

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-225–234

УДК 620.921(261.24) (08)

Обеспечение качества электрической энергии в системе электроснабжения при параллельной работе с ветроустановкой

Ю. А. Ролик¹⁾, А. В. Горностай²⁾

¹⁾Институт транспорта и связи (Рига, Латвийская Республика),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Рассматривается проблема обеспечения качества электрической энергии в системах электроснабжения, где используются достаточно протяженные воздушные или кабельные линии электропередачи. Показано, что эта проблема приобретает особую актуальность в системах электроснабжения, в которых одним из источников электрической энергии является генератор ветроустановки, поскольку первичный источник энергии – ветер – обладает собственной нестабильностью. Определение степени автоматизации регулирования напряжения в системах электроснабжения сводится к выбору способов и средств регулирования параметров качества электроэнергии. Понятие потери напряжения и ее причины поясняются простейшей системой электроснабжения, представленной однолинейной схемой. Регулирование напряжения предлагается осуществлять путем изменения параметров электрической сети с использованием способа снижения потерь напряжения в линии за счет уменьшения ее реактивного сопротивления. Последнее достигается с помощью продольной емкостной компенсации индуктивного сопротивления линии. Достижимый эффект проиллюстрирован векторными диаграммами токов и напряжений в схемах замещения линии электропередачи с использованием и без использования продольной емкостной компенсации. На основе анализа приведенных формул показано, что такой способ регулирования целесообразен только в системах электроснабжения с относительно низким коэффициентом мощности ($\cos\varphi < 0,7-0,9$). Такой коэффициент мощности типичен при включении в сеть ветроустановки с асинхронным генератором из-за существующей в природе нестабильности скорости ветра. Регулирование напряжения предлагаемым способом в данной ситуации позволит обеспечить требуемое качество напряжения на шинах потребителей. Это, в свою очередь, позволит создать необходимые условия для экономичной передачи электрической энергии с наименьшими затратами реактивной и потерями активной мощности.

Ключевые слова: ветроустановка, качество электрической энергии, регулирование напряжения, система электроснабжения, однолинейная схема, эквивалентная схема замещения, продольная емкостная компенсация

Для цитирования: Ролик, Ю. А. Обеспечение качества электрической энергии в системе электроснабжения при параллельной работе с ветроустановкой / Ю. А. Ролик, А. В. Горностай // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 3. С. 225–234

Адрес для переписки

Горностай Александр Владимирович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Address for correspondence

Gornostay Alexander V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-52
epp@bntu.by

Providing Quality of Electric Power in Electric Power System in Parallel Operation with Wind Turbine

Yu. A. Rolik¹⁾, A. V. Gornostay²⁾

¹⁾Transport and Telecommunication Institute (Riga, Latvian Republic),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The problem of providing electric power quality in the electric power systems (EPS) that are equipped with sufficiently long air or cable transmission lines is under consideration. This problem proved to be of particular relevance to the EPS in which a source of electrical energy is the generator of wind turbines since the wind itself is an instable primary energy source. Determination of the degree of automation of voltage regulation in the EPS is reduced to the choice of methods and means of regulation of power quality parameters. The concept of a voltage loss and the causes of the latter are explained by the simplest power system that is presented by a single-line diagram. It is suggested to regulate voltage by means of changing parameters of the network with the use of the method of reducing loss of line voltage by reducing its reactance. The latter is achieved by longitudinal capacitive compensation of the inductive reactance of the line. The effect is illustrated by vector diagrams of currents and voltages in the equivalent circuits of transmission lines with and without the use of longitudinal capacitive compensation. The analysis of adduced formulas demonstrated that the use of this method of regulation is useful only in the systems of power supply with a relatively low power factor ($\cos\varphi < 0.7$ to 0.9). This power factor is typical for the situation of inclusion the wind turbine with asynchronous generator in the network since the speed of wind is instable. The voltage regulation fulfilled with the aid of the proposed method will make it possible to provide the required quality of the consumers' busbars voltage in this situation. In its turn, it will make possible to create the necessary conditions for the economical transmission of electric power with the lowest outlay of reactive power and the lowest outlay of active power losses.

