

1. Выявление особенностей расчета НЭТ с учетом их области использования и режима работы.
2. Выявление факторов, в большей степени влияющих на показатели НЭТ, и задание целевых функций, накладывающих ограничение на область допустимых значений.
3. Получение необходимых математических моделей на основе метода планирования эксперимента.
4. Исследование этих моделей и получение рекомендаций по проектированию с использованием графических построений или численных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сериков А.В., Кузьмин В.М. Электронагревательные элементы и устройства трансформаторного типа для систем энергообеспечения: моногр. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 247 с.
2. Электронагреватель трансформаторного типа: свид. на ПМ № 13133 Рос. Федерация. № 99117308/20; заявл. 06.08.99; опубл. 20.03.00, Бюл. № 8. – 3 с.
3. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с., ил.
4. Прайс-лист на обмоточные провода ООО «Формопласт М». 2012. URL: <http://www.formoplast-m.ru> (дата обращения: 23.03.2012).
5. Прайс-лист на цветной металл компании «Полиасмет». 2012. URL: <http://poliasmet.ru/alyumi-niy/lyuminiy-list.html> (дата обращения: 23.03.2012).
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.

Поступила 08.06.2012 г.

УДК 681.513.1

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ МИКРОГЭС БАЛЛАСТНОГО ТИПА

Б.В. Лукутин, Е.Б. Шандарова

Томский политехнический университет
E-mail: bvl@tpu.ru

Показана возможность одновременного регулирования как активной, так и реактивной составляющей результирующей нагрузки микроГЭС с автобалластным регулированием выходного напряжения, построенной на полностью управляемых полупроводниковых вентилях. В диапазоне наиболее характерных для практики применения микроГЭС нагрузок предложено использовать балластную нагрузку активно-индуктивного характера с $\cos\phi_0=0,8$, а также установлены аналитические зависимости полиномиального типа для автоматизированного вычисления углов фазового управления вентилями балласта в зависимости от параметров полезной нагрузки станции.

Ключевые слова:

Микрогидроэлектростанция, возобновляемые энергоресурсы, система стабилизации частоты, стабилизация напряжения, эквивалентная нагрузка, балластная нагрузка, одноканальная система.

Key words:

Micro-hydro-electric power station, renewable energy sources, frequency stabilization system, voltage stabilization, equivalent load, ballast load, single channel system.

Малая гидроэнергетика по сравнению с другими традиционными видами электроэнергетики является наиболее экономичным и экологически безопасным способом получения электроэнергии. МикроГЭС (микрогидроэлектростанции) позволяют сохранять окружающую среду и природный ландшафт не только на этапе эксплуатации, но и в процессе строительства. В отличие от других экологически безопасных возобновляемых источников электроэнергии таких, как солнце, ветер, малая гидроэнергетика практически не зависит от погодных и временных условий и способна обеспечить устойчивую подачу электроэнергии потребителю.

Создание современных автоматизированных микрогидроэлектростанций (микроГЭС) требует проведения глубоких исследований, необходимость которых объясняется сложностью процессов пре-

образования потока воды в электроэнергию со стабильными параметрами. Тенденция к упрощению гидротехнической части станции существенно повышает требования к устройствам генерирования электроэнергии и стабилизации ее параметров [1].

Возмущающими воздействиями для гидроагрегата являются изменения энергии рабочего потока воды и колебания величины мощности нагрузки, уравновешивающей мощность, развиваемую гидродвигателем. Если стабилизировать поток воды с помощью напорного трубопровода, то, выбирая соответствующую нагрузку источника электропитания, можно стабилизировать частоту вращения гидрогенератора, а, следовательно, и выходное напряжение.

Изменять величину нагрузки микроГЭС возможно включением на выход генератора автомати-

чески регулируемой балластной нагрузки, в качестве которой может использоваться некоторая полезная нагрузка, например, тепловая.

Данный способ стабилизации выходных параметров микроГЭС подразумевает автоматическое перераспределение электрической мощности между потребителями, часть из которых (балластные) допускает снижение величины питающего напряжения или его отключение. Балластные системы обеспечивают высокое качество регулирования выходного напряжения в установившихся и переходных режимах при хороших эксплуатационных и надежностных характеристиках станции [2].

