

УДК 621.311.212

## МАЛЫЕ ГЭС И ЭФФЕКТИВНЫЕ ГИДРОАГРЕГАТЫ ДЛЯ ЭТИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Ю.Н. Перминов<sup>1</sup>, кандидат технических наук, Е.А. Монахов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт возобновляемой энергетики НАН Украины,

02094 ул. Гната Хоткевича, 20А, г. Киев

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,

03059 пр-т Победы, 37, г. Киев

*В статье рассматриваются перспективы развития малой гидроэнергетики в Украине и указаны требования о доле этой энергетики в структуре мощностей в сравнении с развитыми странами, определены потенциальные возможности по реконструкции и восстановлению малых гидроэлектростанций, строительству новых гидроэлектростанций. На сегодняшний день общие прогнозы величины развития малой гидроэнергетики в Украине составляют 1240 МВт. Предложена конструктивная схема эффективного гидроагрегата для малой гидроэлектростанции и приведены основные геометрические соотношения. При этом использован предыдущий опыт по созданию низконапорных малых гидроэлектростанций. В работе предлагается использовать синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов с высокой удельной энергией (редкоземельные постоянные магниты NdFeB, SmCo) в качестве гидрогенераторов, что позволяет упростить их конструкцию, повысить их надежность. Замена электромагнитного возбуждения на магнитоэлектрическое позволяет исключить скользящие контакты, уменьшить потери, устранив их в обмотке возбуждения ротора и повысить надежность. Проведено сравнение различных конструкций синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для этих электростанций; описаны их конструктивные особенности, а также даны рекомендации по их применению. Предложена и исследована конструкция синхронного генератора смешанного возбуждения, приведены его выходные характеристики, а именно – естественная и стабилизированная внешние характеристики генератора. Рассмотренный вариант генератора с комбинированным возбуждением позволяет существенно снизить стоимость установки за счет минимизации расходов на электронные полупроводниковые преобразователи. Библ. 12, рис. 3.*

**Ключевые слова:** малая гидроэнергетика; гидроагрегаты; синхронные генераторы; постоянные магниты; выходные характеристики.

## SMALL HYDROPOWER PLANTS AND EFFECTIVE HYDROPOWER UNITS FOR THESE PLANTS

Y. Permynov<sup>1</sup>, candidate of technical sciences, E. Monakhov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine

02094, 20A Hnata Khotkevicha Street, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

03059, 37 Peremohy Avenue, Kyiv, Ukraine

*The article deals with a review of the prospects of small hydropower plants in Ukraine. The requirements for its part in the whole energy production system in comparison with developed countries are shown. Some potential opportunities in the area of reconstruction of small hydropower plants and design of new plants are determined. At the present day, general energy forecast of small hydropower energy in Ukraine is estimated by 1240 MW. A constructive scheme of an effective hydro generator for small hydropower plant is proposed. Its main geometric relationships are provided. The previous experience of designing the low head small hydropower plants is used. The usage of a synchronous generator with high-density energy permanent magnet excitation (rare-earth permanent magnets NdFeB, SmCo) for hydropower units is proposed. It allows to simplify its design, increase reliability. The replacement electromagnetic excitation by permanent magnet excitation allows to exclude slipping rings, decrease power losses. The comparison of different synchronous permanent magnet generators for these electric stations is provided. Their constructive features are described. Also, some recommendations are given for its usage. A new design of synchronous generator with combined excitation is proposed. Its output characteristic is given, namely natural and stabilized external characteristic of a generator. The proposed generator with combined excitation allows substantially decrease total price due to the minimization expenses on electronic semiconductor converters. References 12, figures 3.*

**Keywords:** small hydropower plants, hydropower unit, synchronous generators, permanent magnets, output characteristics.

© Ю.Н. Перминов, Е.А. Монахов, 2018



Ю. Перминов  
Y. Permyunov

**Сведения об авторе:** кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института возобновляемой энергетики НАН Украины.

**Образование:** окончил в 1968 г. Киевский политехнический институт по специальности «Электрические машины и аппараты».

**Научная сфера:** ветрогенераторы, ветроустановки малой мощности, гидрогенераторы, устройства с постоянными магнитами.

**Публикації:** 84.

ORCID: 10000-0001-5604-8327

**Контакты:**

тел. /факс +38 (044) 206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net

**Author information:** candidate of technical sciences, Senior Researcher at Institute for Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine.

**Education:** graduated from the Kyiv Polytechnic Institute in 1968 with a degree in Electrical Machines and Apparatuses.

