

ПРИМЕНЕНИЕ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ МАЛЫХ И СРЕДНИХ РЕК

Б.И. Косимов, Н.С. Шарбатов, А.Г. Каюмов, Д.С. Аминов, А.М. Давлатов

Таджикский энергетический институт

В статье рассматривается проблема эффективного использования потенциала малых и средних рек Республики Таджикистан в условиях децентрализованного энергоснабжения. Обоснована целесообразность применения асинхронизированного синхронного генератора (машины двойного питания) в составе малых гидроэлектростанций. Отмечены социально-экономические и экологические преимущества внедрения таких комплексов, включая повышение передачи мощности в удалённых горных районах, снижение эксплуатационных затрат и уменьшение выбросов CO₂. Рекомендуется в перспективности переходить к адаптивным гибридным системам малой гидроэнергетики как к активным интеллектуальным элементам энергосистемы.

Ключевые слова: ВИЭ, асинхронизированный синхронный генератор с двойным питанием, машины переменного тока, управление электрических машин, синхронные машины, асинхронный генератор.

ИСТИФОДАИ ГЕНЕРАТОРҶОИ СИНХРОНИИ АСИНХРОНИШУДА ҶАМЧУН МАНБАЪҶОИ АЛТЕРНАТИВИИ ЭНЕРГИЯИ ЭЛЕКТРИКӢ БАРОИ ДАРӢҶОИ ХУРД ВА МИӢНА

Б.И. Қосимов, Н.С. Шарбатов А.Г. Қаюмов, Д.С. Аминов, А.М. Давлатов

Дар мақола масъалаи истифодаи самараноки потенисали дарёҳои хурду миёнаи Ҷумҳурии Тоҷикистон дар шароити таъминоти ғайримарказонидашудаи нерӯи барқ баррасӣ шудааст. Зарурати истифодаи генератори синхронии асинхронизуда (мошинаи манбаи таъминоташ дутога) дар ҳайати неругоҳҳои барқи оби хурд асоснок карда шудааст. Афзалиятҳои иқтимоию иқтисодӣ ва экологии ҷорӣ намудани ҷунин комплексҳо, аз ҷумла баланд бардоштани интиқоли тавонои минтақаҳои дурдасти кӯхистон, кохиш додани хароҷоти истифодабарӣ ва кам кардани партовҳои CO₂ қайд гардидаанд. Дар оянда гузаштан ба системаҳои хурди гидроэнергетикии гибридии мутобиқшаванда (адаптивӣ), ки элементҳои фаъоли зехнии низоми энергетикӣ мебошанд, тавсия дода мешавад.

Калидвожаҳо: МБЭ, генератори синхронии асинхронизуда бо манбаи таъминоташ дутога, мошинҳои ҷараёни тағйирёбанда, идоракунии мошинҳои электрикӣ, мошинҳои синхронӣ, генератори асинхронӣ.

APPLICATION OF ASYNCHRONIZED SYNCHRONOUS GENERATORS AS ALTERNATIVE ENERGY SOURCES FOR SMALL AND MEDIUM RIVERS

B.I. Kosimov, N.S. Sharbatov A.G. Kayumov, D.S. Aminov, A.M. Davlatov

The article addresses the efficient utilization of the hydropower potential of small and medium rivers in the Republic of Tajikistan under decentralized power supply conditions. The study substantiates the feasibility of using asynchronous synchronous generators (doubly-fed induction machines) within small-scale hydropower plants. The socio-economic and environmental benefits of implementing such systems are highlighted, including increased power transmission capacity in remote mountainous areas, reduced operating costs, and lower CO₂ emissions. It is recommended to transition toward adaptive hybrid small-scale hydropower systems as active intelligent components of the power grid.

Keywords: RES, doubly fed induction generator, alternating current machine, electric machine control, synchronous machines, asynchronous generator.

Введение

Широкое внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в отдельных регионах мира обусловлено их географической спецификой. В частности, дефицит ископаемого топлива и высокий потенциал местных возобновляемых ресурсов вынуждают некоторые страны, особенно такие как Таджикистан, полагаться на ВИЭ как на основной или ключевой источник электроэнергии. Существенная роль гидроэнергетики в структуре ВИЭ и высокий потенциал её дальнейшего развития в развивающихся странах отмечены в ряде исследований [2, 5, 6].

