

DOI: 10.17747/2618-947X-2023-2-000-000  
УДК 621.311

# Оценка цикличности и стохастичности ветрового потока для обеспечения надежности энергосистемы

В.А. Зубакин<sup>1</sup>  
К.Н. Юсупов<sup>1,2</sup><sup>1</sup> РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина (Москва, Россия)<sup>2</sup> НПО «Б энд Б Индастриз» (Москва, Россия)

## Аннотация

Данная статья освещает актуальные вопросы, связанные с проблемой непостоянства выработки электроэнергии ветровых электростанций, что становится все более важным с учетом растущего вклада ветроэнергетики в общий энергобаланс многих стран. Рассматриваются различные аспекты волатильности ветрового потока, включая его случайную и детерминированную составляющие. Случайная составляющая связана с непредсказуемыми изменениями скорости и направления ветра, в то время как детерминированная составляющая обусловлена известными закономерностями, такими как суточные и сезонные колебания. В статье предложены различные методы нивелирования стохастичности энергии ветровых потоков. Это важно для обеспечения стабильности и надежности энергосистемы, так как снижает вероятность перебоев в подаче электроэнергии, обеспечивая более равномерное распределение нагрузки. В статье также приводятся примеры экономических и экологических эффектов использования предложенных методов.

**Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, прогноз энергии ветра, стохастичность, ветровая электростанция, квантильный прогноз, статистический тест.

## Для цитирования:

Зубакин В.А., Юсупов К.Н. (2023). Оценка цикличности и стохастичности ветрового потока для обеспечения надежности энергосистем. *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 14(2): \*\*\*-\*\*\*. DOI: 10.17747/2618-947X-2023-2-\*\*\*-\*\*\*.

# Assessment of cyclical and stochastic wind flow to ensure power system reliability

V.A. Zubakin<sup>1</sup>  
K.N. Yusupov<sup>1,2</sup><sup>1</sup> The Gubkin State University of Oil and Gas (Moscow, Russia)<sup>2</sup> NPO 'B&B Industries' (Moscow, Russia)

## Abstract

This article highlights current issues related to the problem of variability of wind power generation, which is becoming increasingly important as wind power's contribution to the overall energy balance of many countries grows. Various aspects of wind flow volatility, including its random and deterministic components, are considered. The random component is associated with unpredictable changes in wind speed and direction, while the deterministic component is due to known patterns, such as daily and seasonal variations. The article proposes different methods for levelling the stochasticity of wind power flows. This is important for the stability and reliability of the power system, as it reduces the likelihood blackouts and ensures a more even distribution of load. The article also gives examples of the economic and environmental impact of using the proposed methods.

**Keywords:** renewable energy sources, wind energy forecast, stochasticity, wind power plant, quantile forecast, statistical test.

## For citation:

Zubakin V.A., Yusupov K.N. (2023). Assessment of cyclical and stochastic wind flow to ensure power system reliability. *Strategic Decisions and Risk Management*, 14(2): 000-000. DOI: 10.17747/2618-947X-2023-2-000-000. (In Russ.)

# 确保电力系统可靠性的风流周期性和随机性评估

V.A. Zubakin<sup>1</sup>  
K.N. Yusupov<sup>1,2</sup><sup>1</sup> 伊米·古布金命名的俄罗斯国立石油天然气大学 (俄罗斯莫斯科)<sup>2</sup> "B&B Industries 科学生产联合体" 有限责任公司 (俄罗斯莫斯科)

## 摘要

本文重点介绍了当前与风电场发电变异性问题有关的问题。鉴于风能许多国家的总体能源结构中所占比例越来越大，这一点正变得越来越重要。作者考虑了风流波动的各个方面，包括其随机和确定成分。随机成分是由于风速和风向的不可预测变化造成的，而确定成分则是由于已知模式造成的，如昼夜和季节变化。本文提出了来平抑风流能量的随机性的多种方法。这对确保电力系统的稳定性和可靠性非常重要，因为通过提供更均匀的负荷分配，降低了停电的可能性。本文还说明了使用拟议方法的经济和环境影响例子。

**关键词:** 可再生能源、风能预测、随机性、风力发电厂、分位数预测、统计检测。

## 供引用:

Zubakin V.A., Yusupov K.N. (2023). 确保电力系统可靠性的风流周期性和随机性评估. *战略决策和风险管理*, 14 (2) : \*\*\*-\*\*\*. DOI: 10.17747/2618-947X-2023-2-\*\*\*-\*\*\*. (俄文).

