

Аминов Д.С.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS ELECTRONICS DESKTOP ДЛЯ АНАЛИЗА ВОДОПОГРУЖНОГО ГИДРОГЕНЕРАТОРА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В статье анализируется энергетический потенциал малых рек России и ближнего зарубежья. Сделан вывод о том, что энергоемкость малых рек во много раз превышает этот показатель для крупных рек. Это дает основание для развития этой отрасли энергетики. Однако развитие малой гидроэнергетики сдерживается рядом проблем. Это – требования экологии, необходимость больших финансовых затрат на создание малых ГЭС, получение качественной электроэнергии при сезонных колебаниях расхода воды. Для преодоления этих противоречий предлагается разработать гибкую систему проектирования, которая позволяла бы рассчитывать гидрогенераторы для конкретной реки в выбранном заранее месте. При этом можно получить наиболее эффективное преобразование энергии реки в электрическую энергию. Среди большого количества типов генераторов в качестве гидрогенератора малой и средней мощности предлагается применить генератор оригинальной конструкции. Рассматриваемая электрическая машина представляет собой генератор погружного типа с комбинированным возбуждением. Результирующее магнитное поле генератора образуется от двух источников – постоянных магнитов и обмотки возбуждения. При этом гидрогенератор имеет небольшие размеры благодаря использованию мощных постоянных магнитов и обмотку возбуждения для регулирования магнитного потока. В результате появляется возможность регулировки магнитного потока по слаботочной цепи возбуждения. Это упрощает электронную систему управления генератора, делает ее малогабаритной и надежной. Генератор имеет сложную магнитную систему, поэтому для электромагнитного анализа используется программа точного расчета электромагнитного поля на основе метода конечных элементов Ansys Electronics Desktop. Задача усложняется тем, что предлагаемая конструкция не входит в базу типовых конструкций. Возникла необходимость разработки трехмерной модели на базе заложенных в программу примитивов. Были смоделированы выпрямитель и регулятор напряжения в редакторе электронных схем Citrix. Характеристики генератора исследовались совместно с работой электронных компонентов. Разработанная цифровая модель генератора показала хорошую сходимость с реальным генератором по основным параметрам и характеристикам. Представлены результаты исследования.

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

### ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всей истории человечество постоянно использовало энергию природы. Еще древние греки применяли механическую энергию рек для мукомольного производства. На демидовских заводах эту энергию использовали в металлургическом производстве для приведения в действие мехов. Уже к концу 19-го века, тысячи городов по всему миру располагались рядом с гидроэлектростанциями.

Важнейшие проблемы проектирования и строительства гидроэнергетических объектов и гидроузлов народного народнохозяйственного значения были впервые поставлены в нашей стране и успешно решены в процессе разработки и реализации плана ГОЭЛРО.

В настоящее время получение энергии из водных ресурсов принимает новые пути развития. С одной стороны, это восстановление старых гидроузлов на основе новейших технологий, с другой – это построение новых гидроэлектростанций в местах, где они могут быть наиболее эффективными.

На территории России и стран СНГ огромное количество малых и средних рек, на которых по тем или иным причинам не установлены гидроэлектростанции. Возведение ГЭС – трудоемкий и сложный процесс, который вмешивается в природу.

Можно выделить следующие факторы, сдерживающие установку гидроэлектростанций на малых и средних реках:

1. Некоторые реки относятся к различным охраняемым территориям. Это значительно усложняет создание

гидроэлектростанций, что связано со сбором необходимой документации и соблюдением законодательных норм.

2. Реки имеют малые скорости течения, которые не позволяют раскрутить тяжелые лопасти крупных гидрогенераторов.

3. Не все реки имеют бассейны, которые необходимы для создания на их основе гидроэлектростанций.

4. Многие реки являются горными и доставить туда необходимое оборудование и технику крайне сложно.

5. Сами по себе реки достаточно мелководны и не позволяют поставить машины больших размеров.

Тем не менее энергетический потенциал малых и средних рек во много раз превосходит этот показатель для крупных рек.

