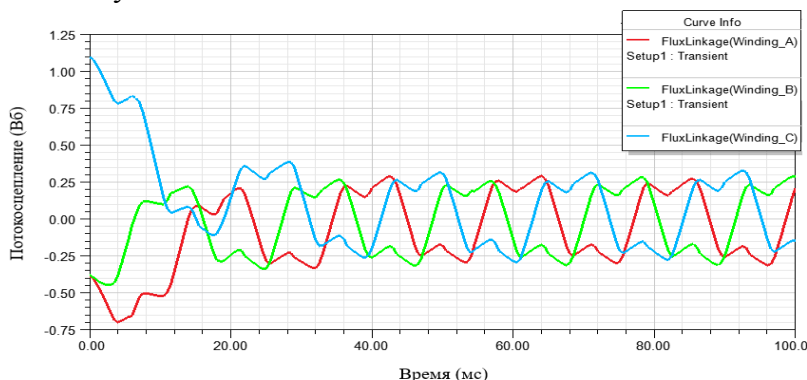


Рис. 6. Зависимости потокосцепления основного магнитного потока с фазами якорной обмотки

Большие пульсации крутящего момента (рис. 7) объясняются в основном реактивным моментом. Крутящий момент рассчитывался без инерционной массы лопастей гидрогенератора. В реальном изделии пульсации момента сгладятся за счет этой инерционной нагрузки.

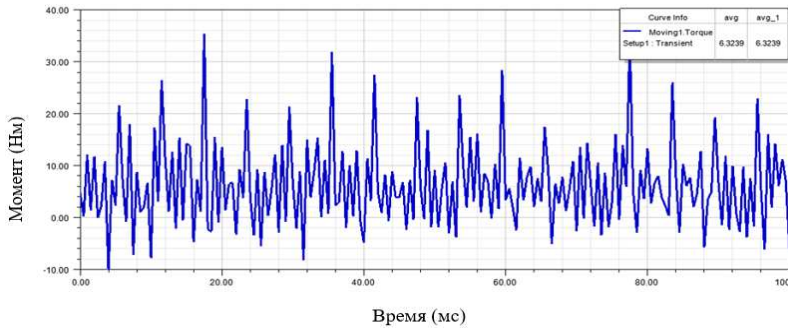


Рис. 7. Кривая крутящего момента при номинальной нагрузке

Полученные результаты свидетельствуют о том, что созданная цифровая модель практически является цифровым двойником реальной электрической машины и может быть использована для системы анализа при проектировании генераторов данного типа.

Разработка трехмерной твердотельной конструкции гидрогенератора с применением программы Solidworks. Для отработки конструктивных решений было принято решение разработать конструкцию рассчитанного выше генератора 3 кВт с применением CAD проектной системы по созданию трехмерных твердотельных моделей Solidworks. Фрагменты спроектированной в программе Solidworks трехмерной модели представлены на рис. 8.

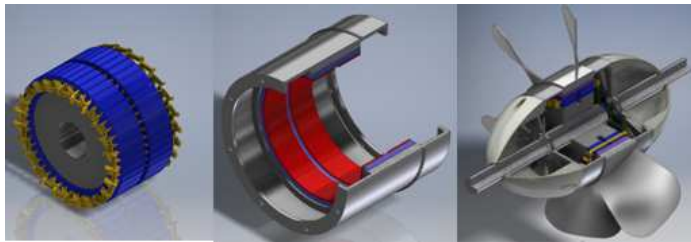


Рис. 8. Ротор с постоянными магнитами и генератор в сборе

Для проверки собираемости и отработки вопросов по технологичности конструкции была изготовлена масштабная пластмассовая конструкция модели гидрогенератора с использованием технологии 3D-принтера. Фотографии реальной пластмассовой модели представлены на рис. 9.



Рис. 9. Фотографии масштабной модели генератора, изготовленной по технологии 3D-принтера

Выводы. Распределенная генерация постоянно увеличивает свою долю в общем балансе электроэнергии всех стран. Значительную часть в этом балансе занимает малая и средняя гидроэлектростанция. Для эффективного использования этого потенциала необходимо разрабатывать мини-ГЭС применительно к конкретному месту установки реки с ее специфическими параметрами по течению и рельефу. При современном развитии гибкого производства это технически возможно и экономически целесообразно. Представленные мини-ГЭС на базе запатентованной конструкции вентильного генератора комбинированного возбуждения в определенной мере решают эту проблему. Погруженные в воду, они представляют собой экологически чистый источник электроэнергии и, что немаловажно для гидроэлектростанций, не нарушающий внешний природный ландшафт. Представленная проектная система для гибкого производства показала свою эффективность при проектировании ряда мини-ГЭС и, в частности, гидрогенератора 3 кВт, 220 В, 350 об/мин. Система состоит из двух подсистем: подсистемы синтеза оптимальной геометрии и подсистемы анализа. Подсистема анализа, представленная в статье, построена на основе современной САД-системы Ansys Electronics Desktop, в основе которой лежит метод конечных элементов.

