

УДК 621.313.322.82

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-78-84

### Особенности конструктивного исполнения и проектирования синхронных гидрогенераторов для микро-ГЭС

С.П. Курилин, В.Н. Денисов

Развитие малой энергетики — одна из приоритетных задач, сформулированных в Энергетической стратегии России. Техническими средствами ее решения в области малой гидроэнергетики служат мини- и микро-ГЭС.

Структурный состав современной микро-ГЭС включает в себя приводной механизм, синхронный гидрогенератор (СГГ), звено постоянного тока, кабель и нагрузку. К СГГ предъявляются следующие основные требования: минимальные габариты и масса, возможность длительной работы на максимальной мощности, повышенный класс пыле- и влагозащиты, отсутствие необходимости проведения технического обслуживания в период активного использования в течение года, возможность работы при низких частотах вращения вала гидравлической турбины, низкое значение момента трогания.

Проанализированы особенности конструктивного исполнения СГГ. Выделены группы СГГ быстроходного и тихоходного исполнения. Конструктивные типы СГГ для микро-ГЭС традиционны для специальных синхронных электрических машин с когтеобразными полюсами, а также машин с постоянными магнитами. Тихоходные СГГ обладают рядом особенностей, связанных с многополюсным исполнением. Особое внимание уделено конструктивным типам тихоходных генераторов. Изучены СГГ с внешним статором, внешним ротором барабанного типа, внешним ротором на консоли.

Приведены результаты расчета главных размеров для трёх тихоходных СГГ мощностью 5, 10 и 15 кВт. Во всех случаях для СГГ характерны малые полюсные деления и проблемная зона пазов и зубцов статора. Это относится как к технологическому выполнению мелкой пазово-зубцовой структуры, так и к размещению на ней мощной обмотки статора. Изготовление тихоходных СГГ для микро-ГЭС ориентировано на высокотехнологичные производства.

*Ключевые слова:* синхронный гидрогенератор, микро-ГЭС, проектирование.

*Для цитирования:* Курилин С.П., Денисов В.Н. Особенности конструктивного исполнения и проектирования синхронных гидрогенераторов для микро-ГЭС // Вестник МЭИ. 2019. № 4. С. 78—84. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-78-84.

### Specific Features of Embodiment and Designing of Synchronous Hydrogenerators for Micro Hydroelectric Power Plants

S.P. Kurilin, V.N. Denisov

The development of small-scale power generation facilities is one of the priority tasks formulated in the Energy Strategy of Russia. Mini and micro hydroelectric power plants (HPPs) serve as the technical means for solving this problem in the field of small-scale hydropower.

Structurally, a modern microHPP includes a drive mechanism, a synchronous hydrogenerator (SHG), a DC link, a cable, and a load. The main requirements for an SHG are the minimum dimensions and weight, the possibility of long-term operation at the maximum power, an increased class of protection against dust and moisture, the lack of necessity to carry out maintenance during the period of active use during the year, the possibility to operate at low hydraulic turbine shaft rotation frequencies, and a low kick-off torque value.

The specific features of the SHG embodiment are analyzed. Groups of high-speed and low-speed SHG designs are identified. The embodiment types of SHGs for microHPPs are conventional for special-purpose claw-pole synchronous electrical machines, as well as permanent magnet machines. Low-speed SHGs have a number of features related to multipole embodiment. Special attention is paid to embodiment types of low-speed generators. The SHGs with an external stator, with an external drum-type rotor, and with an external rotor on a console are analyzed.

The results from design calculation of the main dimensions for three low-speed SHGs for capacities equal to 5, 10, and 15 kW are presented. In all cases, the SHG is characterized by small pole pitches and the problem zone of stator slots and teeth. This applies both to the technological implementation of the shallow slot-and-tooth structure and to the placement of a powerful stator winding on it. The manufacture of low-speed SHGs for microHPPs is focused at high-tech production facilities.

*Key words:* synchronous hydro generator, microHPP, designing.

*For citation:* Kurilin S.P., Denisov V.N. Specific Features of Embodiment and Designing of Synchronous Hydrogenerators for Micro Hydroelectric Power Plants. Bulletin of MPEI. 2019;4:78—84. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-4-78-84.

## Введение

Развитие малой энергетики в зонах децентрализованного энергоснабжения — одна из приоритетных задач, сформулированных в Энергетической стратегии России на период до 2030 г. [1]. Техническими средствами решения данной задачи в области малой гидроэнергетики служат мини- и микро-ГЭС.