Один из перспективных способов регулирования электрической нагрузки станции предусматривает использование в регуляторах автобалласта вентильных схем с фазовым регулированием. Балластная нагрузка подключается параллельно полезной, при этом система управления формирует определенный угол управления вентилями регулятора в зависимости от величины управляющего воздействия, характеризующего отклонение выходных электрических параметров установки относительно номинальных значений. Такие регуляторы требуют небольшого количества вентилях для построения силовых схем и в наибольшей степени удовлетворяют основным требованиям, предъявляемым к микроГЭС – простоте и надежности [2].

В настоящее время распространены одноканальные автобалластные системы, стабилизирующие суммарный потребляемый ток генератора, что позволяет стабилизировать в определенных пределах величину и частоту напряжения станции деривационного типа.

Однако одноканальная автобалластная система с естественной коммутацией вентилях не позволяет одновременно повышать точность стабилизации величины и частоты выходного напряжения, поскольку при фазовом регулировании вентилях регулятора балласта происходит изменение не только величины, но и характера эквивалентной нагрузки генератора, определяемой по основным гармоникам тока и напряжения [2].

Для улучшения стабилизации параметров генерируемой электроэнергии предлагается использование фазорегулируемых автобалластных систем, построенных на основе двухоперационных тиристоров или на силовых транзисторах. Подобные системы позволяют осуществлять независимое регулирование амплитуды и фазы основной гармоники тока балласта, что позволяет с большей точностью поддерживать постоянство величины и характера эквивалентной результирующей нагрузки станции и, соответственно, постоянство величины и частоты генерируемого напряжения микроГЭС.

Стабилизация величины и характера эквивалентной нагрузки с помощью автобалластной системы, построенной на полностью управляемых тиристорах (или силовых транзисторах), обеспечивается за счет изменения углов включения α и записания β силовых вентилях.

Задачей исследования являлось определение зависимостей углов управления вентильного ключа α и β от полной мощности полезной нагрузки генератора при условии максимально возможной стабилизации величины и характера эквивалентной нагрузки станции.

Эквивалентная схема замещения фазы генератора микроГЭС с автобалластной системой регулирования представлена на рис. 1, где УК – управляемый ключ, построенный на тиристорах или силовых транзисторах; r_r, L_r – соответственно активное и индуктивное сопротивление якорной обмотки генератора [3]. Генератор работает на полезную нагрузку активно-индуктивного характера r_n, L_n . При изменении величины полезной нагрузки система управления вентилями формирует углы управления α и β , обеспечивающие подключение балластной нагрузки с параметрами r_b, L_b такой мощности, которая поддерживает постоянство активной и реактивной составляющих мощности генератора микроГЭС.

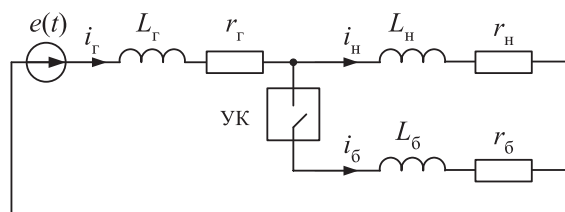


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения фазы генератора с активно-индуктивным балластом

В этой связи приобретает актуальность определение законов изменения углов α и β в функции от величины и характера полезной нагрузки станции при определенных параметрах балластной нагрузки. Решение этой задачи целесообразно осуществлять методами математического моделирования, позволяющими реализовывать численные эксперименты с использованием программных пакетов высокого уровня для проведения необходимых исследований.

Дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы при включении балластной нагрузки активно-индуктивного характера, имеют вид:

$$L_r \frac{di_r}{dt} + i_r r_r + L_b \frac{di_b(\alpha, \beta)}{dt} + i_b(\alpha, \beta) r_b = e(t);$$

$$L_n \frac{di_n}{dt} + i_n r_n - L_b \frac{di_b(\alpha, \beta)}{dt} - i_b(\alpha, \beta) r_b = 0;$$

$$i_r - i_n - i_b(\alpha, \beta) = 0.$$

При выключении балласта ток и напряжение генератора определяются по уравнению:

$$(L_r + L_n) \frac{di_r}{dt} + (r_r + r_n) i_r = e(t);$$

$$u(t) = e(t) - i_r r_r - L_r \frac{di_r}{dt}.$$

Численное моделирование режимов работы станции с автобалластной системой стабилизации

проводилось с использованием программы Simulink, являющейся приложением к пакету Matlab. В данной работе использовался блок SimPowerSystems, который в настоящее время может считаться одним из лучших пакетов для моделирования электротехнических устройств и систем.