Keywords: wind turbine, electric power quality, voltage regulation, electrical power system, single line diagram, equivalent circuit, longitudinal capacitive compensation

For citation: Rolik Yu. A., Gornostay A. V. (2016) Providing Quality of Electric Power in Electric Power System in Parallel Operation with Wind Turbine. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 225–234 (in Russian)

Введение

Основу существующих систем электроснабжения (СЭС) объектов различного назначения, кроме источников электрической энергии, например ветроустановок (ВЭУ), составляют широко разветвленные воздушные или кабельные электрические сети напряжением 30, 20 или 10 кВ [1]. Из-за большой протяженности этих сетей напряжение у потребителей электроэнергии, если не применять дополнительных мер, будет отличаться от номинального значения [2]. Поэтому по мере усложнения структуры и укрупнения электрических сетей за счет новых вводимых источников возобновляемой энергии возникает проблема качества электроэнергии [3–5]. Поддерживать качество электрической энергии на необходимом уровне призваны специально разработанные для этих целей устройства и способы регулирования режимов работы СЭС [6].

Основными функциями таких устройств являются:

1) поддержание на заданном уровне частоты и напряжения в узловых точках энергосистемы в нормальном и в послеаварийном режимах работы. Это обеспечивается за счет автоматического регулирования напряжения

в электрических сетях, а также автоматического регулирования возбуждения и частоты синхронных генераторов электрических станций [7];

2) экономически выгодное распределение активных и реактивных нагрузок между параллельно работающими агрегатами СЭС и ВЭУ и поддержание оптимального состава работающих агрегатов с целью обеспечения резерва мощности в системе;

3) повышение надежности работы ВЭУ путем предотвращения нарушений нормального режима и ускорения ликвидации возникающих аварийных ситуаций;

4) обеспечение бесперебойности электроснабжения за счет параллельной работы преобразователей автоматизированных систем гарантированного электроснабжения.

Необходимость регулирования напряжения в СЭС

Необходимость регулирования напряжения в СЭС, в которых ВЭУ работает параллельно с сетью, обусловлена требованиями потребителей к качеству электроэнергии. В соответствии с существующими требованиями основными параметрами, определяющими качество электроэнергии, являются: установившееся отклонение напряжения, отклонение частоты, размах изменения напряжения, коэффициент искажения синусоидальности кривой междупазного (фазного) напряжения и др. Наибольшей изменчивости подвержено напряжение в отдельных узлах электрической сети, причем его изменение оказывает наиболее сильное влияние на работу потребителей. Причины появления и характер влияния отклонений и колебаний напряжения на работу приемников электрической энергии различны и подробно рассмотрены в [8].

Отклонения напряжения вызываются в основном изменениями режима работы потребителей и характеризуют качество напряжения на шинах приемников электрической энергии в статических режимах. Отклонение напряжения ΔU_i в i -й точке сети определяется как разность между фактическим значением напряжения U_i и его номинальным значением $U_{\text{ном}}$ при сравнительно медленном изменении режима работы, выраженная в процентах от значения $U_{\text{ном}}$

$$\Delta U_i = \frac{U_i - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \% . \quad (1)$$

Каждый приемник электрической энергии имеет наилучшие технико-экономические показатели при определенном напряжении на его зажимах. Отклонение напряжения от номинального значения приводит к изменению технико-экономических показателей и при определенных значениях может вызвать нарушение работоспособности. Одновременно отклонения напряжения снижают экономичность работы электрической сети за счет изменения потерь мощности и энергии. Таким образом, отклонения напряжения

в отдельных точках сети оказывают влияние на всю СЭС и на объект в целом [9]. Особенно важным становится обеспечение качества электрической энергии, вырабатываемой с помощью ВЭУ, поскольку первичный источник энергии – ветер – обладает собственной нестабильностью.