Микро-ГЭС принято называть электростанцию с приводом от гидравлической турбины мощностью 0,3...100 кВт. В настоящее время они востребованы на территориях Сибири, Дальнего Востока, Арктики, а также в центральной части РФ для электроснабжения коттеджей, фермерских хозяйств, мобильных групп геологов, рыбаков, туристов и проч. В публикациях [2 — 31] изложены структурно-технические и иные данные продукции наиболее известных производителей и поставщиков комплектующих и комплектов микро-ГЭС, позволяющие обобщить применяемые в них технические решения.

Современная микро-ГЭС, как правило, содержит звено постоянного тока. Ее структурная схема представлена на рис. 1 и включает в себя приводной механизм (ПМ), синхронный гидрогенератор (СГГ), звено постоянного тока (ЗПТ), кабель (К) и нагрузку (Н).

Приводной механизм предназначен для передачи энергии потока воды на вал СГГ. Частота вращения вала СГГ — 3000, 1500 или 1000 об/мин в быстроходном и 100...200 об/мин в тихоходном исполнениях. В быстроходном варианте в состав ПМ входят гидравлическая турбина (ГТ) и повышающий редуктор (Р),

а в тихоходном вал ГТ напрямую сопрягается с валом СГГ.

Синхронный гидрогенератор служит для преобразования энергии ПМ в электрическую энергию переменного тока. Он имеет быстроходное или тихоходное исполнение в зависимости от частоты вращения вала ПМ. При жестких требованиях к стабильности выходного напряжения СГГ выполняется с электромагнитным возбуждением и комплектуется системой автоматического регулирования возбуждения. Другим вариантом стабилизации выходного напряжения, применяемым при относительно малом диапазоне изменения нагрузки, является подключение на выход СГГ резонансных контуров с дросселями насыщения или конденсаторных блоков. Как правило, СГГ имеет трёхфазное исполнение. Вместе с тем, в КНР освоено выпуск однофазных СГГ и микро-ГЭС [10].

Звено постоянного тока позволяет отказаться от специальных систем стабилизации выходного напряжения и эксплуатировать СГГ на естественной внешней характеристике. Оно включает в себя преобразователь переменного напряжения в постоянное (AC/DC) с системой контроля заряда аккумуляторной батареи (АБ) и постоянного напряжения в переменное (DC/AC). Преобразователь DC/AC поддерживает стабильное выходное напряжение и частоту в широком диапазоне нагрузок, а АБ используется как резервный источник питания.

Электрокабель соединяет микро-ГЭС, расположенную на водоёме, с нагрузкой, находящейся на берегу. Его длина может достигать 50 м, что делает потери

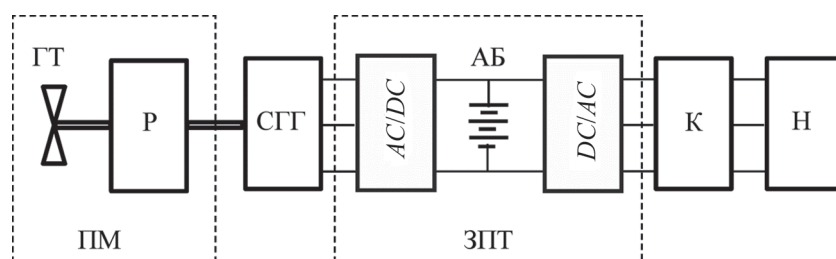


Рис. 1. Структурная схема микро-ГЭС:

ГТ — гидравлическая турбина; ПМ — приводной механизм; Р — повышающий редуктор; СГГ — синхронный гидрогенератор; AC/DC, DC/AC — преобразователи переменного напряжения в постоянное и постоянного в переменное; АБ — аккумуляторная батарея; ЗПТ — звено постоянного тока; К — кабель; Н — нагрузка

энергии существенным фактором проектирования микро-ГЭС.

Специфика микро-ГЭС отражена в требованиях, предъявляемых к СГГ, и технических решениях для их реализации. Проведена систематизация и выполнен обзор особенностей конструктивного исполнения и проектирования СГГ.

К синхронному гидрогенератору предъявляют следующие основные требования.

