

УДК 621.311.24

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-41-45

Ветроэнергетическая установка с двумя синхронно вращающимися ветроколесами

Р.С. Цгоев, А.А. Орлов

Поставлена задача повышения эффективности горизонтально-осевых ветроэнергетических установок (ВЭУ). Описаны основные ограничения, вызывающие снижение эффективности ветроустановок с уменьшением скорости ветра. Проведен сравнительный анализ особенностей работы и выработки электроэнергии мало- и многолопастных ВЭУ, по результатам которого предложена новая конструкция ВЭУ.

Основанная на классическом принципе работы горизонтально-осевой ВЭУ, новая конструкция ветроколеса позволяет преобразовывать ветроагрегаты с n лопастями в агрегаты с $2n$ лопастями и обратно без вывода установки из работы. Особенностью конструкции является установка двух соосных ветроколес на один вал через передаточную ступицу, которая позволяет менять положение соосных ветроколес друг относительно друга, располагая лопасти второго ветроколеса за или между лопастями первого. В результате режим работы ВЭУ подразделяется на два основных режима: с n лопастями на повышенных оборотах ветроколеса и $2n$ лопастями на пониженных оборотах ветроколеса.

Также показана логика управления ветроколесами в зависимости от внешних условий. Ее суть заключается в формировании управляющего сигнала для ступицы, формирующегося на основе реальной скорости ветра и фактического положения второго ветроколеса. Через логический контроллер сигнал подается на электромотор для последующего изменения положения второго ветроколеса.

Представлены основные результаты расчетов, содержащие сравнительные техническую и экономическую эффективности применения предлагаемого решения.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка, ступица, переменное число лопастей, коэффициенты мощности и крутящего момента.

Для цитирования: Цгоев Р.С., Орлов А.А. Ветроэнергетическая установка с двумя синхронно вращающимися ветроколесами // Вестник МЭИ. 2017. № 3. С. 41—45. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-41-45.

A Wind Turbine with Two Synchronously Rotating Windwheels

R.S. Tsgoev, A.A. Orlov

An objective of improving the efficiency of horizontal-axis wind turbines (HAWTs) is stated. The main restrictions causing less efficient operation of wind turbines with a decrease in wind velocity are described. The operation peculiarities of and the power generation by low- and multiblade wind turbines are subjected to a comparative analysis, based on which a new wind turbine design is proposed.

The proposed wind turbine design is based on the classic operation principle of an HAWT and allows a windwheel with n blades to be converted into a windwheel with $2n$ blades and back without the need to shut down the installation. The peculiarity of the new design is that two uniaxial windwheels are installed on a common shaft through a transfer hub, using which the position of uniaxial windwheels with respect to each other can be changed by placing the blades of the second windwheel right behind or in between the blades of the first windwheel. As a result, the wind turbine operation mode is divided into two main modes: one with n blades at higher windwheel rotation speeds and the other with $2n$ blades at lower speeds.

The windwheel control logic depending on the external conditions is also outlined. Its essence consists in producing a control signal for the hub proceeding from the actual wind velocity and the second windwheel's actual position. The generated control signal is applied to the electric motor through a programmable logic controller for changing the position of the second windwheel.

The main results of calculations containing the comparative technical and economic gains from using the proposed solution are presented.

Key words: wind turbine, hub, variable number of blades, power and torque coefficients.

For citation: Tsgoev R.S., Orlov A.A. A Wind Turbine with Two Synchronously Rotating Windwheels. MPEI Vestnik. 2017; 3:41—45. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2017-3-41-45.

Горизонтально-осевые ветроэнергетические установки (ВЭУ) с тремя лопастями получили наибольшее распространение. Анализ их характеристик показывает, что существуют следующие ограничения по скорости ветра: минимальная рабочая составляет $3 \leq V_{\min} \leq 6$ м/с; расчетная равна $8 \leq V_{\text{расч}} \leq 15$ м/с; параметры максимальной: $24 \leq V_{\max} \leq 26$ м/с.

Представленные ограничения приводят к снижению эффективности ВЭУ за счет неиспользования энергии малых скоростей ветра, которые для средней полосы Российской Федерации являются наиболее повторяющимися [1].

