

ГЕНЕРАТОР МИКРОГЭС ДЛЯ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОДОТОКОВ

Разработка систем автономного электропитания на основе микроГЭС, использующих энергию малых водотоков, связана с выполнением целого ряда противоречивых требований. Источник электропитания должен быть достаточно простым и дешевым. Перспективным направлением в построении таких источников, обеспечивающих выполнение этих требований, является создание систем генерации электрической энергии на основе генератора, имеющего индуктор, совмещенный с гидравлической турбиной. В работе рассмотрены вопросы проектирования подобных генераторов, обеспечивающих высокие рабочие характеристики указанных микроГЭС.

Ключевые слова: магнитное поле, индукция в воздушном зазоре, генератор с секционным индуктором, гидротурбина, микроГЭС.

Введение. Анализ конструктивных решений по созданию микроГЭС показывает, что, с точки зрения простоты и стоимости, одним из самых перспективных направлений являются свободно-поточные погружные микроГЭС [1–3]. Данное конструктивное решение удовлетворяет критериям простоты и стоимости. Основным преимуществом данного подхода является то, что он не предъявляет высоких требований к скорости течения (в рассматриваемом случае рабочая скорость начинается с 0,5 м/с), нет необходимости глубокого погружения гидротурбины в воду и не оказывает негативного воздействия на экологию, в том числе на нерестовые реки.

Упрощенная конструкция гидротурбины в равнинной реке приведена на рис. 1.

Таким образом, вопросы проектирования систем электроснабжения на основе безредукторных вариантов микроГЭС для равнинных рек с малым водотоком являются актуальными.

Моделирование такого сложного технического объекта, как микроГЭС, осуществляется на основе общепринятых допущений. Результаты моделирования должны показать зависимости КПД и других определяющих эффективность устройства параметров [4–7].

Параметры, которые определяют значения исходных коэффициентов модели, — это диаметр турбины, угол установки лопаток турбины, скорость течения воды. Исследования соотношений перечисленных параметров функционирования турбины

позволили представить их в виде семейства зависимостей, приведенных на рис. 2.

Постановка задачи. Модельные эксперименты определили основные зависимости конструктивных параметров от параметров водотока. Зависимость, приведенная на рис. 2, показывает зависимость «Мощность гидротурбины — скорость водяного потока — диаметр рабочего колеса турбины».

Источником электрической энергии является генератор разработанной конструкции, который определяет все другие параметры системы. Поэтому требуется выявить особенности магнитной системы и электромеханических параметров генератора, влияющих на рабочие характеристики микроГЭС на этапе построения системы математического описания и дальнейшего проектирования.

Актуальной задачей в этой постановке вопроса является создание математического описания индукторного генератора с секционированным дуговым статором предлагаемой конструкции микроГЭС [8].

Моделирование генератора микроГЭС индукторного типа с секционным дуговым статором. Определение коэффициентов, характеризующих магнитное поле в воздушном зазоре генератора с сегментированным статором дугообразной формы и электромагнитным возбуждением, осуществляется решением системы уравнений стационарного магнитного поля [9]. Одним из основных подходов к их решению является метод конечных элементов (МКЭ).

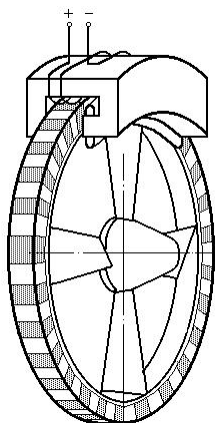


Рис. 1. Гидротурбина для равнинных рек

Особенности конструкции генератора индукторного типа с дуговым исполнением статора влияют на картину магнитного поля в воздушном зазоре и требуют соответствующего анализа для выявления зависимостей параметров генератора и гармонического состава поля, а также потерь от высших гармоник [10–12]. Конструктивно магнитопровод выполняется шихтованным. Это приводит к тому, что при математическом описании магнитной цепи генератора удобно использовать составляющие магнитной проницаемости по двум осям (Y, X), соответствующим продольной и поперечной линиям проката листов стали.

