

ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

О.Д. Абдалгбар^{1,2}, Е.В. Соломин¹, П.А. Юнусов¹, Э.Х. Цветкова¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

² Университет Сэма Хиггинботтома сельского хозяйства, технологии и наук, г. Аллахабад, Индия

В настоящее время стремительно развивается рынок малых гидроэлектростанций (МГЭС) благодаря значительному росту интереса к малой распределённой энергетике, ее экологичности и выгоде использования возобновляемых ресурсов. Гибкость применения блочно-модульного оборудования на русловых гидроэлектростанциях позволяет выполнять проекты для различных уровней потока воды и гидростатического давления. Максимальная эффективность гидроэнергетических систем преобразования энергии может достигаться с помощью различных подходов в управлении потоком воды. В данной работе демонстрируются пути внедрения инновационных решений по производству электроэнергии на основе гидротурбин с учетом гидростатического напора в конкретном месте реки, с учетом естественных географических особенностей. Система отражена в модели с обеспечением симуляции электростанции, имеющей указанное географическое месторасположение и мощность. Кроме этого, исследования построенной модели показывают, что автономная система является более дешевой, чем расширение существующей магистральной сети. Причем автономная система вырабатывает избыточное количество электроэнергии, которое может быть использовано для покрытия нагрузок или пиков дополнительных потребителей.

Ключевые слова: гидроэлектростанция, производство электроэнергии, гидроэнергетические возобновляемые источники энергии, программное обеспечение HOMER.

Введение

За последние несколько лет в мире значительно возросло производство энергии, производимой различными возобновляемыми ресурсами, в том числе электростанциями, использующими энергию рек. В последнее время такие вопросы, как глобальное потепление, таяние ледников и извлечение энергии из водного потока находятся в центре внимания ученых и разработчиков. Выработка электроэнергии на основе свободно текущего потока является одним из наиболее доступных вариантов, поскольку практически в каждом месте планеты существует множество объектов, в которых возможна эксплуатация местных рек с использованием гидротурбины. Гидроэнергетика считается одной из наиболее эффективных вариантов, применяемых для решения современных насущных энергетических проблем. Системы, основанные на гидроэнергетике, предназначены для производства энергии за счет падающего или движущегося с определенной высоты потока воды. Количество вырабатываемой энергии зависит от скорости падения воды в зависимости от силы тяжести, высоты падения или напора, эффективности или КПД гидротурбины и т. д. Генерация механической энергии происходит за счет воздействия потока воды на лопатки гидротурбины.

Сегодня гидроэлектростанции обеспечивают мировое производство электроэнергии свыше 60 % в возобновляемой энергетике и 16 % в общем производстве [1]. Применяемые гидроэлектростанции в значительной степени используются на реках и водопадах для выработки электроэнергии от 5 до 100 кВт [2]. Гидротурбина может быть также установлена в русле реки для выработки электроэнергии 5–100 кВт с эффективностью 70–90 %. Энергия, полученная с использованием таких энергосистем, может поддерживать жизненные потребности отдельных групп людей и целый ряд видов человеческой деятельности, таких как транспорт, связь, инфраструктура и т. д. [3, 4].

Для имитации модульной системы генерации в данной статье предлагается модель энергосистемы, включающая гидротурбину, обеспечивающую выдачу электроэнергии для определенной нагрузки. В сравнении с расширением существующей сети, то есть повышением мощности традиционной, имеющейся в распоряжении энергосистемы, работа которой основана на использовании ископаемого топлива, предложенная система является более дешевой и возводится значительно быстрее [5].

Программное обеспечение HOMER

Программный пакет HOMER является одной из лучших программ оптимизации мощности и

пользуется широким спросом во всем мире. Программа разработана и реализована инженерами компании Mistaya, специализирующейся на разработке и внедрении программных продуктов в Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии (NREL) в США [6]. Программное обеспечение предназначено для решения проблем, связанных с проектированием комбинированных сетевых подключений на основе различных, в том числе возобновляемых генерирующих компонентов [7]. Несложный подход и удобный интерфейс HOMER привлекает разработчиков благодаря все возрастающим потребностям в проведении расчетов в том числе и гибридных энергокомплексов [8].

