



УДК 620

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ ОБОСНОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

*С.Е. Щеклеин, В.В. Власов*

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина  
620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19  
Тел./факс: (343) 375-95-08, тел.: (343) 375-47-78  
E-mail: vadimvv@e1.ru, aes@mail.ustu.ru, s.e.sheklein@ustu.ru

Заключение совета рецензентов: 21.03.12    Заключение совета экспертов: 25.03.12    Принято к публикации: 28.03.12

Предложен метод описания климатических процессов, учитывающий нестационарность их статистических свойств. По данным измерений выполнен анализ процессов изменения интенсивности солнечного излучения, температуры наружного воздуха и скорости ветра. На основе комбинации аддитивной и мультипликативной статистических моделей описано поведение исследуемых климатических процессов. Выполнен анализ остатков после исключения детерминированной компоненты.

Ключевые слова: возобновляемый источник энергии, случайная и детерминированная компоненты климатических процессов, модель нестационарного случайного процесса.

## **NONSTATIONARY RANDOM PROCESSES MODELING IN RENEWABLE ENERGY PROBLEMS**

*S.E. Shcheklein, V.V. Vlasov*

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin  
19 Mira ave., Yekaterinburg, 620002, Russia  
Tel./fax: (343) 375-95-08, tel.: (343) 375-47-78  
E-mail: vadimvv@e1.ru, aes@mail.ustu.ru, s.e.shcheklein@ustu.ru

Referred: 21.03.12    Expertise: 25.03.12    Accepted: 28.03.12

A method for the description of climate processes, taking into account the unsteadiness of their statistical properties is offered. According to measurements an analysis of the changes in the intensity of solar radiation, ambient temperature and wind speed carried out. Based on a combination of additive and multiplicative statistical models the behavior of the investigated climate processes describe. The analysis of the residue after the deterministic components exclusion is made.

Keywords: renewable energy, stochastic and deterministic components of weather parameters, model of nonstationary random process.

Одним из перспективных направлений развития малой энергетики является комбинирование традиционных энергоресурсов и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Использование ВИЭ обусловлено рядом преимуществ:

– повышением эффективности малой энергетики за счет экономии энергоресурсов (замещения топлива и сетевой электроэнергии);

– обеспечением надежности энергоснабжения локальных потребителей за счет использования ВИЭ вблизи нагрузки;

– снижением локальной экологической нагрузки за счет уменьшения вредных выбросов в атмосферу.

Наряду с преимуществами ВИЭ обладают недостатками, которые заключаются в их пространственной и временной неоднородности, а также высоких капи-

тальных затрат на единицу установленной мощности. Эти факторы усложняют задачи выбора структуры и параметров систем энергоснабжения, которые определяются не только взаимосвязями процессов производства и потребления энергии, но и требованиям надежного функционирования. С одной стороны, автономность энергокомплексов на основе ВИЭ позволяет рассматривать их как системы локального энергоснабжения изолированных потребителей. С другой стороны, возобновляемая энергия поступает в локальную систему энергоснабжения из внешней среды. Таким образом, объект исследования сам является элементом более сложной системы. К решению таких проблем применима методология системного подхода, а выбор оптимальных схем энергоснабжения должен осуществляться по критериям эффективности с учетом взаимосвязи с внешней средой. Основная сложность заключается в получении статистически значимых оценок влияния внешних факторов, учитывающих их неравномерное распределение во времени. Один из путей решения данной проблемы заключается в описании внешних факторов с учетом нестационарности их статистических свойств. Методами анализа нестационарных случайных процессов можно выявлять закономерности, обусловленные влиянием детерминированных факторов, что не представлялось возможным при использовании методов описательной статистики, которые традиционно применяются при оценке энергетического потенциала ВИЭ. Это позволит повысить достоверность решения задач по повышению эффективности и надежности систем энергоснабжения с использованием ВИЭ.