**Research area:** wind power systems, small capacity wind units, hydrogenerators, devices with permanent magnets.

**Publications:** 84.

ORCID: 10000-0001-5604-8327

**Contacts:**

phone /fax: +38 (044) 206-28-09

e-mail: renewable@ukr.net



Е. Монахов  
E. Monakhov

**Сведения об авторе:** ассистент кафедры электромеханики КПИ им. Игоря Сикорского, Киев.

**Образование:** окончил в 2012 г. Киевский политехнический институт по специальности «Электрические машины и аппараты».

**Научная сфера:** машины с постоянными магнитами, синхронные генераторы, малые электростанции, гидроэлектростанции.

**Публикации:** 23.

ORCID: 0000-0001-8408-8051

**Контакты:**

Тел./факс +38-095-317-61-15

e-mail: emonachov@gmail.com

**Author information:** assistant of Electromechanics Department in Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

**Education:** graduated from Kyiv Polytechnic Institute in 2012 with a degree in «Electrical machines and apparatus».

**Research area:** permanent magnet machines, synchronous generators, small energy plants, hydropower plants.

**Publications:** 23.

ORCID: 0000-0001-8408-8051

**Contacts:**

Phone./fax: +38-095-317-61-15

e-mail: emonachov@gmail.com

#### Используемые сокращения и обозначения:

$V$	– скорость потока;	$H$	– расчетная величина напора;
$N_{уст}$	– установленная мощность;	$МГЭС$	– малые гидроэлектростанции;
$\rho$	– плотность воды;	$ГЭС$	– гидроэлектростанции;
$k$	– К.П.Д.;	$АЭС$	– атомная электростанция;
$S_{турб}$	– площадь омываемой поверхности турбины;	$микроГЭС$	– микрогидроэлектростанция;
$Q$	– расчетная величина расхода;	$ПЭС$	– приливная электростанция.

**Введение.** Гидроэнергетика имеет высокий возобновляемый энергоресурс, наименьшую себестоимость производства электроэнергии, высокие показатели надёжности. Для гидроэнергетики характерно комплексное использование гидроресурсов: выработка электроэнергии; защита от наводнений; решение водохозяйственных задач судоплавания; водообеспечение населённых пунктов и промышленных предприятий; ир-

ригации; рыболовства [1].

МГЭС любой мощности, разных гидрологических и гидрографических характеристик могут иметь комплексные свойства экономического влияния на хозяйственное состояние разных территорий [2].

На территории Украины протекает 63029 малых рек и водотоков общей длиной в 185,8 тысяч километров. Они относятся к бассейнам Вислы,

Дуная (Тиса и Прут с притоками), Днестра, Южного Буга, Днепра. Водные ресурсы малых рек используются также для водоснабжения мощных тепловых и атомных электростанций (например, Чернобыльской, Ровненской, Хмельницкой и Южноукраинской АЕС) [3].

Сегодня в Украине в эксплуатации находится 84 малых ГЭС общей мощностью около 107 МВт. В развитых странах существует требование о наличии в структуре мощностей энергетических систем не менее 15% гидроэнергетики. В Швеции на гидроэлектростанциях вырабатывается 40% электроэнергии [3].

Потенциальные возможности малой гидроэнергетики в Украине на ближайшую перспективу (на период до 2030 года) оцениваются следующими составляющими и показателями [4, 5]:

- реконструкция и восстановление малых ГЭС (общая мощность – 135 МВт, годовой объем выработки электроэнергии – 540 млн. кВт·год);

- строительство новых малых ГЭС на р. Тиса и её притоках (общая мощность – 460 МВт, годовой объем выработки электроэнергии – 1461 млн. кВт·год) [7];

- строительство новых малых ГЭС на реке Днестр и её притоках – общая мощность 560 МВт, годовой объем выработки электроэнергии – 1779 млн. кВт·год;

- строительство новых децентрализованных малых ГЭС на малых водотоках – общая мощность 121 МВт, годовой объем выработки электроэнергии – 426 млн. кВт·год.

Общие прогнозы величины развития малой гидроэнергетики составляют 1240 МВт [6].

На сегодня в Украине используется лишь 8% экономического потенциала малой гидроэнергетики, в то время как в странах Европы эксплуатируется 15000 МГЭС; наблюдается большая заинтересованность в микроГЭС для повышения надежности объектов горнолыжных курортов и «зеленого туризма», малых перерабатывающих предприятий и фермерских хозяйств. При этом оборудование соответствует требованиям качества генерированной энергии и возможности параллельной работы с электрической сетью других энергокомпаний и легко модифицируется по требованиям потребителей. Это обуславливает

высокие требования к используемым в микроГЭС гидроагрегатам, в частности – к стабильности выходных электрических параметров, минимизации их габаритов, массы, цены; упрощении конструкции; повышении надежности.