Цель работы

В данной статье предложена новая энергосистема, обеспечивающая электроснабжение определенной нагрузки, определяемой небольшой деревней под названием Кара-Бег [9]. Система разработана на основе гидроэлектростанции – единственного генерирующего компонента, относящегося к возобновляемой энергетике. Особенность системы заключается в том, что в нормальном режиме работы гидроэлектростанция должна обеспечивать электроснабжение одного отдельно взятого поселка, но при экстремальных ситуациях может увеличивать выработку электроэнергии в том числе и для внешних потребителей с покрытием соответствующих пиков энергопотребления.

Нагрузка потребителя имеет пиковую мощность 17 кВт. Координаты деревни Кара-Бег 39°57'151" северной широты (СШ), 42°53'14" восточной долготы (ВД). Она расположена на

высоте 299 м над уровнем моря около города Алтун-Копр [10].

Расположение гидроэлектростанции

Исток реки Заб находится на горе Загрос, расположенной в Иране на высоте 9843 фута (3000 м). Река течет по северо-западному склону горы, который является достаточно высоким для создания напора, и далее вдоль горных склонов через долины. Река достигает южной равнины Дукан, где меняет свое направление на западное. Далее река поворачивает на юго-запад, протекает через город Алтун-Копр и впадает в реку Тигр около города Аль-Заб. Реки Бане и Кала Чулан являются притоками Заба выше Дукана. Стоит отметить, что в равнине Рая, которая в настоящее время затоплена озером Дукан, есть несколько небольших малых рек, которые впадают в Забу. Длина реки Заб составляет 402 км (250 миль), бассейн 22 000 км² (8,494 мили²) [11]. Река располагается в месте, показанном на снимке карты Google (рис. 1), с координатами 35°14'17" СШ и 43°26'11" ВД, которые могут быть указаны в десятичной форме как 35,238056; 43,436389, в Ираке.

Потребляемая нагрузка

Потребление энергии составляет 156 кВт·ч в сутки. Пиковая мощность нагрузки может составлять 17 кВт. График усредненного потребления на 24 ч приведен в табл. 1.

Формирование энергосистемы

На рис. 2 приведена модель энергосистемы с электроснабжением от гидроэлектростанции на основе расхода воды 50 л/с.



Рис. 1. Снимок реки Заб на карте Google

Таблица 1

Нагрузка потребителя почасовая

Часы	Нагрузка, кВт	Часы	Нагрузка, кВт
00:00–01:00	3,000	12:00–13:00	8,000
01:00–02:00	3,000	13:00–14:00	8,500
02:00–03:00	3,500	14:00–15:00	8,500
03:00–04:00	4,000	15:00–16:00	8,500
04:00–05:00	4,000	16:00–17:00	8,500
05:00–06:00	4,500	17:00–18:00	8,000
06:00–07:00	5,000	18:00–19:00	7,000
07:00–08:00	5,500	19:00–20:00	6,000
08:00–09:00	6,000	20:00–21:00	5,000
09:00–10:00	6,600	21:00–22:00	4,000
10:00–11:00	7,000	22:00–23:00	3,500
11:00–12:00	7,500	23:00–00:00	3,000

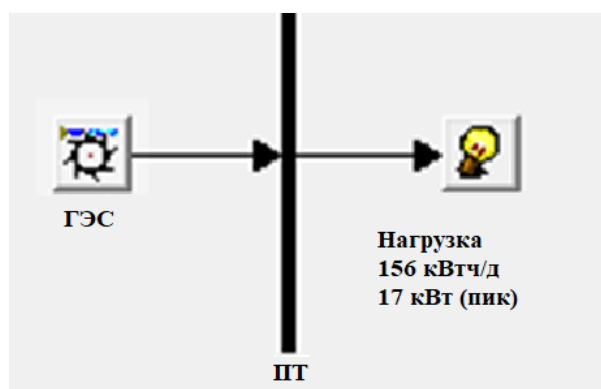


Рис. 2. Модель гидроэлектрической системы

Гидроэлектростанция

Гидротурбина рассматривается как основной компонент выработки электроэнергии для обеспечения питания нагрузки. Модель гидроэлектростанции построена в программном пакете HOMER на основе методологии OFF-river (непогружная модель). Модель использует усредненную ежемесячную информацию о потоке [12], которая приведена на рис. 3.

Спецификация затрат гидроэлектростанции на срок службы 25 лет:

- первоначальные капитальные затраты 8000 долларов;
- стоимость монтажа 3000 долларов;
- эксплуатационные расходы около 200 долларов в год.



