

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ МИНИ-ГЭС КАК ОСНОВА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНЫХ РАЙОНОВ ТАДЖИКИСТАНА

*С.Г. Воронин, А.М. Давлатов, О.О. Султонов, Б.И. Косимов, Д.Ю. Гулов*  
*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Представлен краткий анализ существующих малых ГЭС Республики Таджикистан. В результате анализа проблем, усложняющих эксплуатацию мини-ГЭС, отмечены элементы, не позволяющие их использовать в автономном режиме и снижающие надёжность работы. Предлагается для обеспечения надёжной работы мини-ГЭС и возможности эксплуатации в необслуживаемом режиме строить её на основе конструктивно простых и надёжных устройств. При этом появляется возможность отказаться от непрерывного наблюдения за работой мини-ГЭС обслуживающим персоналом и обойтись периодически регламентными проверками. В качестве турбины предлагается использовать центробежный насос, не нуждающийся в дополнительных операциях управления рабочими режимами, а в качестве генератора – синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов, не требующую наличия канала организации и регулирования потока возбуждения. Качество вырабатываемой энергии предлагается обеспечить с помощью полупроводникового преобразователя напряжения, который должен осуществлять стабилизацию с заданной точностью частот и амплитуд входного напряжения мини-ГЭС. В состав мини-ГЭС предлагается ввести устройства для самодиагностики, осуществляющие контроль не только качества входного напряжения, но и состояние основных элементов мини-ГЭС – турбин, преобразователя напряжений, коммутационной аппаратуры и устройства связи с центральным диспетчерским пунктом. В статье показаны также проблемы, возникающие при реализации предлагаемой структуры, касающиеся в основном обеспечения симметрирования входного напряжения при существенно несимметричной нагрузке, а также повышения достоверности и надёжности устройств диагностики состояния отдельных элементов мини-ГЭС и пути их решения.

*Ключевые слова: микро- и мини-ГЭС, гидротурбина, центробежный насос, синхронный генератор с постоянными магнитами, устройство самодиагностики, симметрирование напряжения.*

Основной проблемой систем электроснабжения горных районов Таджикистана является нехватка электроэнергии [1–3]. Для устранения дефицита электрической энергии в энергосистеме правительство Республики Таджикистан одобрило закон, который включает в себя несколько проектов, одним из которых является использование малых гидроэлектростанций: «Долгосрочная программа строительства малых электростанций на период 2009–2020 годов» от 02 февраля 2009 г. № 73. График дефицита электроэнергии в республике показан на рис. 1. Таким образом, основной упор при устранении дефицита электроэнергии делается на строительство малых ГЭС.

При известных преимуществах использования малых ГЭС, к которым можно отнести: относительно небольшие начальные капиталовложения; возможность использования энергоресурсов малых рек, которых в республике много; точечное расположение источника электроэнергии вблизи населённого пункта, не требующее длинных линий электропередачи и т. д., имеются и отрицательные моменты. Остановимся на них подробнее. Для этого рассмотрим традиционную структуру мини-

ГЭС (рис. 2). Кроме плотины (П) и подводящего трубопровода (ПТ) она содержит известные составные элементы:

- гидротурбина (ГТ);
- генератор (Г);
- коммутационно-защитная и распределительная аппаратура (КРА);
- тиристорное устройство возбуждения (ТУВ);
- привод затвора турбины (ПЗТ);
- привод разгонный турбины (ПРТ);
- регулятор турбины (РТ);
- регулятор возбуждения (РЗ).

Не останавливаясь на рассмотрении принципиальных схем и конструкций ГТ, отметим, что, как правило, они содержат устройство регулирования скорости вращения при изменении напора жидкости. Это может быть либо устройство регулирования перекрытия трубопровода [4, 5], либо устройство для регулирования угла поворота лопаток турбины [6, 7]. В том и другом случае это достаточно сложные устройства, входящие в СУ, требующие наблюдения и обслуживания. Иногда для пуска турбины требуется привод затвора турбины (ПЗТ) [8].