Причины возникновения потери напряжения

Понятие «потеря напряжения» и ее причины поясняются простейшей системой электроснабжения, представленной однолинейной схемой на рис. 1а. Здесь передача энергии от ВЭУ к потребителям (П1–П3) осуществляется по воздушным и кабельным линиям электропередачи (Л1–Л3). Эквивалентная схема замещения линии Л1 представлена на рис. 1б, где $R_{л}$ и $x_{л}$ – соответственно эквивалентные активное и реактивное сопротивления линии электропередачи и трансформаторов Т1 и Т2, а $I_{л}$ – ток в линии, равный току нагрузки $I_{н}$.

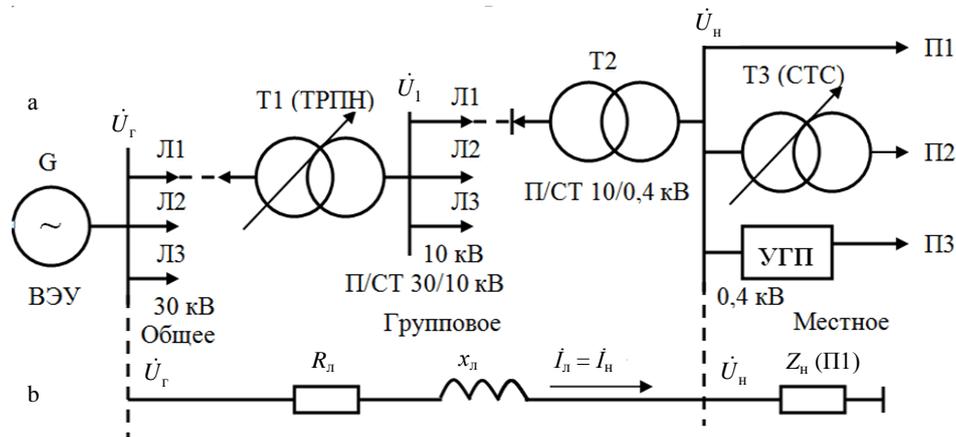


Рис. 1. Упрощенная схема системы электроснабжения:
а – однолинейная схема; б – эквивалентная схема замещения

Fig. 1. Simplified scheme of the electric power system:
а – single line scheme; б – equivalent circuit

На рассматриваемом участке сети от ВЭУ до потребителя имеет место падение напряжения на активном $R_{л}$ ($R_{л}I_{л}$) и реактивном $x_{л}$ ($jx_{л}I_{л}$) сопротивлениях, которые обусловлены протеканием тока в линии $I_{л} = I_{н}$. В результате величина напряжения на нагрузке $U_{н}$ будет меньше напряжения на шинах ВЭУ $U_{г}$ на величину потерь напряжения $U_{л}'$.

Для определения $U_{л}'$ рассмотрим векторную диаграмму для токов и напряжений в линии (рис. 2) согласно схеме замещения (рис. 1б). Напряжение на шинах ВЭУ составляет

$$\dot{U}_{г} = \dot{U}_{н} + R_{л}\dot{I}_{л} + jx_{л}\dot{I}_{л} = \dot{U}_{н} + Z_{л}\dot{I}_{л}, \quad (2)$$

где $Z_{л}$ – полное сопротивление линии; $Z_{л}\dot{I}_{л}$ – суммарное падение напряжения в линии.

Как следует из рис. 2, величина $U'_л$ определяется отрезком $AC = AE$ и для рассматриваемых сетей она обычно составляет $U'_л = (5-20) \% U_н$. В этом случае можно считать, что величина OE приблизительно равна проекции вектора AC на прямую OE , т. е. $\Delta U'_л \approx \Delta U_л$.