С учетом того, что магнитная цепь при расчете параметров генератора принимается ненасыщенной, допустимо использовать следующие выражения:

по оси Y (вдоль листового проката), Гн/м:

$$\mu_Y = \mu_{cm} \cdot K_3,$$

где K_3 — коэффициент заполнения пакета сталью по оси X (поперек листового стального проката), Гн/м.

Относительная магнитная проницаемость вдоль листов стали магнитопровода:

$$\mu_{cm} = \frac{B_\delta}{H_\delta \cdot \mu_0},$$

где μ_0 — величина магнитной проницаемости воздуха Гн/м.

$$\mu_x = \frac{(2 - K_3) \cdot \Delta_{cm}}{\frac{\Delta_{cm}}{\mu_{cm}} + \frac{\Delta_{cm} \cdot (1 - K_3)}{\mu_0^e}},$$

где $\mu_0^e = 1$ — значение относительной магнитной проницаемости стали.

Намагничивающая сила в воздушном зазоре генератора определяется как:

$$F_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot \delta,$$

где δ — величина воздушного зазора, м;

Δ_{cm} — толщина листов стали магнитопровода, м.

Разность магнитных потенциалов в воздушном зазоре между статором и ротором $U_m = F_\delta$.

Граничные условия, введенные для решения полевой задачи:

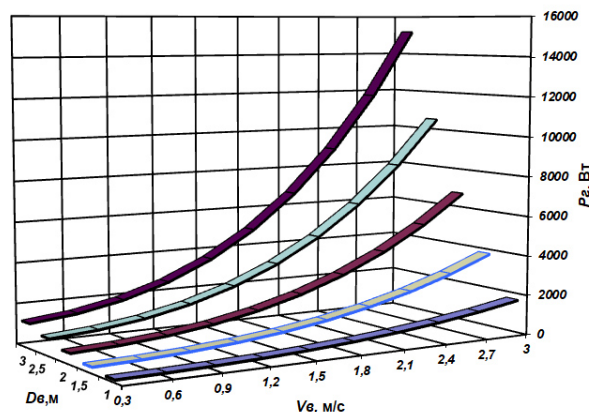


Рис. 2. Семейство зависимостей «Скорость потока–диаметр турбины–мощность»

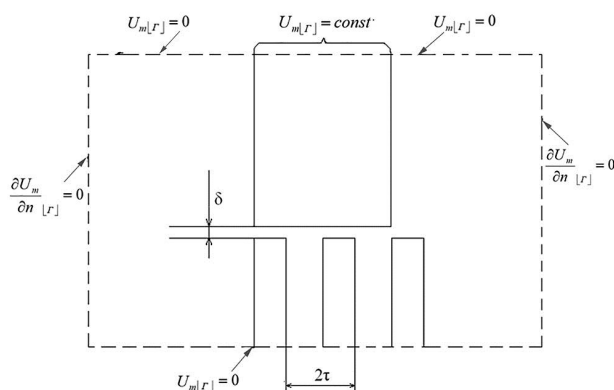


Рис. 3. Моделируемая зона магнитопровода

— граничные условия первого рода на внешних (верхней и нижней) границах моделируемой области (однородные) (рис. 3):

$$U_{m[r]} = const;$$

— граничные условия второго рода на внешних (левой и правой) границах моделируемой области (рис. 3)

$$\frac{\partial U_m}{\partial n [r]} = 0.$$

Последнее условие справедливо при удалении границ области на значительное расстояние от источника поля.

Адекватность математического описания картины магнитного поля обеспечивается учетом необходимости равенства нормальной и тангенциальной производных на границах раздела сред и непрерывности скалярного магнитного потенциала. Стандартные пакеты, использующие МКЭ, выполнение указанных условий обеспечивают изначально.

Граничные условия для описываемой зоны магнитопровода показаны на рис. 3.

Результаты моделирования генератора микро-ГЭС. Кривые распределения индукции, полученные в результате численного моделирования поля в воздушном зазоре (форма зубцов ротора выбрана прямоугольной) изображены на рис. 4.