- минимальные габариты и масса;
- возможность длительной работы на максимальной мощности;
- класс защиты от пыли и влаги по ГОСТ 14254—2015 на уровне IP54 — IP55 или выше;
- отсутствие необходимости проведения технического обслуживания в период активного использования в течение года;
- возможность работы при частотах вращения вала ГТ порядка 100...200 об/мин (для тихоходных СГГ);
- низкое значение момента трогания.

Электростанции с ЗПТ, как правило, комплектуются СГГ с возбуждением от постоянных магнитов, что позволяет снизить массу и стоимость, а также повысить надёжность микро-ГЭС.

### Особенности конструктивного исполнения синхронного гидрогенератора

В целом конструктивные типы СГГ для микро-ГЭС традиционны для специальных синхронных электрических машин с когтеобразными полюсами, а также машин с постоянными магнитами [11, 12]. При этом тихоходные СГГ имеют ряд особенностей, связанных с многополюсным исполнением. Конструктивные типы СГГ для микро-ГЭС изображены на рис. 2.

Достоинство быстроходных СГГ заключается в их конструктивной унификации с автотракторными генераторными установками. Конструкции подобных генераторов представлены в [12]. У синхронного гидрогенератора с электромагнитным возбуждением и когтеобразными полюсами оригинальным узлом считается оболочка с повышенной степенью защиты, а у СГГ с возбуждением от постоянных магнитов к ней добавляется и ротор. Конструкция ротора СГГ с возбуждением от постоянных магнитов и когтеобразными полюсами описана в [13]. Компонка быстроходного СГГ с возбуждением от постоянных магнитов и ротором в виде магнитного колеса дана на рис. 3.

При частоте вращения выходного вала ПМ 1000 об/мин генератор должен иметь 6 полюсов. Они выполняются из шести неодимовых магнитов (Nd-Fe-B) с чередующейся полярностью, закреплённых на спинке ротора.

Синхронный гидрогенератор с конструкцией по рис. 3 обладает высокой степенью технологичности. Положительным качеством данного варианта исполнения является то, что для него может быть использован статор серийного асинхронного или синхронного элек-



Рис. 2. Конструктивные типы гидрогенераторов для мини-ГЭС

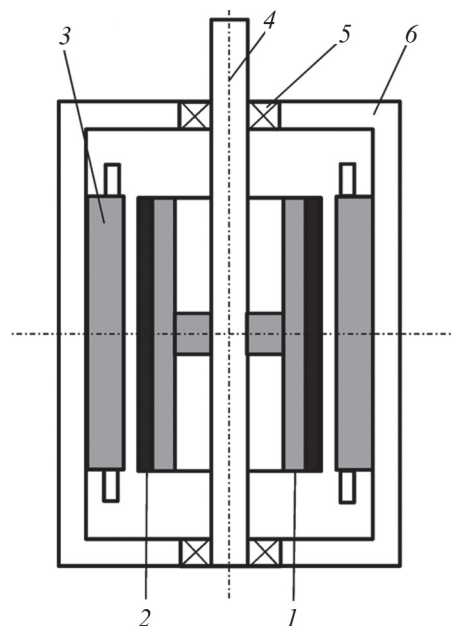


Рис. 3. Компонка быстроходного генератора ротором в виде магнитного колеса:

1 — спинка ротора, выполненная из магнитной конструкционной стали; 2 — постоянный магнит; 3 — статор; 4 — вал; 5 — подшипник; 6 — оболочка

тродвигателей, а оригинальными изделиями станут ротор с постоянными магнитами и пыле- и влагозащитная оболочка.

Конструкция тихоходного СГГ, аналогичная приведенной на рис. 3, представлена на рис. 4. В связи со значительными радиальными размерами генератора в его компоновку добавлено кольцо 7, придающее конструкции жесткость. При частоте вращения вала ПМ

200 об/мин генератор должен иметь 30 полюсов, что требует значительных радиальных размеров и придает СГГ дискообразную форму. Полюсы выполняются из 30 неодимовых магнитов с чередующейся полярностью, закреплённых на стальной спинке ротора. Основное достоинство подобной компоновки — хорошее охлаждение обмотки статора. В настоящей комплектации обмотка статора максимально приближена к охлаждаемой внешней оболочке 6, что способствует интенсивному отводу тепла (плоские конфигурации электрических машин характеризует усиленный естественный теплоотвод). В результате этого генератор менее чувствителен к длительным перегрузкам.