При скоростях ветра ниже расчетных электроснабжение автономного потребителя электроэнергии за счет трехлопастных ВЭУ приводит к увеличению расхода дизельного топлива дублируемыми гарантированными мощностями, обычно представленными дизель-генераторными установками (ДГУ).

Конструкция многолопастных ВЭУ обеспечивает использование энергии малых ветров за счет высокого коэффициента использования энергии ветра (КИЭВ) в данном диапазоне скоростей. К недостаткам многолопастных ВЭУ относится малый КИЭВ при скоростях ветра больше 7...10 м/с за счет увеличения потерь ветрового потока [2].

Рассмотрена конструкция ВЭУ, в которой по условию работы скомпенсированы недостатки горизонтально-осевых много- и малолопастных установок.

Основной принцип работы предлагаемой ВЭУ заключается в регулировании КИЭВ в зависимости от скорости воздушного потока за счет изменения момента и быстроходности ветроколеса (ВК), которые, в свою очередь, зависят от числа его лопастей.

В основе конструкции ВК лежит конструкция колеса с изменяющимся числом лопастей. Принцип изменения числа лопастей заключается в вариации взаимного расположения двух синхронно вращающихся в одну сторону ветроколес. Оба ВК должны иметь одинаковое число лопастей n . Дополнительно следует отметить, что радиусы ветроколес различны. Общая структура ВЭУ с двумя синхронно вращающимися ВК представлена на рис. 1.

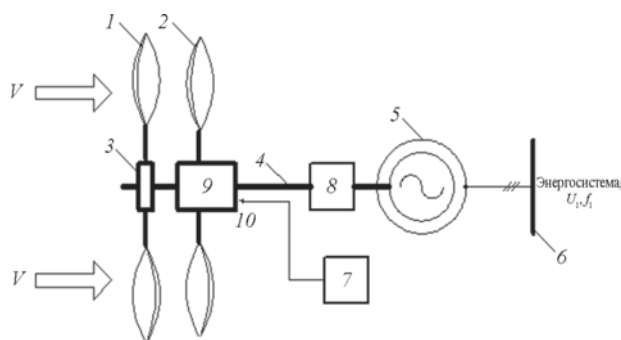


Рис. 1. Общая структура ВЭУ с двумя ВК:

1, 2 — ВК1, ВК2; 3 — ступица ВК1; 4 — общий вал ВК1 и ВК2; 5 — электрогенератор; 6 — энергосистема; 7 — датчик скорости ветра; 8 — мультипликатор; 9 — блок расположения ВК2

Принцип работы рассматриваемой ВЭУ совпадает с классической горизонтально-осевой ВЭУ: ВК1 преобразовывает поступательную энергию ветра во вращательную, передающуюся ступице. Ступица ВК подает вращательную энергию через вал на мультипликатор, предназначенный для увеличения переменной скорости вращения до стандартной скорости вращения ротора генератора. Генератор вырабатывает электроэнергию и выдает ее в энергосистему.

Дополнительное ВК2 крепится к валу через блок расположения ВК2, позволяющий менять положение ВК2 относительно ВК1 на основании сигналов, получаемых с датчика скорости ветра. Модель конструкции ВЭУ представлена на рис. 2.

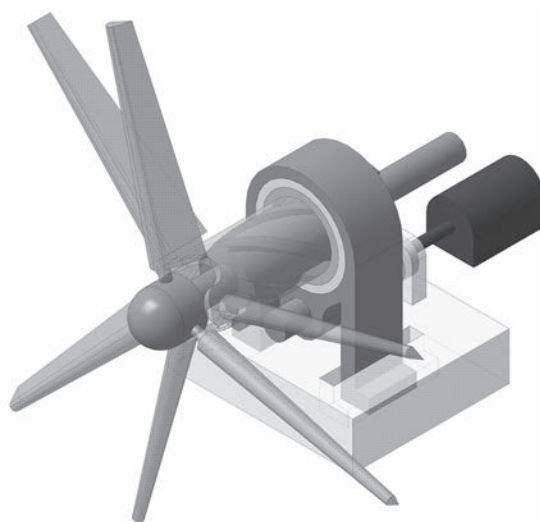


Рис. 2. Модель ветроколеса в момент изменения положения ВК2 относительно ВК1

Предлагаем ограничиться анализом двух крайних режимов работы блока расположения ВК2 относительно ВК1.