В этом плане, вероятно, возможно использовать опыт, полученный в результате проектирования и создания МГЭС (Кислогубской ПЭС) [8]. В этой электростанции используется энергия, накопленная в водном бассейне определённого объема и напора. Применение вертикальной турбины приводит к большим потерям напора [8], поэтому применен агрегат капсульного исполнения горизонтального расположения. Генератор этого агрегата – асинхронизированный синхронный генератор, который обеспечивает возможность генерирования напряжения стандартной частоты на статоре машины при несинхронной частоте вращения ротора. Генератор обеспечивает регулирование частоты вращения в диапазоне  $\pm 30\%$ : 50,4–93,6 об/мин – по турбине и через мультипликатор, 420–790 об/мин – по электрической машине. К недостаткам такого генератора следует отнести, в первую очередь, сложность конструкции ротора за счет наличия трехфазной обмотки, во-вторых сложную тиристорную систему возбуждения. Ввиду капсульного исполнения генератор имеет громоздкую систему охлаждения, в которой для устранения конденсата внутри капсулы используются холодильники и затруднена работоспособность подшипников.

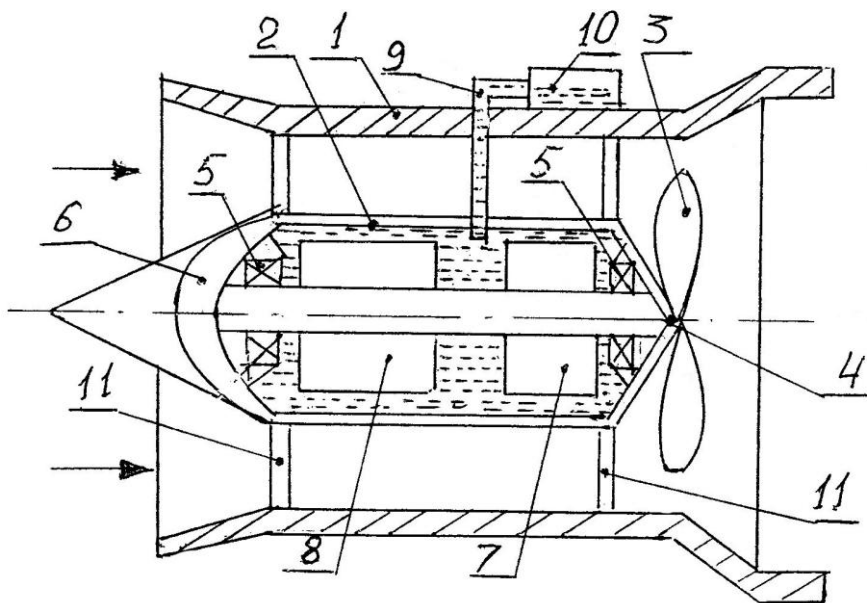
**Постановка задачи.** В данной работе предлагается использовать в МГЭС синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов с высокой удельной энергией (NdFeB, SmCo), что позволит упростить гидроагрегаты капсульного исполнения, повысить их надежность. Замена электромагнитного возбуждения за счет применения магнитных систем с постоянными магнитами позволяет исключить скользящие контакты, уменьшить потери, устранив их в обмотке возбуждения ротора.

Поскольку капсульные гидроагрегаты работают в потоке воды, их обслуживание затруднено, поэтому в предлагаемом к рассмотрению варианте агрегата, сложная система смазки [8] может быть заменена заключением энергетической

части агрегата в капсулу, заполненную, например, трансформаторным маслом (в целях охлаждения этой части, электроизоляции и облегчения условий работы подшипников). В целом, разуме-

ется, требуется серьезная конструкторско-технологическая проработка агрегата [9].

На рис. 1 показана конструктивная схема предлагаемого капсульного гидроагрегата.



**Рис. 1. Конструктивная схема капсульного гидроагрегата:** 1 – железобетонная камера; 2 – железобетонная капсула; 3 – турбина; 4 – стальной вал; 5 – подшипники; 6 – утолщенная железобетонная часть капсулы; 7 – мультипликатор; 8 – гидрогенератор; 9 – трубопровод; 10 – расширительный бачок; 11 – железобетонные решетки.

**Fig. 1. Constructive scheme of capsule hydropower unit:** 1 – concrete chamber; 2 – concrete capsule; 3 – turbine; 4 – steel shaft; 5 – bearings; 6 – thickened part of a concrete capsule; 7 – gearbox multiplier; 8 – hydrogenerator; 9 – pipeline; 10 – extension tank; 11 – concrete grate.

