

# Определение выработки определённой обеспеченности ветроустановки с учётом повторя- емости мощности на этапе проекти- рования станции

Рецензия эксперта на статью получена  
01.07.2026 [The expert review of the article  
was received on July 1, 2026]

При проведении технико-экономическо-  
го обоснования строительства ветроэлек-  
тростанции (ВЭС) одним из расчётных  
параметров проекта является планируе-  
мая выработка энергии, на базе которой  
рассчитывается коэффициент использо-  
вания установленной мощности (КИУМ)  
[1]. В целом планируемая выработка ве-  
троэнергоустановки (ВЭУ) может быть  
определена несколькими способами:

1. По данным реальных наблюдений за  
скоростью ветра, полученными с метео-  
станции (МС) или из какой-либо базы  
данных, с последующим пересчётом их  
на площадку проектируемой ВЭС. Далее  
с помощью паспортной мощностной ха-  
рактеристики определяется потенциаль-  
ная мощность ВЭУ и рассчитывается вы-  
работка за год.
2. По повторяемости скорости ветра, по-  
лучаемой на основе статистической обра-  
ботки реальных измерений скорости ве-  
тра, и паспортной характеристике ВЭУ  
определяется годовая выработка.
3. По данным местных измерений на  
площадке, полученных от ветроизмери-  
тельного комплекса (ВИК).

Первый и второй способ чаще всего  
используют в программных комплексах  
при расчёте ветроресурсов на площадке  
ВЭС. Третий способ рассматривается как  
инструмент построения корреляционной  
зависимости между данными МС и пло-  
щадки ВИК. Получаемые данные по ветру  
из справочников, МС, специализирован-  
ных баз данных (БД) и ВИК сильно отли-  
чаются между собой по способу пред-  
ставления, интервалу получения, а также  
точности измерительных приборов. Всё  
это оказывает существенное влияние на  
получаемые значения годовой выработки

ВЭС. В работе [2] был проведён сравни-  
тельный анализ применения ПО WASP  
и windPRO для проектируемой ВЭС Ин-  
дии. В результате проведённого модели-  
рования годовая выработка ВЭС разли-  
чалась на 3,5 ГВт·ч, что составило 11 % от  
полученных расчётных значений.

*Из-за большого разброса данных  
в каждый год относительно  
среднегодовое значение ско-  
рости ветра в результате бу-  
дут разные значения выработки  
ВЭУ за год и, соответственно,  
различные КИУМ*

В отечественное ПО закладываются  
те же методики, что и в WASP и windPRO  
[3], однако преимущественно используют-  
ся данные наблюдений с МС и ВИК, между  
которыми строится корреляционная за-  
висимость на основе данных характерного  
года (полнота ряда 95 % и выше, отклоне-  
ние от среднегодового значения скорости ветра  
минимальное [3]). Из-за большого раз-  
броса данных в каждый год относитель-  
но среднегодовых значений скорости  
ветра в результате будут разные значения  
выработки ВЭУ за год и, соответственно,  
различный коэффициент установленной  
мощности. В табл. 1 приведены значения  
разброса расчётного значения КИУМ за  
период с 2011 по 2013 годы на примере  
ВИК «Оссора» в посёлке Оссора на полу-  
острове Камчатка. В качестве прототи-  
па использовалась ВЭУ Komai KWT 300  
(мощность 300 кВт, установлена в посёлке  
Усть-Камчатск).

UDC 621.311.24. Научная специальность: 2.4.5.

## Определение выработки определённой обеспеченности ветроуста- новки с учётом повторяемости мощности на этапе проектирова- ния станции

**Надежда Васильевна Алиходжина**, ассистент, кафедры «Гидроэнергетика  
и возобновляемые источники энергии» (ГВИЭ), Национальный исследова-  
тельский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»);  
**Дмитрий Сергеевич Сычёв**, к.т.н., доцент, кафедра ГВИЭ, НИУ «МЭИ»; **Дми-  
трий Анатольевич Титов**, доцент, кафедра «Математическое и компьютер-  
ное моделирование» (МКМ), НИУ «МЭИ»

Статья посвящена оценке возможности определения выработки ветро-  
энергоустановки с определённой обеспеченностью на этапе проектиро-  
вания ветроэлектростанции с учётом повторяемости выдачи мощности. Пла-  
нируемая выработка электроэнергии является одним из параметров для  
определения экономической эффективности ветроэлектростанции, однако из-за  
стохастичности прихода ветроэнергетического ресурса и наличия данных за небольшой  
промежуток времени, оценить данный параметр довольно трудно, что  
приводит к завышению показателей проекта. Предлагаемая методика  
направлена на определение выработки ветроустановки с учётом неко-  
торой гарантии её получения за годовой интервал времени.