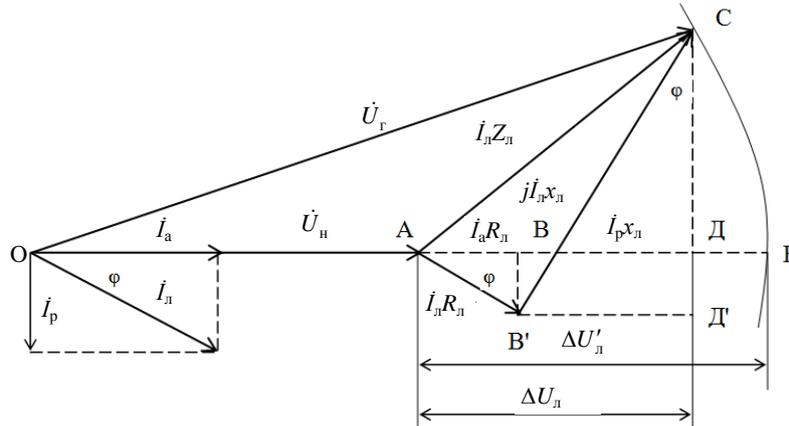


Рис. 2. Векторная диаграмма токов и напряжений в линии
 Fig. 2. Vector diagram of currents and voltages in the line

Тогда из векторной диаграммы следует, что

$$\Delta U_л = R_л I_л \cos \varphi + j x_л I_л \sin \varphi = R_л I_a + x_л I_p, \quad (3)$$

где I_a , I_p – соответственно активная и реактивная составляющие тока в линии.

Выражение (3) можно представить в следующем виде:

$$\Delta U_л = \frac{R_л P + x_л Q}{U_н}, \quad (4)$$

где P , Q – соответственно активная и реактивная мощности.

Из (3) и (4) следует, что потери напряжения в линии зависят от сопротивлений линии $R_л$ и $x_л$, изменения тока нагрузки $I_н = I_л$ и потребляемой мощности. В результате напряжение на шинах приемников электрической энергии $U_н$ не остается постоянным, и для протяженных электрических сетей с несколькими ступенями трансформации потери напряжения в линии могут достигать 20–40 %. Это означает, что без применения специальных мер по регулированию напряжения обеспечить требуемое качество напряжения на шинах нагрузки в СЭС практически невозможно.

Основные виды и способы регулирования напряжения в системах электроснабжения

Регулирование напряжения в СЭС – это принудительное его изменение специальными способами и средствами с целью обеспечения требуемого

качества напряжения на зажимах приемников электрической энергии для эффективного их использования, а также создания условий для экономичной передачи электроэнергии с наименьшими затратами реактивной и потерями активной мощности. Особенно остро необходимость регулирования напряжения возникает в разветвленных электрических сетях при параллельной работе с ВЭУ. Это происходит ввиду следующих особенностей:

- малой удельной плотности нагрузок;
- значительной протяженности воздушных и кабельных линий;
- существенного различия в нагрузках при разных режимах работы потребителей электроэнергии.

В зависимости от структуры электрической сети, количества потребителей и протяженности линий электропередачи применяют следующие виды регулирования (рис. 1а): централизованное (общее и групповое) и децентрализованное (местное). Общее регулирование осуществляют в центрах питания с помощью электрических станций или подстанций. Такое регулирование приводит к изменению напряжения во всей распределительной сети и может быть применено для однородных потребителей, находящихся примерно в равных условиях и имеющих совпадающие по времени графики нагрузок. Групповое регулирование применяют для неоднородных потребителей. Оно осуществляется в основном с помощью регулируемых трансформаторов (Т1, рис. 1а) для каждой отдельной линии или нескольких однородных линий, отходящих от центра питания.

Чем дальше потребитель удален от источника питания, тем труднее обеспечить заданное качество напряжения на его шинах. В этом случае применяют децентрализованное регулирование. Оно может осуществляться с помощью силовых стабилизаторов (Т3, рис. 1а), устанавливаемых на отдельных участках линии или непосредственно на шинах потребителей. При этом для ответственных потребителей применяют установки гарантированного питания (УГП).