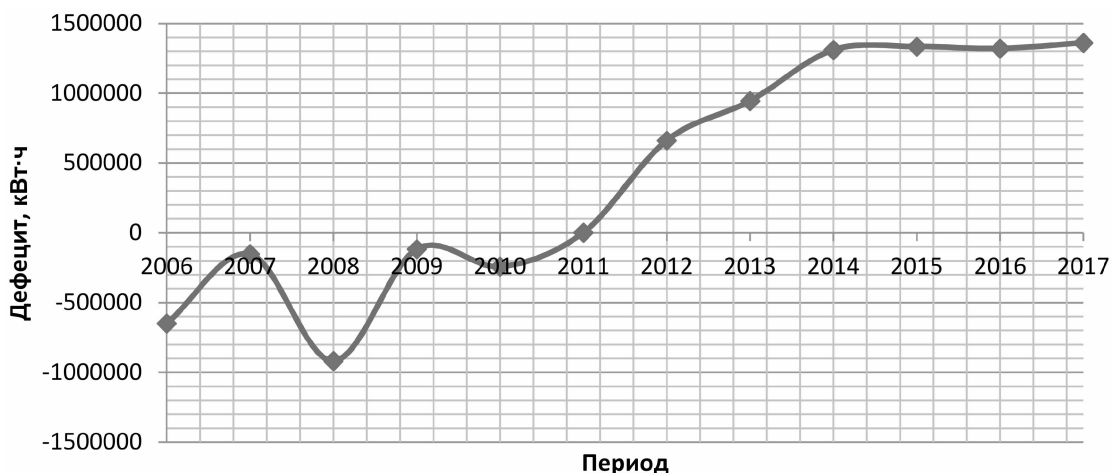


Рис. 1. Дефицит электроэнергии в период с 2006 по 2017 г.

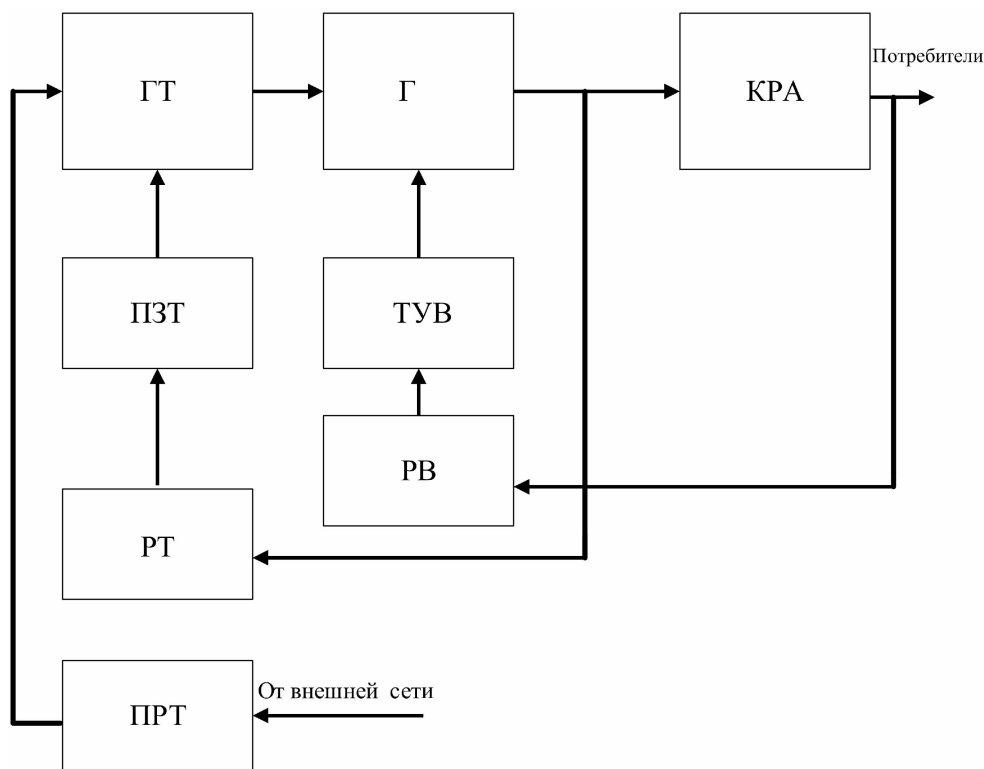


Рис. 2. Традиционная схема мини-ГЭС

В качестве генераторов в таких ГЭС чаще всего используется синхронная машина с электромагнитным возбуждением [9–18]. Для такого генератора требуется дополнительный источник постоянного тока для возбуждения, и ток возбуждения поступает через контактные кольца [19]. Наличие контактных колец понижает надёжность генератора и требует периодического обслуживания. Генератор может содержать собственный возбудитель [20]. Тогда машина будет бесконтактной, но это уже не машина, а агрегат из двух машин, что также усложняет конструкцию и обслуживание генератора.

Система управления должна содержать ис-

точник электропитания для собственных нужд и электронные органы для регулирования частоты и амплитуды выходного напряжения ГЭС.

Краткий анализ функциональной схемы мини-ГЭС показывает, что она является достаточно сложным техническим объектом, требующим периодического обслуживания и постоянного наблюдения. Действительно, статистика показывает [21], что каждую ГЭС мощностью от нескольких десятков кВт до единиц МВт обслуживает в среднем 2–3 человека непрерывно. К этому персоналу необходимо добавить людей, работающих в районных системах электроснабжения и занятых конкретной станцией, и мы увидим, что стоимость

## Электромеханические системы

производства электроэнергии возрастает весьма значительно из-за высоких эксплуатационных расходов.