Основные геометрические соотношения агрегата, расчет установленной мощности –  $N_{уст}$  агрегата и расчеты основной геометрии агрегата и синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов могут быть проведены по рекомендациям, приведенным в [9]. При этом скорость рабочего потока определяется по установленной мощности агрегата:

$$V = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot N_{уст}}{\rho \cdot S_{турб} \cdot \kappa}}$$

где  $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$  – плотность морской воды;  $\kappa \approx 0,85 \div 0,87$  – К.П.Д. турбины,  $S_{турб}$  – площадь омываемой поверхности турбины:

$$S_{турб} = 0,785 \cdot D_{турб}$$

Расчетная величина расхода:

$$Q = S_{турб} \cdot V$$

Расчетная величина напора:

$$H = \frac{N_{уст}}{9,8 \cdot Q \cdot \kappa}$$

На массо-габаритные и выходные параметры гидроагрегата влияет конструкция и параметры используемого в нем генератора, поэтому проведено сравнение синхронных генераторов разных конструкций с возбуждением от постоянных магнитов с высокой удельной энергией (NdFeB) [10, 11], представленных на рис. 2а, б, в, г. При выборе конкретного конструктивного варианта генератора проводится анализ технологии изготовления, электрических и электромагнитных параметров и характеристик. Также следует учитывать способ регулирования, возможность агрегатирования и геометрические соотношения, которые определяют стоимость и массо-габаритные показатели агрегата в целом.

В данном случае, предпочтение отдано генераторам «уплощенной» конструкции, позволяющей уменьшить осевой размер гидроагрегата.

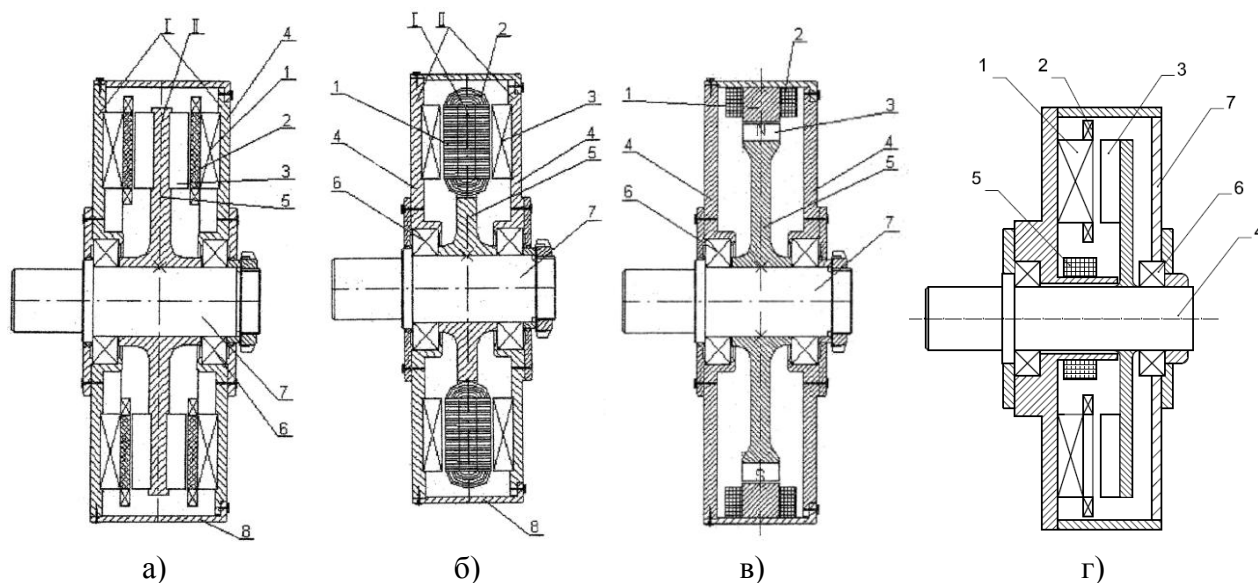


Рис. 2. Конструкции генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для гидроагрегатов МГЭС и микроГЭС.

Fig. 2. Design of the permanent magnet generator for hydropower units for small hydropower plants

На рис. 2а показана машина торцевого исполнения, в которой I – статор, II – ротор. Статор представляет собой тороидальный сердечник 1 из электротехнической ленты. Вокруг сердечника намотана однофазная или многофазная обмотка 2. Ротор состоит из магнитов 3 в виде секторов, расположенных на ярмах статора 4 из литой электротехнической стали. Магнит расположен по обоим торцам статора.