Основное направление развития современной электроэнергетики связано с переходом к распределённым энергосистемам и приоритетным использованием чистых ВИЭ. Данный переход обусловлен ростом энергопотребления, необходимостью снижения выбросов CO₂ и задачами повышения энергетической эффективности [5, 6]. Некоторые стимулирующие причины перехода – факторы, приведенные на рис. 1.

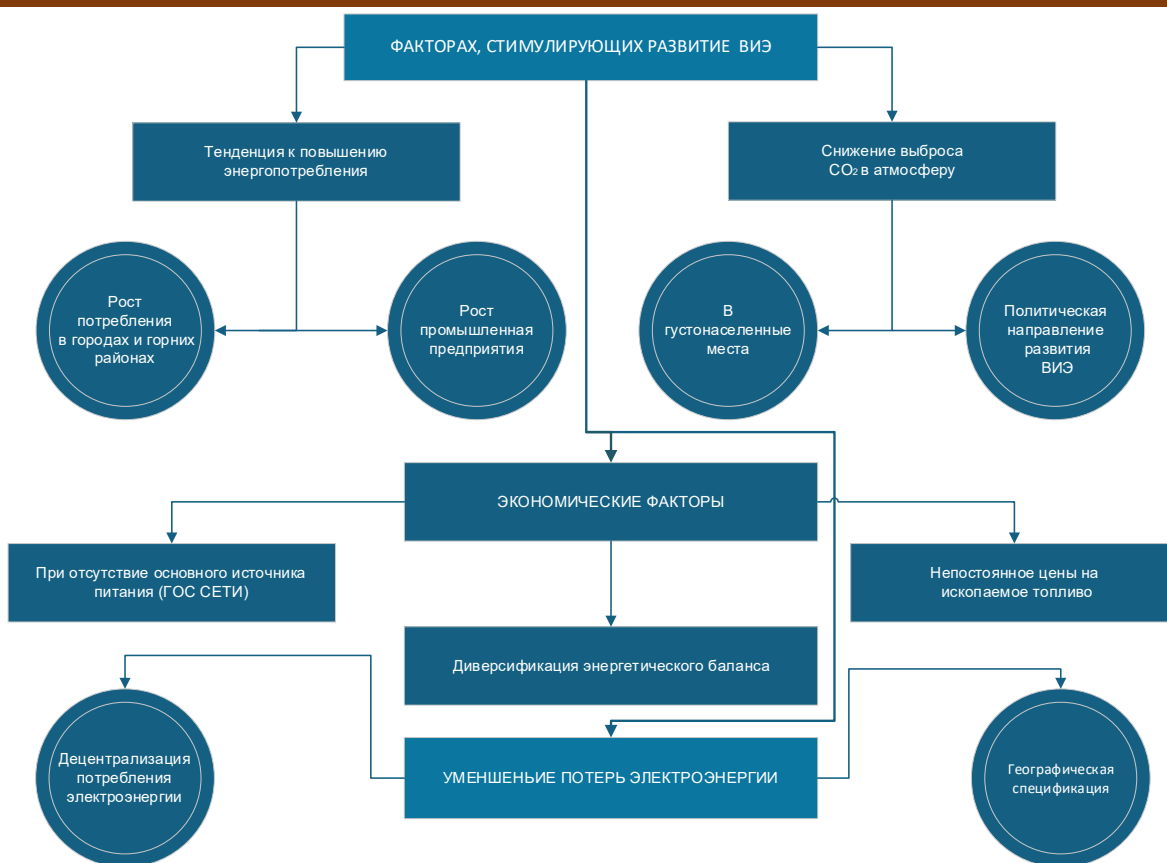


Рисунок 1 – Фокус на стимулах развития ВИЭ

Тенденция к повышению энергопотребления. В последние годы в связи с ростом населения и необходимостью ввода в эксплуатацию новых промышленных предприятий возрастает потребность в качественном и бесперебойном обеспечении электроэнергией. Эта востребованность совпадает с одной из стратегических задач нашей страны — плавным переходом от аграрно-индустриального сектора к индустриально-аграрному сектору. Следует отметить, что обеспечение электроэнергией населения в горных районах затрудняется в связи с проведением ЛЭП в труднодоступных местах, а в некоторых случаях строительство ЛЭП практически невозможно. В этих условиях особую актуальность приобретает развитие малой и микро-гидроэнергетики как основы автономного и децентрализованного электроснабжения [5].