Режим Р1: лопасти ВК2 расположены за лопастями ВК1. В данном случае можно рассматривать ВЭУ как установку с n лопастями.

Режим Р2: лопасти ВК2 расположены между лопастями ВК1. В этом режиме ВЭУ выглядит как установка с $2n$ лопастями.

Пример взаимного расположения лопастей описанных режимов при $n = 3$ представлен на рис. 3, а, б.

Следует отметить, что в режиме Р2 для устранения негативного воздействия лопастей ВК1 на режим работы ВК2 в блоке расположения ВК2 относительно ВК1 предусмотрено перемещение лопастей ВК2 в плоскость ВК1. Развертка окружностей вращения ВК1 и ВК2 представлена на рис. 4.

Данная конструкция ВЭУ позволяет объединить преимущества мало- и многолопастных ВЭУ.

Для реализации поставленной задачи была разработана конструкция блока расположения ВК2 относительно ВК1 (рис. 5).

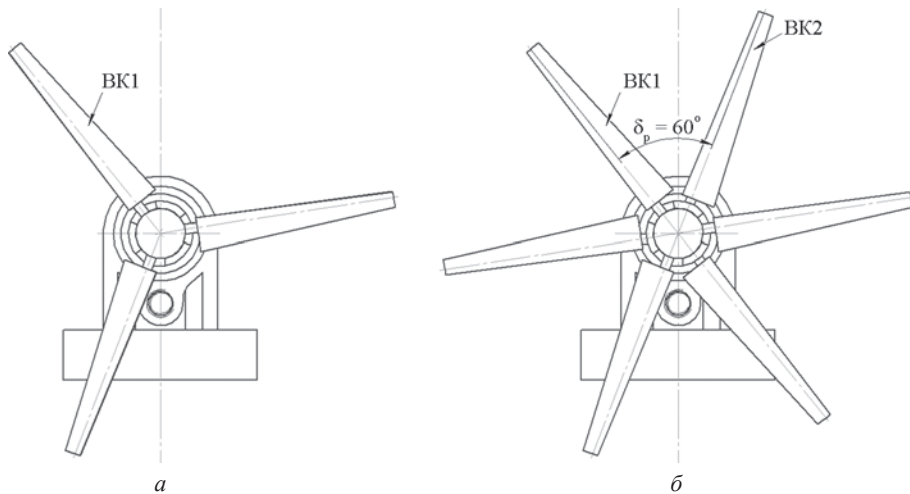


Рис. 3. Режимы ВЭУ:

a — режим P1 при $n = 3$, лопасти BK2 расположены за лопастями BK1; *b* — режим P2 при $2n = 6$, лопасти BK2 расположены между лопастями BK1

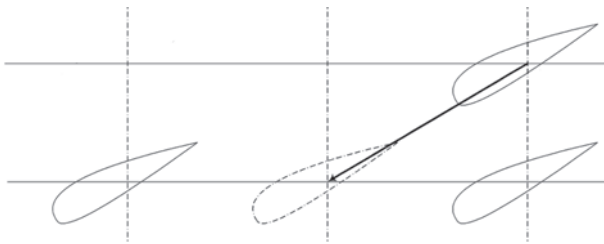


Рис. 4. Развертка окружности вращения BK1 и BK2

Исходной информацией для блока регулировки BK2 является информация о скорости ветра, поступающая с датчика скорости ветра, и фактическое положение BK2 относительно BK1, получаемое с датчика фактического положения BK2 относительно BK1. Для ориентации BK2 относительно BK1 вводится понятие угла раскрытия BK2 δ_p , показывающее минимальный угол между осями лопастей BK1 и BK2. Пример угла для режима P2 трехлопастной ВЭУ показан на рис. 3, б.

