

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРЕДНЕМЕСЯЧНОЙ СКОРОСТИ ВЕТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ****В. П. Розен, А. В. Чермалых, А. С. Бычковский***Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

**Аннотация.** Интерпретирован байесовский подход к прогнозированию среднемесячной скорости ветра с учетом поправки эксперта. Рассчитано прогнозное значение среднемесячной скорости ветра для города Киева в январе 2018 года на основе исходных данных соответствующего месяца за период с 2012 по 2017 годы. Исходя из полученного прогнозного значения скорости ветра, определена величина ошибки прогнозирования. В результате сравнения различных методов, самую высокую точность показал метод с использованием мнения эксперта с использованием байесовского подхода к прогнозированию.

**Ключевые слова:** альтернативные источники энергии, ветроэнергетическая установка, прогнозирование временных рядов.

**Введение**

В последние годы именно экологические аспекты определяют, какой вид энергии человечество будет использовать в будущем. Все больше заявляют о себе так называемые альтернативные источники энергии. Наиболее распространенным в плане практической реализации источником энергии на сегодняшний день является использование энергии ветра. Однако самой большой проблемой при интеграции ветроэнергетических установок (ВЭУ) в общую электрическую сеть является нестабильность ветрового потока. Один из подходов для борьбы с изменчивостью ветрового потока заключается в прогнозировании будущих значений скорости ветра, что позволяет более эффективно управлять режимом работы ветроэнергетических станций и дает возможность в какой-то степени решать проблему совместной работы ВЭУ с силовой электрической сетью.

Прогнозирование скорости ветра заключается в использовании временного ряда с учетом сезонного изменения данных с нелинейной зависимостью. Прогнозирование подобных временных рядов возможно с применением целого ряда методов и методик, среди которых можно выделить следующие [1]:

- при наличии тренда или долгосрочной тенденции в развитии временного ряда используются экстраполяционные методы прогнозирования;

- в случае сезонной тенденции или изменений в динамике ряда, повторяемых через определенные периоды, применяются методы корреля-

ционного анализа данных с определением периода (временного лага) сезонности;

- для прерванных временных рядов, при наличии резких изменений тенденции процесса под каким-либо воздействием (обычно внешним), часто называемым интервенцией, применяется специальный класс моделей, в свойства которых закладывается один из типов интервенции (устойчивое скачкообразное, устойчивое постепенное, скачкообразное временное);

- при более или менее регулярных колебаний относительно тренда с неизвестным в начале исследования периодом используются гармонические модели или модели авторегрессии скользящего среднего.

**1. Цель и задачи исследования**

Для увеличения точности прогноза скорости ветра используется прогнозная модель, позволяющая учесть мнение эксперта при расчете прогнозного значения скорости ветра в определенный период времени с максимальной точностью. Прогнозная модель построена на основе байесовского подхода к прогнозированию временного ряда.

**2. Общая часть**

Для определения прогнозных значений показателей производится прогнозирование факторов, входящих в состав этих показателей. При решении такой задачи, помимо учета ретроспективных данных, необходимо учесть тенденции, не отраженные в них, а именно, влияние решений, принятых недавно или тех, принятие которых запланировано в ближайшем будущем. Помимо этого, необходимо учитывать быстрое изменение факторов.

© Розен В. П., Чермалых А. В.,  
Бычковский А. С., 2018

Сложившиеся на сегодняшний день традиционные подходы в общем случае не обеспечивают учет неотраженной в ретроспективном ряде информации  $h(Q)$ , а также позволяют работать с коротким временным рядом  $f(y/Q)$ , что влияет на обоснованность фактически получаемых резуль-

татов [2].

Для решения поставленной задачи имеет смысл использовать метод прогнозирования, основанный на теореме Байеса. Ортодоксальная схема процесса прогнозирования изображена на рис. 1.