Снижение выбросов CO₂ в атмосферу

Ввод в эксплуатацию малых, мини- и микро-ГЭС играет ключевую роль в электрификации сельских районов во многих странах [1, 9-10] и способствует более значительному снижению выбросов CO₂ в атмосферу, чем другие виды источников энергии. Данные аспекты энергетического перехода и роль ВИЭ подробно рассмотрены в работах [6, 7]. Снижение эмиссии требует ускоренного энергетического перехода к ВИЭ, в частности, к фотоэлектрической станции (ФЭС), ветроэнергетической (ВЭС) и гидроэнергетической генерации. Данный процесс включает масштабную электрификацию конечного потребления (транспорт и теплоснабжение), повышение энергетической эффективности, а также интеграцию технологий интеллектуальных сетей (Smart Grid). Необходимым условием является массивное инвестирование в чистые технологии и принятие регуляторных механизмов, направленных на поэтапный вывод из эксплуатации генерирующих мощностей на ископаемом топливе и масштабирование таких инновационных решений, как накопители энергии (Battery Storage) и зеленый водород (Green Hydrogen).

Географическая специфика потенциала малых водотоков представляет собой перспективный сегмент ВЭИ. В сравнении с крупномасштабными гидроэнергетическими комплексами, микро-ГЭС

демонстрируют ряд инженерных и эксплуатационных преимуществ, прежде всего, в контексте децентрализованного энергоснабжения. Роль гидроресурсов в производстве электроэнергии значительно превышает роль любой другой технологии возобновляемой энергии, и в развивающихся странах всё ещё сохраняется огромный потенциал [2, 3]. Наша страна располагает богатыми водными ресурсами и значительным потенциалом малой и средней гидроэнергетики. Крайне важно правильно использовать эти ресурсы в необходимых объёмах для снижения дефицита электроэнергии и формирования экологически чистой (зелёной) среды.

Уменьшение потерь электроэнергии

В настоящее время из-за высоких потерь электроэнергии в стране поставлена задача стремительно снизить их. Один из способов снижения потерь электроэнергии — децентрализация источников и потребления электроэнергии. Кроме того, потери энергии могут быть сокращены за счёт просвещения пользователей, чтобы они были осведомлены об ограничениях своих устройств. Благодаря усовершенствованию процессов мониторинга и координации производства (генерации), передачи и распределения энергии, возможности для сокращения потерь энергии могут быть найдены во всех сферах энергопотребления (коммунальная, промышленная, коммерческая и бытовая). Области, предоставляющие такие возможности, включают, но не ограничиваются следующим:

- сбор и управление данными энергосистемы;
- автоматическое управление генерацией;
- управление нагрузкой и энергопотреблением;
- распределённая генерация;
- ценообразование на электроэнергию в режиме реального времени.

Это был краткий обзор по снижению потерь энергии, и в настоящее время происходит активное развитие в этой области.

Экономические факторы

В условиях текущей высокой стоимости топлива промышленные предприятия проводят переоценку своей собственной электрогенерирующей мощности и требований к приводам насосного оборудования. Решение о переходе на автономную генерацию (самообеспечение энергией) должно быть основано на технико-экономическом обосновании (ТЭО). То, что ранее считалось нерентабельным, в настоящее время может обеспечить существенную экономию.

В связи с вышеуказанными факторами нам необходимо внедрить новые научно-технические меры для рационального использования энергетических ресурсов, особенно в области малой гидроэнергетики. На рис.2 приведен график развития малой гидроэнергетики Республики Таджикистан.