### Методика анализа

В задачах обоснования ВИЭ для оценки влияния внешних климатических факторов традиционно применяются методы описательной статистики, которые заключаются в комбинировании двух основных подходов: 1) усреднения в пределах длительных интервалов времени, например, среднемесячные и среднегодовые значения; 2) использования статистических распределений, параметры которых также получены усреднением по времени, например, описание ветровых режимов распределением Вейбулла. В то же время реальные геофизические процессы подвержены циклическим колебаниям как кратковременного (суточные циклы), так и долгосрочного характера (годовые циклы). Кроме того, климатические данные, как правило, представлены выборками небольшого объема. Эффективной заменой традиционных методов при малой длине реализации и наличии априорной информации о процессе могут служить параметрические методы, применяемые в радиофизике, экономических и социологических исследованиях [1-9].

Наличие закономерностей в климатических процессах приводит к нарушению стационарности их статистических свойств. Возможным способом описания таких процессов является исключение детерми-

нированной компоненты и сведение к стационарным процессам. Поскольку климатические процессы подвержены годовым и суточным циклическим изменениям, для их описания можно применить теорию модулированных колебаний, которая широко используется в радиофизике и описана в работах [7, 8].

Таким образом, детерминированную составляющую таких процессов можно представить функцией

$$a(t) = (1 + M \cos(\Omega t + \psi)) f(t), \quad (1)$$

где  $f(t)$  – периодическая последовательность суточных колебаний;  $M$ ,  $\Omega$ ,  $\psi$  – амплитуда, частота и фазовый угол годовых колебаний.

Воздействие детерминированных факторов на случайный процесс в общем виде можно описать комбинацией аддитивной (2) и мультипликативной (3) моделей:

$$x(t) = a(t) + u(t); \quad (2)$$

$$x(t) = a(t)u(t), \quad (3)$$

где  $u(t)$  – реализация стационарного случайного процесса;  $a(t)$  – детерминированная функция.

После исключения детерминированной составляющей оставшуюся часть можно считать случайной компонентой. Статистические свойства случайной составляющей процесса можно оценить, используя традиционно применяемые методы теории вероятности и математической статистики.

### Результаты анализа данных и их обсуждение

Поскольку исходные данные одновременно должны описывать кратковременные и долгосрочные изменения процессов, то, с одной стороны, требуется высокое разрешение, с другой стороны, при сохранении среднеквадратической ошибки следует увеличивать время наблюдения. То есть при заданной статистической точности разрешение и время наблюдения связаны между собой своего рода «соотношением неопределенности». Поэтому в данной работе выбран массив данных, охватывающих временной интервал 5 лет с периодом дискретизации 10 минут (общий объем данных  $2,6 \cdot 10^5$  точек). Диаграммы климатических процессов, построенные по данным измерений, представлены на рис. 1-3.

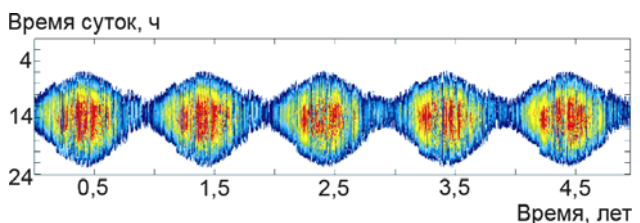
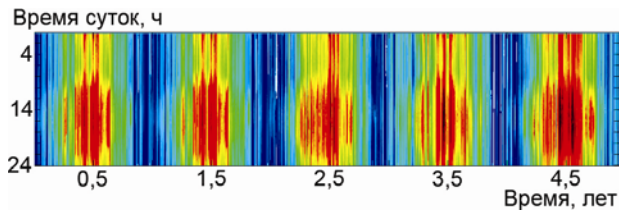
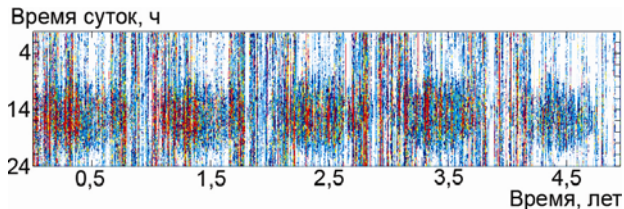


Рис. 1. Диаграмма изменения интенсивности солнечного излучения на горизонтальную поверхность

Fig. 1. The solar radiation intensity on a horizontal surface diagram



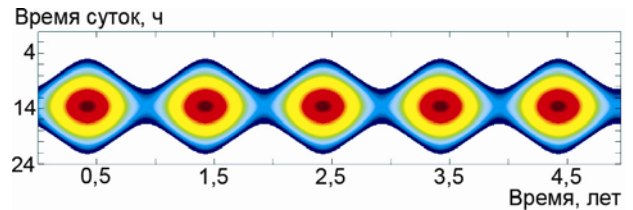
**Рис. 2.** Диаграмма изменения температуры  
**Fig. 2.** The temperature change diagram