Местное регулирование является более сложным. Поэтому его применяют в том случае, когда необходимо обеспечить электроснабжение приемников электрической энергии первой категории. В схеме рис. 1а при передаче электроэнергии от ВЭУ к потребителям осуществляется трехступенчатое регулирование напряжения с помощью электрического генератора ВЭУ (G), регулируемого трансформатора Т1, силового стабилизатора Т3 и УГП. При этом для реализации того или иного вида регулирования напряжения в СЭС применяют следующие способы:

- принудительное изменение напряжения на питающем конце линии – генераторе ВЭУ;
- изменение параметров электрической сети за счет компенсации ее реактивного сопротивления;
- генерирование реактивной мощности в определенных точках СЭС.

Рассматриваемые способы могут быть реализованы различными средствами. Первый способ регулирования является основным. Он обеспечивается за счет регулирования напряжения асинхронных генераторов ВЭУ

с помощью батарей компенсирующих конденсаторов [10] и использования регулируемых трансформаторов для подключения ВЭУ к СЭС. Последние два способа – дополнительные, но их необходимо применять совместно с первым, так как в ряде случаев батареи компенсирующих конденсаторов асинхронных генераторов ВЭУ из-за большой дискретности регулирования не обеспечивают достаточного качества электроэнергии.

При втором способе регулирования в линию электропередачи последовательно с нагрузкой включают реакторы или конденсаторы последовательно-емкостной компенсации (рис. 3а). Генерирование реактивной мощности обеспечивается за счет подключения параллельно нагрузке различных компенсирующих устройств (конденсаторов, силовых дросселей, синхронных компенсаторов). Выбор того или иного способа регулирования осуществляют на основании технико-экономических расчетов. Определение степени автоматизации регулирования напряжения в СЭС сводится к выбору способов и средств регулирования параметров качества электроэнергии.

Регулирование напряжения за счет изменения параметров электрической сети

При данном способе регулирования напряжения снижение его потерь в линии достигается за счет уменьшения ее реактивного сопротивления x_n . Для этой цели последовательно с линией, обладающей индуктивным сопротивлением x_L , включается конденсатор с емкостным сопротивлением x_C (рис. 3а). В результате уменьшается суммарное реактивное сопротивление линии $x_n = x_L - x_C < x_L$. Если сопротивление линии имеет емкостный характер (кабельные линии электропередачи), то последовательно с ней включают реактор, обладающий реактивным сопротивлением, который также изменяет параметры электрической сети в сторону уменьшения общего сопротивления линии.

Схема замещения линии с продольной емкостной компенсацией представлена на рис. 3а, а соответствующая ей векторная диаграмма токов и напряжений – на рис. 3с. На рис. 3б приведена векторная диаграмма этой же линии без компенсации. Из сопоставления векторных диаграмм рис. 3б и 3с видно, что $\Delta U' < \Delta U$. Выражение для определения $\Delta U'$ по аналогии с соотношением (3) будет иметь следующий вид:

$$\Delta U' \approx \dot{I}_a R_n + (x_L - x_C) \dot{I}_p, \quad (5)$$

где \dot{I}_a , \dot{I}_p – соответственно активная и реактивная составляющие тока в линии.

Как следует из рис. 3с, напряжение на нагрузке U'_n возросло на величину надбавки δU_k , которую можно определить по формуле

$$\delta U_k = \left(1 + \frac{\Delta U_1}{100}\right) \left(\frac{1}{\cos \varphi_n} - 1\right), \quad (6)$$

где ΔU_1 – отклонение напряжения U_1 на питающем конце линии (ВЭУ).