Обоснование применения асинхронизированного синхронного генератора в гидроэнергетическом комплексе малых рек

Несмотря на очевидные преимущества развития малой гидроэнергетики, реализация потенциала малых рек Таджикистана сталкивается с фундаментальным техническим противоречием. Традиционные гидроэнергетические установки, использующие классические синхронные генераторы, ориентированы на работу с постоянной частотой вращения [4]. Однако гидрологический режим горных рек характеризуется значительной стоковой вариативностью. В условиях сезонных колебаний расхода и напора воды жесткая фиксация скорости вращения турбины приводит к существенному снижению коэффициента полезного действия (КПД) гидроагрегата и нерациональному использованию энергетического ресурса водотока. Именно эти факторы привели к отсутствию надлежащего развития малой гидроэнергетики в Республике Таджикистан за последние 5 лет (см. рис. 2) [5-7].

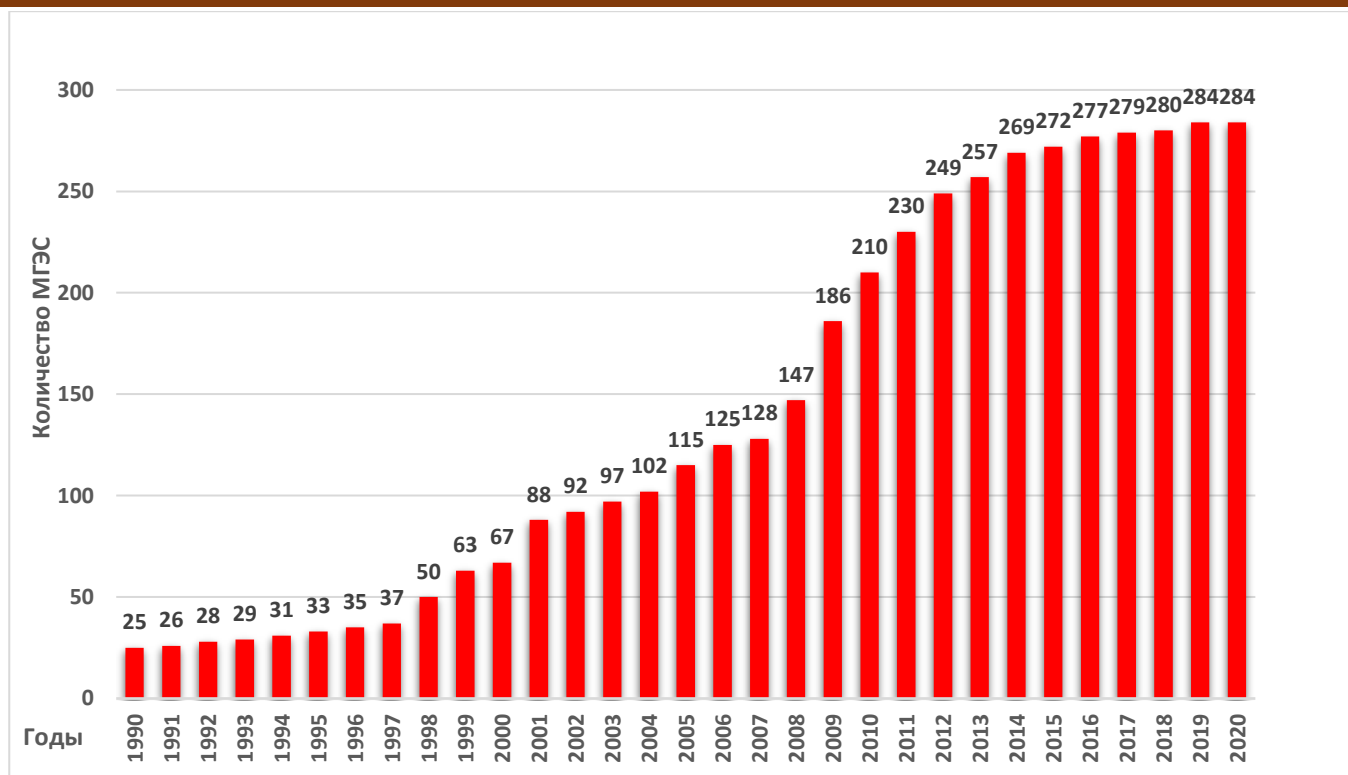


Рисунок 2 – Динамика развития малых гидроэлектростанций

В качестве эффективного решения данной проблемы выступает переход к технологиям регулируемой скорости вращения на базе машин двойного питания (МДП), в отечественной литературе часто классифицируемых как асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ) [8]. Конструктивная особенность данных машин, предполагающая питание обмоток ротора через двухзонный преобразователь частоты, позволяет разделить частоту вращения вала и частоту напряжения в сети. Это дает возможность реализовать алгоритмы отслеживания точки максимальной мощности (MPPT), адаптируя скорость турбины под текущие гидравлические параметры потока без потери качества генерируемой электроэнергии.