Рис. 3. Информация о потоке

Принцип работы

Природные изменения в большинстве географических районов значительно влияют на объем производимой энергии за счет изменения ресурсов возобновляемых источников и особенно в области гидроэнергетики рек. С вырубкой лесов реки мелеют, заиливаются и перестают рассматриваться в виде гидроэнергетических объектов. Поэтому необходимо аккуратно подходить к любым изменениям ландшафта, инфраструктуры, планирования лесозаготовительных мероприятий и т. д. Соответственно, необходимо тщательно продумывать структуру гидроэлектростанции и ее место расположения, принимая во внимание площади возможного затопления, роста расхода потока в период таяния ледников и сезона дождей, путей нереста рыбы и многое другое в соответствии с местным законодательством.

Принцип работы любой гидроэлектростанции (ГЭС) основан на преобразовании кинетической энергии потока воды в электрическую энергию. Основным способом регулирования качества электроэнергии (фазы, частоты, амплитуды тока) является управление открытием водяного клапана для регулирования расхода и скорости потока, как показано на структурной схеме гидроэлектростанции (рис. 4).

Производственная мощность ГЭС является производной ряда различных физических величин, таких как потенциальная энергия от напора воды

на плотине и кинетическая энергия движения потока реки. Турбина является преобразователем кинетической энергии потока воды во вращательное движение вала турбины. Крутящий момент на валу равен произведению силы давления воды на радиус лопаток турбины, а генерируемая мощность равна крутящему моменту на валу, умноженному на угловую скорость вращения вала. Для большей наглядности приведена диаграмма на рис. 5.

Тангенциальная скорость жидкости выражается формулой

$$V = q \cos \beta, \quad (1)$$

где q – скорость жидкости; β – угол падения.

Для вычисления выходной мощности гидротурбины ГЭС необходимо рассчитать крутящий момент:

$$T = \rho Q (r_{\text{вх}} V_{\text{вх}} - r_{\text{вых}} V_{\text{вых}}), \quad (2)$$

где Q – скорость потока жидкости; ρ – плотность жидкости; индексы «вх» и «вых» означают параметры на входе и выходе турбины.

Также необходимо рассчитать непосредственно саму мощность турбины:

$$P = \omega \cdot T = \omega \rho Q (r_{\text{вх}} q_{\text{вх}} \cos \beta_{\text{вх}} - r_{\text{вых}} q_{\text{вых}} \cos \beta_{\text{вых}}), \quad (3)$$

где r – радиус турбины; ω – рациональная скорость турбины; T – крутящий момент; P – выходная мощность.

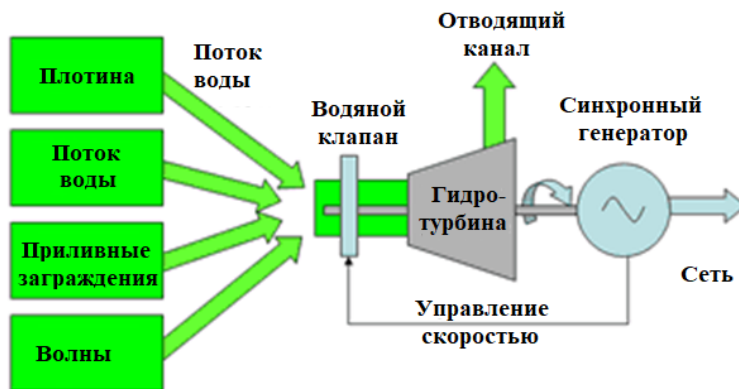


Рис. 4. Структура ГЭС

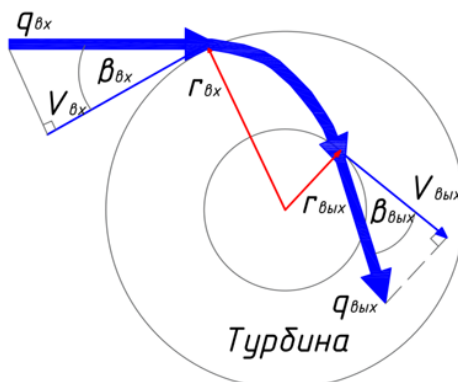


Рис. 5. Основные параметры турбины

Альтернативные источники энергии

Производительность и затраты

На основе расчетов исследуемая система в номинальном режиме производит энергию 12,3 кВт от одной гидротурбины со следующими параметрами (одним из основных является гидростатический напор):

- гидростатический напор или высота падения потока (расстояние, на которое источник воды должен упасть до точки генерации энергии) = 25 м;
- расчетная скорость потока = 50 л/с;
- потери эффективности = 5 %.