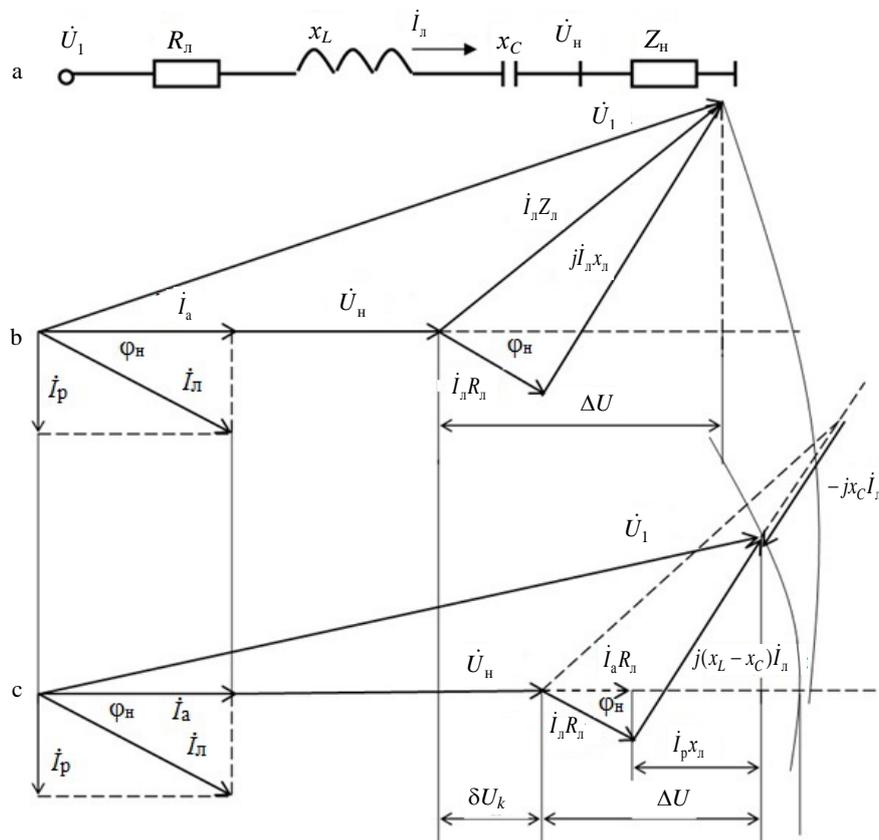


Рис. 3. Продольная емкостная компенсация индуктивного сопротивления линии:
а – эквивалентная схема замещения; б – векторная диаграммы токов и напряжений
без компенсации; с – то же с емкостной компенсацией

Fig. 3. The longitudinal capacitive compensation of the inductive reactance of the line:
а – equivalent circuit; б – vector diagram of currents and voltages without compensation;
с – vector diagram of currents and voltages with capacitive compensation

Из (5) и (6) следует, что эффективное использование продольной емкостной компенсации возможно лишь при достаточно больших реактивных токах I_p и малых значениях $\cos \varphi_n$. При этом если $\cos \varphi_n = 1$, т. е. $I_p = 0$, то потеря напряжения в линии будет определяться только активным сопротивлением R_l , а надбавка $\delta U_k = 0$. В этом случае продольная емкостная компенсация окажется бесполезной. Поэтому использование такого способа регулирования целесообразно только в СЭС с относительно низким коэффициентом мощности ($\cos \varphi_n \leq 0,7-0,9$), который типичен при парал-

лельной работе с ВЭУ из-за существующей нестабильности скорости ветра.

Таким образом, регулирование напряжения при параллельной работе ВЭУ с асинхронным генератором в СЭС за счет изменения параметров электрической сети позволит обеспечить требуемое качество напряжения на шинах потребителей и создать необходимые условия для экономичной передачи электрической энергии с наименьшими затратами реактивной и потерями активной мощности.

ВЫВОДЫ

1. Продольная компенсация не требует специального автоматического регулятора, так как при изменении тока нагрузки изменяется компенсирующее напряжение, которое соответствующим образом нивелирует появившуюся потерю напряжения.

2. Продольная емкостная компенсация является безынерционным средством регулирования, поскольку скорость нарастания падения напряжения на реактивном сопротивлении практически равна скорости нарастания тока компенсации.

3. Применение продольной компенсации целесообразно при параллельной работе с ветроустановкой в высоковольтных электрических сетях напряжением 10, 20 и 30 кВ.