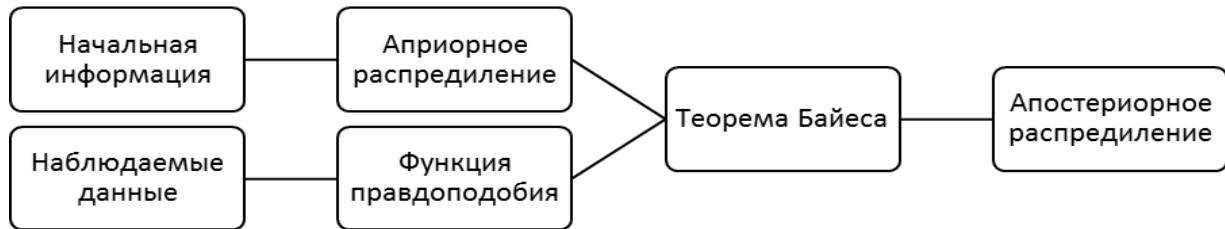


Рис. 1. Ортодоксальная схема процесса прогнозирования

Пусть свойства района выражаются с помощью параметра  $\theta$ . Предварительное представление о свойствах района базируется на информации  $I_a$ . Формализация этой информации осуществляется путем записи априорного распределения параметра  $\theta$ , который является условным по отношению к  $I_a$ , т.е.  $h(\theta/I_a)$ . Полученные в процессе наблюдения данные  $x$  формализуются с помощью прогнозной функции  $f(\theta/x)$ . Данная параметрическая функция представляет собой вероятность наблюдения данных. Существенно, что для ее получения необходимо знать модель объекта в виде условного распределения случайной величины. Затем объединяется априорная вероятность  $h(\theta/I_a)$  с функцией правдоподобия  $f(\theta/x)$  по теореме Байеса:

$$h(\theta/x, I_a) = \frac{h(\theta/I_a) \cdot f(\theta/x)}{\int h(\theta/I_a) f(\theta/x) d\theta},$$

где  $h(\theta/I_a)$  – априорное распределение параметра  $\theta$ , условное по отношению к  $I_a$ ;

$f(\theta/x)$  – прогнозная функция, условная по отношению к  $x$ ;

$h(\theta/x, I_a)$  – апостериорное смещение параметра  $\theta$ , условное по отношению к первоначальной информации  $I_a$  и наблюдаемым данным  $x$ .

Таким образом, процедура прогнозирования факторов энергетической безопасности баланса с использованием ортодоксальной схемы байесовского подхода является одним из подходов, обеспечивающих учет такого элемента, как индивидуальный опыт, и включение лица прини-

мающего решение, в логико-математический процесс принятия решения [3].

Примером такого прогнозирования является прогноз скорости ветра для города Киева в январе 2018 года, выполненный согласно следующей методике.

Исходная априорная оценка  $h(\theta/I_a)$  получена на основании замеров скорости ветра на высоте 10 метров по данным метеостанции аэропорта Киев имени Игоря Сикорского. Анализ данных за период с 2012 по 2017 годы показывает, что скорость ветра находится в пределах 3,1...3,6 м/с, учитывая, что

$$W_{\text{факт}}^{\text{н}} = 3,1 \text{ м/с};$$

$$W_{\text{факт}}^{\text{с}} = 3,6 \text{ м/с};$$

$$\Delta W_{\text{факт}}^{\text{н}} = 0,09 \text{ м/с};$$

$$\Delta W_{\text{факт}}^{\text{с}} = 0,59 \text{ м/с};$$

где  $W_{\text{факт}}^{\text{н}}$  – нижний предел скорости ветра, установленный в результате экспертизы;

$W_{\text{факт}}^{\text{с}}$  – верхний предел скорости ветра, установленный в результате экспертизы;

$\Delta W_{\text{факт}}^{\text{н}}$  – разность между нижним пределом экспертной оценки и фактической скоростью ветра в предыдущем году;

$\Delta W_{\text{факт}}^{\text{с}}$  – разность между верхним пределом экспертной оценки и фактической скоростью ветра в предыдущем году.

Из данных ретроспективного периода определяются значения скорости ветра за период в 6 последних лет с учетом сезонности (таблица 1).

Скорость ветра по киевскому региону на высоте 10 метров за период 6 лет, январь месяц

Год	2012	2013	2014	2015	2016	2017
V (м/с)	2,7	2,31	3,32	3,35	2,92	3,01

По данным, установленным специалистом, рассчитываются коэффициенты уравнения  $b_1'$  и  $b_2'$

$$b_1' = \frac{W_{\text{факт}}^n + W_{\text{факт}}^e}{2} = 3,35 ;$$

$$b_2' = \frac{\Delta W_{\text{факт}}^n + \Delta W_{\text{факт}}^e}{2} = 0,34 .$$

Определяется ковариационная матрица  $V'$ :

$$v_{11}' = \left( \frac{W_{\text{факт}}^e - W_{\text{факт}}^n}{6} \right) = 0,007 ;$$

$$v_{22}' = \left( \frac{\Delta W_{\text{факт}}^e - \Delta W_{\text{факт}}^n}{6} \right) = 0,007 .$$

Значения  $v_{12}' = 0, v_{21}' = 0$ .