**Рис. 3.** Диаграмма изменения скорости ветра  
**Fig. 3.** The wind rate change diagram

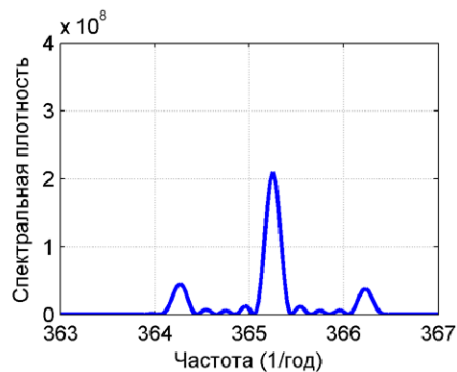
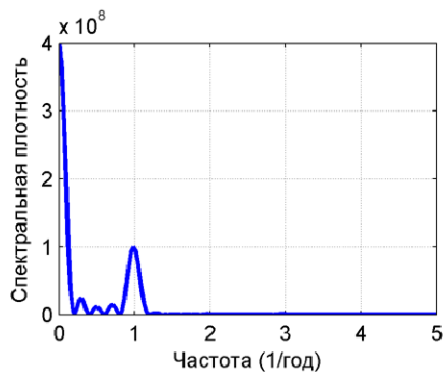
Циклическая повторяемость данных свидетельствует о наличии закономерностей с годовой и суточной периодичностью, которые повторяют особенности диаграммы внеатмосферного солнечного излучения, показанной на рис. 4. На диаграмме изменения

скорости ветра закономерности проявляются в наименьшей степени, что свидетельствует о преобладающем стохастическом характере этого процесса.

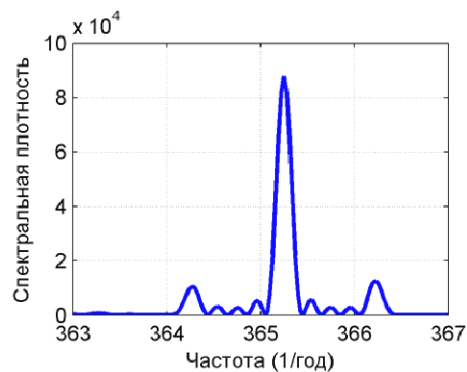
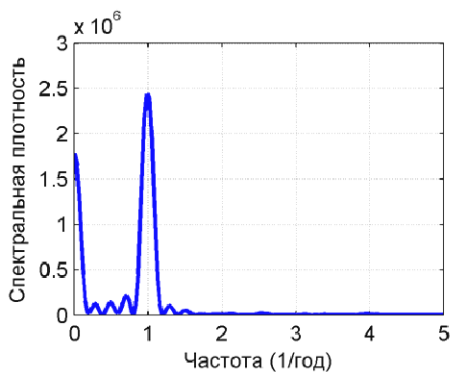


**Рис. 4.** Диаграмма изменения интенсивности внеатмосферного солнечного излучения на горизонтальную поверхность  
**Fig. 4.** The extra-atmospheric solar radiation intensity on a horizontal surface change diagram

При анализе периодических процессов целесообразно перейти от временного представления данных к частотному. На рис. 5-8 приведены спектры процессов, полученные с помощью алгоритма дискретного преобразования Фурье. Каждой периодической компоненте соответствуют пики спектральной характеристики с определенной частотой.