Несмотря на большое количество обслуживающего персонала на мини-ГЭС, их надёжность и срок службы оказываются небольшими. Например, из 22 электростанций, пущенных в эксплуатацию за 2001–2010 годы, многие вышли из строя. Следовательно, необходим пересмотр если не структуры, то элементного состава мини-ГЭС.

Для этого проанализируем статистику неисправностей и причин выхода из строя существующих ГЭС. Например, Ховалингская гидроэлектростанция мощностью 15 кВт·ч в деревне Сарисёб, построенная в 2010 году, из-за отказа генератора не работает. Малая гидроэлектростанция «Яхшо» мощностью 5 кВт была построена в Шурободском районе в 2009 году, прекратила работу в связи с выходом из строя генератора. Другая малая гидроэлектростанция «Хафса» мощностью 15 кВт была построена в 2010 году в Шуробском районе – не функционирует из-за повреждения генератора. В 2009 году была построена малая гидроэлектростанция «Шуробский район» мощностью 20 кВт·ч. По причине выхода из строя системы возбуждения генератора прекратила работу. Также можно привести примеры выхода из строя электростанций из-за выхода из строя регуляторов гидротурбин. Следовательно, можно заключить, что основными причинами выхода из строя малых электростанций является отказ системы возбуждения генератора и регуляторов турбин. Другими словами, отказывают те элементы, которые обеспечивают качество электроэнергии: стабильность амплитуды выходного напряжения – система возбуждения генератора; стабильность частоты выходного напряжения – регулятор скорости вращения турбины.

Отсюда возникает направление совершенствования элементного состава мини-ГЭС с целью

повышения их надёжности и сокращения эксплуатационных расходов. Смысл его заключается в отказе от традиционных методов регулирования амплитуды напряжения путём изменения тока возбуждения и частоты – путём регулирования скорости вращения турбины или балластной нагрузкой [22–26]. Вместо этого предлагается обеспечить стабилизацию амплитуды и частоты выходного напряжения ГЭС с помощью электронного преобразователя напряжения, а возбуждение генератора осуществлять от постоянных магнитов. Реализации мини-ГЭС в таком виде способствует, во-первых, значительное развитие электронной элементной базы в части существенного повышения передаваемой мощности, уменьшения потерь преобразования, массы и габаритов аппаратуры, во-вторых, появление новых магнитных материалов с высокой удельной энергией.

Кроме того, расширение использования электронной аппаратуры позволит сделать ГЭС действительно автономным необслуживаемым объектом. Для этого в её состав необходимо ввести устройства, реализующие функции диагностики состояния узлов и агрегатов ГЭС и функции связи с центральным диспетчерским пунктом системы электроснабжения республики. С учётом изложенного функциональная схема мини-ГЭС как автономного электротехнического комплекса представлена на рис. 3. Комплекс содержит следующие элементы:

- гидротурбина (ГТ), в качестве которой предлагается использовать серийный центробежный насос;
- синхронный трёхфазный генератор (СГ), в качестве которого предлагается использовать серийный синхронный трёхфазный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов;
- силовой преобразователь напряжения (СПН), включающий в себя три элемента: преобразова-

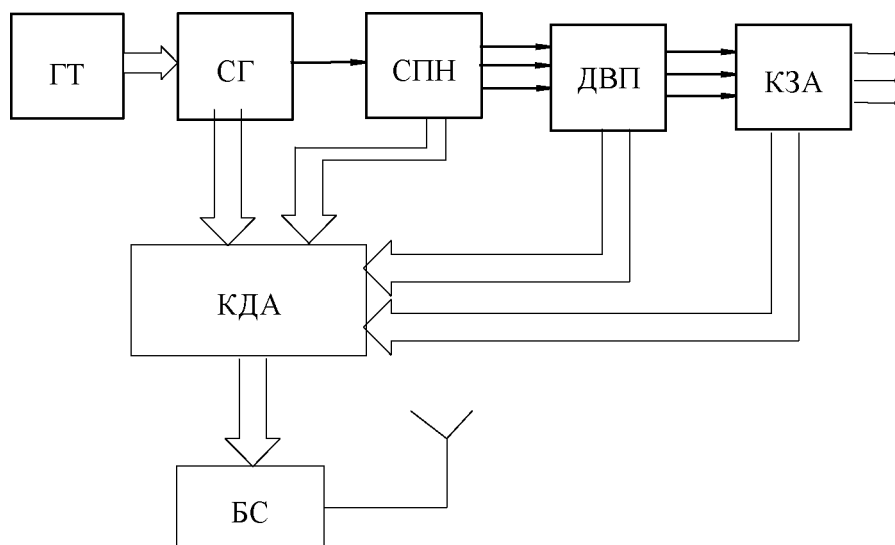


Рис. 3. Функциональная схема автономной автоматизированной мини-ГЭС

тель переменного тока в постоянный, преобразователь постоянного тока в переменный заданной амплитуды, частоты и устройство симметрирования выходного трёхфазного напряжения;