При создании виртуальной модели были приняты следующие допущения: параметры рабочего потока воды стабильны; генератор эквивалентруется неискаженной ЭДС $e(t)$ с постоянными параметрами $L_r=0,1L_n$ и $r_r=0,04r_n$; полезная нагрузка активно-индуктивного характера r_n и L_n ; балластная нагрузка активно-индуктивного характера r_6, L_6 .

В качестве управляемого ключа использовался ГТО Thyristor – модель тиристора с искусственной коммутацией, работой которого управляет блок логики. В модели параллельно тиристорам включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

Созданная модель генерирующей системы микроГЭС с автобалластным регулированием позволяет исследовать режимы работы станции при изменении в широком диапазоне мощности и характера полезной нагрузки с автобалластной нагрузкой различного характера.

Регулирование балластной нагрузки осуществлялось по активной и реактивной составляющим мощности генератора. При изменении мощности полезной нагрузки от нуля до номинального значения, при неизменном $\cos\varphi_n$, определялись углы α и β , которые обеспечивали подключение активно-индуктивного балласта такой мощности, которая поддерживает постоянство активной и реактивной составляющих результирующей мощности генератора.

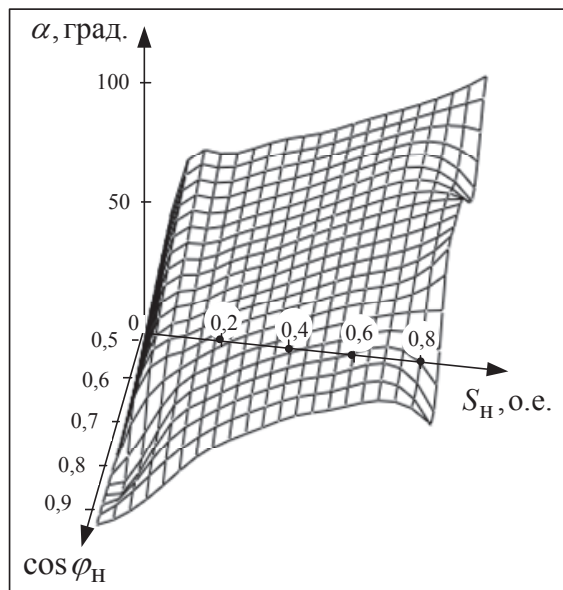
Исследования производились при изменении $\cos\varphi_n$ от 0,50 до 0,95. На рис. 2 представлены зависимости углов управления α и β от изменения мощности полезной нагрузки станции S_n для различных коэффициентов мощности нагрузки. Балластная нагрузка принималась активно-индуктивной с $\cos\varphi_6=0,80$. Величина номинальной балластной нагрузки принималась равной величине номинальной полезной нагрузки станции.

Активно-индуктивный балласт с $\cos\varphi_6=0,80$ позволяет полностью стабилизировать активную составляющую мощности генератора при изменении мощности активно-индуктивной нагрузки ($\cos\varphi_n=0,80$) от нуля до номинальной, при этом реактивную составляющую не удается точно стабилизировать только в диапазоне от $0,2S_n$ до $0,1S_n$. Погрешность стабилизации реактивной мощности в этом диапазоне составляет от 18 до 25 %.