На рис. 2б показан генератор торцевого исполнения, в котором II – ротор, I – статор. Статор выполнен в виде тороидальных сердечников 1 из электротехнической ленты, на поверхности которых уложены однофазные или многофазные обмотки 2. Генератор может представлять две машины в одном корпусе при независимом включении обмоток. В этом генераторе вращение внутренней части облегчает её агрегатирование. Ротор состоит из ярма 5 из литой электротехнической стали, на торцевых поверхностях которого расположены магниты 3. Корпус машины 4 может быть выполнен из немагнитных материалов.

На рис. 2в показан генератор цилиндрической конструкции с радиальной магнитной системой. Статор состоит из ярма 1, в пазы которого уложена обмотка 2. На ярме ротора 5 из литой электротехнической стали расположены маг-

ниты 3 в виде сегментов. Корпус машины 4 может быть выполнен из немагнитной стали.

На рис. 2г показан генератор комбинированного возбуждения, в котором осуществляется регулирование выходных параметров машины с возбуждением от постоянных магнитов с помощью обмотки, позволяющей, по сути, иметь постоянный результирующий магнитный поток в машине на разных скоростях и нагрузках. Статор представляет собой тороидальный сердечник 1 из электротехнической ленты. Трехфазная обмотка 2 укладывается в полузакрытые пазы, организованные на поверхности торцов статора. В центре расположен сердечник из литой электротехнической стали, на котором установлена дополнительная обмотка возбуждения 5. Ротор 3 представляет из себя ферромагнитный диск из литой стали, на поверхности которого расположены постоянные магниты одноименной полярности со стороны рабочего зазора, между которой расположены ферромагнитные сердечники из литой электротехнической стали. При вращении ротора в статорной трехфазной обмотке наводится ЭДС. Выпрямленное значение ЭДС подается на катушку возбуждения. И поток, создаваемый обмоткой возбуждения, проходит через сердечники. На роторе происходит чередование полюсов.

Подробный сравнительный анализ генераторов различных конструкций в том числе и показанных на рис. 2а, б, в приведен в [11].

Необходимо более внимательно рассмотреть варианты (рис. 2а, в, г). В [10] проведено сравнение вариантов (рис. 2а, в). Сравнение проведено на основе расчетов при известном из испытаний экспериментальных образцов удельном тепловом потоке  $A \cdot J$  и при равных активных длинах проводников. Принципиальное отличие варианта (рис. 2а) от варианта (рис. 2в) в том, что величины немагнитных зазоров отличаются на порядок, так как в первом случае (рис. 2а) обмотка мотается вокруг стального тора, – т.е. не имеет пазов, – а в традиционном варианте (рис. 2в) обмотка расположена в пазах. Но в первом случае не требуется изготовление штампа, поэтому облегчается изготовление генератора. Результаты расчетов этих вариантов (рис. 2а, в) позволяют сделать следующие выводы:

- индукция в рабочем зазоре в генераторе (рис. 2а) в 2,8 раза ниже, чем в генераторе (рис. 2в);
- наличие двух магнитных систем в генераторе (рис. 2в) не сопровождается удвоением полезного потока, так как поток разветвляется между полюсами разноименной полярности и в результате через контур, занимаемый катушкой обмотки, проходит поток одного полюса;
- при соизмеримых геометрических соотношениях роторов электромагнитные моменты сопоставимы;
- расход магнитов в генераторе (рис. 2а) по сравнению с генератором (рис. 2в) примерно вдвое больше.

Резюмируя вышеприведенные выводы, можно сказать, что генератор торцевой конструкции с беспазовым статором, даже при двух магнитных системах, расположенных по торцам статора (рис. 2а), не имеет явных преимуществ по электромагнитным параметрам в сравнении с генера-

тором традиционной конструкции (рис. 2в) с пазовым статором. Но учитывая тот фактор, что при сопоставимых мощностях и размерах на изготовление генератора торцевой конструкции с беспазовым статором, расходуется почти вдвое больше магнитов NdFeB, цена которых составляет около \$100, расходы на материалы беспазового варианта будут существенно выше, но не требуется изготовление штампа. Преимущество по электромагнитным параметрам возможно в конструкции (рис. 2б) при расположении обмотки в полужакрытых пазах, но это более сложная конструкция в технологическом плане. Следует отметить, что в генераторе (рис. 2а, б, в) стабилизация выходных параметров возможна только с помощью электроники, а это требует определенных затрат (контроллеры заряда (фирмы Hybridon, R&X Energy, Avian, EzPower и др.) стоят \$250–400 за 3 кВт). По этой причине, рассмотрен вариант генератора с комбинированным возбуждением (рис. 2г), позволяющим минимизировать расходы на электронику.