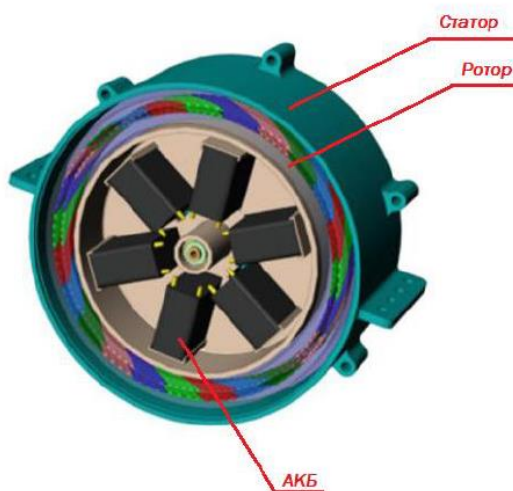


Рисунок 3 – Общий вид асинхронизированного синхронного генератора

Применение АСГ на малых ГЭС Республики Таджикистан обусловлено не только энергетической эффективностью, но и необходимостью поддержания устойчивости распределительных сетей. Большинство малых объектов генерации интегрируются в радиальные линии электропередач напряжением 10 кВ, характеризующиеся значительной протяженностью и высоким полным сопротивлением (так называемые «слабые сети»). В таких условиях резкие изменения нагрузки вызывают недопустимые отклонения уровней напряжения у потребителей.

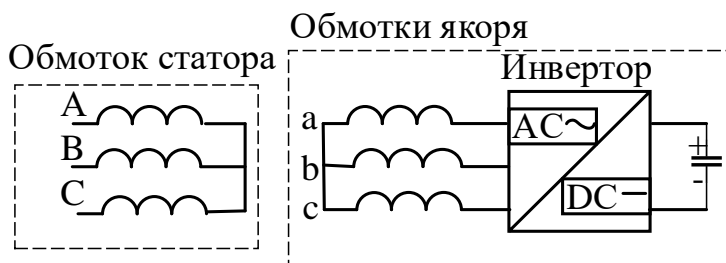


Рисунок 4 – Общая электрическая схема АСГ-АКБ

Использование преобразователя в цепи ротора МДП превращает генератор в активное средство управления параметрами сети (см.рис.4). Благодаря векторному управлению, АСГ способен осуществлять прецизионное и независимое регулирование активной и реактивной мощности. Это позволяет не только оптимизировать выработку энергии, но и динамически компенсировать дефицит реактивной мощности в сети, стабилизируя напряжение в точке общего подключения. Таким образом, технологический переход к машинам двойного питания позволяет трансформировать малую ГЭС из пассивного источника энергии в активный элемент системы регулирования качества электроэнергии. Однако практическая реализация потенциала АСГ в условиях высокогорных и труднодоступных регионов Таджикистана требует решения еще одной критической задачи — обеспечения гарантированной надежности системы возбуждения при возникновении аварийных режимов в «слабых» сетях.