**Ключевые слова:** ветроэнергетическая установка, ветроэлектростан-  
ция, прогноз выдачи мощности, прогноз выработки электроэнергии, про-  
ектирование ветроэлектростанции.

UDC 621.311.24. Scientific specialty number: 2.4.5.

## Determination of wind turbine energy output with a specified level of reliability, taking into account the repeatability of power output, at the design stage of the station

**Nadezhda V. Alikhodzhina**, Assistant, Department of "Hydropower and Renew-  
able Energy Sources" (HPRES), National Research University "Moscow Power En-  
gineering Institute" (NRU "MPEI"); **Dmitry S. Sychev**, PhD, Associate Professor,  
Department of HPRES, NRU "MPEI"; **Dmitry A. Titov**, Associate Professor, De-  
partment of "Mathematical and Computer modeling" (MCM), NRU "MPEI"

The article is devoted to assessing the possibility of determining the generation of  
a wind turbine with a certain security at the design stage of a wind farm, taking into  
account the repeatability of power output. The planned electricity generation is one  
of the parameters for determining the economic efficiency of a wind farm, howev-  
er, due to the stochastic arrival of wind resources and the availability of data over  
a short period of time, it is quite difficult to estimate this parameter, which leads to  
an overestimation of the project indicators. The proposed methodology is aimed at  
determining the generation of a wind turbine, taking into account some guarantee  
of its receipt over an annual time interval.

**Key words:** wind power plant, wind farm, power output forecast, electricity gen-  
eration forecast, wind farm design.

Для представленных в табл. 1 расчётных значений КИУМ можно отметить следующие факты:

1. Одним из способов расчёта по реальным данным наблюдений за скоростью ветра является использование «метеостанции-аналога» (МС-аналог) с выбором характерного года (скорость ветра близка к среднесуточной и полнота ряда  $\geq 95\%$  [1]). Если такой год придётся на «ветреный», то в итоге КИУМ будет завышен, что приведёт к неправильной экономической оценке проекта.
2. Использование паспортных характеристик ВЭУ на этапе проектирования неизбежно, так как других ещё нет. Поэтому не учитывается, что установка может обледенеть и простаивать часть времени, а также не учитываются ограничения, которые может накладывать система или дизельная электростанция (если установка входит в состав ВДЭК).

*Хранящиеся данные по скорости ветра имеют большой интервал представления. При расчёте мощности ВЭУ получается, что она работала с этой мощностью в течение трёх, шести или восьми часов, что не совпадает с реальностью (скорость ветра меняется каждую минуту)*

3. Хранящиеся в базах данных и на МС данные по скорости ветра имеют большой интервал представления — как правило, три или шесть часов, реже встречается восемь часов. Особенностью является то, что при расчёте мощности ВЭУ получается, что она работала с этой мощностью в течение трёх, шести или восьми часов, что не совпадает с реальностью, так как скорость ветра меняется каждую минуту [5].

Предлагаемое решение по определению планируемой годовой выработки позволит уйти от привязки по времени, что даст картину в целом по площадке, а не за конкретный год или период. На рис. 1 представлен алгоритм расчёта годовой планируемой выработки ВЭУ. В табл. 2 приведены градации, по которым необходимо разбить получаемую по паспортной характеристике мощность ВЭУ.

Разбиение мощности по градациям основано на том, что область до 30% от установленной мощности ( $N_{уст}$ ) приходится на «околопиковые» скорости ветра (до 5 м/с), область до 60% от  $N_{уст}$  приходится на скорости ветра 5–9 м/с, а остальное попадает в диапазон от  $v_p$  до  $v_{max}$ .