Как было описано выше, возбуждение осуществляется двумя способами: от постоянных магнитов и от дополнительной обмотки возбуждения. При согласном включении обмотки возбуждения и постоянных магнитов поток обмотки возбуждения замыкается по пути: обмотка возбуждения – радиальный зазор – вал – диск ротора – сердечник – аксиальный воздушный зазор – статор – ступица – обмотка возбуждения. Таким образом, увеличивается общий поток в основном воздушном зазоре и изменяется выходное напряжение генератора. Диапазон регулирования ограничен насыщением магнитной цепи и для 3 кВт генератора диапазон регулирования напряжения составляет до 50%. Более детально принцип, конструкция описаны в [12]. На рис. 3 представлена внешняя характеристика при отсутствии стабилизации (сплошная линия) и с учетом стабилизации выходного напряжения (штриховая линия).

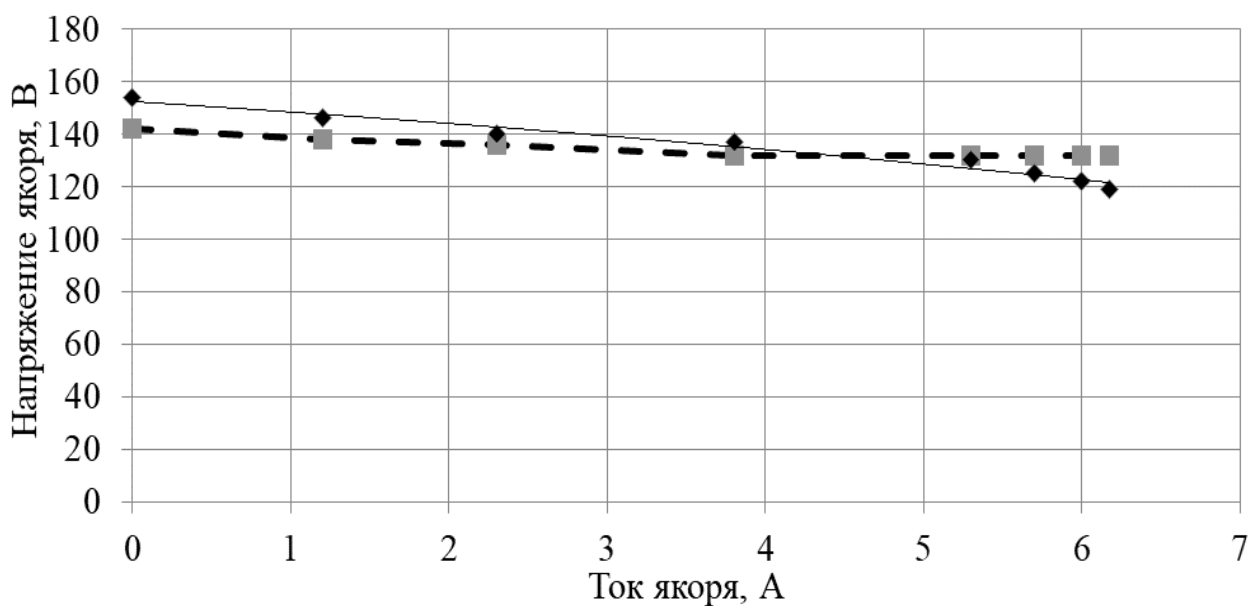


Рис. 3. Внешняя характеристика генератора без стабилизации и со стабилизацией.

Fig. 3. External characteristics of a generator with and without stabilization.

При стабилизации внешней характеристики возможно как грубое регулирование, так и прецизионное. При этом электрические потери на обмотке возбуждения при прецизионном управлении приблизительно в 1,5 раза выше, нежели при грубом регулировании, когда необходимо поддерживать напряжение в пределах  $\pm 5\%$ .

Выводы. 1. Отмечены положительные аспекты использования МГЭС.

Проведена оценка состояния развития МГЭС; определены потенциальные возможности малой гидроэнергетики в Украине на ближайшую перспективу и указаны требования о доле этой энергии в структуре мощностей развитых стран.

Указаны требования к оборудованию современных МГЭС.

Предложена конструктивная схема капсульного гидроагрегата упрощенной конструкции.

Проведено сравнение синхронных генераторов разных конструкций с возбуждением от постоянных магнитов применительно к МГЭС, определены возможные решения по стабилизации их выходных параметров.

Предложенный вариант конструкции генератора (рис. 2г) с комбинированным возбуждением

позволяет решать задачу стабилизации выходных параметров генератора с минимизацией расходов на электронику, повышает надежность гидроагрегата, не сопровождается увеличением его стоимости; машина конструктивно-технологически проста.

1. *Васько П.Ф.* Сучасний стан, потенційні можливості та передумови подальшого розвитку малої гідроенергетики в Україні // Відновлювана енергетика – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2006. – №1 – С. 60–66.