Учитывая стохастический характер гидрологических процессов и специфику распределительных сетей 10 кВ, представляется целесообразным переход от классической архитектуры АСГ к гибридным энергосистемам. Интеграция фотоэлектрических панелей и аккумуляторных батарей непосредственно в систему питания ротора позволяет создать энергетический резерв, необходимый для бесперебойного управления генератором. Для анализа эффективности такой интеграции и разработки алгоритмов согласованного управления потоками энергии от разнородных источников требуется построение комплексной математической модели, учитывающей динамическое взаимодействие всех элементов гибридного узла.

Социально-экономический эффект внедрения в Республике Таджикистан

Переход от классических схем генерации к предлагаемым гибридным комплексам на базе АСГ несет в себе выраженный мультипликативный эффект. Во-первых, это снижение эксплуатационных затрат: за счет перекладывания функций регулирования с механики турбины на силовую электронику увеличивается межремонтный интервал гидроагрегата.

Во-вторых, это повышение энергетической безопасности. Для Таджикистана, где малые ГЭС часто являются единственным источником тепла и света для горных кишлаков, надежность системы возбуждения — это вопрос жизнеобеспечения. Предлагаемая схема превращает каждую малую ГЭС в полноценный интеллектуальный узел, способный «выживать» в самых суровых сетевых условиях и неблагоприятных гидрологических условиях.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает, что для эффективного освоения гидроэнергетического потенциала малых и средних рек Республики Таджикистан необходим переход

от традиционных жестких схем генерации к адаптивным гибридным системам. В ходе работы были получены следующие ключевые результаты и выводы:

1. Технологическая адаптация: Доказано, что применение машин двойного питания (АСГ) является наиболее рациональным решением для малых ГЭС, работающих в условиях значительной сезонной вариативности стока. Использование векторного управления позволяет реализовать принцип переменной скорости вращения турбины, что обеспечивает работу гидроагрегата в точке максимального КПД (MPPT) и увеличивает годовую выработку электроэнергии в среднем на 12–15% по сравнению с синхронными машинами.

2. Инновационная топология: Разработана и теоретически обоснована гибридная электрическая схема, объединяющая АСГ, фотоэлектрические панели и накопители энергии на общей шине постоянного тока. Такая конфигурация решает критическую проблему надежности системы возбуждения в «слабых» распределительных сетях 10 кВ. Наличие АКБ и солнечной генерации гарантирует бесперебойную работу преобразователя ротора, обеспечивая возможность автономного пуска («черного старта») и функционирования ГЭС в режиме микросети при авариях в основной энергосистеме.

3. Социально-экономический и экологический эффект: Внедрение предлагаемых комплексов в энергосистему Таджикистана несет выраженный практический эффект. Снижение механических нагрузок на направляющий аппарат турбины за счет перевода функций регулирования на силовую электронику позволяет увеличить межремонтный интервал оборудования. С точки зрения социального развития, это обеспечивает качественное и бесперебойное энергоснабжение труднодоступных населенных пунктов, способствуя развитию локальной промышленности и улучшению бытовых условий населения.

В конечном итоге, предложенный подход трансформирует малую гидроэнергетику из пассивного участника генерации в активный интеллектуальный ресурс, способный динамически поддерживать устойчивость национальной энергосистемы. Дальнейшее развитие темы может быть связано с оптимизацией алгоритмов управления гибридным узлом с использованием методов искусственного интеллекта для прогнозирования суточного графика нагрузки и выработки ФЭП в специфических климатических условиях высокогорья.

Рецензент: Касобов А.С. — к.т.н., доцент кафедры «Электрические станции» ЛЭТУ имени академика М.С. Осими

Литература

1. Рывкин, С. Е. Современные способы управления микро-ГЭС с асинхронным генератором / С. Е. Рывкин, Г. Б. Зиборов, А. А. Ель // Электротехника. – 2017. – № 8. – С. 67-73. – EDN WIGZWQ.
2. 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.
3. Котов, А. А. Применение генератора двойного питания для ветроэнергетических установок малой, средней и большой мощности / А. А. Котов, Н. И. Неустроев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 80-89. – DOI 10.14529/power170409. – EDN ZXNZRB.
4. 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.\
5. Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электроснабжения горных районов Таджикистана / С. Г. Воронин, А. М. Давлатов, О. О. Султонов [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 100-107. – DOI 10.14529/power190311. – EDN KJFFOR.
6. Д.С. Аминов, Б.И. Косимов, Ниматов Р.Р. Использование малых гидроэлектростанций в качестве возобновляемых источников энергии. // Приоритетные направления развития энергетики в АПК Курган, 22 февраля 2018 г. Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2018. С.70-75.
7. Tazil, M., Kumar, V., Bansal, R., Kong, S., Dong, Z., Freitas, W., and Mathur, H., “Three-phase doubly fed induction generators: An overview,” IET Elect. Power Appl., Vol. 4, No. 2, pp. 75–89, 2010.