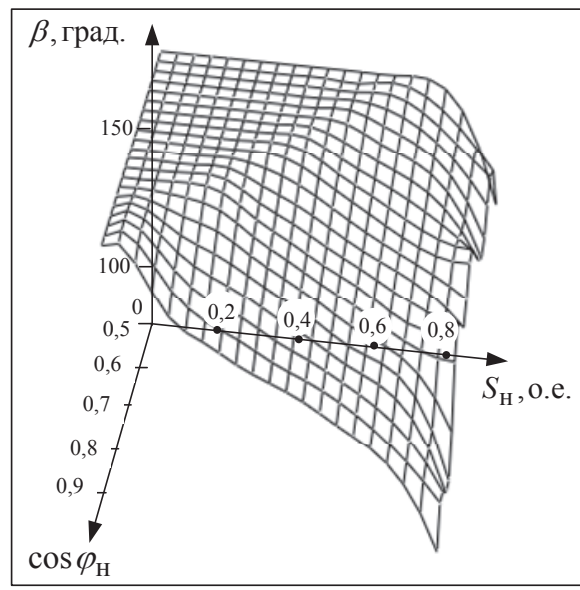
В ходе численных экспериментов также были получены зависимости, позволяющие определить углы управления вентилями $\alpha(\cos\varphi_n, S_n)$ и $\beta(\cos\varphi_n, S_n)$ при изменении полезной нагрузки станции с балластной нагрузкой различного характера: $\cos\varphi_6$ менялся от 0,70 до 0,90.

В результате проведенных расчетов было установлено, что при использовании в микроГЭС активно-индуктивного балласта с $\cos\varphi_6=0,70...0,90$ активную составляющую результирующей мощности генератора удается стабилизировать с высокой точностью при изменении величины полезной нагрузки с $\cos\varphi_n$ от 0,50 до 0,95 во всем диапазоне. Точность стабилизации реактивной мощности зависит от характера полезной и балластной нагрузок.

На рис. 3 представлены кривые, иллюстрирующие стабилизацию реактивной мощности в зависи-



а



б

Рис. 2. Зависимость углов управления α (а) и β (б) от изменения мощности полезной нагрузки станции S_n для разных $\cos\varphi_n$ при $\cos\varphi_6=0,80$

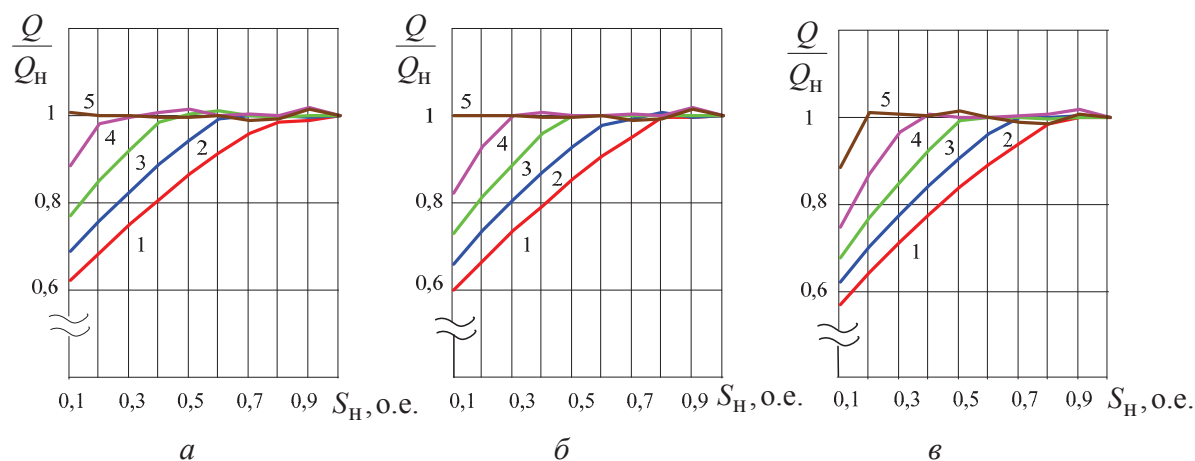


Рис. 3. Зависимость стабилизации реактивной мощности $\frac{Q}{Q_H}$ от изменения мощности полезной нагрузки станции S_H (кривая 1) $\cos\varphi_n=0,50$; 2) $\cos\varphi_n=0,60$; 3) $\cos\varphi_n=0,70$; 4) $\cos\varphi_n=0,80$; 5) $\cos\varphi_n=0,90$): а) семейство кривых для $\cos\varphi_0=0,70$; б) для $\cos\varphi_0=0,80$; в) для $\cos\varphi_0=0,90$

мости от изменения мощности нагрузки S_H при фиксированных значениях $\cos\varphi_n$, изменяющихся от 0,50 до 0,90. Точность стабилизации оценивается отношением текущей реактивной мощности к номинальной реактивной мощности нагрузки: $\frac{Q}{Q_n}$.