### КРАТКИЙ ОБЗОР МАЛЫХ РЕК

На основании открытых источников проведем краткий анализ энергетических возможностей малых и средних рек (**табл. 1**).

Анализ энергоемкости водных ресурсов малых и средних рек показывает, что их энергетический потенциал достаточно высок [1-4]. Его использование может быть экономически выгодным, но для этого необходима разработка специальных гидрогенераторов, которые учитывают особенности водных ресурсов. Эти генераторы должны иметь конструкцию, габаритные размеры и основные характеристики применительно к конкретному месту их использования в реке. Только в этом случае можно достичь высокой эффективности использования энергии водяного потока.

Характеристики малых и средних рек

Название реки	Длина, км	Площадь бассейна, тыс. км <sup>2</sup>	Средний годовой расход, м <sup>3</sup> /с
<i>Река Теберда</i> на Северном Кавказе в Карачаево-Черкесии, левый приток реки Кубань	60	1080	7,3
<i>Река Большой Зеленчук</i> в районе Северного Кавказа	158	2730	40
<i>Река Анчас</i> , образуется на северо-восточных склонах хребта Котх, севернее Большого Кавказа	120	550	19
<i>Река Битюг</i> , протекает в Тамбовской, Липецкой и Воронежской областях, левый приток Дона	379	8840	18,2
<i>Река Усмань</i> , приток реки Воронеж. Протекает по Воронежский и Липецкой областям. В нижнем течении называется Усманка	151	2840	1,99
<i>Река Воронеж</i> , левый приток Дона. Протекает по территории Тамбовской, Липецкой и Воронежской областей	520	342	70,8
<i>Река Олым</i> , протекает в Курской области, частично проходит по границе с Воронежской и Липецкой областями, частично проходит по границе с Орловской областью	151	3090	6,5
<i>Река Воль</i> , находится в Смоленской области, правый приток Днепра. Истоки находятся в болотах Смоленской возвышенности	158	3300	22
<i>Река Чир</i> , расположена в Ростовской и Волгоградской областях. Это правый приток Дона, впадает в Цимлянское водохранилище	317	9580	12
<i>Река Снов</i> , протекает по Брянской области России и Черниговской области Украины	253	8705	24
<i>Река Шостка</i> , протекает по территории Глуховского, Ямпольского и Шосткинского районов Сумской области Украины	56	412	360
<i>Река Теберда</i> на Северном Кавказе в Карачаево-Черкесии, левый приток реки Кубань	60	1080	7,3

ВЫБОР ТИПА ГИДРОГЕНЕРАТОРА

Требования высокой надежности заставляют рассматривать только бесконтактные конструкции синхронных генераторов [5-12].

Одним из таких вариантов является синхронный генератор с постоянными магнитами. Он имеет ряд преимуществ. Среди них высокая надежность, хорошие массоэнергетические показатели, максимально возможный КПД. Но для такого типа машин стабилизацию выходного напряжения можно осуществить только по якорной цепи, так как невозможно регулировать магнитный поток постоянного магнита. Это значительно усложняет систему управления генератором и увеличивает общие габариты.

Существует класс машин с комбинированным возбуждением. В качестве источника магнитного поля он имеет постоянный магнит и обмотку возбуждения.

Этот тип электрических машин имеет следующие преимущества:

- высокую надежность;
- хорошие массоэнергетические показатели;
- максимально возможный КПД;
- мощные высококоэрцитивные магниты позволяют уменьшить габариты генератора;
- обмотка возбуждения позволяет управлять магнитным потоком по слаботочной цепи, что существенно упрощает систему управления.

Большинство известных бесконтактных электрических машин комбинированного возбуждения имеют дополнительный паразитный зазор. Этот зазор приводит к увеличению объема обмотки возбуждения и электрической машины в целом.

В статье рассматривается конструкция синхронного генератора комбинированного возбуждения, которая не имеет этого недостатка. Конструкция и принцип действия предлагаемого генератора представлены на **рис. 1**.