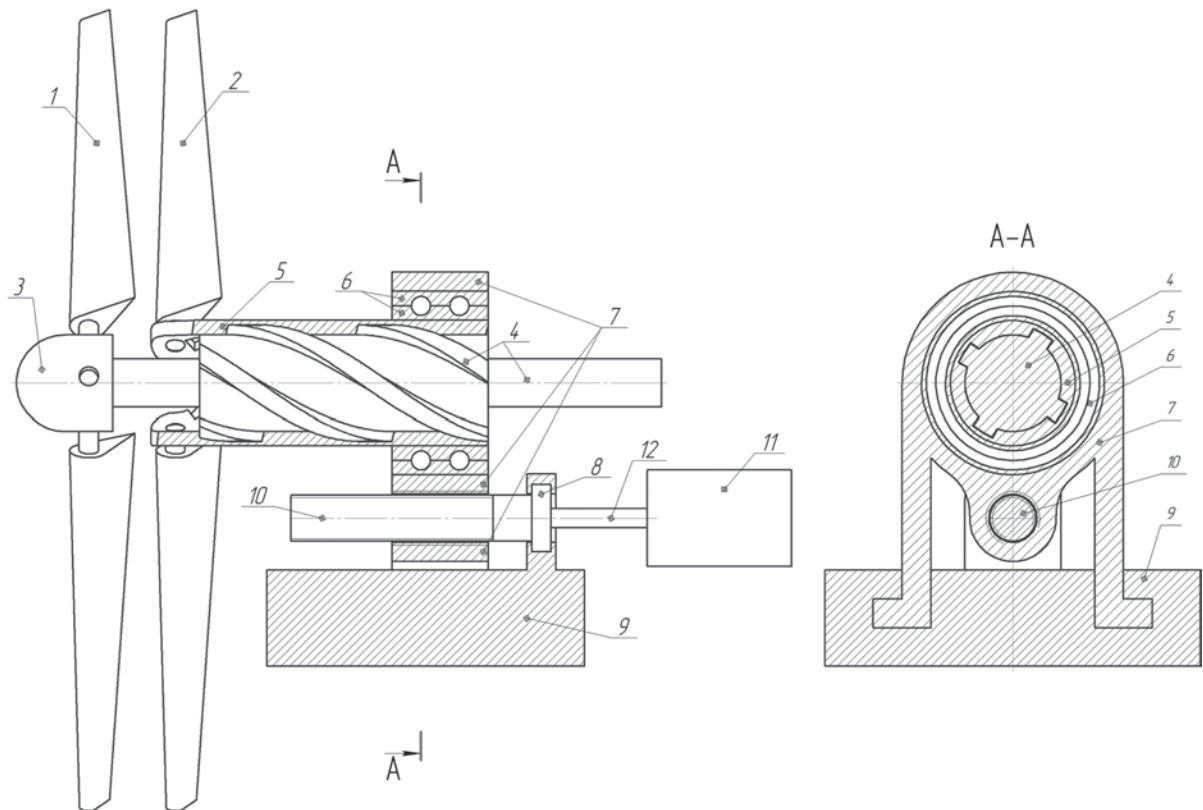


Рис. 5. Продольный разрез блока расположения BK2 относительно BK1:

1, 2 — BK1, BK2; 3, 5 — ступицы BK1, BK2; 4 — вал; 6 — опорно-упорный подшипник скольжения; 7 — гайка винтовой передачи; 8 — подшипниковый узел; 9 — остов; 10 — винт; 11 — электродвигатель; 12 — вал электродвигателя

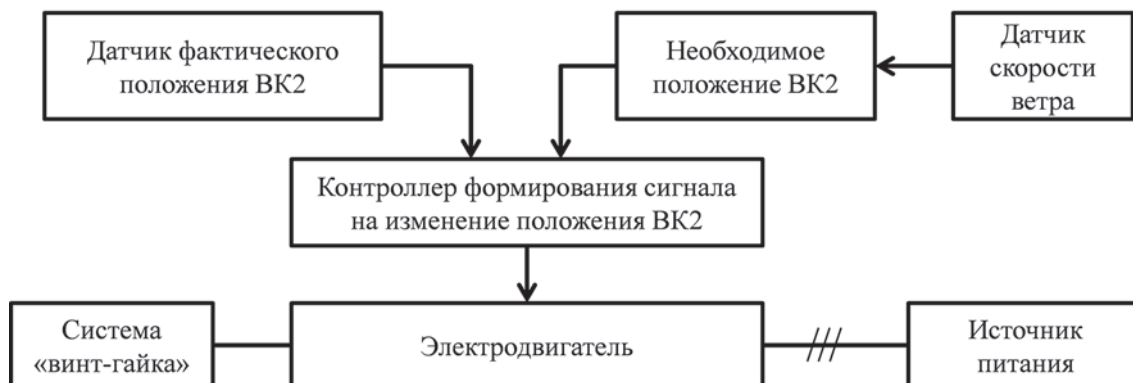


Рис. 6. Схема сбора и обработки исходной информации

Исходная информация обрабатывается контроллером формирования сигнала, в результате работы которого на электродвигатель поступает информация о необходимости включения и направлении вращения.