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

9. Шамсиев, М.В. О возможности совместной работы гидрогенератора Варзоб ГЭС - 3 с гравитационной аккумулирующей электрической станцией / М. В. Шамсиев, Д. Т. Мамаджанова, Ш. М. Султонзода // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2025. – № 3(71). – С. 22-26. – EDN STZOJS.

10. Фишов, А. Г. Анализ состояния и направление развития малой гидроэнергетики Таджикистана / А. Г. Фишов, А. Х. Гуломзода, Л. С. Касобов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 1(45). – С. 13-22. – EDN VJUIVK.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ – МАЪЛУМОТ ДАР БОРАИ МУАЛЛИФОН – INFORMATION ABOUT AUTHORS

TJ	RU	EN
Қосимов Бахтиёр Исматуллоевич	Косимов Бахтиёр Исматуллоевич	Kosimov Bakhtiyor Ismatulloevich
н.и.т., саромӯзгори кафедраи «неругоҳҳои барқӣ»	к.т.н., старший преподаватель кафедры «электрические станции»	Candidate of Technical Sciences, Senior teacher of the Department "Electrical power stations"
Донишкадаи энергетикӣ Тоҷикистон	Таджикский энергетический институт	Tajikistan Power Engineering institute
E-mail: kosimov.energy@mail.ru https://orcid.org/0000-0001-8807-3260		
TJ	RU	EN
Шарбатов Навруз Сайвалиевич	Шарбатов Навруз Сайвалиевич	Sharbatov Navruz Sayvalievich
Докторанти PhD	Докторант PhD	PhD student
Донишкадаи энергетикӣ Тоҷикистон	Таджикский энергетический институт	Tajikistan Power Engineering institute
E-mail: nsharbatov@internet.ru		
TJ	RU	EN
Қаюмов Алишер Гафурҷонович	Қаюмов Алишер Гафурҷонович	Kayumov Alisher Gafurjonovich
н.и.т., саромӯзгори кафедраи «неругоҳҳои барқӣ»	к.т.н., старший преподаватель кафедры «электрические станции»	Candidate of Technical Sciences, Senior teacher of the Department "Electrical Power stations"
Донишкадаи энергетикӣ Тоҷикистон	Таджикский энергетический институт	Tajikistan Power Engineering institute
E-mail: kayumov_ag@mail.ru		
TJ	RU	EN
Аминов Дилшод Саидович	Аминов Дилшод Саидович	Aminov Dilshod Saidovich
н.и.т., саромӯзгори кафедраи «неругоҳҳои барқӣ»	к.т.н., старший преподаватель кафедры «электрические станции»	Candidate of Technical Sciences, Senior teacher of the Department "Electrical Power stations"
Донишкадаи энергетикӣ Тоҷикистон	Таджикский энергетический институт	Tajikistan Power Engineering institute
E-mail: aminov_ds@mail.ru		
TJ	RU	EN
Давлатов Азамҷон Махмадиевич	Давлатов Азамҷон Махмадиевич	Davlatov Azamjon Mahmadiyevich
н.и.т., саромӯзгори кафедраи «неругоҳҳои барқӣ»	к.т.н., старший преподаватель кафедры «электрические станции»	Candidate of Technical Sciences, Senior teacher of the Department "Electrical Power stations"
Донишкадаи энергетикӣ Тоҷикистон	Таджикский энергетический институт	Tajikistan Power Engineering institute
E-mail: Davlatov_azam@bk.ru		