Она позволяет провести комплексный анализ электрической машины и системы управления к ней. На созданном цифровом двойнике можно провести все исследования и испытания генератора в различных режимах, что во многом снимает технические риски при его производстве. Данный подход можно рекомендовать для разработки электроприводов других типов и применений. Разработанную проектную систему планируется развивать дальше в направлении сквозных технологий, при которых бумажная документация будет постепенно заменяться электронным документооборотом в технологической цепочке: расчеты, конструирование, изготовление, испытание.

Работа выполнялась в Южно-Уральском государственном университете при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-19-00327). Авторы благодарят администрацию университета, предоставившую возможность реализации данного проекта.

Библиографический список

1. Klyuev R.V., Bosikov I.I. Research of waterpower parameters of small hydropower plants in conditions of mountain territories // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2016.

2. Anastasiya A. Zhdanovic, Evgeny N. Timoshenko. Investigations on Possible Places for Installation of Small Hydro Plants at Municipal Industrial Wastewaters // 14th International Scientific-Technical Conference АРЕIE – 44894. – 2018.

3. Ганджа С.А., Аминов Д.С. Разработка водопогружного гидрогенератора в качестве возобновляемого источника электроэнергии малых рек // Материалы Десятой науч. конф. аспирантов и докторантов ЮУрГУ. – Челябинск, 2018. – С. 82–86.

4. Панасюк А.М., Тоокомбаев К.А., Шайнова Г.А. Малые гидроэлектростанции и перспективы их развития // Гидротехническое строительство. – 1987. – № 6. – С. 44–49.

5. Фельдман Б.Н., Марканова Т.К., Серегина М.И. Состояние и тенденции развития малой гидроэнергетики // Энергетическое строительство за рубежом. – 1987. – № 3. – С. 23–27.

6. Прямоточные и погружные гидрогенераторы. – М.: ЦИНТИМ, 1962. – 211 с.

7. Гидроэнергетика США. – URL: <http://www.eeseaec.org/energetika-stran-mira/energetika-stran-mira-severnaa-amerika/energeticeskij-profil-ssa/gidroenergetika-ssa>

8. Электроэнергетический комплекс Канады. – URL: <http://www.eeseaec.org/energetika-stran-mira/energetika-stran-mira-severnaa-amerika/energeticeskij-profil-kanady/elektroenergeticeskij-kompleks-kanady>

9. Гидроэнергетика Японии. – URL: <http://www.eeseaec.org/energetika-stran-mira/energetika-stran-mira-azia-i-okeania/energeticeskij-profil-aponii/gidroenergetika-aponii>

10. The European Small Hydropower Association (ESHA). – URL: <https://web.archive.org/web/20110426043551/http://www.esha.be/index.php?id=4>

11. Радин В.И., Винокуров В.А., Аскерко В.С. Применение асинхронного генератора как автономного источника переменного тока // Электротехника. – 1967. – № 8. – С. 17–20.

12. Голландцев Ю.А. Сравнение механических характеристик асинхронных и вентильных индукторно-реактивных электродвигателей // Информационно-управляющие системы. – 2006. – № 6. – С. 50–53.

13. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. – М.: Энергия, 1964.– 480 с.

14. Сравнительный обзор синхронного электродвигателя с постоянными магнитами и бесколлекторного электродвигателя постоянного тока при непосредственном управлении моментом / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов, Е.И. Ионова [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 6. – С. 123–128.

15. Gandzha S., Aminov D., Kosimov B. Application of the combined Excitation Submersible Hydrogenerator as an Alternative energy source for small and medium rivers // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI); 4–5 October 2019. – Magnitogorsk, 2019. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915294

16. Мартянов А.С., Неустроев Н.И. Анализ электромеханических систем с помощью ANSYS MAXWELL // Альтернативная энергетика и экология: междунар. науч. журнал. – 2014. – № 19(159). – С. 47–52.