– блок датчиков выходных параметров ГЭС (ДВП), который выдаёт информацию о текущих значениях частоты, тока, напряжения, мощности и выработанной энергии;

– блок коммутационно-защитной аппаратуры (КЗА), который включает в себя стандартные для любой электростанции коммутационно-защитные устройства;

– блок контрольно-диагностической аппаратуры (КДА), предназначенный для реализации функций диагностики состояния элементов комплекса и оценки его текущей и последующей работоспособности;

– блок связи (БС), предназначенный для связи и передачи данных о выходных параметрах и состоянии отдельных элементов на центральный диспетчерский пункт.

Представленная структурная схема хотя и является очевидной, однако почти каждый из её элементов требует дополнительной научно-технической проработки, поэтому рассмотрим её подробнее.

Обратимся к ГТ. Использование центробежного насоса в качестве гидротурбины известно [27]. Однако остаются недостаточно выясненными вопросы изменения скорости вращения насоса в режиме турбины при одновременном изменении напора и момента на валу, связанного с изменением потребления электроэнергии [28]. Следовательно, для обоснованного выбора типа и мощности насоса, а также оценки возможного диапазона изменения его скорости вращения в процессе эксплуатации потребуются более детальное исследование гидродинамических процессов его работы в режиме турбины.

Генератор на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) является хорошо технологически отработанной и изученной машиной. Существенным недостатком СДПМ при использовании его в качестве генератора автономной энергетической установки является возможность возникновения катастрофических последствий в случае виткового замыкания в обмотке. Действительно, если СДПМ будет продолжать вращаться при наличии такого замыкания, в короткозамкнутом контуре будут протекать большие токи, в результате которых обмотка перегреется и возможно возникновение пожара. Следовательно, возникает задача либо исключения таких замыканий, либо быстрого их обнаружения и останова генератора.

В СПН преобразователь переменного тока в постоянный может быть выполнен по одному из двух вариантов. Либо это стандартный двухполупериодный, либо синусный выпрямитель [29–31].

Недостатком первой схемы является влияние выпрямителя на синхронный генератор за счёт не синусоидальности потребляемого тока, что ухудшает его энергетические показатели. Синусоидальный выпрямитель позволяет обеспечить синусоидальность фазных токов, но схема его существенно сложнее и стоимость выше. Поэтому требуется дополнительная оценка эффективности и границ применения того и другого выпрямителей.

На первый взгляд, не вызывает вопросов преобразователь постоянного напряжения в переменное трёхфазное, так как схемы таких устройств хорошо отработаны и серийно выпускаются. Однако в рассматриваемом случае преобразователь работает на несимметричную нагрузку, и вопросы симметрирования напряжений требуют особого внимания, так как несимметрия может быть весьма существенной. Например, одна фаза может иметь нулевую нагрузку, а две другие нагружены до номинальных токов или наоборот, две фазы нагружены, а одна без нагрузки. Вопросы симметрирования нагрузки на выходе преобразователей хотя и рассмотрены в настоящее время [31], однако имеющиеся технические решения достаточно сложны и требуют усовершенствования.

Блок датчиков выходных координат энергетической установки и блок коммутационно-защитной аппаратуры могут быть выполнены на основе стандартных элементов. В первом случае это стандартные датчики частоты и действующего значения напряжения, а также датчики тока и вырабатываемой мощности. Во втором – это стандартная коммутационно-защитная аппаратура. Дополнительным требованием к ним является вывод информации об измеряемых координатах и о состоянии коммутационно-защитных элементов в цифровой и импульсной форме для последующего анализа в устройстве диагностики и передачи по выбранным каналам связи.

Блок диагностики является в данном случае важнейшим, алгоритмически сложным элементом, так как должен в режиме онлайн на действующей аппаратуре оценивать её работоспособность и выявлять не только возникшие неисправности, но и прогнозировать возможность их возникновения. При этом на него поступает информация с различных датчиков. Например: датчики вибраций корпусов турбины и генератора – по информации с этих датчиков можно судить о состоянии опор этих устройств; датчик расхода жидкости, поступающей в турбину, информация с которого используется при определении соответствия её мощности расчётным значениям; датчик температуры обмотки генератора и силовых ключей преобразователя напряжения, информация с которых позволяет судить об исправности генератора и преобразователя; датчики, фиксирующие возникновение несимметрии и искажение картины магнитного поля, позволяющие экстренно фиксировать витко-

вое замыкание; датчики для определения сопротивления изоляции обмотки. Информация с перечисленных датчиков, а также информация о значениях выходных координат энергоустановки совместно с информацией, получаемой от математической модели процессов преобразования энергии, заложенной в блок диагностики, используется для оценки её работоспособности и выявления неисправностей.