С учетом дискообразной формы СГГ выполняют по различным компоновочным принципам: с внешним статором, с внешним ротором барабанного типа, с внешним ротором на консоли (рис. 4 — 6).

На рисунке 5 дана компоновка генератора с внешним ротором барабанного типа. Статор крепится на направляющем стержне 7, причём концы его обмотки выведены наружу через осевой канал, выполненный

в направляющем стержне 7. Ротор барабанного типа зафиксирован относительно статора посредством подшипников 5. Вал генератора 4 соединён с барабанным ротором муфтой 9.

За счет снижения, по сравнению с конструкцией рис. 4, внутреннего диаметра статора, в конструкции на рис. 5 достигается экономия электротехнической стали и обмоточной меди с соответствующим снижением стоимости. Барабанная арматура ротора изготовлена из лёгкого сплава или из композитных материалов, что позволяет снизить массу СГГ.

На рисунке 6 представлена компоновка генератора с внешним ротором, закреплённым на консоли. Арматура ротора 8 выполнена в виде консоли с торцевыми отверстиями. Данная компоновка обладает теми же преимуществами, что и вариант с ротором барабанного типа, но отличается большей технологичностью. В частности, концы фаз статора выведены через нижнюю стенку оболочки 6. Не закрытая ротором с нижней стороны активная часть генератора подвергается более

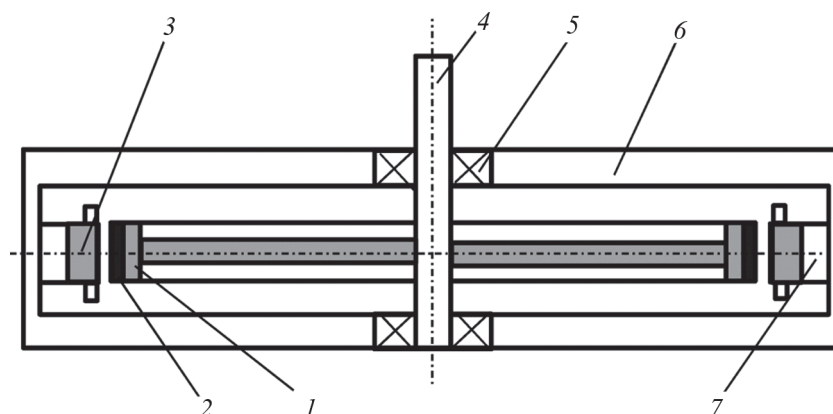


Рис. 4. Компоновка тихоходного СГГ с внешним статором:  
1 — 6 — те же, что на рис. 3; 7 — кольцо

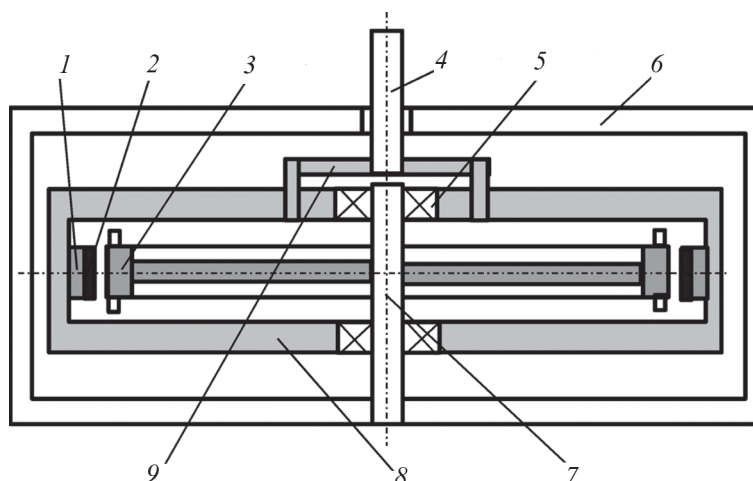


Рис. 5. Компоновка тихоходного генератора с внешним ротором барабанного типа:

1 — стальная спинка ротора; 2 — магнит; 3 — статор; 4 — вал; 5 — подшипник; 6 — внешняя оболочка; 7 — направляющий стержень; 8 — барабанная арматура ротора; 9 — муфта