17. Аминов Д.С. Применение программного комплекса Ansys Electronics Desktop для анализа водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 1(46). – С. 13–18.

18. Аминов Д.С., Косимов Б.И., Ниматов Р.Р. Использование малых гидроэлектростанций в качестве возобновляемых источников энергии // Приоритетные направления развития энергетики в АПК (Курган, 22 февраля 2018 г.) / Курган. гос. сельскохозяйств. акад. им. Т.С. Мальцева. – Курган, 2018. – С. 70–75.

19. Генератор переменного тока: пат. 2244996 Рос. Федерация, МПК Н 02 К 19/16, 1/06 / Ганджа С.А., Соломин Е.В., Шауфлер А.Д.; № 2003124088/09; заявит. и патентооблад. С.А. Ганджа; заявл. 31.07.03; опубл. 20.01.05.

20. Разработка инженерной методики расчета магнитных систем с постоянными магнитами на основе метода конечных элементов / С.А. Ганджа, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов, Р.Р. Ниматов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 29. – С. 58–74.

21. Gandzha S., Aminov D., Kosimov B. Development of Engineering Method for Calculation of Magnetic Systems for Brushless Motors Based on Finite Element Method // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICOEAM); 25–29 March, Sochi, 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742976

22. Ганджа С.А., Аминов Д.С., Косимов Б.И. Применение водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения в качестве альтернативного источника энергии для малых и средних рек // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2019. – № 4. – С. 102–111.

References

1. Klyuev R.V., Bosikov I.I. Research of waterpower parameters of small hydropower plants in conditions of mountain territories. *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, 2016.

2. Anastasiya A. Zhdanovic, Evgeny N. Timoshenko. Investigations on Possible Places for Installation of Small Hydro Plants at Municipal Industrial Wastewaters. *14th International Scientific-Technical Conference APEIE - 44894*, 2018.

3. Gandzha S.A., Aminov D.S. Razrabotka vodopogruzhnogo gidrogeneratora v kachestve vozobnovliaemogo istochnika elektroenergii malykh rek [Development of a submersible hydrogenerator as a renewable source of electricity for small rivers]. *Materialy Desiatoi nauchnoi konferentsii aspirantov i doktorantov Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. Cheliabinsk, 2018, pp. 82-86.

4. Panasiuk A.M., Tookombaev K.A., Shainova G.A. Malye gidroelektrostantsii i perspektivy ikh razvitiia [Small hydropower plants and their development prospects]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 1987, no. 6, pp. 44-49.

5. Fel'dman B.N., Markanova T.K., Seregina M.I. Sostoianie i tendentsii razvitiia maloi gidroenergetiki [Status and development trends of small hydropower]. *Energeticheskoe stroitel'stvo za rubezhom*, 1987, no. 3, pp. 23-27.

6. Priamotochnye i pogruzhnye gidrogeneratory [Direct-flow and submersible hydrogenerators]. Moscow: TsINTIM, 1962, 211 p.

7. Gidroenergetika SShA [Hydropower USA], available at: <http://www.eeseaec.org/energetika-stran-mira/energetika-stran-mira-severnaa-amerika/energeticeskij-profil-ssa/gidroenergetika-ssa>

8. Elektroenergeticheskii kompleks Kanady [The electric power complex of Canada], available at: <http://www.eeseaec.org/energetika-stran-mira/energetika-stran-mira-severnaa-amerika/energeticeskij-profil-kanady/elektroenergeticeskij-kompleks-kanady>

9. Gidroenergetika Iaponii [Hydropower of Japan], available at: <http://www.eeseaec.org/energetika-stran-mira/energetika-stran-mira-azia-i-okeania/energeticeskij-profil-aponii/gidroenergetika-aponii>

10. The European Small Hydropower Association (ESHA), available at: <https://web.archive.org/web/20110426043551/http://www.esha.be/index.php?id=4>

11. Radin V.I., Vinokurov V.A., Askerko V.S. Primenenie asinkhronnogo generatora kak avtonomnogo istochnika peremennogo toka [The use of an asynchronous generator as an autonomous source of alternating current]. *Elektrotehnika*, 1967, no. 8, pp. 17-20.

12. Gollandtsev Iu.A. Sravnenie mekhanicheskikh kharakteristik asinkhronnykh i ventil'nykh induktorno-reaktivnykh elektrodvigateli [Comparison of the mechanical characteristics of asynchronous and valve induction-reactive electric motors]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2006, no. 6, pp. 50-53.