Для связи с центральным диспетчерским пунктом может быть использован интернет, радиоканал, спутниковая связь и т. д.

### Заключение

1. Одним из наиболее целесообразных путей повышения надёжности автономных энергоустановок в виде мини-ГЭС является реализация их на основе конструктивно простых, бесконтактных и нерегулируемых устройств первичного преобразования энергии – турбины в виде центробежного насоса и генератора в виде синхронной бесконтактной машины.

2. Требуемое качество энергии в этом случае обеспечивается с помощью полупроводникового преобразователя энергии.

3. Для контроля состояния и оценки работоспособности энергоустановки в её состав должно быть введено устройство диагностики, которое на основе анализа информации с датчиков гидравлических, механических, температурных и электрических параметров путём сопоставления их значений с параметрами, полученными на математической модели, должно не только выявить неисправность, но и сигнализировать о возможности её возникновения.

4. Введение устройства диагностики позволит реализовать автономный режим работы энергоустановки без привлечения обслуживающего персонала с дистанционной передачей данных о её состоянии на центральный диспетчерский пункт.

### Литература

1. Иноятов, М.Б. К вопросу об использовании малой гидроэнергетики применительно к условиям Республики Таджикистан / М.Б. Иноятов, А.К. Киргизов // *Вестник Таджикского технического университета*. – 2008. – № 2. С. 38–42.

2. Положение дел по использованию возобновляемых источников энергии в Центральной Азии. Перспективы их использования и потребности в подготовке кадров. Обзор / Н. Друзь, Н. Борисова, А. Асанкулова и др. – ЮНЕСКО; Алматы, 2010. – 144 с.

3. Отчет Министерства экономического развития и торговли Республики Таджикистан «Экспресс-оценка и анализ пробелов в энергетическом секторе Таджикистана». – Душанбе, 2011.

4. Li, X. Guide vane asynchronous closure mode for improving the transient quality of hydroturbines /

X. Li, J. Chang, C. Li // *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*. – 2014. – Vol. 33 (1). – P. 202–206. DOI: 10.1115/1.4036234

5. Switched Model and Dynamic Analysis of a Hydroturbine Governing System in the Process of Load Rejection Transient / H. Li, D. Chen, F. Wang, H. Zhang // *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*. – 2017. – Vol. 139 (10). – 101002.

6. Кавитирующее обтекание уменьшенной модели направляющих лопаток турбины высокого давления / М.В. Тимошевский, С.А. Чуркин, А.Ю. Кравцова и др. // *Международный журнал многофазного потока*. – 2016. – Т. 78. – С. 75–87. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.09.014

7. Lewis, B.J. Unsteady computational fluid dynamic analysis of the behavior of guide vane trailing-edge injection and its effects on downstream rotor performance in a francis hydroturbine / B.J. Lewis, J.M. Cimbala // *Journal of Turbomachinery*. – 2015. – Vol. 137 (8). – 81001. DOI: 10.1115/1.4029427

8. Лукутин, Б.В. Автономное электроснабжение микрогидроэлектростанцией / Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, Е.Б. Шандарова. – Томск, 2001. – 104 с.

9. Асинхронизированные синхронные генераторы для ветроэлектростанций и малых ГЭС Таджикистан / Н.И. Смолин, Д.Ю. Гулов, Б.И. Косимов, О.О. Султонов // *Приоритетные направления развития энергетики в АПК: материалы I Всерос. науч.-практ. конф.* – 2017. – С. 100–105.

10. Dietz, A. Efficiency improvement of small hydroelectric power stations with a permanent-magnet synchronous generator / A. Dietz, A. Groeger, C. Klingler // *1st International Electric Drives Production Conference 2011, EDPC-2011 – Proceedings*. – 6085557. – P. 93–100. DOI: 10.1109/edpc.2011.6085557

11. Wegiel, T. Variable speed small hydropower plant / T. Wegiel, D. Borkowski // *Proceedings – 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG 2012)*. – 6253996. – P. 167–174. DOI: 10.1109/pedg.2012.6253996

12. Borkowski, D. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed / D. Borkowski, T. Wegiel, // *IEEE Transactions on Energy Conversion*. – 2013. – Vol. 28 (2). – 6479690. – P. 452–459. DOI: 10.1109/tec.2013.2247605

13. Ганджа, С.А. Выбор оптимальной конструкции электродвигателя привода пильгерстана для технологии изготовления бесшовных труб / С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 5–17. DOI: 10.14529/power190101

14. Farret, F.A. Small Hydroelectric Systems / F.A. Farret, M.G. Simoes, A. Michels // *Green Energy and Technology*. – 2013. – Vol. 59. – P. 151–184. DOI: 10.1007/978-1-4471-5104-3\_5