2. *Вихорев Ю.О.* Вирішення проблем розвитку малої гідроенергетики Україні потребує загальнодержавної координації // Відновлювана енергетика – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2013. – №1 – С. 69–75.

3. *Васько П.Ф.* Стан та потенціал малої гідроенергетики України // Відновлювана енергетика – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2014. – №3 – С. 81–87.

4. *Никиторович О.В.* Малые ГЭС. Опыт строительства. // Гидроэнергетика Украины. – 2005. – №3. – С. 23–24.

5. *Прокура Г.Ф.* Вибрані праці. – Київ: Наукова думка, 1972 – 484 с.

6. *А.В. Яцик.* Малі річки України. Справочник. – Київ: Урожай, 1991. – 296 с.

7. *Васько П.Ф.* Опыт создания каскада ГЭС на малых и больших реках. // Відновлювана енергетика – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2012. – №3. – С. 21–25.

8. *Бернштейн Л.Б.* Приливные электростанции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 38–39.

9. *Перминов Ю.Н., Коханевич В.П., Шихайлов Н.А., Перминова С.Ю.* Определение параметров и основных размеров генераторов для приливных электростанций малой мощности (до 1000 кВт). // *Відновлювальна енергетика – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2017. – №3. – С. 66–72.*

10. *Перминов Ю.Н., Коханевич В.П., Марченко Н.В.* Сравнение торцевых беспазовых генераторов для ветроустановок с генераторами традиционной конструкции // *Відновлювальна енергетика – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2015. – №3. – С. 40–43.*

11. *Кудря С.О., Перминов Ю.М.* Порівняння синхронних вітрогенераторів різних конструкцій зі збудженням від постійних магнітів // *Відновлювальна енергетика – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2007. – №2. – С. 54–59.*

12. *Чумак В.В.* Управление магнитоэлектрическим генератором с аксиальным потоком / В.В. Чумак, Е.А. Моныхов // *Технічна електродинаміка. – 2016. – №2. – С. 55–57.*

#### МАЛІ ГЕС ТА ЕФЕКТИВНІ ГІДРОАГРЕГАТИ ДЛЯ ЦИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

**Ю.Н. Перминов<sup>1</sup>**, кандидат технічних наук, **Є.А. Моныхов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Інститут відновлюваної енергетики НАН України  
02094 вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ

<sup>2</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,  
03059 пр-т Перемоги, 37, м. Київ

*У статті розглянуто перспективи розвитку малої гідроенергетики в Україні та вказані основні вимоги щодо доли гідроенергетики в структурі потужностей в порівнянні з розвинутими країнами. Визначені потенційні можливості реконструкції та відновлення малих гідроелектростанцій, будівництва нових гідроелектростанцій. На сьогоднішній день, загальні прогнози величини розвитку малої гідроенергетики в Україні складають 1240 МВт. Запропоновано конструктивну схему ефективного гідроагрегату для малої гідроелектростанції та наведено основні геометричні співвідношення. При цьому, було використано минулий досвід зі створення низьконапірних малих гідроелектростанцій. В роботі запропоновано використовувати синхронні генератори зі збудженням від постійних магнітів з високою питомою енергією (рідкоземельні постійні магніти NdFeB, SmCo) в якості гідрогенераторів, що дозволяє спростити їхню конструкцію, підвищити їхню надійність. Заміна електромагнітного збудження на магнітоелектричне дозволяє виключити ковзкий контакт, зменшити втрати та підвищити надійність. Проведено порівняння різноманітних конструкцій синхронних генераторів зі збудженням від постійних магнітів для цих електростанцій; описано їхні конструктивні особливості, а також надано рекомендації стосовно їхнього застосування. Запропоновано та досліджено конструкцію синхронного генератора змішаного збудження, наведено його вихідні характеристики, а саме – природна та стабілізована зовнішні характеристики генератора. Розглянутий варіант генератора з комбінованим збудженням дозволяє суттєво знизити вартість установки*

*за рахунок мінімізації витрат на електронні напівпровідникові перетворювачі. Бібл. 12, рис. 3.*

**Ключові слова:** мала гідроенергетика; гідроагрегати; синхронні генератори; постійні магніти; вихідні характеристики.

#### REFERENCES

1. *Vasko P.* (2006) Suchasniy stan, potentsiyni mozhlivosti ta peredumovi podalnoho rozvitku maloyi gidroenergetiki v Ukrayini [The current state, potential opportunities and prerequisites for the further development of small hydropower in Ukraine]. *Vidnovliuvana Enerhetyka [Renewable energy]*, 1. P. 60–66 (in Ukr)