Моделирование параметров магнитного поля в электрической машине с целью выявления качественной и количественной оценки распределения

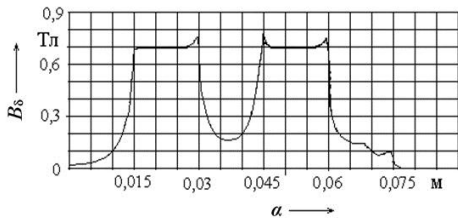


Рис. 4. Кривая магнитной индукции в воздушном зазоре (прямоугольная форма зубцов ротора)

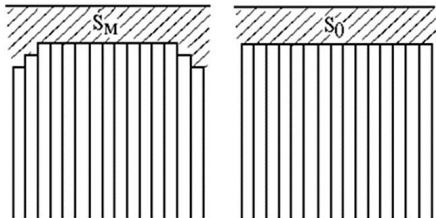


Рис. 5. Интерполяция коэффициента формы воздушного зазора в зубцовой зоне

индукции в воздушном зазоре позволяет также провести и ее гармонический анализ.

Вариативный алгоритм поиска оптимальной формы кривой магнитной индукции в воздушном зазоре позволил определить следующие пути:

- а) пошаговый синтез формы полюсного наконечника, согласно рис. 5;
- б) вариативный фактор полюсности $\alpha_n = b_p / \tau$, где b_p — величина дуги полюса, м; τ — полюсное деление, м.

Коэффициент формы воздушного зазора под зубцом статора K_s определяется по формуле:

$$K_s = \frac{S_M}{S_0}$$

и интерпретируется рис. 5.

Коэффициенты, определяющие распределение магнитной индукции в рассматриваемой области зубцовой зоны ротора, определяются согласно предлагаемому алгоритму:

1. Коэффициент формы переменной составляющей магнитного поля возбуждения для v -ой гармоники:

$$K_{fv} = \frac{B_{\delta mv}}{B_m}$$

где $B_{\delta mv}$ — амплитуда гармоники магнитной индукции в воздушном зазоре с номером v , Т;

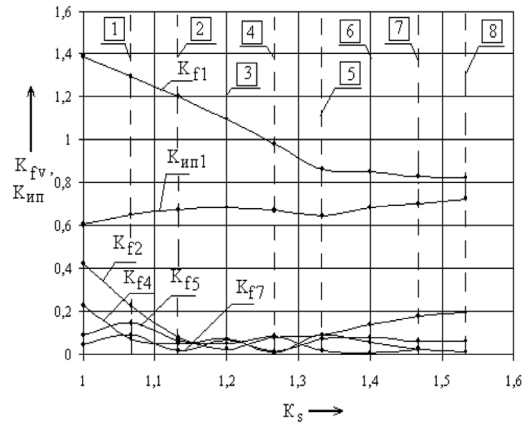
B_m — амплитуда гармоники магнитной индукции в воздушном зазоре машины на оси полюса ротора, Т.

2. Коэффициент использования магнитного поля /5/:

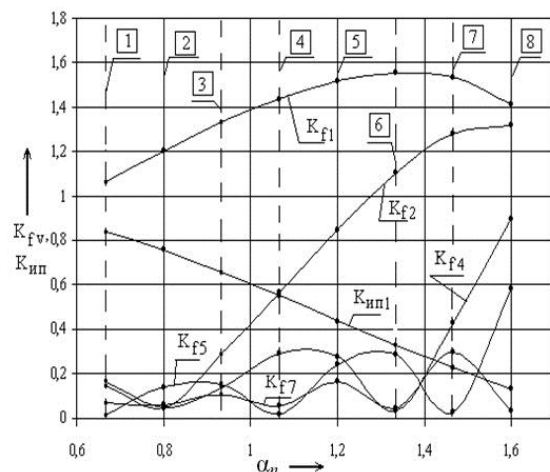
$$K_{un} = \frac{B_{\delta 1m}}{A(0)/2}$$

где $A(0)/2$ — нулевая гармоника магнитного поля в воздушном зазоре машины, Т; $B_{\delta 1m}$ — амплитуда первой гармоники магнитной индукции в воздушном зазоре, Т.