Проведенные исследования показали, что рациональным является выбор балластной нагрузки, модуль которой равен номинальной мощности генератора с $\cos\varphi_0=0,80$. Это позволяет полностью стабилизировать активную составляющую мощности генератора при изменении полезной нагрузки активно-индуктивного характера от нуля до номинальной. Выбранный балласт позволяет с высокой точностью стабилизировать реактивную составляющую мощности генератора при $\cos\varphi_n=0,90$ и 0,80 для наиболее распространенного на практике диапазона изменения полезной нагрузки станции от $0,2S_H$ до $0,95S_H$.

При понижении коэффициента мощности нагрузки, погрешность стабилизации увеличивается с уменьшением мощности полезной нагрузки станции. Так, для $\cos\varphi_0=0,80$ относительная погрешность стабилизации реактивной мощности с нагрузкой от $0,2S_H$ до $0,1S_H$ составляет при $\cos\varphi_n=0,50$ от 35 до 40 %; при $\cos\varphi_n=0,60$ от 35 до 25 %; при $\cos\varphi_n=0,70$ от 25 до 20 % (рис. 3).

Если полезная нагрузка станции меняется от $0,4S_H$ до $0,95S_H$, то относительная погрешность стабилизации реактивной мощности составляет от 13 до 8 % при коэффициенте мощности нагрузки 0,60 и $\cos\varphi_0=0,80$. При изменении $\cos\varphi_n$ от 0,60 до 0,90 реактивная составляющая стабилизируется с высокой точностью при активно-индуктивном балласте с $\cos\varphi_0=0,70\dots 0,80$ (рис. 3).

Уменьшение коэффициента мощности балластной нагрузки позволяет более точно стабилизировать реактивную мощность (рис. 3) для режимов

работы станции, близких к холостому ходу, что в большинстве случаев практически не оправдано по соображениям энергоэффективности.

Важным результатом работы являлось получение формул, в которых оптимальные углы управления балластной нагрузкой были бы связаны с изменением полезной нагрузки станции. Серия численных экспериментов позволила установить зависимость угла открытия управляемых вентилей от изменения полной мощности и характера полезной нагрузки:

$$\alpha(S_H, \cos\varphi_n) = k_1(\cos\varphi_n)e^{S_H} + k_2(\cos\varphi_n)\sin(S_H) + k_3(\cos\varphi_n)S_H, \quad (1)$$

где

$$k_1(\cos\varphi_n) = -679 \cdot \cos\varphi_n + 687 \cdot \sin(\cos\varphi_n) + 78;$$

$$k_2(\cos\varphi_n) = -8435 \cdot \sin(\cos\varphi_n) + 636 \cdot \cos(\cos\varphi_n) + 7333 \cdot \cos\varphi_n;$$

$$k_3(\cos\varphi_n) = 6142 \cdot \sin(\cos\varphi_n) - 637 \cdot \cos(\cos\varphi_n) - 5208 \cdot \cos\varphi_n.$$

Формула для определения оптимального угла закрытия управляемых вентилей, при изменении мощности и характера полезной нагрузки имеет вид:

$$\beta(S_H, \cos\varphi_n) = k_4(\cos\varphi_n)S_H^2 + k_5(\cos\varphi_n)\cos(S_H) + k_6(\cos\varphi_n)S_H, \quad (2)$$

где

$$k_4(\cos\varphi_n) = -4719 \cdot \sin(\cos\varphi_n) + 371 \cdot \cos(\cos\varphi_n) + 3957 \cdot \cos\varphi_n;$$

$$k_5(\cos\varphi_n) = 124 \cdot \cos^2(\cos\varphi_n) + 180 \cdot \cos(\cos\varphi_n) - 28 \cdot \cos\varphi_n;$$

$$k_6(\cos\varphi_n) = 1477 \cdot \sin(\cos\varphi_n) + 2206 \cdot \cos(\cos\varphi_n) - 2610 \cdot \cos\varphi_n.$$