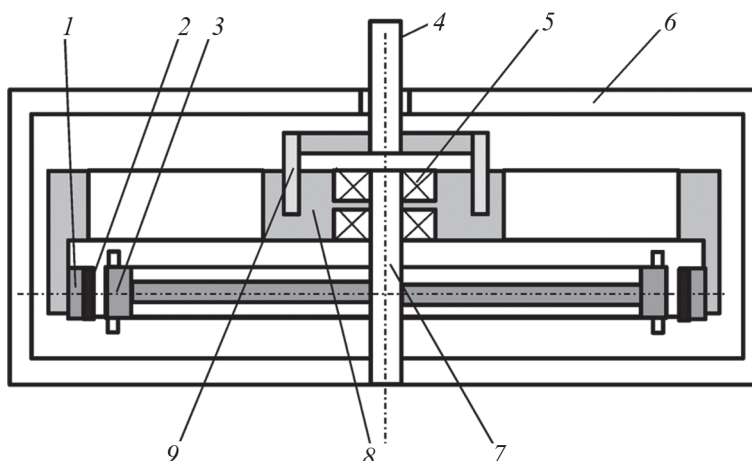


Рис. 6. Компоновка тихоходного генератора с внешним ротором на консоли:

1 — 9 — те же, что на рис. 5

интенсивному охлаждению. Этому же способствуют торцевые отверстия, выполненные в арматуре ротора  $\delta$ .

### Особенности проектирования тихоходных синхронных гидрогенераторов

Наиболее остро стоят вопросы проектирования тихоходных СГГ на мощности порядка 5...15 кВт. Общепринятого опыта их проектирования пока нет. Проблема заключается в том, что диаметр расточки статора должен иметь достаточно большие значения из-за необходимости размещения на нём обмотки с большим количеством полюсов. Тем самым ухудшаются массогабаритные показатели изделия, закладываемые диаметром расточки  $D$  и длиной пакета  $l_\delta$  статора.

Главные размеры и мощность СГГ  $S_n$  связаны машинной постоянной [13]:

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \Omega}{k_E S_n} = \frac{1}{AB_\delta}. \quad (1)$$

В соответствии с (1) при фиксированных значениях мощности и частоты вращения снижение массогабаритного фактора (произведения  $D^2 l_\delta$ ) зависит только от возможностей повышения электромагнитных нагрузок. Однако повышение линейной токовой нагрузки  $A > 60000$  А/м при приемлемом значении плотности тока создаёт сложности с размещением проводников на статоре. Повышение индукции в зазоре  $B_\delta > 0,7$  Тл опасно в связи с увеличением момента трогания. Таким образом, электромагнитные нагрузки  $A = 60000$  А/м и  $B_\delta = 0,7$  Тл приблизительно соответствуют минимальному значению массогабаритного фактора. В его рамках возможны вариации  $D$  и  $l_\delta$  с целью выбора приемлемых (по технологическим соображениям) значений.

В качестве примера приведем результаты расчета главных размеров для трёх трёхфазных СГГ мощностью 5, 10 и 15 кВт с числом полюсов  $2p = 30$ . Расчет

главных размеров для трёх значений мощности  $S_n = P_n = \{5000, 10000, 15000\}$  Вт выполняли по (1). При этом использовали дополнительные соотношения  $D = 2p\tau/\pi$ ,  $\Omega = 2\pi n/60$ . Приняты следующие значения постоянных:  $k_E = 1,05$ ;  $B_\delta = 0,7$  Тл;  $A = 60000$  А/м;  $n = 200$  об/мин. В качестве технологических ограничений взяты  $\tau \geq 0,021$  м;  $l_\delta \geq 0,04$ . Расчёты свидетельствуют о том, что для генератора мощностью 5 кВт принятым ограничениям удовлетворяют значения  $\tau = 0,04$  м;  $D = 0,38$  м;  $l_\delta = 0,04$  м. Для генераторов мощностью 10 и 15 кВт —  $\tau = 0,06$  м;  $D = 0,57$  м;  $l_\delta = 0,04$  м и  $\tau = 0,07$  м;  $D = 0,67$  м;  $l_\delta = 0,04$  м, соответственно. Приведенные значения позволяют оценить габариты и массу тихоходных СГГ.

Во всех случаях для тихоходных СГГ характерны малые полюсные деления и проблемная зона пазов и зубцов статора. Это относится как к технологическому выполнению мелкой пазово-зубцовой структуры, так и к размещению на ней мощной обмотки статора.

### Заключение

Разработка и производство микро-ГЭС — актуальная научно-техническая задача. В Российской Федерации сформирована группа производителей данной продукции.