Таким образом, матрица  $V'$  запишется в виде

$$V' = \begin{pmatrix} 0,007 & 0 \\ 0 & 0,007 \end{pmatrix} .$$

По фактическим значениям  $x_i$  при  $T = 6$  определяется ковариационно-вариационная матрица априорного распределения. Пусть единичная матрица  $Z'$  имеет вид

$$Z' = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{vmatrix} .$$

Тогда параметры модели прогнозирования

$$G = Z^t \cdot Z' = \begin{vmatrix} 6 & 21 \\ 21 & 91 \end{vmatrix}$$

$$g = Z^t \cdot X = \begin{vmatrix} 1129 \\ 3418 \end{vmatrix}$$

где  $Z^t$  – транспонированная матрица,  $Z'$  – обратная матрица,  $X$  – единичная матрица,  $g$  – единичная матрица модели прогнозирования.

Вычисляется обратная матрица  $V^{-1}$

$$V^{-1} = G / \sigma_\varepsilon^2 ,$$

где  $G$  – параметр модели прогнозирования;  $\sigma_\varepsilon^2$  – дисперсия случайной составляющей модели прогнозирования.

При отсутствии информации о дисперсии  $\sigma_\varepsilon^2$ , она принимается равной 2...3% от среднего ряда скорости ветра согласно выражению:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^T x_t}{T} = 2,935 \text{ м / с} .$$

Тогда  $\sigma_\varepsilon = 0,02 \cdot \bar{x} = 0,0587$  и, следовательно,  $\sigma_\varepsilon^2 = 0,00345$ .

В результате получаем

$$V^{-1} = \begin{vmatrix} 1739,13 & 6086,96 \\ 6086,96 & 26376,81 \end{vmatrix} .$$

Определяется обратная матрица

$$V'^{-1} = \frac{\tilde{V}'}{|V'|} = \begin{vmatrix} 142,86 & 0 \\ 0 & 142,86 \end{vmatrix} ,$$

где  $\tilde{V}'$  – союзная матрица,  $|V'|$  – определитель матрицы  $V'$ .

Находится обратная ковариационно-вариационная матрица скорректированного распределения  $V''^{-1}$

$$V''^{-1} = V'^{-1} + V^{-1} = \begin{vmatrix} 1881,99 & 6086,96 \\ 6086,96 & 26519,67 \end{vmatrix} .$$

Определяется ковариационно-вариационная матрица скорректированного распределения  $V''$

$$V'' = \begin{vmatrix} 0,00205 & -0,00047 \\ -0,00047 & 0,000146 \end{vmatrix} .$$

Определяются параметры модели прогнозирования скорости ветра

$$B = V'' (V'^{-1} b_c' + \frac{g}{\sigma_\varepsilon^2}) = \begin{vmatrix} 10,42 \\ -1,13 \end{vmatrix} ,$$

где  $B$  – удовлетворяющий определитель матрицы прогнозного значения скорости ветра,  $b_c'$  – среднее значение коэффициентов отклонения по данным эксперта.

Таким образом, расчетная скорость ветра в

киевском регионе в прогнозном январе 2018 года составит

$$X_{T+\tau} = B(T + \tau) = 10.42 - 1.13(6 + 1) = 2.51 \text{ м/с}$$

Учитывая тот факт, что данные измерений на сайте метеостанции дают информацию о фактическом значении среднемесячной скорости ветра в Киеве за январь 2018 года, которая составляет 2,6 м/с, можно определить погрешность (точность) прогноза среднемесячной скорости ветра.

На рис. 2 приведен график изменения средней скорости ветра за рассматриваемый период по годам в январе месяце.