Надежное функционирование энергосистемы является важнейшей задачей для нормального функционирования всех секторов экономики и жизнедеятельности человека, что обеспечивается постоянным балансом производства электроэнергии и его потреблением.

Для поддержания постоянного баланса производства и потребления электроэнергии необходимо иметь должный спектр гибких инструментов для регулирования дисбаланса: горячий резерв тепловой мощности, маневренные электростанции, управление спросом и др.

С возрастанием неопределенности в энергосистеме увеличивается спрос на инструменты гибкости, что сопровождается высокими затратами для энергосистемы.

Одним из главных факторов роста неопределенности является увеличение объема переменной генерации – ветровых и солнечных электростанций.

Так, изменчивость скорости ветра и вырабатываемой энергии в некоторой степени ограничивает ее использование в рамках энергосистемы. Поэтому многие ученые работают над подходами к прогнозированию выработки ветровых электростанций, чтобы заранее знать приход ветровой энергии [Kamran, 2023]. С увеличением горизонта прогнозирования ошибка прогнозирования увеличивается.

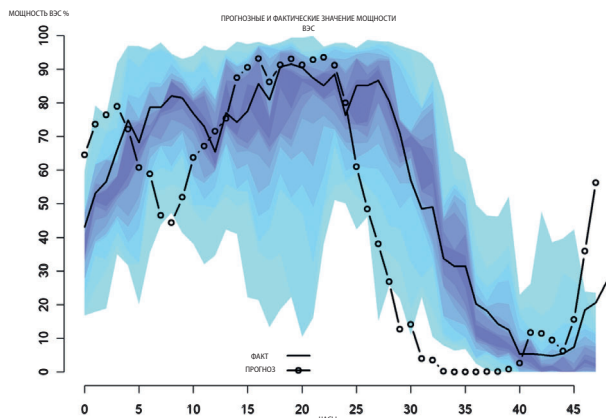
Для точного моделирования прихода ветровой энергии с учетом стохастичности в тех районах, исходной статистической информации о которых недостаточно, необходимо определить распределение скоростей ветра во времени по грациям и по высоте [Зубакин, Ковшов, 2015].

Изменчивость шероховатости земной поверхности требует проведения ветромониторинга в течение не менее года перед строительством ветропарка для оценки основных статистических параметров ветрового потока в районе расположения станции. При этом накопленные данные за год ветромониторинга необходимо экстраполировать на все предполагаемое время функционирования ВЭС с помощью различных методов МСР (измерение – корреляция – прогноз).

Однако, несмотря на стохастическую природу ветровой генерации, существует несколько способов снизить негативные эффекты от непостоянства ее выработки.

Рис. 1. Фактические и прогнозные значения с учетом неопределенности

Fig. 1. Actual and forecast values with consideration of uncertainty



Источник: выгрузка из системы прогнозирования.

Так, при оценке поведения ветрового потока на различных временных интервалах необходимо также учитывать и вероятностное поведение ветра, которое можно представить в виде квантильного прогноза [Bossavy et al., 2010] (рис. 1).

При наличии несмещенного прогноза выработки ВЭС системный оператор может опираться на квантильные прогнозы (P05, P95) для планирования оптимального резерва, что может существенно сократить его объем. Так, системный оператор может использовать нижнее значение квантильного прогноза (P01, P05) как гарантированную мощность ветровой электростанции в будущем.

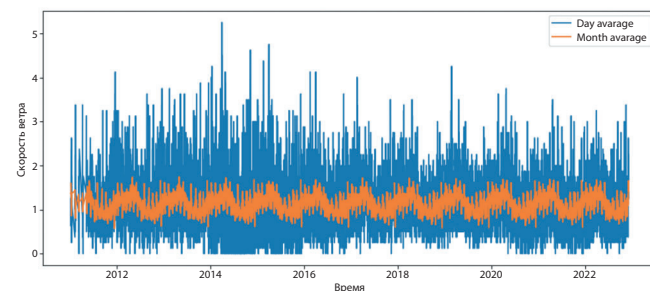
Также эффективным управлением стохастической природой ВЭС является объединение нескольких ВЭС в одну виртуальную электростанцию, что приводит к снижению ошибки прогнозирования [Шувалов и др., 2022]. При этом в агрегированных ветровых парках квантильный прогноз имеет меньший диапазон, что связано со снижением дисперсии общей выработки нескольких ВЭС.