Оценка производительности и затрат для исследуемой системы приведена на рис. 6 и в табл. 2.

В табл. 2 приведено также сравнение с вари-

антом, когда производится расширение существующей магистральной сети (строительство генерирующих мощностей, линий электропередачи, подстанций, трансформаторов и т. д. – то есть всей традиционной генерирующей инфраструктуры).

На основе анализа и подбора различных параметров окончательный идеальный результат получен в программном пакете HOMER. Данный результат свидетельствует о том (см. табл. 2), что предлагаемая автономная система на основе ГЭС дешевле, чем расширение магистральной сети по аналогу с [13] на 6,20 км. Демонстрация экономического расчета в пакет HOMER приведена на рис. 7.

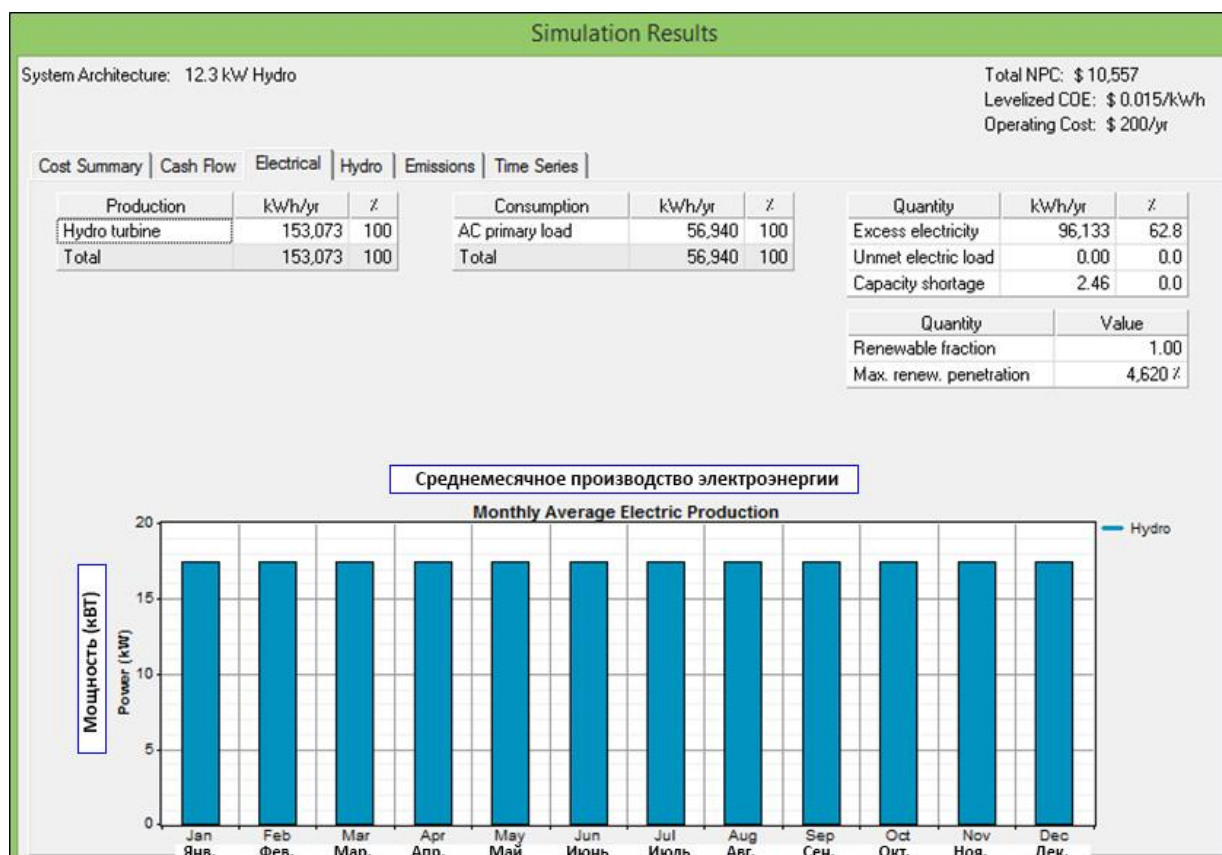


Рис. 6. Результаты производства электроэнергии

Таблица 2

Производительность и затраты

Номинальная мощность, кВт	Результаты деятельности			
	Производство электроэнергии, кВт·ч/год	Избыток электроэнергии, кВт·ч/год	Избыток электроэнергии, %	Расширение сети, км
12,3	153,073	96,133	62,8	-6,20
	Результаты затрат			
	Начальные капиталовложения, \$	Эксплуатационные затраты, \$/год	Итоговые приведенные текущие затраты, \$	Стоимость электроэнергии, \$/кВт·ч
	8000	200	10,557	0,015