Структурный состав современной микро-ГЭС включает в себя звено постоянного тока.

Конструктивные исполнения СГГ для микро-ГЭС многообразны и зависят от частоты вращения гидравлической турбины. Достаточно специфичны конструктивные исполнения тихоходных СГГ. В проектировочном отношении проблемным вопросом является выполнение пазово-зубцовых зон.

Изготовление тихоходных СГГ с низкими массогабаритными показателями ориентировано на высокотехнологичные производства.

Материалы статьи могут служить основой инженерной разработки электрогенератора для микро-ГЭС.



## Литература

## References

1. **Распоряжение** Правительства РФ N 1715-р от 13 ноября 2009 г. «Об Энергетической стратегии России на период до 2030 г.» [Электрон. ресурс] [http://energoeducation.ru/wp-content/uploads/2015/11/LAW94054\\_0\\_20151002\\_142857\\_54007.pdf](http://energoeducation.ru/wp-content/uploads/2015/11/LAW94054_0_20151002_142857_54007.pdf) (дата обращения 17.07.2018).
2. **Weswen** [Официальный сайт] <http://weswen.ru/> (дата обращения 17.07.2018).
3. **ООО «АЭнерджи»** [Официальный сайт] <http://aenergy.ru/miniges> (дата обращения 17.07.2018).
4. **Микро-ГЭС** [Электрон. ресурс] <https://alter220.ru/> (дата обращения 17.07.2018).
5. **ИНСЭТ** [Официальный сайт] <http://www.inset.ru/r/predm.htm> (дата обращения 17.07.2018).
6. **CINK Hydro-Energy** [Официальный сайт] <http://cink-hydro-energy.com/ru/home/> (дата обращения 17.07.2018).
7. **Micro Hydro Power** [Официальный сайт] <http://www.micro-hydro-power.com/index.htm> (дата обращения 17.07.2018).
8. **Инженерно-техническая фирма «Гидропоника»** [Официальный сайт] <http://energyservice.sitecity.ru/index.phtml> (дата обращения 17.07.2018).
9. **НПО «Инверсия»** [Официальный сайт] <http://www.inversiya.com/> (дата обращения 17.07.2018).
10. **Alibaba** [Официальный сайт] <https://russian.alibaba.com/> (дата обращения 17.07.2018).
11. **Кацман М.М.** Справочник по электрическим машинам. М.: Академия, 2005.
12. **Электротехнический справочник.** Т. 4. Использование электрической энергии / под ред. А.И. Попова. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
13. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. М.: Энергия, 1980.
14. **Вольдек А.И.** Электрические машины. М.: Альянс, 2017.
15. **Копылов И.П.** Электрические машины. М.: Высшая школа, 2004.
16. **Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф.** Электрические машины. М.: Академия, 2006.
17. **Копылов И.П. и др.** Проектирование электрических машин. М.: Альянс, 2016.
18. **Гольдберг О.Д., Макаров Л.Н., Хелемская С.П.** Инженерное проектирование электрических машин. М.: Издат. дом «Бастед», 2016.
19. **Абрамов А.И., Иванов-Смоленский А.В.** Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. М.: Высшая школа, 2001.
20. **Осин И.Л.** Синхронные электрические двигатели малой мощности. М.: Издат. дом МЭИ, 2006.
21. **Лукутин Б.В.** Способы стабилизации параметров электроэнергии автономных микрогидроэлектростанций // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1987. № 8. С. 42—44.
22. **Лукутин Б.В.** Стабилизация напряжения автономных микрогидроэлектростанций // Техника в сельском хозяйстве. 1989. № 2. С. 22—24.