Питание на электродвигатель подается от источника питания. Вал электродвигателя связан с системой «винт-гайка» [3], предназначенной для непосредственного изменения положения ВК2. Схема сбора и обработки исходной информации представлена на рис. 6.

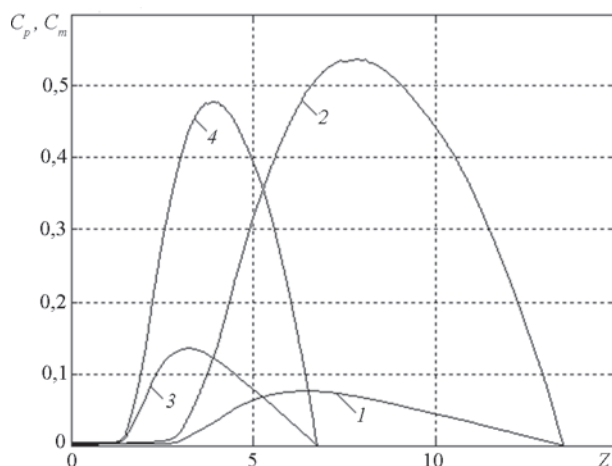
В результате обработки исходной информации после формирования сигнала на изменение положения ВК2 электродвигатель приводит во вращение вал, который, в свою очередь, передает вращающий момент на винт. Винт закреплен на остова через винтовой подшипник с одной стороны и резьбовым соединением с гайкой винтовой передачи с другой стороны. Благодаря резьбовому соединению винта и гайки вращение винта преобразовывается в поступательное движение гайки, что, в свою очередь, вызывает перемещение опорно-упорного подшипника скольжения и ступицы ВК2 вдоль оси вала ВЭУ.

Следует отметить, что сопряжение вала ВЭУ и ступицы ВК2 выполнено в виде винтовой шлицевой пары [3] с большим шагом, которая в результате перемещения гайки вызывает поворот ступицы ВК2 и соответственно лопастей ВК2 на заданный угол.

Использование предлагаемой конструкции ВЭУ позволяет оперировать коэффициентами крутящего момента и мощности в функции быстроходности. Графики изменения коэффициентов крутящего момента и мощности представлены на рис. 7.

Необходимо уточнить, что график крутящего момента в режиме P1 соответствует ветроэнергетической характеристике ВЭУ «Радуга-1» [1], снятой в аэродинамической трубе, а графики крутящего момента и мощности для режима P2 построены с учетом критерия Глауэра [4].

На основе графиков, представленных на рис. 7, были рассчитаны зависимости мощности ВЭУ от скоростей ветра. Указанные зависимости представлены на рис. 8.

Рис. 7. Графики зависимостей коэффициентов крутящего момента и мощности в функции быстроходности для ВЭУ с $n = 3$ (режим P1) и $2n = 6$ (режим P2):

коэффициенты крутящего момента (1, 3) и мощности (2, 4) в режимах P1, P2

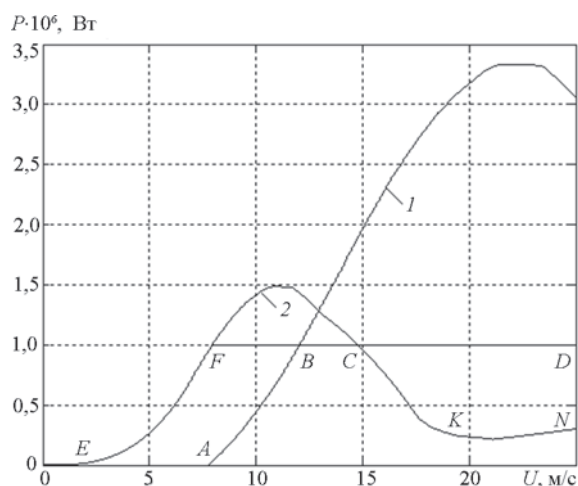


Рис. 8. Графики зависимостей мощностей ВЭУ от скоростей ветра

1, 2 — режимы P1, P2

Анализ графиков рис. 8 показывает, что график работы ВЭУ в режиме P1 будет соответствовать линии *ABCD*, а в режиме P2 — *EFBCKN* (*FBCD* — линия ограничения по установленной мощности электрогенератора).