15. Pistelok, P. Highly efficient synchronous generators with permanent magnets intended to small hydropower station / P. Pistelok, M. Baranski // 5th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact (ICCEP 2015). – 7177654. – P. 395–399. DOI: 10.1109/iccep.2015.7177654
16. Сравнительный анализ электродвигателей привода пильгерстана для технологии изготовления бесшовных труб. Выбор оптимальной конструкции / С.А. Ганджа, Б.И. Косимов, Д.С. Аминов, Р.Р. Ниматов // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 30, – С. 79–101. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.137
17. Математическое моделирование постоянного магнита для оптимизации вентильных электрических машин и возобновляемых источников энергии / С.А. Ганджа, Д.С. Аминов, Б.И. Косимов // Наука ЮУрГУ. Материалы 70-й научной конференции. – 2018. – С. 420–428.
18. Бут, Д.А. Бесконтактный электрический машины / Д.А. Бут. – М.: Высш. шк., 1990. – 415 с.
19. A Study of the Operation Mode of a Synchronous Compensator with Two Excitation Windings / K.I. Kim, K.K. Kim // Russian Electrical Engineering. – 2018. – Vol. 89 (10). – P. 598–606. DOI: 10.3103/s106837121810005x
20. Transient analysis of air-core pulsed alternators in self-excitation mode / X. Xie, K. Yu, C. Ye et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2015. – Vol. 43 (5). – P. 1415–1420. DOI: 10.1109/tps.2015.2416371
21. Копылов, И.П. Электрические машины: учеб. // И.П. Копылов. – 5-е изд. – М.: Высш. шк., 2006. – 607 с.
22. Abo-Khalil, A.G. Grid connection of doubly-fed induction generators in wind energy conversion system / A.G. Abo-Khalil, D.-C. Lee, S.-H. Lee // Conference Proceedings – IPEMC 2006: CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference 3. – 2006. – 4078676. – P. 1482–1486. DOI: 10.1109/ipemc.2006.4778244
23. Chlodnicki, Z. Control strategies of the variable speed generating systems / Z. Chlodnicki, W. Koczara, N. Al-Khayat // EUROCON 2007 – The International Conference on Computer as a Tool. – 2007. – 4400682. – P. 1301–1309. DOI: 10.1109/eurcon.2007.4400682
24. Hwang, J.-C. Application of three-level converters to wind power systems with permanent-magnet synchronous generators / J.-C. Hwang, M.-H. Chen, S.-N. Yeh // IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). – 2007. – 4460130. – P. 1615–1620. DOI: 10.1109/iecon.2007.4460130
25. Воронин, С.Г. Векторное управление синхронными двигателями с возбуждением от постоянных магнитов / С.Г. Воронин, Д.А. Курносков, А.С. Кульмухаметова // Электротехника. – 2013. – № 10. – С. 50–54.
26. Дедков, В.Н. Применение серийных насосов в качестве гидротурбин для малой энергетики // Проблемы машиностроения. – 2011. – № 4. – С. 24–30.
27. Лямасов, А.К. Исследование гидромашин МГЭС: центробежный насос и гидродинамическая передача / Б.М. Орахелашвили // Вестник УГАТУ. – 2013. – № 3. – С. 189–193.
28. An analysis of virtual direct power control of three-phase AC-DC converter / N.A. Yusoff, A.B.M. Razali, K.A. Karim et al. // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. – 2018. – Vol. 9, no. 3. – P. 947–956. DOI: 10.11591/ijpeds.v9.i3.pp947-956
29. Nonisolated Harmonics-Boosted Resonant DC/DC Converter with High-Step-Up Gain / Y. Huang, S. Xiong, S.-C. Tan, S.Y. Hui // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Vol. 33, no. 9. – P. 7770–7781. DOI: 10.1109/tpe.2017.2769165
30. Six-Leg Single-Phase to Three-Phase Converter / N.B. De Freitas, C.B. Jacobina, A.C.N. Maia, A.C. Oliveira // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2017. – Vol. 53, no. 6. – P. 5527–5538. DOI: 10.1109/tia.2017.2720138
31. Саидов, А.Х. Симметрирование нагрузки в трёхфазных сетях при дискретном формировании фазных напряжений // Научный поиск: материалы девятой научной конференции аспирантов и докторантов. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2017. – С. 47–54.

**Воронин Сергей Григорьевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; voroninsg@susu.ru.

**Давлатов Азамджон Махмадиевич**, аспирант кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; davlatov\_azam@bk.ru.

**Султонов Оламафруз Олимович**, аспирант кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

**Косимов Бахтиёр Исматуллоевич**, аспирант кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

**Гулов Диловар Юсупович**, аспирант кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

Поступила в редакцию 3 декабря 2018 г.