Магнитная система предлагаемого генератора имеет сложную геометрию, поэтому для ее расчета используется программный комплекс Ansys Electronics Desktop, в основе которой лежит метод конечных элементов [13-22].

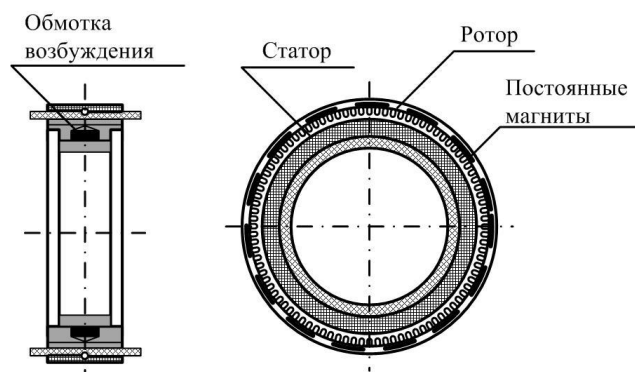


Рис. 1. Эскиз комбинированного генератора возбуждения

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ  
С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА  
ANSYS ELECTRONICS DESKTOP

Для моделирования был выбран генератор комбинированного возбуждения с параметрами: номинальная мощность 3000 Вт, номинальное фазное напряжение 220 В, номинальная частота вращения 350 об/мин.

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 создать трехмерную модель (рис. 2).

Для упрощения расчета была использована осевая симметрия генератора, которая позволила определить параметры одного полюсного деления (рис. 3). Полные характеристики определялись умножением результатов на количество составляющих частей.

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. 4.

Картина распределения индукции магнитопровода показывает, что магнитная система имеет допустимое насыщение основных участков магнитной цепи.

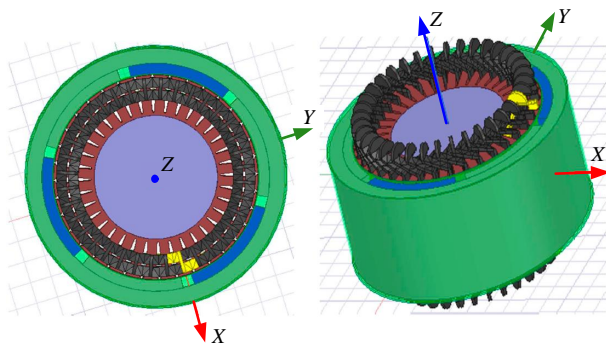


Рис. 2. Результаты создания трехмерной модели

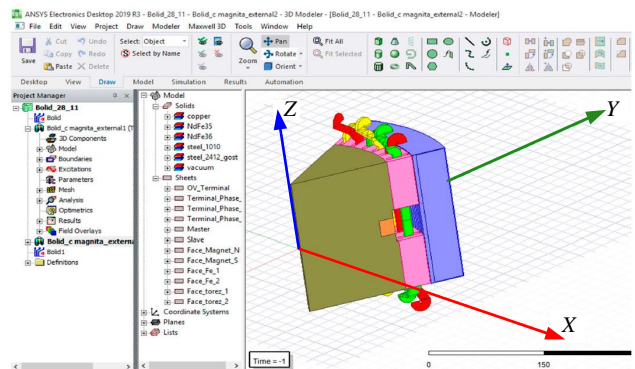


Рис. 3. Модель генератора в Ansys Electronics Desktop

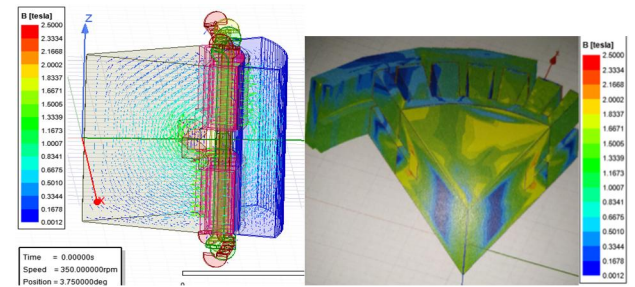


Рис. 4. Результаты расчета магнитного поля

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. 5 показан трехфазный выпрямитель и регулятор напряжения, который управляет обмоткой возбуждения для стабилизации выходного напряжения генератора. Обмотка возбуждения включена в мостовую схему. 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.