В диапазоне *BC* смена режимов с P1 на P2 происходит при уменьшении скорости ветра и с P2 на P1 — при ее увеличении. В результате изменения режимов в процессе работы ВЭУ график работы ВЭУ будет *EFBCD*.

Таким образом, эффективность ВЭУ можно оценить отношением площадей *EFBCD* и *ABCD*, что составляет $1,914e007/1,485e007 = 1,288$ о.е.

При рассматриваемом управлении ВЭУ с двумя ВК переход из режима P1 при скоростях ветра, меньших номинального значения, в режим работы P2 позволяет увеличить выработку энергии почти на 29 %, что говорит о существенном повышении эффективности ВЭУ.

В заключение отметим, что для мощных (несколько мегаватт) ВЭУ стоимость элементов распределена следующим образом [5]: 33 % — башня; 18 % — ветроколесо; 2 % — ступица ветроколеса; 4 % — генератор; 14 % — мультипликатор; 5 % — система регулирования угла установки лопастей ветроколеса; 6 % — полупроводниковый преобразователь; 3 % — трансформатор; 1 % — подшипник ветроколеса; 2 % — вал ветроколеса; 2 % — система поворота гондолы; 2 % — гондола; 8 % — остальные элементы ВЭУ.

Для ВЭУ с двумя ветроколесами требуются второе ветроколесо и вторая ступица, что в целом ведет к удорожанию на 20 % по сравнению с ВЭУ с одним ветроколесом. Вопрос сравнения сроков окупаемости ВЭУ представляет самостоятельную задачу, и она будет представлена отдельно.

Были рассмотрены ограничения классических ВЭУ, связанные с коэффициентами крутящего момента, и мощности, описанные в [2]. Предложена конструкция, способная варьировать указанные коэффициенты за счет изменения количества лопастей. Модель конструкции выполнена в системе автоматизированного проектирования российского производства «Компас-3D». Расчеты проведены на основе [2]. В последующих публикациях будет описана методология расчета характеристик, учитывающая особенности представленной конструкции.

Литература

1. Дьяков А.Ф., Перминов Э.М., Шакарян Ю.Г. Ветроэнергетика России: состояние и перспективы развития. М.: Изд-во МЭИ, 1996. С. 214—217.

2. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. М: ОГИЗ, 1947.

3. Машиностроение. Детали машин. Конструкционная прочность. Трение, износ, смазка. Т. IV-1 / под общ. ред. Д.Н. Решетова. М.: Машиностроение, 1995.

4. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. М.: Энергоатомиздат, 1990.

5. Weinhold N. Inconspicuous world champions // New Energy. 2005. No. 5. Pp. 33—41.

References

1. D'yakov A.F., Perminov E.M., Shakaryan Yu.G. Vetroehnergetika Rossii: Sostoyanie i Perspektivy Razvitiya. M.: Izd-vo MPEI, 1996:214—217. (in Russian).

2. Fateev E.M. Vetrodvigateli i Vetroustanovki. M: OGIZ, 1947. (in Russian).

3. Mashinostroenie. Detali Mashin. Konstrukcionnaya Prochnost'. Trenie, Iznos, Smazka. T. IV-1 / pod Obshch. red. D.N. Reshetova. M.: Mashinostroenie, 1995. (in Russian).

4. Tvajdell Dzh., Uehjr A. Vozobnovlyaemye Istochniki Energii. M.: Energoatomizdat, 1990. (in Russian).

5. Weinhold N. Inconspicuous World Champions. New Energy. 2005;5:33—41.

Сведения об авторах

Цгоев Руслан Сергеевич — доктор технических наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ»

Орлов Алексей Александрович — аспирант кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», ведущий эксперт ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», e-mail: ollusio.orlov@gmail.com

Information about authors

Tsgoev Ruslan S. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI

Orlov Aleksey A. — Ph.D.-student of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, leading expert of JSC «STC FGC UES», e-mail: ollusio.orlov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 18.02.2016