## AUTOMATED SMALL HPPs AS THE BACKBONE OF POWER GRIDS FOR MOUNTAINEOUS REGIONS OF TAJIKISTAN

S.G. Voronin, voroninsg@susu.ru,

A.M. Davlatov, davlatov\_azam@bk.ru,

O.O. Sultonov, B.I. Kosimov, D.Yu. Gulov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article briefly analyzes the existing small hydropower plants in the Republic of Tajikistan. Analysis reveals why such units are not suitable for stand-alone operation and what renders them less reliable. The paper proposes a simpler design for better reliability and stand-alone, low-maintenance operation. A design based on simpler and more reliable components requires less maintenance, which could be limited to regular inspections, hence no need for round-the-clock staff presence. A centrifugal pump is proposed as a turbine, as it does not require additional parameter controls, while a synchronous permanent magnet-excited unit is proposed as a generator, as it does not require a special channel to control the excitation flux. For better quality of generated electricity, the paper proposes using a semiconductor-based voltage converter that will stabilize the input voltage to a required accuracy of frequency and amplitude. Self-diagnosis instrumentation is part of the design, as it can monitor not only the input voltages, but also the condition of primary components: turbines, voltage converters, switches, and communications with the mission control center. The paper also analyzes the problems of implementing this design, which mainly pertain to balancing the input voltage given a significantly asymmetrical load; another challenge is to improve the accuracy and reliability of instrumentations implemented to monitor the health of specific small-HPP elements.

*Keywords:* small hydroelectric power plants, hydraulic turbine, centrifugal pump, permanent magnet synchronous generator, self-diagnosis instrumentation, voltage balancing.

### References

1. Inoyatov M.B., Kirghizov A.K. [On the issue of using small hydropower in relation to the conditions of the Republic of Tajikistan]. *Bulletin of the Tajik Technical University*, 2008, no. 2, pp. 38–42. (in Russ)
2. Druz N., Borisova N., Asankulova A., Radjabov., Zakhidov R., Tajiev U. [The state of affairs on the use of renewable energy sources in Central Asia. Prospects for their use and training needs. Overview]. *UNESCO, Almaty*, 2010. 144 p. (in Russ.)
3. [Report by the Ministry of Economic Development and Trade of the Republic of Tajikistan “Express assessment and analysis of gaps in the energy sector of Tajikistan”]. Dushanbe, 2011. (in Russ)
4. Li X., Chang J., Li C. Guide vane asynchronous closure mode for improving the transient quality of hydroturbines. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, vol. 33 (1), pp. 202–206. DOI: 10.1115/1.4036234
5. Li H., Chen D., Wang F., Zhang H. Switched Model and Dynamic Analysis of a Hydroturbine Governing System in the Process of Load Rejection Transient. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 2017, vol. 139 (10), 101002.
6. Timoshevskiy M.V., Churkin S.A., Kravtsova A.Y., Markovich D.M., Hanjalić K. [Cavitating flow around a scaled-down model of guide vanes of a high-pressure turbine]. *International Journal of Multiphase Flow* 78, 2016, pp. 75–87. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.09.014
7. Lewis B.J., Cimbala J.M. Unsteady computational fluid dynamic analysis of the behavior of guide vane trailing-edge injection and its effects on downstream rotor performance in a francis hydroturbine. *Journal of Turbomachinery*, 2015, vol. 137 (8), 81001. DOI: 10.1115/1.4029427
8. Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shandarova E.B. *Avtonomnoe elektrosnabzheniya mikrogidroelektrostantsiya* [Autonomous power supply small hydroelectric power plant]. Tomsk, 2001. 104 p.
9. Smolin N.I., Gulov D.Yu., Kosimov B.I., Sultonov O.O. [Asynchronized synchronous generators for wind farms and small hydropower plants in Tajikistan]. In: *Priority directions of energy development in the agro-industrial complex. Proceedings of the 1st All-Russian Research Conference*, 2017, pp. 100–105. (in Russ)
10. Dietz A., Groeger A., Klingler C. Efficiency improvement of small hydroelectric power stations with a permanent-magnet synchronous generator. *1st International Electric Drives Production Conference 2011, EDPC-2011 – Proceedings*, 6085557, pp. 93–100. DOI: 10.1109/edpc.2011.6085557
11. Wegiel T., Borkowski D. Variable speed small hydropower plant, *Proceedings – 2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, 2012, pp. 167–174. DOI: 10.1109/pedg.2012.6253996
12. Borkowski D., Wegiel T. Small hydropower plant with integrated turbine-generators working at variable speed. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2013, vol. 28 (2), 6479690, pp. 452–459. DOI: 10.1109/tec.2013.2247605