Расчетное значение выпрямленного напряжения (рис. 6) показывает, что обмотка возбуждения достаточно эффективно стабилизирует напряжение в заданном диапазоне.

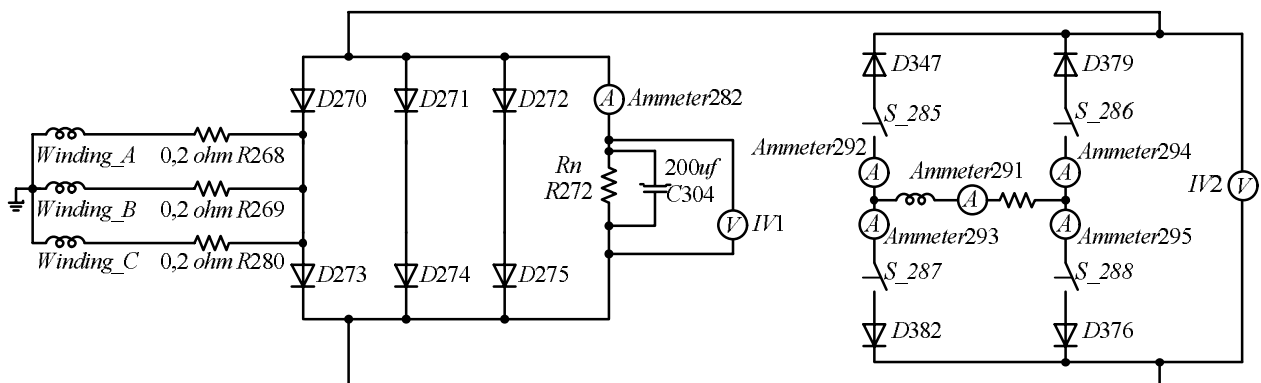


Рис. 5. Электронная схема системы управления

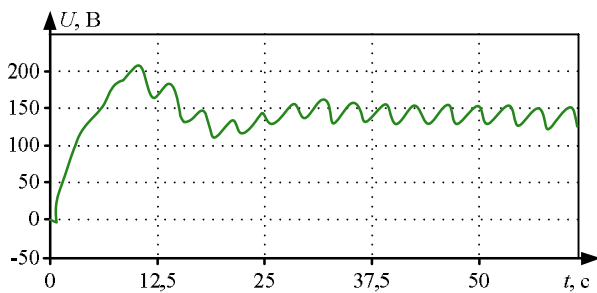


Рис. 6. Зависимости выпрямленного напряжения от времени

На рис. 7 показана кривая мгновенного значения выходной мощности. Среднее значение мощности при этом составляет 3 кВт, что подтверждает соответствие генератора одному из основных параметров – выходной мощности.

Для проверки точности цифровой модели реальному генератору был изготовлен макетный образец и проведены его стендовые испытания. Фрагменты основных сборочных единиц генератора показаны на рис. 8.

По основным параметрам получены следующие расхождения между результатами расчета и тестирования:

- действующее значение ЭДС вращения в фазной обмотке при номинальной частоте вращения 7-9 %;
- среднее значение выпрямленного напряжения при номинальной нагрузке 5-8 %;
- коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке 12 %.

Полученные результаты говорят о том, что созданная цифровая модель достаточно точно копирует реальную электрическую машину и может быть использована для системы анализа при проектировании генераторов данного типа.