2. *Vihorev Yu.* (2013) Virishennya problem rozvitku maloyi gidroenergetiki Ukrayini potrebuє zagalnoderzhavnoyi koordinatsiyi [Solving problems of development of small hydropower Ukraine needs nationwide coordination]. *Vidnovliuvana Enerhetyka [Renewable energy]*, 3. P. 69–75 (in Ukr)

3. *Vasko P.* (2014) Stan ta potentsial maloyi gidroenergetiki Ukrayini [Status and potential of small hydropower in Ukraine] *Vidnovliuvana Enerhetyka [Renewable energy]*, 3. P. 81–87 (in Ukr)

4. *Nikitorovich O.* (2005) Malyie GES. Opyit stroitelstva [Small hydropower plants. Building experience]. *Gidroenergetika Ukrainyi [Hydroenergy of Ukraine]*, 3. P. 23–24 (in Rus)

5. *Proskura G.* (1972) *Vibrani pratsi.* [Selected works]. Kiev, Ukraine: Naukova dumka, 484 p. (in Rus)

6. *Yatsik A.* (1991) *Mali richki Ukrayini. Spravochnik.* [Small rivers of Ukraine. Directory]. Kiev, Urozhay, 296 p. (in Ukr)

7. *Vasko P.* (2012) Opyit sozdaniya kaskada GES na malyih i bolshih rekah. [Experience in creating a cascade of hydroelectric power plants on small and large rivers.]. *Vidnovliuvana Enerhetyka [Renewable energy]*, 3. P. 21–25 (in Rus)

8. *Bernshcheyn L.* (1987) *Prilivnyie elektrostantsii* [Tidal power]. Moscow, Russia, Energoizdat, P. 38–39. (in Rus)

9. *Perminov Yu., Konahevich V., Shihaylov N., Perminova S.* (2017) Opredelenie parametrov i osnovnyih razmerov generatorov dlya prilivnyih elektrostantsiy maloy moschnosti (do 1000 kVt) [Determination of parameters and basic dimensions of the generator of low power tidal plants (up to 1000 kW)]. *Vidnovliuvana Enerhetyka [Renewable energy]*, 3. P. 66–72 (in Rus)

10. *Perminov Yu., Kohanevich V., Marchenko N.* (2015) Svravnenie tortsevyih bespazovyih generatorov dlya vetroustanovok s generatorami traditsionnoy konstruksii [Comparison of slotless axial flux generators for wind turbines with traditional generators]. *Vidnovliuvana Enerhetyka [Renewable energy]*, 3. P. 40–43 (in Rus)

11. *Kudrya S., Perminov Yu.* (2007) Porivnyannya sinhronnih vitrogeneratoriv riznih konstruksiy zi zbudzhennyam vid postiynih magnitiv [Comparison of synchronous windgenerator of various designs with excitation from permanent magnets]. *Vidnovliuvana Enerhetyka [Renewable energy]*, 2. P. 54–59 (in Ukr)

12. *Chumak V., Monahov E.* (2016) Upravlenie magnitoelektricheskim generatorom s aksialnym potokom [Control of axial flux permanent generator]. *Tehnichna elektrodinamika [Technical electrodynamic]*, 2. P. 55–57 (in Rus)



## SYNOPSIS

The article deals with review of the present state and prospects of development of small hydropower in Ukraine. The positive aspects of small hydropower plants usage are shown; requirements to modern hydropower unit are noted. A constructive scheme of simplified capsule hydropower unit is proposed and comparison of different designs of permanent magnet synchronous generator is provided. As a result possible solutions for stabilizing the output parameters of hydro-generator are determined. An option of the design generator with combined excitation for a hydropower plant is proposed. Its output parameters are estimated.

## РЕФЕРАТ

В статті розглядається сьогоднішнє стан і перспективи розвитку малої гідроенергетики в Україні, при цьому відзначені позитивні аспекти використання малих ГЭС (МГЭС); вказані вимоги до обладнання сучасних МГЭС. Також запропонована конструктивна схема капсульного гідроагрегата упрощеної конструкції і проведено порівняння синхронних генераторів різних конструкцій з возбужденням від постійних магнітів застосовано до МГЭС. В результаті визначені можливі рішення по стабілізації вихідних параметрів гідрогенераторів. Предложено варіант конструкції гідрогенератора з комбінованим возбужденням і проведена оцінка його вихідних параметрів.

Стаття надійшла до редакції 05.11.18  
Остаточна версія 30.11.18



II Міжнародна спеціалізована виставка  
низьковольтної електротехніки  
та електроніки

# ELECTRO INSTALL 2019

Листопад 5–7

 МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР  
Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15  
тел.: (044) 201-11-57, 206-87-96, e-mail: lyudmila@iec-expo.com.ua  
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua