

Повышение эффективности ветроэнергетического агрегата регулированием угла установки лопастей ветроколеса

ЦГОЕВ Р. С., ПОГОСЯН А. В., ЯКОВЕНКО Г. А.

Проанализирован опыт эксплуатации ветроустановок в Калмыкии. Предложен метод повышения эффективности ветроэнергетической установки и увеличения выработки электроэнергии. Достигается это применением дополнительного регулирования угла установки каждой лопасти в отдельности за каждый оборот ветроколеса в функции положения лопасти.

Ключевые слова: ветроустановки, методы управления, повышение эффективности

В 2012 г. в Калмыкии были пушены в эксплуатацию два ветроагрегата высотой башни более 60 м и с радиусом ветроколеса 31 м производства немецкой компании Vensys мощностью по 1,2 МВт каждый. Это вывело Калмыкию в число лидеров развития энергетики на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в России. Но это лишь начало масштабного проекта создания ветропарка общей мощностью 300 МВт (далее предполагается установка ветроагрегата компании Vestas мощностью 3 МВт высотой более 100 м), который обеспечит выработку электроэнергии в объёме, существенно превышающем всё нынешнее потребление электроэнергии в Калмыкии [2]. Это вторая попытка строительства ветропарка в Калмыкии. Первая была предпринята в начале 90-х годов, но по ряду причин не увенчалась успехом. Предполагалось оснастить ВЭС установками отечественного производства типа «Радуга-1» мощностью 1 МВт [3, 5]. Но реально был сооружён лишь один агрегат «Радуга-1», выполненный с возможностью регулирования угла установки лопастей j с помощью специального гидропривода. Это позволяло обеспечить работу ВЭУ как в режимах с постоянной быstroходностью ($Z = \text{const}$), так и в режимах с постоянной скоростью вращения ветроколеса (ВК) $n_{\text{ВК}} = \text{const}$ и постоянной мощностью $P_{\text{ВЭУ}} = \text{const}$. Такая система регулирования угла установки лопастей предусматривает за счёт указанного регулирования осуществлять как самозапуск, так и остановку турбины при скорости ветра выше максимально допустимой скорости для ВЭУ (25 м/с).

Рассмотрим, правильно ли выбрана ВЭУ «Радуга-1» для данной местности, как распределена мощность ветропотока по всей высоте ветроколеса, и на основании этого рассмотрим возможность повышения эффективности ВЭУ. При этом все расчёты будем проводить для ВЭУ «Радуга-1», так как в [3, 5] опубликован наибольший объём необходимых технических данных.

Для оценки ресурсов ветропотенциала данной местности воспользуемся статистической обработкой многолетнего ряда часовых значений скорости ветра $V_0^{h=10}$ из базы данных (БД) [1] на высоте флюгера $h=10$ м от поверхности земли. Перерасчёт скорости ветра к высоте оси вращения ветроколеса (башни) ВЭУ V_0^h осуществляется по известной формуле [4, 7]:

$$V_0^h = V_0^{h=10} \frac{z_0^m}{z_0^m} \frac{h}{h_0} \frac{z_0^m}{z_0^m}, \quad (1)$$

где $m=0,2$ для ровной местности.

Высота до оси вращения ветроколеса ВЭУ «Радуга-1» составляет 38 м, радиус ветроколеса равен 24 м.

По пересчитанным на высоту установки ВЭУ данным скорости ветра рассчитываются кривые повторяемости, например по формуле Гриневича [6]:

$$f(V) = 1,038 \frac{DV}{V_{\text{ср}}} \frac{DV}{V_{\text{ср}}} e^{-0,547 \frac{DV}{V_{\text{ср}}}} \frac{DV}{V_{\text{ср}}} \frac{DV}{V_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где V – текущее значение скорости ветра, м/с; $V_{\text{ср}}$ – средняя многолетняя скорость ветра, м/с; DV – шаг расчёта (например 1 м).

График кривой повторяемости скорости ветра $t = f(V)$ по формуле (2) приведен на рис. 1. Там же приведен график известной зависимости удельной годовой энергии \mathcal{E}_{V_0} на один квадратный метр (в функции скорости ветра) ортогональной потоку ветра площади [7]:

$$\mathcal{E}_{V_0} = \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^{25} V_i^3 t_i (V_i) 8760 = \sum_{i=1}^{25} P_{0i} t_i (V_i) 8760 \text{ Втж}/(\text{м}^2 \text{ год}), \quad (3)$$

где γ – удельный вес воздуха; P_{0i} – удельная мощность невозмущённого ветропотока на i -м интервале градации скорости ветра.

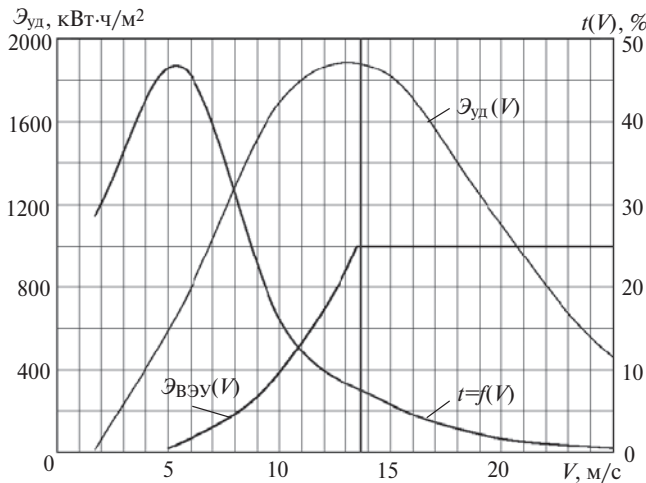


Рис. 1. Вероятностное распределение скорости ветра $t = f(V)$, удельный ветроэнергетический потенциал ветрового потока $\Delta_{уд} = f(V)$ на высоте оси вращения ветроколеса ВЭУ и характеристика мощности $P_{ВЭУ} = f(V)$ ВЭУ «Радуга-1»

Вообще-то нас интересует в (3) график несколько отвлечённого параметра (обозначим его $P_{уд}$ – удельная мощность), а именно – произведения, равного $P_{уд} = f(V) = P_{0i} t_i(V_i)$, Вт/м², с максимумом характеристики которого совпадает и максимум характеристики $P_{уд} = f(V)$. Согласно графику он достигается при скорости ветра примерно 13 м/с. На рис. 1 также приведён график $P_{ВЭУ} = f(V)$ мощности ВЭУ «Радуга-1» (из [5]). Из рис. 1 видно, что скорость ветра номинального режима (точка начала горизонтального участка графика мощности $P_{ВЭУ} = f(V)$, соответствующая номинальному режиму при $P_{ВЭУ} = \text{const}$) практически совпадает со скоростью ветра максимума характеристики $P_{уд} = f(V)$, что свидетельствует о *правильности выбора ветроустановки «Радуга-1» для данной местности*. Это можно обосновать тем, что чем на большем интервале скорости ветра производные характеристик $\Delta_{уд} = f(V)$ (точнее $P_{уд} = f(V)$) и $P_{ВЭУ} = f(V)$ имеют одинаковый и положительный знак, тем больше естественный прирост выработки энергии. Реально – чем ближе восходящая часть характеристики $P_{ВЭУ} = f(V)$ к характеристике мощности идеального ветроколеса $P_{ид} = \frac{\rho}{2} S V^3 C_P^{\max}$, где S – площадь ветроколеса; $C_P^{\max} = 16/27$ – коэффициент мощности идеального ветроколеса (критерий Жуковского–Бетца), тем более эффективна реальная ветроустановка.

На рис. 2 приведён график мощности, развиваемой ветропоток с учётом аэродинамической характеристики ветроколеса по его высоте h в вертикальном разрезе по оси вращения ветроколеса, рассчитанный с учётом (1). При этом математическая модель ветроколеса была представлена формулами, определяющими:

быстроходность

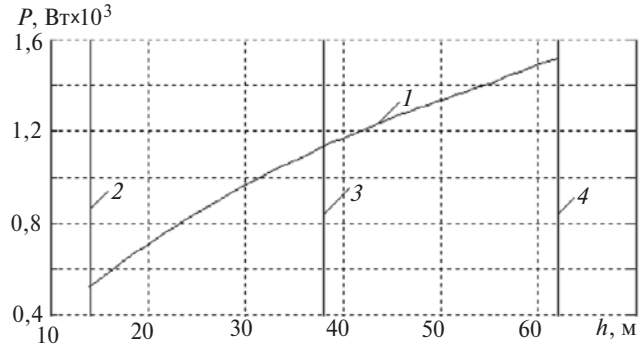


Рис. 2. График мощности, развиваемой ветропоток с учётом аэродинамической характеристики ветроколеса по его высоте (1); 2, 3, 4 – высота нижней границы (14 м), оси вращения (38 м) и верхней границы ветроколеса (62 м) соответственно

$$Z = \frac{\rho n R}{30V}, \tag{4}$$

где n – скорость вращения ветроколеса, об/мин; R – радиус ветроколеса, м;

коэффициент мощности ветроколеса

$$C_P = Z C_M, \tag{5}$$

где C_M – коэффициент крутящего момента ветроколеса (характеристика $C_M = f(Z)$ строится при продувке в аэродинамической трубе модели ветроколеса (обычно характеристика задана) и, по сути, является аэродинамической характеристикой ветроколеса);

мощность ветроколеса

$$P = 0,5 \rho R^2 V^3 C_P; \tag{6}$$

крутящий момент ветроколеса

$$M = \frac{30P}{\rho n}. \tag{7}$$

Очевидно, что мощность ветропотока существенно неравномерна по высоте ветроколеса.

Для построения графика реального распределения мощности, развиваемой ветроколесом с учётом его аэродинамической характеристики и «ометаемой» им площади, разобьём площадь ветроколеса по его высоте на сегменты. Площадь каждого i -го сегмента определяем по формуле

$$S_i = R^2 \frac{\sin a_i - \sin a_{i-1}}{2 \sin 360^\circ} - 0,5 \sin a_i \frac{\dot{\alpha}}{\dot{\alpha}_0} \tag{8}$$

где $0 \leq a_i \leq 360^\circ$ – текущее значение угла i -го сегмента (расчёт проводился с шагом в 1°).

Далее определяем элементарные площади:

$$DS_i = S_{i+1} - S_i. \tag{9}$$

Очевидно, должно выполняться условие $\sum_{i=0}^{360} DS_i = \rho R^2 = S_{ВК}$, где $S_{ВК}$ – «ометаемая» ветро-

колесом площадь. Для каждой элементарной площади DS_i по уравнениям (4)–(6) рассчитываются с учётом (1) по высоте ветроколеса элементарные мощности:

$$DS_i = DS_i P_i(h),$$

где $P_i(h)$ – значения мощности по графику рис. 2.

График изменения элементарных мощностей по высоте ветроколеса представлен на рис. 3.

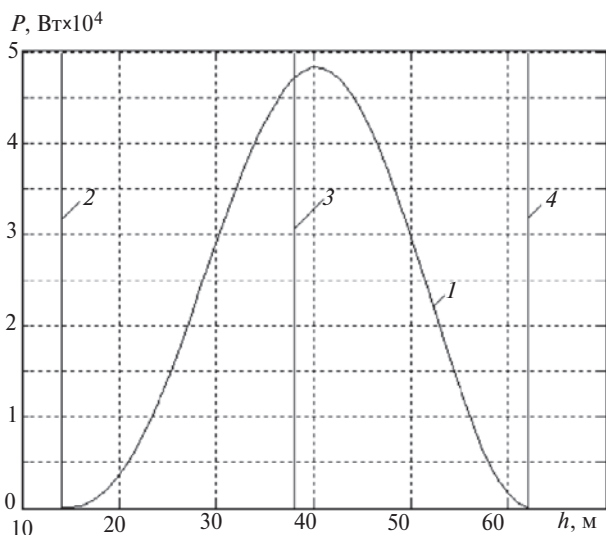


Рис. 3. График распределения мощности, развиваемой ветроколесом с учётом его аэродинамической характеристики, по площади ветроколеса и его высоте (1); 2–4 – то же, что на рис. 2

Из графика рис. 3 видно, что при вращении ветроколеса его лопасти в положении выше оси вращения перегружены по сравнению с нижним положением. По рис. 3 перегрузка составляет 16,6%. По сути, так же возрастает опрокидывающий момент всей ветроустановки.

Рассмотрим возможность использования системы регулирования угла установки лопастей ветроколеса для повышения эффективности ВЭУ. Для этого воспользуемся семейством графиков зависимости коэффициентов крутящего момента от быстроходности при разных углах установки лопастей ветроколеса $C_M = f(Z, j)$, представленным на рис. 4.

В соответствии с характеристиками $C_M = f(Z, j)$ по уравнениям (5)–(7) были рассчитаны и построены на рис. 5 для трехлопастной ВЭУ «Радуга-1» при номинальной скорости вращения ($n=38$ об/мин) характеристики мощностей ВЭУ в функции скорости ветра при различных углах установки лопастей.

Эти характеристики справедливы при одновременном и совместном регулировании общего для всех лопастей ветроколеса угла установки j . Из семейства характеристик мощностей ВЭУ

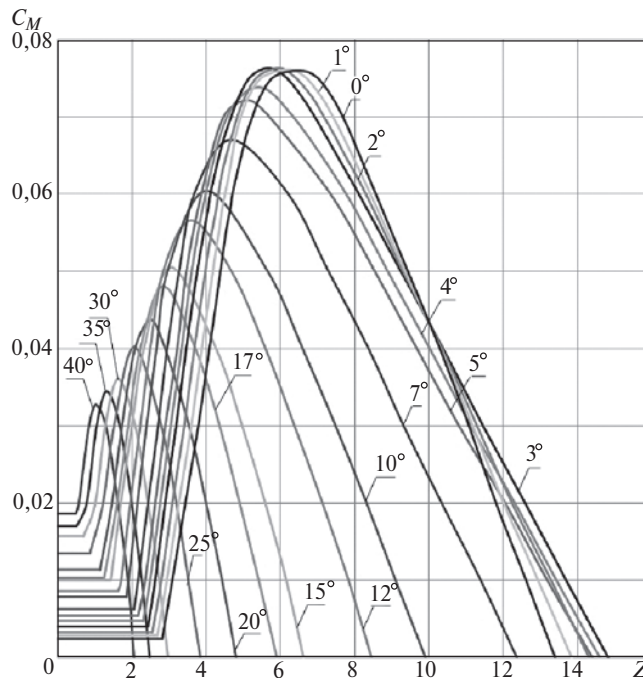


Рис. 4. Зависимость коэффициента крутящего момента от быстроходности $C_M = f(Z, j)$ при разных углах установки лопастей ветроколеса j

$P_{ВЭУ} = f(V, j)$ видно, что если, например, провести горизонтальную линию при $P_{ВЭУ} = 1000$ кВт, то этот режим можно обеспечить традиционным методом, а именно – увеличением общего для всех лопастей ветроколеса угла установки j . Именно так обеспечивается горизонтальный участок (1000 кВт×м) в приведённой на рис. 1 характеристики мощности ВЭУ «Радуга-1».

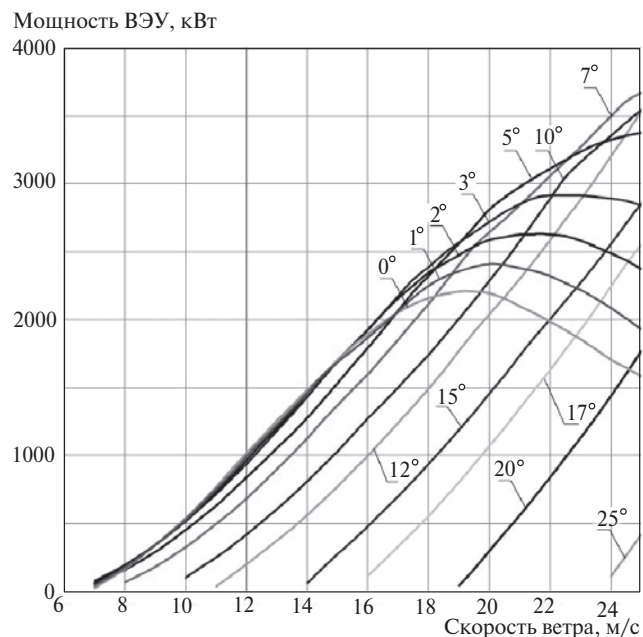


Рис. 5. Графики мощности ветроколеса ВЭУ «Радуга-1» $P_{ВЭУ} = f(V)$ при разных углах установки лопастей ветроколеса j и $n=38$ об/мин в соответствии с рис. 4

Если же провести вертикальную линию условно при постоянной скорости ветра, например при $V = 18$ м/с, то график мощности при $j = 0$ пространство мощностей разделяет на две зоны — для режимов, графики мощностей которых проходят выше графика мощности при $j = 0$, возрастание угла ($j > 0$) ведёт к увеличению мощности ВЭУ, а для режимов, графики мощностей которых проходят ниже графика мощности при $j = 0$, возрастание угла ($j > 0$) ведёт к уменьшению мощности ВЭУ.

Эта особенность режимов ветроколеса позволяет рассмотреть возможность регулирования угла установки j_i каждой i -й лопасти отдельно и независимо от других лопастей ветроколеса в функции от высоты ее положения в течение каждого оборота ветроколеса. Следует заметить, что при одних и тех же условиях характеристика мощности $P_{ВЭУ} = f(V, j)$ каждой i -й лопасти будет иметь такой же характер, но, например для трехлопастного ветроколеса (как у ВЭУ «Радуга-1») ее амплитуда будет в 3 раза меньше.

Учитывая это, для небольшого диапазона регулирования угла установки (например, $0 \leq j \leq 3^\circ$) строим мощностную характеристику для одной лопасти при разных углах одного проворота ветроколеса. При этом для того чтобы для любого угла j_i для каждой лопасти ветроколеса не строить характеристики, аналогичные рис. 3, воспользуемся графиками мощностей $P_{ВЭУ} = f(V)$ рис. 5. Так как диапазон изменения скорости ветра по всей высоте ветроколеса уже известен, то каждая лопасть проходит все эти значения за один оборот ветроколеса. При этом по значениям мощности из графиков $P_{ВЭУ} = f(V)$, например при $j = 0$, строим для i -й лопасти график

$$P_{\text{доп}(j=0)} = \frac{P_{ВЭУ(j=0)}}{3} = f(V). \quad (10)$$

График приведён на рис. 6. Там же приведены аналогичные графики для других значений угла j за один оборот ветроколеса ($0 \leq \omega t \leq 360^\circ$, где ω — угловая частота вращения ветроколеса; t — время), а также график огибающей этих характеристик, по сути предполагающей работу ВЭУ по огибающей характеристик $C_M = f(Z, j)$ по рис. 5 (на рис. 5 огибающая не показана), что обеспечивает максимальную эффективность ВЭУ. Огибающая кривая рис. 6 показывает, по каким углам установки j надо регулировать лопасть для получения максимальной мощности и, соответственно, увеличения выработки электроэнергии. Примем, что при $\omega t = 0$ лопасть находится в нижнем положении (ниже оси вращения ветроколеса), а при $\omega t = 180^\circ$ в верхнем положении.

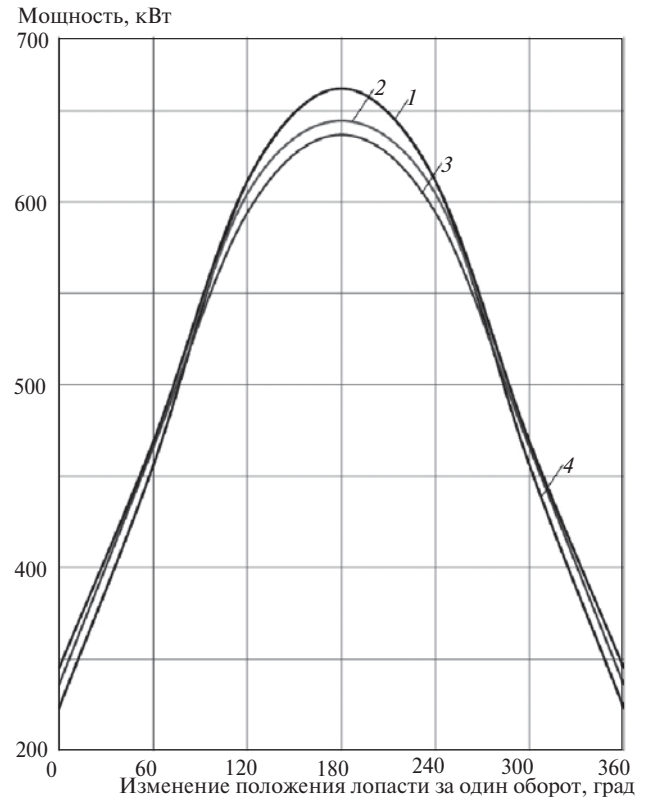


Рис. 6. Мощностная характеристика, выдаваемая одной лопастью за один оборот ветроколеса (высота оси его вращения 38 м) при различных углах установки лопасти: 1 — огибающая всех характеристик; 2 — мощностная характеристика одной лопасти при $j = 0$; 3 — то же при $j = 1^\circ$; 4 — при $j = 2^\circ$

В данном случае ветроколесо имеет три лопасти, сдвинутые в пространстве на 120° относительно друг друга. С учётом этого на рис. 7 построены три графика (5, 6 и 7) мощностных характеристик, аналогичные приведённой на рис. 6 огибающей, сдвинутые также в пространстве на 120° относительно друг друга. Эти три графика просуммированы. Из рис. 7 очевидно, что суммарный график мощности 2 явно содержит третью гармонику. Там же приведен интегральный график 3 суммарного графика 2 и интегральный график 4 суммарного графика, рассчитанного для режима при $j = 0$. Из сравнения этих двух графиков следует, что при дополнительном (к основному) регулировании угла установки в диапазоне $0 \leq j \leq 2^\circ$ увеличение мощности ВЭУ составляет $\sim 1\%$.

На первый взгляд кажется, что процент слишком маленький, чтобы им серьёзно заниматься. Однако при создании вышеупомянутого ветропарка общей мощностью 300 МВт, где предполагается установка ветроагрегатов компании Vestas мощностью по 3 МВт, эффект условно составит один дополнительный агрегат. По общепринятому уравнению (7) был проведён расчёт мощности при тех же условиях, график которой также приведён на рис. 7. Из сравнения 1 и 3 следует, что для данной ВЭУ уравнение (6) даёт завышенный примерно на 8% результат.



Рис. 7. Мощностная характеристика трех лопастей со смещением на 120° относительно друг друга: *а* – высота оси вращения ветроколеса 38 м; *б* – 50 м: 1 – мощность ВЭУ, рассчитанная по формуле (7); 2 – суммарная мощность, рассчитанная для огибающей; 3 – интегральная мощность для графика 2; 5–7 – мощностные характеристики трёх лопастей ветроколеса; 4 – интегральная мощность, рассчитанная для угла установки лопасти $j = 0$

Для сравнения на рис. 7,б приведены характеристики, аналогичные рис. 7,а, но для высоты оси вращения 50 м. При этом из сравнения интегрального графика 3 суммарного графика 2 и интеграль-

ного графика 4 суммарного графика, рассчитанного для режима при $j = 0$, следует, что при дополнительном (к основному) регулировании угла установки в диапазоне $0 \leq j \leq 3^\circ$ увеличение мощности ВЭУ составляет $\sim 2,3\%$. Кроме того, из сравнения графика 1 и графика 3 следует, что для такой ВЭУ уравнение (6) даёт завышенный примерно на $13,8\%$ результат.