13. Gandzha S.A., Kosimov B.I., Aminov D.S. Optimizing the Design of a Pilger Mill Motor to Produce Seamless Pipes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 5–17. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190101
14. Farret F.A., Simoes M.G., Michels A. Small Hydroelectric Systems. *Green Energy and Technology*, 2013, vol. 59, pp. 151–184. DOI: 10.1007/978-1-4471-5104-3\_5
15. Pistelok P., Baranski M. Highly efficient synchronous generators with permanent magnets intended to small hydropower station. *5th International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact (ICCEP 2015)*, 2015, 7177654, pp. 395–399. DOI: 10.1109/iccep.2015.7177654
16. Gandzha S.A., Sogrin A.I., Kiessh I.E. The comparative analysis of permanent magnet electric machines with integer and fractional number of slots per pole and phase. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 129, pp. 408–414. (in Russ.) DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.137
17. Gandzha S.A., Aminov D.S., Kosimov B.I. [Mathematical modeling of a permanent magnet for optimization of valve electric machines and renewable energy sources]. *Science SUSU. Materials of the 70th scientific conference*, 2018, pp. 420–428. (in Russ.)
18. Booth D.A. *Beskontaktnyy elektricheskiy mashiny* [Contactless Electric Machines]. Moscow, Higher School, 1990. 415 p.
19. Kim K.I., Kim K.K. A Study of the Operation Mode of a Synchronous Compensator with Two Excitation Windings. *Russian Electrical Engineering*, 2018, vol. 89 (10), pp. 598–606. DOI: 10.3103/s106837121810005x
20. Xie X., Yu K., Ye C., Tang L., Zhang H. Transient analysis of air-core pulsed alternators in self-excitation mode. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, vol. 43 (5), pp. 1415–1420. DOI: 10.1109/tps.2015.2416371
21. Kopylov I.P. *Elektricheskiye mashiny* [Electrical Machines]. Moscow, Higher School, 2006. 607 p.
22. Abo-Khalil A.G., Lee D.-C., Lee S.-H. Grid connection of doubly-fed induction generators in wind energy conversion system. *Conference Proceedings – IPEMC 2006: CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference 3*, 2006, 4078676, pp. 1482–1486. DOI: 10.1109/ipemc.2006.4778244
23. Chlodnicki Z., Koczara W., Al-Khayat N. Control strategies of the variable speed generating systems. *EUROCON 2007 – The International Conference on Computer as a Tool 4400682*, 2007, pp. 1301–1309. DOI: 10.1109/eurcon.2007.4400682
24. Hwang J.-C., Chen M.-H., Yeh S.-N. Application of three-level converters to wind power systems with permanent-magnet synchronous generators. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2007, 4460130, pp. 1615–1620. DOI: 10.1109/iecon.2007.4460130
25. Voronin S.G., Kurnosov D.A., Kulmukhametova A.S. [Vector control of synchronous motors with excitation from permanent magnets]. *Electrical Engineering*, 2013, no. 10, pp. 50–54. (in Russ.)
26. Dedkov V.N. [Application of serial pumps as hydro turbines for small-scale power engineering]. *Problemy Mechanical Engineering*, 2011, no. 4, pp. 24–30. (in Russ.)
27. Lyamasov A.K., Orachelashvili B.M. [Investigation of Hydromachines of Hydropower Plants: Centrifugal Pump and Hydrodynamic Transmission]. *Vestnik UGATU* [Bulletin of USATU], 2013, no 3, pp. 189–193. (in Russ.)
28. Yusoff N.A., Razali A.B.M., Karim K.A., Jidin A., Sutikno T. An analysis of virtual direct power control of three-phase AC-DC converter. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2018, vol. 9 (3), pp. 947–956. DOI: 10.11591/ijpeds.v9.i3.pp947-956
29. Huang Y., Xiong S., Tan S.-C., Hui S.Y. Nonisolated Harmonics-Boosted Resonant DC/DC Converter with High-Step-Up Gain. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(9), pp. 7770–7781. DOI: 10.1109/tpe.2017.2769165
30. De Freitas N.B., Jacobina C.B., Maia A.C.N., Oliveira A.C. Six-Leg Single-Phase to Three-Phase Converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(6), 7959097, pp. 5527–5538. DOI: 10.1109/tia.2017.2720138
31. Saidov A.Kh. [Load balancing in three-phase networks with discrete formation of phase voltages]. *Scientific search: materials of the ninth scientific conference of graduate students and doctoral students*. Chelyabinsk, SUSU Publishing Center, 2017. pp. 47–54. (in Russ.)

Received 3 December 2018

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Автоматизированная мини-ГЭС как основа системы электрообеспечения горных районов Таджикистана / С.Г. Воронин, А.М. Давлатов, О.О. Султонов и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 100–107. DOI: 10.14529/power190311

#### FOR CITATION

Voronin S.G., Davlatov A.M., Sulstonov O.O., Kosimov B.I., Gulov D.Yu. Automated Small HPPs as the Backbone of Power Grids for Mountainous Regions of Tajikistan. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 100–107. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190311