1. **Rasporyazhenie** Pravitel'stva RF N 1715-r ot 13 Noyabrya 2009 g. «Ob Energeticheskoy Strategii Rossii na Period do 2030 g.» [Elektron. Resurs] [http://energoeducation.ru/wp-content/uploads/2015/11/LAW94054\\_0\\_20151002\\_142857\\_54007.pdf](http://energoeducation.ru/wp-content/uploads/2015/11/LAW94054_0_20151002_142857_54007.pdf) (Data Obrashcheniya 17.07.2018). (in Russian).
2. **Weswen** [Ofits. Sayt] <http://weswen.ru/> (Data Obrashcheniya 17.07.2018). (in Russian).
3. **ООО «АЭнерджи»** [Ofits. Sayt] <http://aenergy.ru/miniges> (Data Obrashcheniya 17.07.2018).
4. **Mikro-GES** [Elektron. Resurs] <https://alter220.ru/> (Data Obrashcheniya 17.07.2018). (in Russian).
5. **INSET** [Ofits. Sayt] <http://www.inset.ru/r/predm.htm> (Data Obrashcheniya 17.07.2018). (in Russian).
6. **CINK Hydro-Energy** [Ofits. sayt] <http://cink-hydro-energy.com/ru/home/> (Data Obrashcheniya 17.07.2018). (in Russian).
7. **Micro Hydro Power** [Ofits. Sayt] <http://www.micro-hydro-power.com/index.htm> (Data Obrashcheniya 17.07.2018).
8. **Inzhenerno-tekhnicheskaya Firma «Gidropionika»** [Ofits. Sayt] <http://energyservice.sitecity.ru/index.phtml> (Data Obrashcheniya 17.07.2018). (in Russian).
9. **НПО «Инверсия»** [Ofits. Sayt] <http://www.inversiya.com/> (Data Obrashcheniya 17.07.2018). (in Russian).
10. **Alibaba** [Ofits. Sayt] <https://russian.alibaba.com/> (Data Obrashcheniya 17.07.2018). (in Russian).
11. **Katsman M.M.** Spravochnik po Elektricheskim Mashinam. M.: Akademiya, 2005. (in Russian).
12. **Elektrotekhicheskiy Spravochnik.** T. 4. Ispol'zovanie Elektricheskoy Energii. Pod red. A.I. Popova. M.: Izd-vo MEI, 2004. (in Russian).
13. **Ivanov-Smolenskiy A.V.** Elektricheskie Mashiny. M.: Energiya, 1980. (in Russian).
14. **Vol'dek A.I.** Elektricheskie Mashiny. M.: Al'yans, 2017. (in Russian).
15. **Kopylov I.P.** Elektricheskie Mashiny. M.: Vysshaya Shkola, 2004. (in Russian).
16. **Bespalov V.Ya., Kotelenets N.F.** Elektricheskie Mashiny. M.: Akademiya, 2006. (in Russian).
17. **Kopylov I.P. i dr.** Proektirovanie Elektricheskikh Mashin. M.: Al'yans, 2016. (in Russian).
18. **Gol'dberg O.D., Makarov L.N., Khelemskaya S.P.** Inzhenernoe Proektirovanie Elektricheskikh Mashin. M.: Izdat. Dom «Basted», 2016. (in Russian).
19. **Abramov A.I., Ivanov-Smolenskiy A.V.** Proektirovanie Gidrogeneratorov i Sinkhronnykh Kompensatorov. M.: Vysshaya Shkola, 2001. (in Russian).
20. **Osin I.L.** Sinkhronnye Elektricheskie Dvigateli Maloy Moshchnosti. M.: Izdat. Dom MEI, 2006. (in Russian).
21. **Lukutin B.V.** Sposoby Stabilizatsii Parametrov Elektroenergii Avtonomnykh Mikrogidroelektrostantsiy. Mekhanizatsiya i Elektrifikatsiya Sel'skogo Khozyaystva. 1987;8:42—44. (in Russian).
22. **Lukutin B.V.** Stabilizatsiya napryazheniya Avtonomnykh Mikrogidroelektrostantsiy. Tekhnika v Sel'skom Khozyaystve. 1989;2:22—24. (in Russian).

23. **Стребков Д.С.** Проблемы развития возобновляемой энергетики // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1997. № 6. С. 4—8.

24. **Бояринов Г.И., Курилин С.П., Максимкин В.Л., Мартынов В.Ф.** Электромашинные источники питания. М.: Изд-во МЭИ, 1994.

25. **Бояринов Г.И., Курилин С.П., Талюко В.В.** Динамические процессы при запуске асинхронного двигателя от генератора соизмеримой мощности // Известия высших учеб. заведений. Серия «Электромеханика». 1991. № 10. С. 66—67.

26. **Макаричев Ю.А., Ануфриев А.С.** Критериальный анализ параметров генераторов малой мощности // Известия высших учеб. заведений. Серия «Электромеханика». 2018. Т. 61. № 2. С. 42—46.