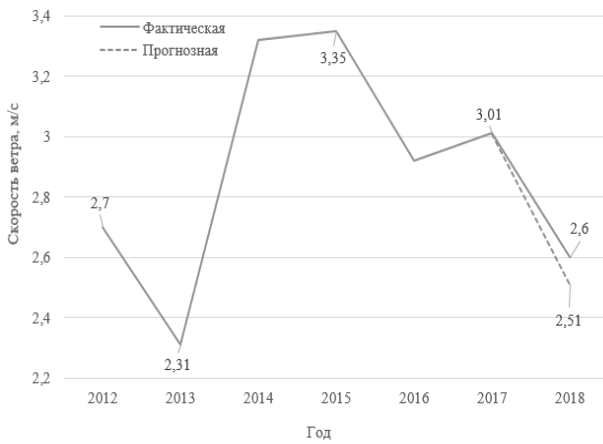


Рис. 2. График изменения фактической и прогнозной скоростей ветра

График иллюстрирует в целом достаточно стабильную картину изменения среднемесячной скорости ветра за длительный период, что дает возможность приблизить результаты прогнозирования скорости к реальным значениям для любого требуемого отрезка времени.

### Выводы

Полученное прогнозное значение скорости ветра на январь 2018 при использовании байесовского подхода составляет 96,5% относительно действительной среднемесячной величины скорости ветра. Следует отметить, что данный подход значительно точнее, чем системы, построенные на базе нейронных сетей с точностью прогноза 70-80% или с применением методологии Бокса-Дженкинса на основе интегрированной модели авторегрессии, точность прогноза которой составляет всего 60-70%, поскольку используется только временной ряд скорости ветра с учетом сезонности [4]. Таким

образом, метод прогнозирования среднемесячной скорости ветра с учетом мнения эксперта (байесовский подход к прогнозированию) повышает точность прогноза не менее чем на 10% по сравнению с другими методами прогнозирования.

### Список использованной литературы

1. Афанасьев, В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование [Текст] / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика, 2010. – 228 с.
2. Дегтярев, В.В. Нормирование топливно-энергетических ресурсов и регулирование режимов электропотребления [Текст] / В.В. Дегтярев. – М.: “Недра”, 1983. – 193 с.
3. Розен, В.П. Прогнозирование показателей классификации состояния энергетической безопасности региона [Текст] / В.П. Розен, М.М. Танский // Энергетика, экономика, экология: научн. журнал. – К.: НТУУ КПИ, 2005. – № 2 – С. 101–112.
4. Бичківський, О.С. Визначення потенціалу застосування вітроенергетичних установок на основі стохастичного аналізу вітрового потоку [Текст] / О.С. Бичківський, О.В. Чермалих // Новые измерения научного познания: зб. наук. праць. – Чернігів: ЧНГУ, 2017. – С. 51–56.

### References

1. Afanasyev, V.N. (2001), Time series analysis and forecasting [Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye], Finance and Statistics, Moscow, 228 p.
2. Degtyarev, V.V. (1983), Normalization of fuel and energy resources and regulation of power consumption regimes [Normirovanie toplivno-energeticheskikh resursov i regulirovanie rezhimov elektropotrebleniya], Nedra, Moscow, 193 p.
3. Rosen, V.P., Tanskiy, M.M. (2005), "Forecasting the indicators of classification of the state of energy security in the region" ["Prognozirovaniye pokazateley klasifikatsii sostoyaniya energeticheskoy bezopasnosti regiona"], Energy, economics, ecolodgy, №o. 2, pp. 101–112.
4. Bychkivsky, O.S., Chermalikh, O.V. (2017), "Determination of the potential of using wind power plants based on stochastic analysis of wind current" ["Vuznachennya potentsialu zastosuvannya vitroenergetichnyh ustanovok na osnovi stohastychnogo analizu vitrovogo potoku"], New dimensions of scientific knowledge, No. 1, pp. 51–56.