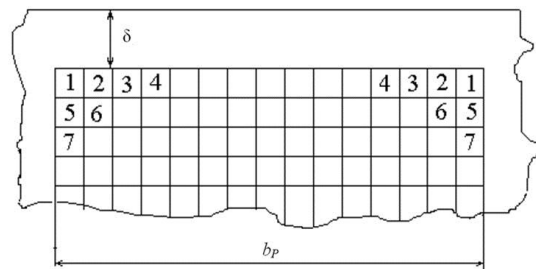
Итогом численного моделирования является возможность оценки влияния искомых коэффици-



а)



б)



в)

Рис. 6. Одна из альтернатив актуальных значений K_{fv} и K_{un} для различных геометрических пропорций магнитной системы. Цифрами здесь идентифицирована очередность штамповки стальных пластин полюса

Таблица 1

Зависимость коэффициента пульсации K_p от величины зазора

Воздушный зазор a , м	K_p
0,002	1,1
0,003	1,141
0,004	1,294

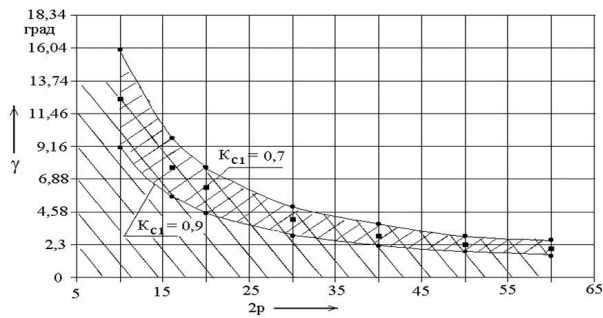


Рис. 7. Зона допустимых соотношений числа полюсов и угла полюсной дуги

ентов на распределение магнитной индукции для вариаций формы полюса машины. Одна из альтернатив актуальных значений K_p и K_m для различных геометрических пропорций магнитной системы приведена на рис. 6.

Значимым итогом анализа проведенных исследований на модели стала фиксация значительного влияния величины воздушного зазора на пульсации магнитного поля генератора. Численные значения коэффициента пульсации K_p , в зависимости от величины зазора, приведены в табл. 1.

Предлагаемая конструкция индукторного генератора обладает рядом особенностей по сравнению с классическими машинами переменного тока. Одна из таких особенностей заключается во взаимной пространственной геометрии пазов дугового статора и зубцов ротора, располагающихся на ободке гидротурбины. Эскиз взаимного расположения зубцовой зоны статора и ротора показан на рис. 7.

В отличие от электрических машин с симметричной магнитной системой, где скос пазов выполняется преднамеренно, служит для борьбы с высшими гармониками и остается постоянным для каждого паза, в данной конструкции это обстоятельство не соблюдается. Как видно из рис. 7, пазы статора и ротора в центре дуги имеют нулевой угол скоса γ , который увеличивается по мере движения зубца ротора от центра к краю дуги статора. Следует отметить, что изменение угла γ и коэффициента скоса K_c носит нелинейный характер.

Величина коэффициента скоса оказывает значительное влияние на сформированную форму кривой и амплитуду ЭДС якорной обмотки генератора. С этой точки зрения, актуальной представляется задача исследования величины угла скоса пазов для выработки рекомендаций по увязки между собой величин коэффициента скоса и угла дуги статора.

В процессе движения ротора между зубцами ротора и статора возникает осевое смещение, которое обуславливает появление ненулевого угла скоса пазов. Следует отметить, что при движении зубцов ротора относительно дуги статора коэффициент скоса K_c меняется, а не остается постоянным, как в классических электрических машинах переменного тока с замкнутой магнитной системой. Известно, что коэффициент скоса пазов оказывает значительное влияние на величину и форму ЭДС обмотки якоря. Это обстоятельство делает актуальной задачу исследования изменения величины коэффициента скоса в зависимости от угла дуги статора α и его влияния на ЭДС якоря.

Исследование влияния величины коэффициента скоса на амплитуду первой гармоники магнитной

индукции позволило определить зону значений угла полюсной дуги и числа полюсов для крайних пазов дуги статора при K_c от 0,7 до 0,9.