**Рис. 5.** Спектральная плотность интенсивности солнечного излучения  
**Fig. 5.** The solar radiation intensity spectral density



**Рис. 6.** Спектральная плотность температуры наружного воздуха  
**Fig. 6.** The outside air temperature spectral density

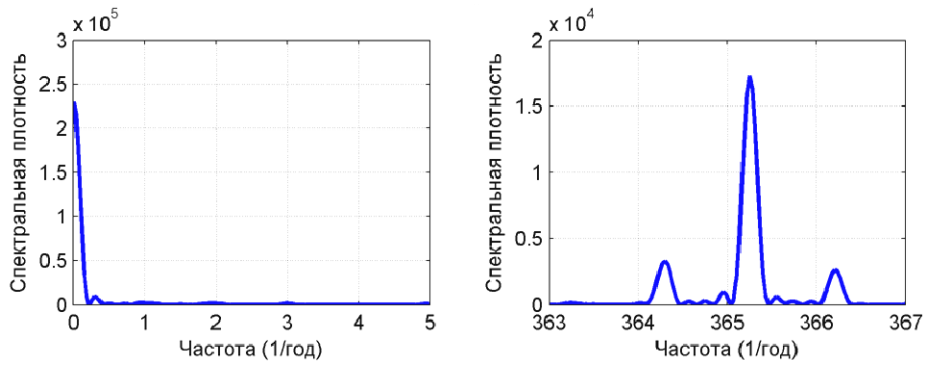


Рис. 7. Спектральная плотность скорости ветра  
 Fig. 7. The wind rate spectral density

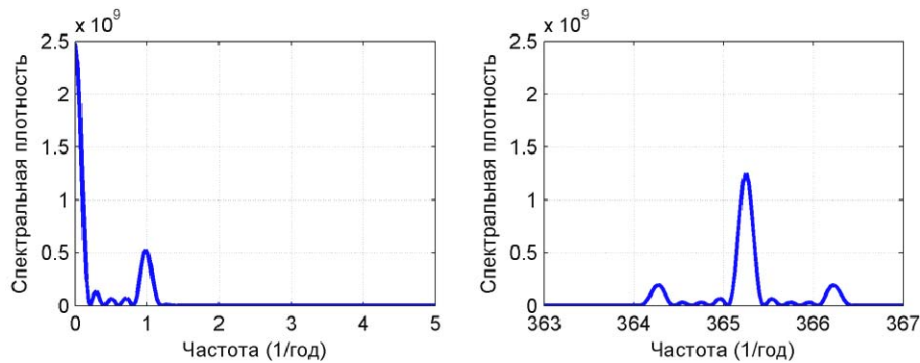


Рис. 8. Спектральная плотность интенсивности внеатмосферного солнечного излучения  
 Fig. 8. The extra-atmospheric solar radiation intensity spectral density

Вид спектральных характеристик свидетельствует о том, что климатические процессы имеют одинаковую частотную структуру. Из чего следует, что внеатмосферное солнечное излучение оказывает существенное влияние на формирование закономерностей исследуемых процессов. Максимумы спектральной плотности соответствуют годовой и суточной периодическим компонентам. Наличие боковых максимумов около суточной компоненты связано с эффектом модуляции колебаний. Поведение таких процессов в общем виде описывается (1).

После выявления закономерностей их можно исключить из исследуемых процессов. На данном этапе необходимо выбрать параметры модели, комбинируя зависимости (1) и (2). Вклад мультипликативной и аддитивной моделей в исследуемый случайный про-

цесс можно оценить по косвенным признакам, характерным для этих двух типов моделей [2]. В результате были получены формулы (4), (5), (6), выражающие соотношения детерминированной и случайной компонент для процессов изменения интенсивности солнечного излучения, температуры наружного воздуха и скорости ветра соответственно.

$$x(t) = (a(t) + A)u(t) + a(t)k ; \quad (4)$$

$$x(t) = u(t) + a(t) ; \quad (5)$$

$$x(t) = (a(t) + A)(u(t) - B) + a(t)k , \quad (6)$$

где  $A, B, k$  – параметры моделей, определяющие соотношение детерминированной и случайной компонент.

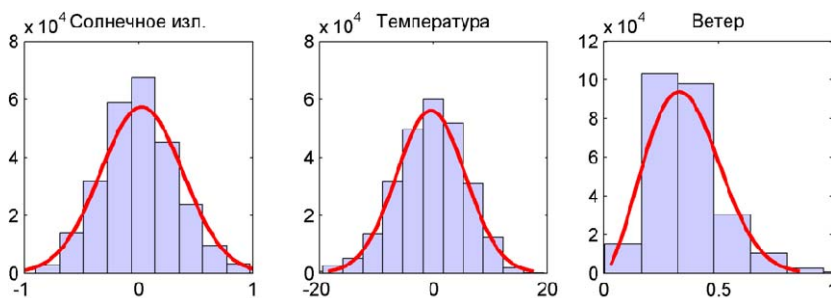


Рис. 9. Статистические распределения случайной компоненты климатических процессов  
 Fig. 9. The climate processes random component statistical distribution

Результаты анализа остатков после исключения детерминированной компоненты показаны на рис. 9. На рис. 10 приведены временные фрагменты данных измерений (показаны окружностями) и детерминированной компоненты (изображена сплошной линией).