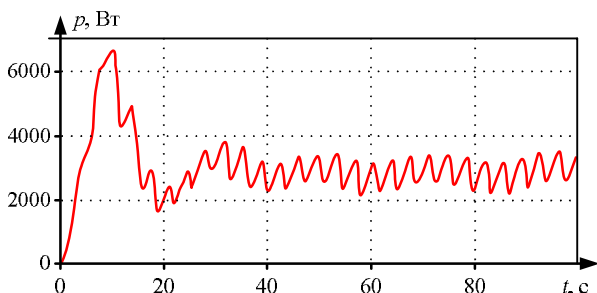


Рис. 7. Кривая мгновенной мощности под нагрузкой



Рис. 8. Основные сборочные единицы генератора комбинированного возбуждения

В статье в качестве гидрогенератора для малых и средних рек предлагается уникальная запатентованная электрическая машина – генератор комбинированного возбуждения обращенной конструкции. Концепция комбинированного возбуждения позволяет уменьшить габаритные размеры машины за счет мощных постоянных магнитов и упростить электронный стабилизатор напряжения за счет регулирования по слаботочной цепи возбуждения. Для проектирования генератора была использована САД-система Ansys Electronics Desktop. Цифровая модель опробована при разработке макетного образца гидрогенератора 3 кВт. На данном этапе она показала положительные результаты, если в качестве критерия оценки принимать расхождения между расчетными параметрами и экспериментальными данными. Данный подход можно рекомендовать для проектирования генераторов данного типа для ряда мощностей.

*Работа выполнена в ЮУрГУ при финансовой поддержке Российского фонда (проект №14-19-00327). Автор благодарит руководство университета за возможность провести данное исследование.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anastasiya A. and 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.
2. Аминов Д.С., Косимов Б.И., Ниматов Р.Р. Использование малых гидроэлектростанций в качестве возобновляемых источников энергии. Приоритетные направления развития энергетики в АПК; Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева. Курган, 22 февраля 2018 г., 2018. С.70-75.
3. R.V. Klyuev; I.I. Bosikov “Research of water-power parameters of small hydropower plants in conditions of mountain territories”. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2016
4. Dariusz Borkowski. “Small Hydropower Plant as a Supplier for the Primary Energy Consumer,” IEEE International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2015.
5. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1964. 480 с.
6. Вольдек А.И. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей // Электричество. 1966. №7. С. 46–52.
7. Электропривод на базе вентильных индукторных машин с электромагнитным возбуждением / В.Ф. Козаченко, Д.Е. Корпусов // Электронные компоненты. 2005. №6. С. 60-64.
8. Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. «Development of analysis methods for claw-pole synchronous motor of the pilger mill for manufacturing of seamless pipes, 2019, IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)», 4-5 Oct. 2019, Magnitogorsk, Russia. DOI: 10.1109 / PEAMI.2019.8915343.
9. Голландцев Ю.А. Сравнение механических характеристик асинхронных и вентильных индукторно-реактивных электродвигателей // Информационно-управляющие системы. 2006. №6. С. 50-53.

10. 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.
11. Опейко О.Ф., Пташкин А.И., Хильмон В.И. Тяговый электропривод с бездатчиковой системой векторного управления // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2010. №6. С. 37-43.
12. Гуляев И.В., Тузаев Г.М. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного электродвигателя: монография. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. С. 200.
13. Gandzha S., Aminov D. and 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.
14. Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. "Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms", 2018, Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018, 8544320, P. 282-287. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544320.
15. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. and Kosimov B. "Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux", Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570132.
16. Gandzha Sergey, Dilshod Aminov and Kiessh Irina. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets, 2018, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) Chelyabinsk, Russia, 2018. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570132.
17. Мартьянов А.С., Неустров Н.И. Анализ электромеханических систем с помощью ANSYS MAXWELL // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2014. №19. С. 47-52.
18. Kovalev K., Ivanov N., Tulinova E. Magnetic field distribution in the active zone of synchronous generators with electromagnetic excitation, 2017, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. Proceedings 8076353. (In Russ.).
19. Babu B.M., Srinivas L.R. and Bindhu B. A MLI topology with different braking mechanisms employing BLDC drive. IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, ICPCSI. Chennai, India, 2017, pp. 1845-1849. DOI:10.1109/ICPCSI.2017.8392034.
20. Papini L., Raminosa T., Gerada D. and Gerada C. "A high-speed permanent-magnet machine for fault-tolerant drivetrains", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 61, no. 6, pp. 3071-3080, Jun. 2014. xico. 2003, no. 4, pp. 1677-1681. DOI: 10.1109/PESC.2003.1217709.
21. Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. "Application of the combined Excitation Submersible Hydrogenerator as an Alternative energy source for small and medium rivers. 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)", 4-5 Oct. 2019, Magnitogorsk, Russia. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915294.
22. Ганджа С.А., Аминов Д.С. Разработка водопогружного гидрогенератора в качестве возобновляемого источника электроэнергии малых рек // Материалы десятой научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ. Челябинск, 2018. С.82-86.