27. **Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М.** Моделирование и исследование гидроагрегатов малых ГЭС с частотно-управляемыми синхронными генераторами с постоянными магнитами // Известия высших учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. Серия «Энергетика». 2016. Т. 59. № 2. С. 106—121.

28. **Волковой М.С., Хижняков Ю.Н., Южаков А.А.** Статическая устойчивость в системе малой энергетики // Электротехника. 2012. № 11. С. 2—5.

29. **Дергачёв П.А., Курбатов П.А., Молоканов О.Н.** Магнитный мультипликатор с регулируемым передаточным отношением для ветровых и малых гидравлических электростанций // Электротехника. 2013. № 4. С. 33—38.

30. **Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г.** Использование регулируемой асинхронной машины двойного питания в синхронном режиме // Электричество. 2017. № 10. С. 60—68.

31. **Мустафаев Р.И., Гасанова Л.Г., Мусаев М.М.** Применение регулируемых электрических машин в гидроагрегатах малых ГЭС, работающих на энергосистему // Электротехника. 2018. № 5. С. 38—44.

23. **Strebkov D.S.** Problemy Razvitiya Vozobnovlyаемой Energetiki. Mekhanizatsiya i Elektrifikatsiya Sel'skogo Khozyaystva. 1997;6:4—8. (in Russian).

24. **Boyarinov G.I., Kurilin S.P., Maksimkin V.L., Martynov V.F.** Elektromashinnye Istochniki Pitaniya. M.: Izd-vo MEI, 1994. (in Russian).

25. **Boyarinov G.I., Kurilin S.P., Talyuko V.V.** Dinamicheskie Protsessy pri Zapuske Asinkhronnogo Dvigatelya ot Generatora Soizmerimoy Moshchnosti. Izvestiya Vysshikh Ucheb. Zavedeniy. Seriya «Elektromekhanika». 1991;10:66—67. (in Russian).

26. **Makarichev Yu.A., Anufriev A.S.** Kriteriial'nyy Analiz Parametrov Generatorov Maloy Moshchnosti. Izvestiya Vysshikh Ucheb. Zavedeniy. Seriya «Elektromekhanika». 2018;61;2:42—46. (in Russian).

27. **Mustafaev R.I., Gasanova L.G., Musaev M.M.** Modelirovanie i Issledovanie Gidroagregatov Malykh GES s Chastotno-upravlyaemymi Sinkhronnymi Generatorami s Postoyannymi Magnitami. Izvestiya Vysshikh Ucheb. Zavedeniy i Energeticheskikh Ob'edineniy SNG. Seriya «Energetika». 2016;59;2:106—121. (in Russian).

28. **Volkovoy M.S., Khizhnyakov Yu.N., Yuzhakov A.A.** Sticheseskaya Ustoychivost' v Sisteme Maloy Energetiki. Elektrotehnika. 2012;11:2—5. (in Russian).

29. **Dergachev P.A., Kurbatov P.A., Molokanov O.N.** Magnitnyy Mul'tiplikator s Reguliruемым Peredatochnym Otnosheniem dlya Vetrovykh i Malykh Gidravlicheskih Elektrostantsiy. Elektrotehnika. 2013;4:33—38. (in Russian).

30. **Mustafaev R.I., Gasanova L.G.** Ispol'zovanie Reguliruемой Asinkhronnoy Mashiny Dvoynogo Pitaniya v Sinkhronnom Rezhime. Elektrichestvo. 2017;10:60—68. (in Russian).

31. **Mustafaev R.I., Gasanova L.G., Musaev M.M.** Primenenie Reguliruemykh Elektricheskikh Mashin v Gidroagregatakh Malykh GES, Rabotayushchikh na Energosistemu. Elektrotehnika. 2018;5:38—44. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Курилин Сергей Павлович** — доктор технических наук, профессор кафедры электромеханических систем Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: sergkurilin@gmail.com

**Денисов Валерий Николаевич** — доктор технических наук, заведующий кафедрой высшей математики Смоленского филиала НИУ «МЭИ», e-mail: dvalnik@mail.ru

#### Information about authors:

**Kurilin Sergey P.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electromechanical Systems Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: sergkurilin@gmail.com

**Denisov Valeriy N.** — Dr.Sci. (Techn.), Head of Higher Mathematics Dept., Branch of NRU MPEI in Smolensk, e-mail: dvalnik@mail.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 29.08.2018

The article received to the editor: 29.08.2018