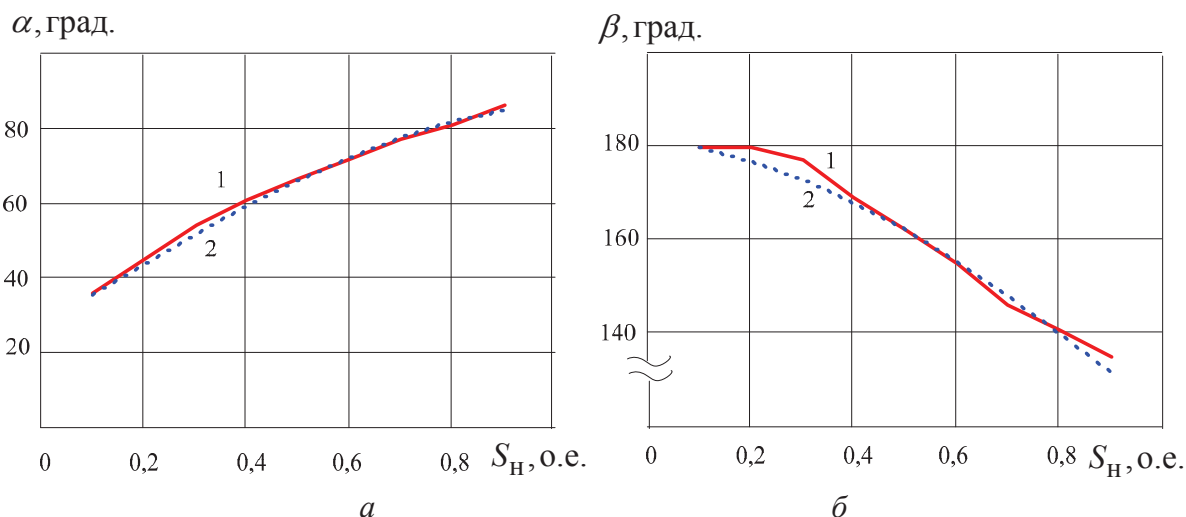


Рис. 4. Зависимости углов управления $\alpha(a)$ и $\beta(b)$ от изменения мощности полезной нагрузки станции для $\cos\varphi_n=0,80$ и $\cos\varphi_0=0,80$: 1) экспериментальная; 2) расчетная зависимости

Зависимости (1) и (2) определены путем аппроксимации данных в результате численного моделирования режимов работы станции по методу наименьших квадратов линейной комбинацией произвольных функций. Полученные зависимости полиномиального типа дают точный результат при изменении мощности полезной нагрузки от $0,9S_H$ до $0,1S_H$.

На рис. 4 представлены зависимости углов управления от изменения мощности полезной нагрузки активно-индуктивного характера для $\cos\varphi_n=0,80$ и $\cos\varphi_0=0,80$.

Анализируя кривые, можно отметить, что значения углов, определенные по математической модели и рассчитанные по формулам (1), (2) практически полностью совпадают.

Полученные зависимости могут служить основой для создания микропроцессорных систем стабилизации выходного напряжения микроГЭС, обладающих адаптивными свойствами по отноше-

нию к изменяющемуся графику электрических нагрузок станции.

Выводы

Проведенные исследования позволили установить возможность одновременного регулирования как активной, так и реактивной составляющей результирующей нагрузки микроГЭС с автобалластным регулированием выходного напряжения, построенной на полностью управляемых полупроводниковых вентилях.

В диапазоне наиболее характерных для практики применения микроГЭС нагрузок предложено:

1. Использовать балластную нагрузку активно-индуктивного характера с $\cos\varphi_0=0,80$.
2. Установлены аналитические зависимости полиномиального типа для автоматизированного вычисления углов фазового управления вентилями балласта в зависимости от параметров полезной нагрузки станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / под ред. В.И. Виссарионова. – М.: ВИЭН, 2004. – 448 с.
2. Davis S. Microhydro: Clean Power from Water. – Canada: New Society Publishers, 2003. – 176 p.

3. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.

Поступила 13.03.2012 г.