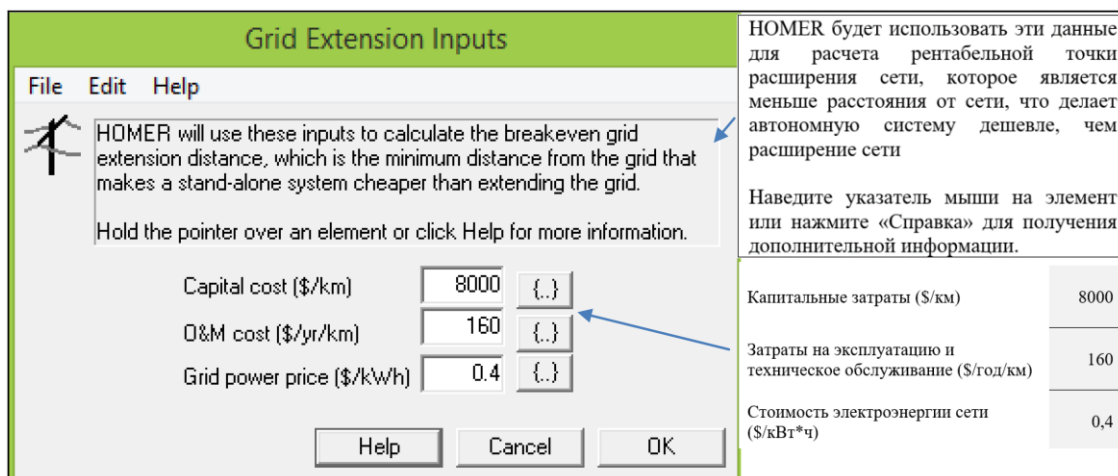


Рис. 7. Стоимость расширения магистральной сети

Выводы

Данная статья демонстрирует новую модель гидроэлектростанции, которая отличается низкой стоимостью и устойчивой электрогенерацией. Энергетическая система основана на одной гидротурбине, установленной в определенном месте с определенными экологическими требованиями. Для большей вероятности внедрения результатов исследований следует добавить следующее.

1. Эксклюзивная малая гидроэлектростанция предназначена для обеспечения небольшого поселка необходимой энергией.
2. Параметры и стоимость предлагаемой энер-

гетической системы на основе гидроэлектростанции вполне соответствуют потребностям поселка.

3. Сравнение с альтернативным способом расширения магистральной сети показывает, что предлагаемая автономная гидроэлектростанция дешевле, чем расширение существующей сети. Кроме того, автономная система сама по себе экологична и, таким образом, является частичным решением экологических проблем.

4. Наконец, гидроэлектростанция имеет избыточную выработку электроэнергии, в связи с чем может использоваться для подачи и покрытия большего количества потребителей.