13. Balagurov V.A., Galteev F.F., Larionov A.N. Elektricheskie mashiny s postoiannymi magnitami [Permanent magnet electric machines]. Moscow: Energiia, 1964, 480 p.

14. Guliaev I.V., Volkov A.V., Popov A.A., Ionova E.I. et al. Sravnitel'nyi obzor sinkhronnogo elektrodvigatelia s postoiannymi magnitami i beskollektornogo elektrodvigatelia postoiannogo toka pri neposredstvennom upravlenii momentom [Comparative review of a permanent magnet synchronous electric motor and a direct current brushless electric motor with direct torque control]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2015, no. 6, pp. 123-128.

15. Gandzha S., Aminov D., Kosimov B. Application of the combined Excitation Submersible Hydrogenerator as an Alternative energy source for small and medium rivers. *IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*, 4-5 October 2019. Magnitogorsk, 2019. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915294

16. Mart'ianov A.S., Neustroev N.I. Analiz elektromekhanicheskikh sistem s pomoshch'iu ANSYS MAXWELL [Analysis of electromechanical systems using ANSYS MAXWELL]. *Al'ternativnaia energetika i ekologiya. Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal*, 2014, no. 19(159), pp. 47-52.

17. Aminov D.S. Primenenie programmogo kompleksa Ansys Electronics Desktop dlia analiza vodopogruzhnogo gidrogeneratora kombinirovannogo vozbuзhdeniia [Application of Ansys Electronics Desktop Software for Analysis of Combined Excitation Water Submersible Hydrogenerator]. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*, 2020, no. 1(46), pp. 13-18.

18. Aminov D.S., Kosimov B.I., Nimatov R.R. Ispol'zovaniia mal'nykh gidroelektrostantsii v kachestve vozobnovliaemykh istochnikov energii [The use of small hydropower plants as renewable energy sources]. *Prioritetnye napravleniia razvitiia energetiki v APK* (Kurgan, 22 February 2018). Kurgan: Kurganskaia gosudarstvennaia sel'skokhoziaistvennaia akademiia imeni T.S. Mal'tseva, 2018, pp. 70-75.

19. Gandzha S.A., Solomin E.V., Shaufler A.D. Generator peremennogo toka [Alternating current generator]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2244996 (2005).

20. Gandzha S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I., Nimatov R.R. Razrabotka inzhenernoi metodiki rascheta magnitnykh sistem s postoiannymi magnitami na osnove metoda konechnykh elementov [Development of engineering methods for calculating magnetic systems with permanent magnets based on the finite element method]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 29, pp. 58-74.

21. Gandzha S., Aminov D., Kosimov B. Development of Engineering Method for Calculation of Magnetic Systems for Brushless Motors Based on Finite Element Method. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICOEAM)*, 25-29 March, Sochi, 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742976

22. Gandzha S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I. Primenenie vodopogruzhnogo gidrogeneratora kombinirovannogo возбуждениа в качестве ал'tернативного источника энергии для малыkh и средних рек [The use of a submersible hydrogenerator of combined excitation as an alternative energy source for small and medium rivers]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika*, 2019, no. 4, pp. 102-111.

Сведения об авторах

Ганджа Сергей Анатольевич (Челябинск, Россия) – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: gandja_sa@mail.ru).

Аминов Дилшод Саидович (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: dilshod-aminov-93@mail.ru).

Косимов Бахтиёр Исматуллоевич (Челябинск, Россия) – аспирант кафедры «Теоретические основы электротехники» Южно-Уральского государственного университета (454080, Челябинск, пр. Ленина 76, e-mail: kosimov.energy@mail.ru).

About the authors

Gandzha Sergey Anatolyevich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Theoretical Fundamentals of Electrotechnology of South Ural State University (76, 454080, Chelyabinsk, Lenina ave. 76, e-mail: gandja_sa@mail.ru).

Aminov Dilshod Saidovich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of Department of Theoretical Fundamentals of Electrotechnology of South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Lenina ave. 76, e-mail: dilshod-aminov-93@mail.ru).

Kasimov Bakhtiyor Ismatulloevich (Chelyabinsk, Russian Federation) is a Graduate Student of Department of Theoretical Fundamentals of Electrotechnology of South Ural State University (454080, Chelyabinsk, Lenina ave. 76, e-mail: kosimov.energy@mail.ru).

Получено 06.04.2020