Для ЭДС катушечной группы E_q определяются суммированием векторов ЭДС ΔE_k катушек группы, сдвинутых в пространстве на угол γ_{ck_i} (рис. 8). Принятые соотношения для определения коэффициента скоса пазов поясняются рис. 8а и 8б и приведены ниже:

$$\gamma_{ck_i} = \frac{\alpha}{2z_i}, \quad 0 \leq \gamma_i \leq \frac{\alpha}{2}, \quad K_c = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\gamma_i}{2}} \Big|_{\gamma_i = \frac{\alpha}{2z_i}}$$

$$K_c = \int_0^{\alpha/2} \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{\gamma_i}{2}} d\gamma_i = \sin \frac{\alpha}{2} \int_0^{\alpha/2} \frac{dx}{\sin \frac{x}{2}} =$$

$$= 2 \sin \frac{\alpha}{2} \int_0^{\alpha/2} \frac{dz}{\sin z} = 2 \sin \frac{\alpha}{2} \ln(\operatorname{cosec} z - \operatorname{ctg} z) \Big|_0^{\alpha/2}.$$

Полученные зависимости коэффициента скоса пазов от угла скоса представлены на рис. 8в.

Аппроксимирующая зависимость может быть описана полиномом 3-го порядка:

$$K_{ci} = -0,0607 \gamma_i^3 - 11,996 \gamma_i^2 + 0,0039 \gamma_i + 0,7839.$$

Выводы. Проведенные исследования позволяют учесть специфические особенности дугостаторного генератора, обусловленные его конструктивным исполнением.

Исследование распределения магнитной индукции на одном зубцовом делении ротора генератора

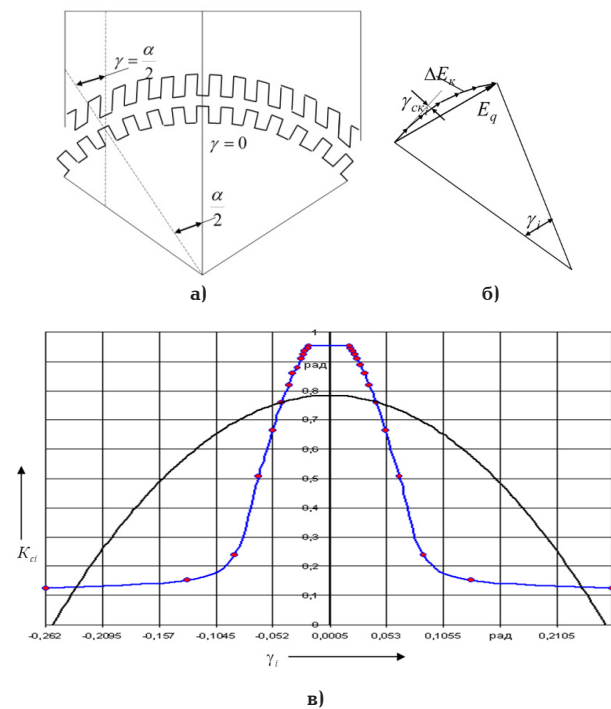


Рис. 8. а) эскизное изображение расположения зубцов ротора относительно зубцов статора (к определению угла скоса пазов); б) формирование вектора ЭДС катушки обмотки якоря с учетом угла скоса пазов; в) результаты моделирования зависимости коэффициента скоса пазов K_{ci} от угла скоса γ_i

позволило определить зависимости между коэффициентом скоса зубцов, углом дуги статора и числом полюсов генератора. Определено влияние формы зубцов статора на коэффициент формы и коэффициент использования магнитной индукции в воздушном зазоре генератора. Определены численные показатели коэффициента пульсации от величины воздушного зазора. Получена полиномиальная зависимость коэффициента скоса пазов от угла скоса, определяющая его нелинейное изменение.

Полученные результаты позволяют добиваться наилучших показателей по формированию геометрии дугостаторного генератора с целью улучшения кривой распределения магнитной индукции и формы ЭДС якоря.