Выводы: 1. Применение дополнительного регулирования угла установки каждой лопасти в отдельности в пределах $0 \leq j \leq 3^\circ$ в течение каждого оборота ветроколеса так, чтобы при прохождении лопасти из положения ниже оси вращения в верхнее угол менялся от большего значения к меньшему, повышает эффективность ВЭУ.

Для отечественной ВЭУ «Радуга-1» с высотой оси вращения 38 м и радиусом ветроколеса 24 м увеличение мощности составляет $\sim 1\%$. С увеличением высоты оси вращения до 50 м того же ветроколеса увеличение мощности составляет $\sim 2,3\%$.

При проведении расчётов по общепринятой формуле (6) получается завышенный результат. Так например, для указанных двух случаев превышение результатов составляет примерно на 8% и $13,8\%$ соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Российский сайт «Расписание погоды»: gr5.ru
2. Журнал «Экология и жизнь»: <http://www.ecolife.ru/ekotekhnologii/9901/>.
3. Дьяков А.Ф., Перминов Э.М., Шакарян Ю.Г. Ветроэнергетика России. Состояние и перспективы развития. – М.: Изд-во МЭИ, 1996, 220 с.
4. Расчет ресурсов ветровой энергии/Под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Изд-во МЭИ, 1997, 32 с.
5. Селезнев И.С. Состояние и перспективы работ МКБ «Радуга» в области ветроэнергетики. Конверсия в машиностроении. – Conversion in machine building of Russia, 1995, № 5.
6. Зубарев В.В., Минин В.А., Степанов И.Р. Использование энергии ветра в районах Севера: Состояние, условия эффективности, перспективы. – Л.: Наука, 1989, 208 с.
7. Бурмистров А.А., Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В. и др. Методы расчёта ресурсов возобновляемых источников энергии: Учебное пособие/Под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007, 144 с.

[23.09.13]

Авторы: Цгоев Руслан Сергеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ) в 1971 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию по управляемым связям электроэнергетических систем. Профессор кафедры «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» НИУ «МЭИ».

Погосян Армен Воваевич окончил Государственный инженерный университет Армении (Политех-

ник). В 2011 г. защитил магистерскую диссертацию «Исследование чувствительности активной мощности относительно коэффициентов трансформации трансформаторов». Аспирант кафедры «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» НИУ «МЭИ».

Яковенко Галина Александровна защитила бакалаврскую работу «Увеличение эффективности выработки ВЭУ» в 2012 г. Студентка кафедры «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» НИУ «МЭИ».

Achieving More Efficient Operation of a Wind Power Installation by Adjusting the Windwheel Blade Pitch Angle

R.S. TSGOEV, A.V. POGOSYAN, and G.A. YAKOVENKO

The experience gained from operation of wind power installations in Kalmykia is analyzed. A method for achieving more efficient operation of a wind power installation and for increasing its power output is proposed. These improvements are achieved by additionally adjusting the pitch angles of each individual blade per each revolution of the windwheel as a function of blade position.

Key words: wind power installations, control methods, achieving more efficient operation

Authors: Ruslan Sergeevich Tsgoev graduated from the Electric Power Engineering Department of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI). In 1992 he received the degree of Doct. Techn. Sci. His thesis dealt with controlled links of electric power systems. He is a professor of the MPEI National Research University's Chair for Nontraditional and Renewable Sources of Energy.

Armen Vovaeich Pogosyan graduated from the State Engineering University of Armenia. In 2011 he received the degree of Cand. Techn. Sci. His thesis dealt with investigation of active power sensitivity with respect to the transformers transformation ratios. He is a post-graduate student at the MPEI Chair for Nontraditional and Renewable Sources of Energy.

Galina Aleksandrovna Yakovenko received the bachelor degree in 2012. Her bachelor work dealt with achieving more efficient generation of the wind power plant output. She is a student at the MPEI Chair for Nontraditional and Renewable Sources of Energy.

* * *

Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира.

Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (495)362-7485