Литература/References

1. *World Energy Resources*. Hydropower. 2016. World Energy Council. 51 p.
2. Dilip S. *Micro-Hydro-Power*, Resource Assessment Handbook, An Initiative of the Asian and Pacific Center for Transfer of Technology, September, 2009. 64 p.
3. Nasir B.A. Design Considerations of Micro-Hydro-Electric Power Plant. *The International Conference on Technologies and Materials Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES14. Energy Procedia* 50, 2014, pp. 19–29. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.06.003
4. Mohibullah M., Radzi A.M., Hakim M.I.A. Basic Design Aspects of Micro-Hydro-Electric Power Plant and Its Potential Development in Malaysia. National Power and Energy Conference, 2004 (PECon 2004). *Proceedings*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004. DOI: 10.1109/pecon.2004.1461647
5. Al-Juboori S.S. Design Hybrid Micropower System in Mistah Village Using Homer Model. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, 2013, vol. 4, iss. 5, pp. 218–230.
6. *The National Renewable Energy Laboratory is a National Laboratory of the U.S. Department of Energy*. Available at: <https://www.nrel.gov> (accessed 10.12.2018). DOI: 10.2172/937357
7. Nurunnabi Md., Roy N.K., Grid Connected Hybrid Power System Design Using HOMER. *IEEE International Conference, Advanced in Electrical Engineering (ICAEE)*, Dec., 2015, pp. 17–19. DOI: 10.1109/icaee.2015.7506786
8. Mahmood S.N., Abdulabbas A., Easa H., Algburi S.S. The Battery Characteristics Impact on Solar Systems: Performance and Cost. *IEEE International Conference of Current Research in Computer Science and Information Technology (ICCRIT)*, April, 2017, pp. 26–27. DOI: 10.1109/crcsit.2017.7965551
9. Mazin A., Al-Abadi A. *Water Resources Evaluation of Altun Kopri Basin, Ne Kirkuk*. A Thesis Submitted to the Council of College of Science of University of Baghdad in Partial Fulfilment of the Requirements for the Degree of Philosophy of Doctorate of Science in Water Resources, December, 2013.
10. Al-Juboori S., Mejbel A., Mutlag A.H. *Optimization Investigation of a Stand-Alone Hybrid Energy System Design in Kirkuk Technical College*. Recent Advances in Educational Technologies, July, 2015.
11. Waterkeepers Alliance – Iraq, *Lesser Zab Threat Assessment & Action Plan (TAAP) Report*, waterkeeper@natureiraq.org, January, 2013.

12. Лямасов А.К., Орахелашвили Б.М. Исследование гидромашин МГЭС: центробежный насос и гидродинамическая передача. Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2013. Т. 17, № 3 (56). С. 189–193. [Lyamasov A.K., Orakhelashvili B.M. Research of SHPP Hydro Machines: Centrifugal Pump and Hydrodynamic Torque Converter, 2013, vol. 17, no. 3 (56), pp. 189–193.]

13. Кодиров Д.Б., Юсупов Д.Т. Создание мобильной микроГЭС для горных районов Узбекистана. Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2017. Т. 17, № 1. С. 42–46. [Kodirov D.B., Yusupov D.T. Building a Mobile Micro-HPP for the Mountainous Areas of Uzbekistan. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 1, pp. 42–46. (in Russ.)] DOI: 10.14529/power170106

Абдалгабар Омер Джамал, аспирант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Университет Сэма Хиггинботтома сельского хозяйства, технологии и наук, г. Аллахабад, Индия; omer.jamal1986@gmail.com.

Соломин Евгений Викторович, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; solominev@susu.ru.

Юнусов Павриз Алиевич, аспирант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; gamberro90@gmail.com.

Цветкова Эльмира Харисовна, магистрант, кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Поступила в редакцию 10 декабря 2018 г.

DOI: 10.14529/power190209

ELECTRICITY GENERATION BY SMALL HYDROELECTRIC POWER PLANTS

O.D. Abdalgar^{1,2}, omer.jamal1986@gmail.com,

E.V. Solomin¹, solominev@susu.ru,

P.A. Yunusov¹, gamberro90@gmail.com,

E.H. Tsvetkova¹

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

² Sam Higginbottom University of Agriculture, Technology and Sciences, Allahabad, India

The today's market for small hydroelectric power plants (SHPP) is on the rise thanks to considerable interest in distributed energy, its environmental friendliness, and the benefits of using renewable resources. Modular equipment of riverbed hydroelectric power plants can be tailored to different water flow and hydrostatic pressure values. The efficiency of hydropower energy conversion systems can be maximized by a variety of water flow management techniques. This paper demonstrates how to introduce innovative solutions for hydro turbine-based electricity generation adjusted to the hydrostatic pressure at a particular spot of the river in the context of its natural geographical features. The system is represented by a model that simulates a power plant of specific location and capacity. In addition, studies of the constructed model show that an autonomous system will be cheaper than expanding the existing backbone network. Moreover, such a system generates excess electricity that can be used to cover the loads or peaks of additional consumers.

Keywords: hydroelectric power plant, electricity generation, hydropower renewable energy sources, HOMER software.

Received 10 December 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Производство электроэнергии на основе малых гидроэлектростанций / О.Д. Абдалгабар, Е.В. Соломин, П.А. Юнусов, Э.Х. Цветкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 80–86. DOI: 10.14529/power190209

FOR CITATION

Abdalgar O.D., Solomin E.V., Yunusov P.A., Tsvetkova E.H. Electricity Generation by Small Hydroelectric Power Plants. *Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 80–86. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190209