Поступила в редакцию 03 декабря 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### APPLICATION OF ANSYS ELECTRONICS DESKTOP SOFTWARE FOR ANALYSIS OF COMBINED EXCITATION WATER SUBMERSIBLE HYDROGENERATOR

Dilshod S. Aminov

Post Graduate Student, the Department of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: dilshod-aminov-93@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-8063>.

The article analyzes the energy potential of small rivers of Russia and neighboring countries. It is concluded that the energy consumption of small rivers is many times higher than that of large rivers. This provides a basis for the development of this energy sector. However, the development of small hydropower is constrained by a number of problems. These are environmental requirements, the need for large financial costs for the creation of small hydroelectric power plants, obtaining high-quality electricity with seasonal fluctuations in water consumption. To overcome these contradictions, it is proposed to develop a flexible design system that would make it possible to calculate hydro generators for a particular river in a pre-selected location. At the same time, it is possible to obtain the most efficient conversion of river energy into electrical energy. Among a large number of types of generators as a hydrogenerator of small and medium power, it is proposed to use a generator of the original design. The electric machine in question is a submersible type generator with combined excitation. The resulting magnetic field of the generator is formed from two sources: permanent magnets and the excitation winding. At the same time, the hydrogenerator has a small size, thanks to the use of powerful permanent magnets

and a winding for regulating the magnetic flux. As a result, it is possible to adjust the magnetic flux through a low-current excitation circuit. This simplifies the electronic control system of the generator making it small and reliable. The generator has a complex magnetic system, so for electromagnetic analysis, an accurate electromagnetic field calculation program based on the finite element method Ansys Electronics Desktop is used. The task is complicated by the fact that the proposed design is not included in the database of standard designs. There was a need to develop a three-dimensional model based on the primitives embedded in the program. The rectifier and voltage regulator were modeled in the Citrix electronic circuit editor. The characteristics of the generator were studied together with the operation of electronic components. The developed digital model of the generator showed good convergence with the real generator on the main parameters and characteristics. The results of the study are presented.

**Keywords:** alternative energy, hydrogenerator, combined excitation generator, reversed design, contactless current supply, digital double.