Библиографический список

1. Сардалов Р. Б., Ельмурзаев А. А., Дебиев М. В. [и др.]. Перспективы развития традиционной и нетрадиционной энергетики Чеченской Республики // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 23 (4). С. 134–144. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-134-144.
2. Сулов К. В., Шушпанов И. Н., Воронцов Д. В. Использование возобновляемых источников энергии для питания собственных нужд нефтепровода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. № 20 (1-2). С. 70–79. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-70-79.
3. Четошников Л. М., Смоленцев Н. И., Четошников С. А. [и др.]. Автономные системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии и умной сетью // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. № 20 (5-6). Р. 3–12. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-3-10.
4. Mohammadi S., Hassanalian M., Arionfard H. [et al.]. Optimal design of hydrokinetic turbine for low-speed water flow in Golden Gate Strait // Renewable Energy. 2020. Vol. 150. P. 147–155. DOI: 10.1016/j.renene.2019.12.142.
5. Adnan M., Tahir M. A., Jamal M. A. [et al.]. Design, Analysis, and Fabrication of Water Turbine for Slow-Moving Water Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2022. Vol. 144 (8). 082102. DOI: 10.1115/1.4052773.
6. Tian W., Mao Z., Ding H. Design, test and numerical simulation of a low-speed horizontal axis hydrokinetic turbine // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2018. Vol. 10 (6). P. 782–793. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2017.10.006.
7. Chica E., Pérez F., Rubio-Clemente A. [et al.]. Design of a hydrokinetic turbine // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2015. Vol. 195. P. 137–148. DOI: 10.2495/ESUS150121.
8. Пат. 39918 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 7/29. Генератор для микроГЭС // Кузьмин В. М., Седов Г. А., Суздорф В. И. № 2003137466; заявл. 26.12.03; опубл. 20.08.04, Бюл. № 23.
9. Зар Н. Н., Сериков А. В., Мшвениерадзе Л. С. Методика электромагнитного расчета нагревательного элемента трансформаторного типа с пространственной магнитной системой // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2018. Т. 61, № 2. С. 59–64. DOI: 10.17213/0136-3360-2018-2-59-64.
10. Suzdorf V. I., Meshkov A. S., Dementyev Yu. N. [et al.]. Energy efficiency improvement of medical electric tools and devices // MATEC Web of Conferences. 2014. Vol. 19. DOI: 10.1051/matecconf/20141901024.

11. Суздорф В. И. Моделирование источников напряжения для систем автономного питания // Образование и наука: современное состояние и перспективы развития: сб. тр. конф. В 6 ч. Тамбов: ООО «Консалтинговая компания Юком», 2014. Ч. 3. С. 128–130. ISBN 978-5-906766-11-3.

12. Татевосян А. А. Научные основы проектирования оптимальных конструкций тихоходных синхронных генераторов с постоянными магнитами для ветроэнергетических установок // Омский научный вестник. 2021. № 1 (175). С. 32–38. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-32-38.

ХАМИТОВ Рустам Нуриманович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

AuthorID (SCOPUS): 24467903000

ResearcherID: D-1001-2016

ORCID: 0000-0001-9876-5471

Адрес для переписки: apple_27@mail.ru

КУЗЬМИН Роман Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (КНАГУ), г. Комсомольск-на-Амуре.

AuthorID (SCOPUS): 57188722978

ResearcherID: G-5743-2016

ORCID: 0000-0002-9729-3510

Адрес для переписки: romadres@mail.ru

МЕШКОВ Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» КНАГУ, г. Комсомольск-на-Амуре.

AuthorID (SCOPUS): 56486099900

ResearcherID: E-6844-2017

ORCID: 0000-0002-5315-6936

Адрес для переписки: meshkov@live.ru

СУЗДОРФ Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» КНАГУ, г. Комсомольск-на-Амуре.

AuthorID (SCOPUS): 56486099900

ResearcherID: G-6519-2016

ORCID: 0000-0002-9459-5978

Адрес для переписки: susdorf@mail.ru

ПИВОВАРОВ Константин Геннадьевич, аспирант кафедры «Электромеханика» КНАГУ, г. Комсомольск-на-Амуре.

Адрес для переписки: kostya.pivovarov.00@mail.ru

Для цитирования

Хамитов Р. Н., Кузьмин В. В., Мешков А. С., Суздорф В. И., Пивоваров К. Г. Генератор микроГЭС для низкопотенциальных водотоков // Омский научный вестник. 2022. № 2 (182). С. 59–63. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-182-59-63.

Статья поступила в редакцию 09.02.2022 г.

© Р. Н. Хамитов, Р. В. Кузьмин, А. С. Мешков, В. И. Суздорф, К. Г. Пивоваров