## FORECASTING THE AVERAGE MONTHLY WIND SPEED WITH THE USE OF THE BAYES APPROACH TO FORECASTING

V. Rosen, A. Chermalykh, A. Buchkivskii

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

**Abstract.** The article is devoted to the interpretation of the classical Bayesian approach to solving problems in the field of alternative energy, namely forecasting the average monthly wind speed, taking into account expert opinion. The proposed interpreted Bayesian approach to forecasting allows, with a small fraction of the error, to determine the forecast value of the average monthly wind speed, taking into account the expert's amendment, that is, to fulfill the forecast taking into account the knowledge of the meteorologist. At the same time, the interpreted method repeats all stages of the orthodox scheme of the forecasting process. As a result of the research and interpretation, the method of calculating the forecast value of the average monthly wind speed in January 2018 based on the January data for the period from 2012 to 2017 is realized. Moreover, the method allows not only to take into account the value of the wind speed in past periods of measurements, but also the seasonal change in the nature of the wind and its stochastic nature. The main advantage of the interpreted method is that the predicted wind speed forecast for January 2018, using the Bayesian approach to forecasting, repeats the actual average monthly value with an accuracy of 96.5%. This suggests that this approach is much more accurate than systems based on neural networks (prediction accuracy of 70-80%) or using the Box-Jenkins methodology (integrated model of autoregression) with a prediction accuracy of only 60-70% (using forecast only using a time series of wind speed, taking into account seasonality).

**Keywords:** alternative energy sources, forecasting of wind speed, wind turbines, forecasting, Bayesian approach to forecasting, neural networks, integrated autoregression model, Box-Jenkins method, forecasting of average monthly wind speed, Bayes theorem, prediction accuracy, variability of wind flow.

## ПРОГНОЗУВАННЯ СЕРЕДНЬОМІСЯЧНОЇ ШВИДКОСТІ ВІТРУ З ВИКОРИСТАННЯМ БАЙЄСІВСЬКОГО ПІДХОДУ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ

В. П. Розен, О. В. Чермалих, О. С. Бичківський

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Анотація.** Стаття присвячена інтерпретації класичного байєсівського підходу до вирішення завдань в галузі альтернативної енергетики (зеленої енергетики), а саме прогнозування середньомісячної швидкості вітру з урахуванням думки експерта. Запропонований інтерпретований підхід до прогнозування, дозволяє визначити значення середньомісячної швидкості вітру в місті Києві, або в будь-якому іншому регіоні за умови зміни вхідних даних. В той же час інтерпретований спосіб повторює всі етапи ортодоксальної схеми процесу прогнозування класичного байєсівського підходу. В результаті дослідження та інтерпретації сформовано метод визначення прогнозної середньомісячної швидкості вітру в січні 2018 р. на основі січневих даних за період з 2012 по 2017 рр. Варто зазначити, що метод дозволяє не тільки прогнозувати швидкість вітру, як прогнозне значення класичного часового ряду, але і сезонну зміну природи вітру та його стохастичний характер. Основна перевага інтерпретованого методу полягає в тому, що середньомісячне значення швидкості вітру визначається з точністю 96,5%, використовуючи байєсівський підхід до прогнозування. Це свідчить про те, що цей підхід є набагато точнішим, ніж системи, засновані на нейронних мережах (точність прогнозування 70-80%) або використання методу Бокса-Дженкінса (інтегрована модель авторегресії) з точністю прогнозування лише 60-70% (використовуючи лише часовий ряд).

**Ключові слова:** альтернативні джерела енергії, прогнозування швидкості вітру, вітрові турбіни, прогнозування, байєсівський підхід до прогнозування, нейронні мережі, інтегрована модель авторегресії, метод Бокса-Дженкінса, прогноз середньомісячної швидкості вітру, теорема Байєса, точність прогнозування, мінливість вітрового потоку.

Получено 15.03.2018



**Розен Виктор Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации управления электротехническими комплексами Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». Просп. Победы, 37, Киев, Украина, E-mail: auek@ukr.net, +38-063-577-50-77

**Rozen Viktor**, Dr. of Science, Professor, Head of Department of electrical automation control complexes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0002-0440-4251



**Чермалых Александр Валентинович**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации управления электротехническими комплексами Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». Просп. Победы, 37, Киев, Украина, E-mail: alvalrik@gmail.com, тел. +38-067-260-76-39

**Chermalykh Oleksandr**, PhD, Associate Professor of the department of electrical automation control complexes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0001-8609-7525



**Бычковский Александр Сергеевич**, аспирант кафедры автоматизации управления электротехническими комплексами Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». Просп. Победы, 37, Киев, Украина, E-mail: Alex\_buchkivskii@hotmail.com, тел. +38-063-533-37-78

**Buchkivskii Oleksandr**, PhD student of the department of electrical automation control complexes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Peremogy ave., 37, Kyiv, Ukraine

**ORCID ID:** 0000-0002-5701-9840