Вопреки сложившемуся представлению, средняя многолетняя энергетическая плотность ветрового потока, распределенная по месяцам и по направлениям, представляет собой циклическую картину. Стохастичность увеличивается на более мелких временных интервалах (часы, минуты) и проявляется вариативностью некоего локального события (штиль, небольшой/средний ветер, шторм). Данная вариативность обусловлена непостоянством и неравномерностью движения слоев ветрового потока, причиной которых являются турбулентные завихрения, теоретическое выражение которых носит преимущественно случайный характер.

Так, при анализе автокорреляционной составляющей временного ряда скорости ветра на метеостанции ВДНХ можно определить цикличность в данных. Скорость ветра имеет значимую цикличность с периодом около 24 часов. Это связано с изменением температуры воздуха в течение дня. Также присутствует цикличность с периодом около 1 года (рис. 2), которая может быть связана с изменением климатических условий. Для оценки стационарности временного ряда был произведен статистический тест Дики – Фуллера, в результате которого статистическое значение теста было меньше р-значения, что указывает на нестационарность временного ряда. Временной ряд обладает изменяющимся во времени средним и дисперсией.

Рис. 2. Временной ряд скорости ветра на метеостанции ВДНХ, 2012–2022 годы

Fig. 2. Time series of wind speed at the VDNKh weather station, 2012–2022



Источник: выгрузка из системы прогнозирования.

При рассмотрении моделей с точки зрения цикличности основным моделируемым показателем является повторяемость скоростей ветра  $F(v)$ , которая показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода дули ветры с той или иной скоростью. Годовая повторяемость ветра достаточно часто, особенно в зарубежной практике, аппроксимируется распределением Вейбулла или ее модифицированным вариантом – распределением Вейбулла – Гудрича:

$$F(v) = k \frac{v^{k-1}}{A^k} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k},$$

где  $k$  – параметр формы (зависит от района местности и в общем случае  $k = 2$ ),  $A$  – параметр масштаба (зависит от средней скорости ветра,  $A \sim 1,13 v$ ).

Распределение Вейбулла – Гудрича является наиболее универсальным и общепризнанным методом моделирования скоростей ветра. С помощью данного подхода выполнено много разработок по районированию потенциальных ветроэнергетических ресурсов территории России и отдельных регионов.

Однако знание закона распределения и наличие высоких средних значений скоростей ветра еще не гарантируют его эффективного использования. В ветроэнергетике большое значение имеет знание возможной длительности затиший, вероятностная оценка которых служит основным критерием эффективности использования ветровой энергии. Можно считать установленным, что структурные свойства ветрового режима слабо зависят от общего уровня интенсивности, то есть в местностях со значительными по интенсивности ветрами


могут наблюдаться длительные затишья, которые делают использование ветра неэффективным. Затишьем считается период так называемых неактивных скоростей ветра, которые не могут быть использованы для производства энергии. Эта характеристика, являющаяся необходимой составной частью ветроэнергетического кадастра, считается одной из наиболее важных при оценке перспектив использования ветра.

Таким образом, оценка цикличности и стохастичности ветрового потока имеет важное значение для обеспечения надежности и эффективности ветровых энергетических систем.

Подводя итог, можно сделать вывод, что в связи с прямо пропорциональной зависимостью волатильности ветрового потока от стохастичности и цикличности использование правильной идентификации циклической составляющей временного ряда скорости ветра с методами борьбы с негативными эффектами стохастичности выработки ВЭС, такими как повышение точности прогнозирования, использование квантильного прогноза ветровой энергии, агрегирование ветровых электростанций в виртуальную электростанцию, снижает требуемый объем резерва мощности в энергосистеме в краткосрочной перспективе и может помочь избежать строительства новых пиковых электростанций в будущем.

Для внедрения предложений по снижению стохастичности выработок требуются дополнительные исследования с использованием реальных данных нескольких электростанций для получения количественной оценки.

## Литература


Зубакин В.А., Ковшов Н.М. (2015). Методы и модели анализа волатильности выработки  с учетом цикличности и стохастичности. *Стратегические решения и риск-менеджмент*, 4(91): 86–98. <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-modeli-analiza-volatilnosti-vyrabotki-viz-s-uchetom-tsiklichnosti-i-stohastichnosti>.