REFERENCES

1. Anastasiya A. and 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.
2. Aminov D.S., Kosimov B.I., Nimatov R.R. The use of small hydropower plants as renewable energy sources. *Prioritetnye napravleniya razvitiya energetiki v APK Kurgan, 22 fevralya 2018 g* [Priority areas of energy development in the agro-industrial complex Kurgan, February 22, 2018]. Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltseva, 2018, pp.70-75. (In Russian)
3. Klyuev R.V., Bosikov I.I. "Research of water-power parameters of small hydropower plants in conditions of mountain territories". 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016.
4. Dariusz Borkowski. "Small Hydropower Plant as a Supplier for the Primary Energy Consumer," IEEE International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2015.
5. Balagurov V. A., Galteev F. F., Larionov A. N. *Elektricheskie mashiny s postoyannymi magnitami* [Electric machine with permanent magnets]. Moscow: Energiya, 1964. 480 p. (In Russian)
6. Voldek A. I. Investigation of magnetic field in the air gap of single-pole synchronous machines by the method of harmonic conductivities. *Elektrichestvo* [Electricity], 1966, no. 7, pp. 46-52. (In Russian)
7. Kozachenko V. F., Korpusov D. E. Electric drive on the basis of valve inductor machines with electromagnetic excitation. *Elektronnye komponenty* [Electronic components], 2005, no. 6, pp. 60-64. (In Russian)
8. Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. Development of analysis methods for claw-pole synchronous motor of the pilger mill for manufacturing of seamless pipes, 2019, IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)", 4-5 Oct. 2019, Magnitogorsk, Russia. DOI: 10.1109 / PEAMI.2019.8915343.
9. Gollandsev Yu.A. Comparison of mechanical characteristics of asynchronous and thyatron inductor-jet motors. *Informatsionno-upravlyayuschie sistemy* [Information and control systems], 2006, no. 6, pp. 50-53. (In Russian)
10. Gulyaev I.V., Volkov A.V., Popov A. A., Ionova E. I. et al. Comparative review of synchronous electric motor with permanent magnets and brushless DC electric motor with direct torque control. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya* [Scientific and technical Bulletin of the Volga region], 2015, no. 6, pp. 123-128. (In Russian)
11. Opeyko O.F., Ptashkin A.I., Hilmon V.I. Traction electric drive with Sensorless vector control system. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh obyedineniy SNG* [Power Engineering. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2010, no. 6, pp. 37-43. (In Russian)
12. Gulyaev I.V., Tutaev G.M. *Sistemy vektornogo upravleniya elektroprivodom na osnove asinkhronizirovannogo ventilnogo elektrodvigatelya: monografiya* [Systems of vector control of the electric drive on the basis of the asynchronous gate electric motor]. Saransk: Publishing house Mordovia universiti, 2010, 200 p.
13. Gandzha S., Aminov D. and 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.
14. Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B., "Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms", 2018, Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018 , 8544320, pp. 282-287 DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544320.
15. S. Gandzha, D. Aminov, I. Kiessh and B. Kosimov, "Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux", Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018, DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570132.
16. Gandzha Sergey, Dilshod Aminov and Kiessh Irina. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia 2018. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570132.
17. Martyanov A.S., Neustroev N.I. Analysis of Electromechanical systems using ANSYS MAXWELL. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Alternativnaya energetika i ekologiya* [International scientific journal Alternative energy and ecology], 2014, no. 19, pp. 47-52. (In Russian)
18. Kovalev K., Ivanov N., Tulinova E. Magnetic field distribution in the active zone of synchronous generators with electromagnetic excitation 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings 8076353. (In Russian).
19. Babu B.M., Srinivas L.R. and Bindhu B. A MLI topology with different braking mechanisms employing BLDC drive. IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, ICPCSI. Chennai, India, 2017, pp. 1845-1849. DOI:10.1109/ICPCSI.2017.8392034.
20. Papini L., Raminosa T., Gerada D. and Gerada C. "A high-speed permanent-magnet machine for fault-tolerant drivetrains", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 61, no. 6, pp. 3071-3080, Jun. 2014. xico, 2003, no. 4, pp. 1677-1681. DOI: 10.1109/PESC.2003.1217709.
21. Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. "Application of the combined Excitation Submersible Hydrogenerator as an Alternative energy source for small and medium rivers. 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)", 4-5 Oct. 2019, Magnitogorsk, Russia. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915294.
22. Gandzha S.A., Aminov D.S. Development of water-submersible hydrogenerator as a renewable source of electricity of small rivers. *Materialy desyatoy nauchnoy konferentsii aspirantov i doktorantov YurGu*. [Proceedings of the tenth scientific conference of postgraduates and doctoral students of SUSU]. Chelyabinsk, 2018, pp. 82-86. (In Russian)

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. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-13-18)

Aminov D.S. Application of Ansys Electronics Desktop Software for Analysis of Combined Excitation Water Submersible Hydrogenerator. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 13-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-13-18)