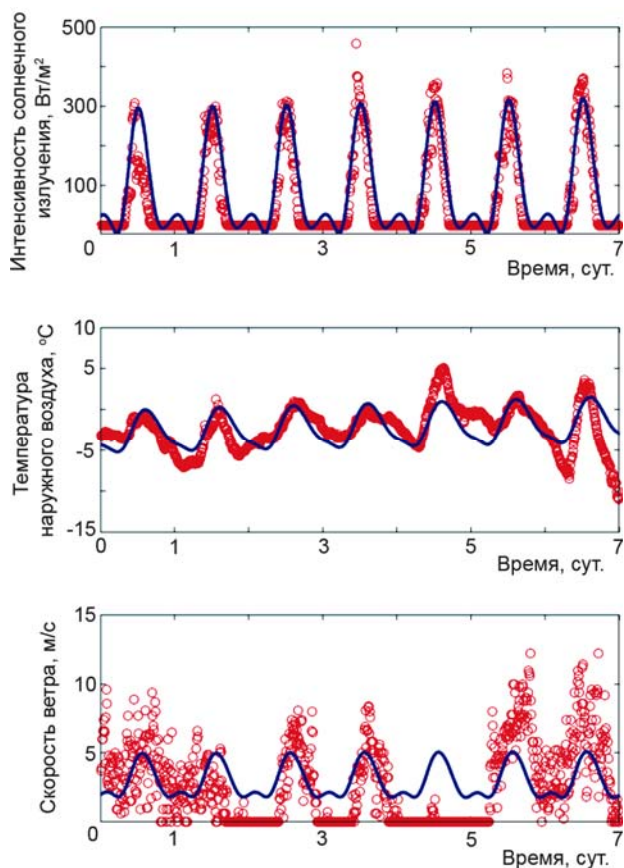


Рис. 10. Фрагменты данных измерений  
Fig. 10. The measurement data fragments

Остатки процессов изменения температуры наружного воздуха и интенсивности солнечного излучения хорошо описываются нормальным распределением. Распределение случайной компоненты изменений скорости ветра имеет асимметричную форму и с приемлемой точностью описывается функцией Вейбулла.

## Заключение

1. Предложен метод описания климатических процессов, учитывающий нестационарность их статистических свойств. Суть метода состоит в исключении из исследуемого процесса закономерностей и последующей оценке параметров случайной компоненты. Применение моделей нестационарных случайных процессов на практике позволит снизить неопределенность учета внешних факторов в задачах обоснования схем энергоснабжения на основе ВИЭ и повысить достоверность принимаемых решений.

2. По данным измерений выполнен анализ процессов изменения интенсивности солнечного излучения, температуры наружного воздуха и скорости ветра. Показано, что закономерности этих процессов приближенно можно описать функцией амплитудно-модулированных колебаний, учитывающей суточный и годовой циклы.

3. На основе комбинации аддитивной и мультипликативной статистических моделей описано поведение исследуемых климатических процессов. Выполнен анализ остатков после исключения детерминированной компоненты.

## Список литературы

1. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. М.: Мир, 1989.
3. Бендат Дж. Пирсол А. Применение корреляционного анализа и спектрального анализа: Пер. с англ. М.: Мир, 1983.
4. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974.
5. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Учеб. Пособие для вузов. 2-у изд., стер. М.: Высш. шк., 2000.
6. Евланов Л.Г., Константинов В.М. Системы со случайными параметрами. М.: Наука, 1976.
7. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч.1. Случайные процессы. М.: Наука, 1976.
8. Рытов С.М. Модулированные колебания и волны // Труды Физ. института АН СССР. 1940. Т. 2, вып. 1.
9. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере / Под ред. В.Э. Фигурнова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ИНФРА-М, 2003.