4. Продольную компенсацию особенно выгодно использовать в системах электроснабжения с низким коэффициентом мощности и изменяющимся режимом нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ролик, Ю. А. Обеспечение бесперебойности электроснабжения ветроэлектростанций путем совершенствования способов контроля исправности масляных трансформаторов / Ю. А. Ролик, А. В. Горноста́й // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2010. № 4. С. 21–27.
2. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии: справочник-каталог / В. И. Виссарионов [и др.]. М.: Фирма «ВИЭН», 2004. 448 с.
3. Twidell, J. W. Renewable Energy Resources / J. W. Twidell, D. W. Anthony. London: Taylor & Francis, 2006. 601 p.
4. Удалов, С. Н. Возобновляемые источники энергии / С. Н. Удалов. 3-е изд., перераб. и доп. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. 459 с.
5. Лукутин, Б. В. Возобновляемые источники энергии / Б. В. Лукутин. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008. 187 с.
6. Лукутин, Б. В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении / Б. В. Лукутин, О. А. Суржикова, Е. Б. Шандарова. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.
7. Сибикин, Ю. Д. Нетрадиционные возобновляемые источники энергии / Ю. Д. Сибикин, М. Ю. Сибикин. М.: РадиоСофт, 2008. 228 с.
8. Автоматизация энергетических систем / О. П. Алексеев [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1994. 448 с.
9. Толшин, В. И. Автоматизация судовых энергетических установок / В. И. Толшин, В. А. Сизых. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ТРАНСЛИТ, 2006. 352 с.

10. Квитко, А. В. Генераторы электроэнергии ветроэлектрических установок и способы стабилизации их напряжения / А. В. Квитко, А. О. Хицкова // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 98. С. 24–36.

Поступила 17.11.2015. Подписана в печать 19.01.2016 Опубликована онлайн 03.06.2016

REFERENCES

1. Rolik Yu. A., Gornostay A. V. (2010) Continuity of Electric Power Supply of Wind Power by Improving the Methods of Testing of Oil Transformers. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG* [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (4), 21–27 (in Russian).
2. Vissarionov V. I., Belkina S. V., Deriugina G. V., Kuznetsova V. A., Malinin N. K. (2004) *Energy Equipment for the use of Alternative and Renewable Power Sources. A Guide-Catalogue*. Moscow, Firm VIEN. 448 (in Russian).
3. Twidell J. W., Anthony D. W. (2006) *Renewable Energy Resources*. London, Taylor & Francis. 601.
4. Udalov S. N. (2014) *Renewable Power Sources*. 3rd ed. Novosibirsk: NSTU Publ. 459 (in Russian).
5. Lukutin B. V. (2008) *Renewable Power Sources*. Tomsk: Tomsk Polytechnic Univ. Publ. 187 (in Russian).
6. Lukutin B. V., Surzhikova O. A., Shandarova Ye. B. (2008) *Renewable Power Engineering in a Decentralized Supply*. Moscow: Energoatomizdat. 231 (in Russian).
7. Sibikin Yu. D., Sibikin M. Yu. (2008.) *Unconventional Renewable Power Sources*. Moscow, RadioSoft. 228 (in Russian).
8. Alekseev O. P., Kozis V. L., Krivenkov V. V., Morozkin V. P., Ovcharenko N. I., Ornov V. G., Panfilov N. I., Rozhkov M. G., Semenov V. A., Engelage D. (1994) *Automation of Power Systems*. Moscow: Energoatomizdat. 448 (in Russian).
9. Tolshin V. I., Sizyh V. A. (2006) *Automation of Marine Power Plants*. 3rd ed. Moscow: TRANSLIT. 352 (in Russian).
10. Kvitko A. V., Hitskova A. O. (2014) The Generators of Wind Power Plants and Ways to Stabilize their Voltage. *Nauchnyy Zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of Kuban State Agricultural University], (98), 24–36 (in Russian).

Received: 17.11.2015

Accepted: 19.01.2016

Published online: 03.06.2016