Шувалов Н., Карасевич В.А., Величко А.И. (2022). Повышение точности прогнозирования выработки ВИЭ с помощью нейросетевых алгоритмов виртуальной электростанции. В: *Материалы Международной научно-практической конференции им. Д.И. Менделеева: сборник статей*. Т. 1.

Bossavy A., Girard R., Kariniotakis G. (2010). Forecasting uncertainty related to ramps of wind power production. *European Wind Energy Conference and Exhibition*, Warsaw, Poland.

Kamran M. (2023). Fundamentals of smart grid systems. *Academic Press*, 365–392. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99560-3.00007-7>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323995603000077>.

## References

Zubakin V.A., Kovshov N.M. (2015). Methods and models for analyzing the volatility of  generation, taking into account cyclicity and stochasticity. *Strategic Decisions and Risk Management*, 4(91): 86–98. <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-modeli-analiza-volatilnosti-vyrabotki-viz-s-uchetom-tsiklichnosti-i-stohastichnosti>.

Shuvalov N., Karasevich V.A., Velichko A.I. (2022). Improving the accuracy of forecasting renewable energy generation using neural network algorithms of a virtual power plant. In: *Materials of the D.I. Mendeleev International Scientific and Practical Conference: Collection of articles*. Vol. 1.

Bossavy A., Girard R., Kariniotakis G. (2010). Forecasting uncertainty related to ramps of wind power production. *European Wind Energy Conference and Exhibition*, Warsaw, Poland.

Kamran M. (2023). Fundamentals of smart grid systems. *Academic Press*, 365–392. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99560-3.00007-7>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323995603000077>.

## Информация об авторах

### Василий Александрович Зубакин

Доктор экономических наук, профессор, основатель и заведующий кафедры возобновляемых источников энергии, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина (Москва, Россия). SPIN: 6075-0628; Author ID: 713925.

Область научных интересов: экономика и прогнозирование энергетики, экономика возобновляемых источников энергии, экономика распределенной генерации, экономика виртуальных электростанций, управление рисками в топливно-энергетическом комплексе.

zubakinva@gmail.com

### Кимал Наилевич Юсупов

Аспирант кафедры возобновляемых источников энергии, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина (Москва, Россия), соучредитель компании «НПО Б энд Б Индастриз» (Москва, Россия).

Область научных интересов: ветроэнергетика, ВИЭ, прогнозирование выработки электрической энергии на ветроэнергетической станции.

kiyus@bandbind.ru

## About the authors

### Vasili A. Zubakin

Doctor of economics, professor, founder and head of the Department of Renewable Energy Sources, The Gubkin State University of Oil and Gas (Moscow, Russia). SPIN: 6075-0628; Author ID: 713925.

Research interests: economics and energy forecasting, economics of renewable energy sources, economics of distributed generation, economics of virtual power plants, risk management in the fuel and energy complex.

zubakinva@gmail.com

### Kimal N. Yusupov

Postgraduate student, Department of Renewable Energy Sources, The Gubkin State University of Oil and Gas (Moscow, Russia), co-founder of the LLC 'NPO B & B Industries' (Moscow, Russia).

Research interests: wind energy, renewable energy sources, forecasting the production of electrical energy in a wind power plant.

## 作者信息

### Vasili A. Zubakin

经济学博士·教授·以伊·米·古布金命名的俄罗斯国立石油天然气大学可再生能源教研室创始人兼主任(俄罗斯莫斯科)。SPIN: 6075-0628; Author ID: 713925.

研究领域: 能源经济与预测、可再生能源经济、分散式发电经济、虚拟电厂经济、燃料和能源行业的风险管理。

zubakinva@gmail.com

### Kimal N. Yusupov

以伊·米·古布金命名的俄罗斯国立石油天然气大学可再生能源教研室研究生·“B&B Industries 科学生产联合体”有限责任公司联合创始人(俄罗斯莫斯科)。

研究领域: 风能、可再生能源、风力发电厂发电量预测。

kiyus@bandbind.ru

Статья поступила в редакцию \*\*\*\*\*.2023; после рецензирования \*\*\*\*\*.2023 принята к публикации \*\*\*\*\*.2023. Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The article was submitted on \*\*\*.2023; revised on \*\*\*.2023 and accepted for publication on \*\*\*.2023. The authors read and approved the final version of the manuscript.

文章于 20.01.2023 提交给编辑。文章于 10.02.2023 已审稿。之后于 25.02.2023 接受发表。作者已经阅读并批准了手稿的最终版本。