Рис. 1. Алгоритм расчёта годовой планируемой выработки ВЭУ

табл. 1

| Год                   | КИУМ ВИК, % |
|-----------------------|-------------|
| 2011                  | 19,8        |
| 2012                  | 13,8        |
| 2013                  | 11,7        |
| Среднее значение КИУМ | 15,1        |

Рис. 2. Градации для расчёта повторяемости выдачи мощности ВЭУ

табл. 2

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| $N^{gr i} - N^{gr i+1}$   | $\bar{N}_{ВЭУ}^{gr i}$ |
| $0 - N_{уст}/3$           | $N_{уст}/6$            |
| $N_{уст}/3 - 2 N_{уст}/3$ | $N_{уст}/2$            |
| $2 N_{уст}/3 - N_{уст}$   | $5 N_{уст}/6$          |
| $N_{уст} - 1,1 N_{уст}$   | $1,05 N_{уст}$         |

По итогам проведения расчёта годовой выработки ВЭУ по повторяемости мощности, полученной по реальным данным измерений скорости ветра и по паспортной характеристике ВЭУ за один год, за несколько лет, по повторяемости скорости ветра (по методу расчёта как в windPRO [4]), по методу МС-аналога [2] и по методу нескольких МС [6], можно отметить нижеследующее:

1. При проведении расчёта выработки по методу МС-аналога используются данные с интервалом представления три часа и более. Согласно правилам Всемирной метеорологической организацией (ВМО), до получения следующего измерения действует текущее [7]. Это приводит к учёту рассчитанной мощности ВЭУ в течение трёх часов как постоянного значения.
2. При использовании повторяемости расчётной мощности ВЭУ за один год или за несколько лет (по данным ВИК) получаются заниженные показания годовой выработки и, как следствие, заниженные

значения КИУМ. Однако такой расчёт позволяет получить значения выработки и КИУМ без привязки ко времени, что можно рассматривать как минимальное значение годовых показателей ВЭУ с обеспеченностью более 50%.

3. Расчёт по МС-аналогу показал, что качество модели определения ветроэнергетического ресурса на площадке ВЭУ напрямую влияет на показатель годовой выработки. При расчёте по повторяемости мощности ветроэнергетической установки разница в периоде и количестве наблюдений, используемых для расчёта, не играет преобладающую роль — так же, как и при расчёте по данным реальных наблюдений за скоростью ветра на территории ВИК (ВЭУ).

4. Расчёт по повторяемости скорости ветра даёт схожие результаты, что и расчёт по повторяемости мощности, но из-за своей специфики не может выполнять проверочную роль, по нему нельзя проверять правильность получения значений годовой выработки и КИУМ для ВЭУ или ВЭС.

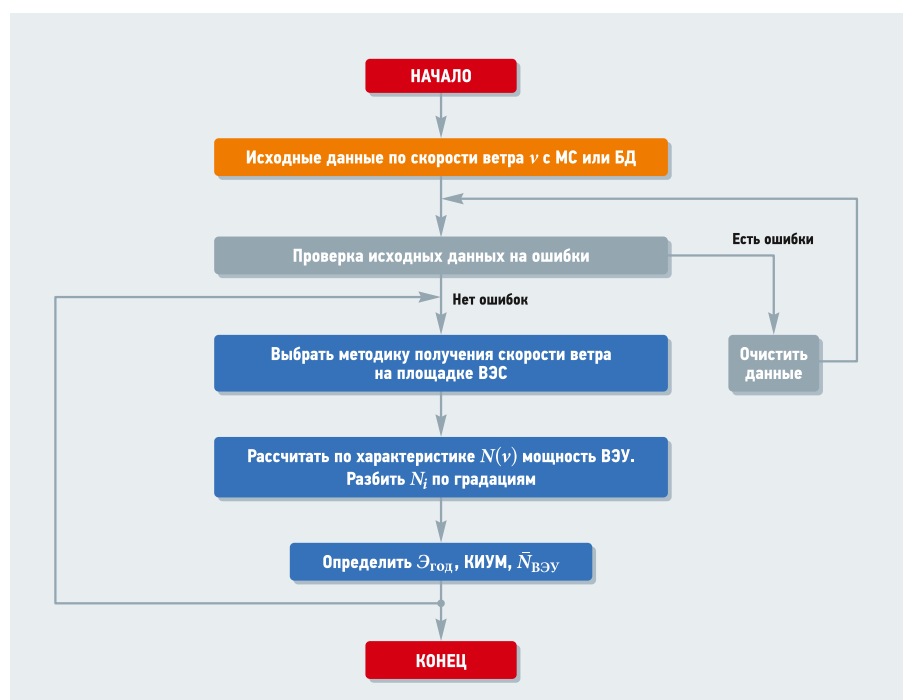


Рис. 1. Алгоритм расчёта годовой планируемой выработки ВЭУ

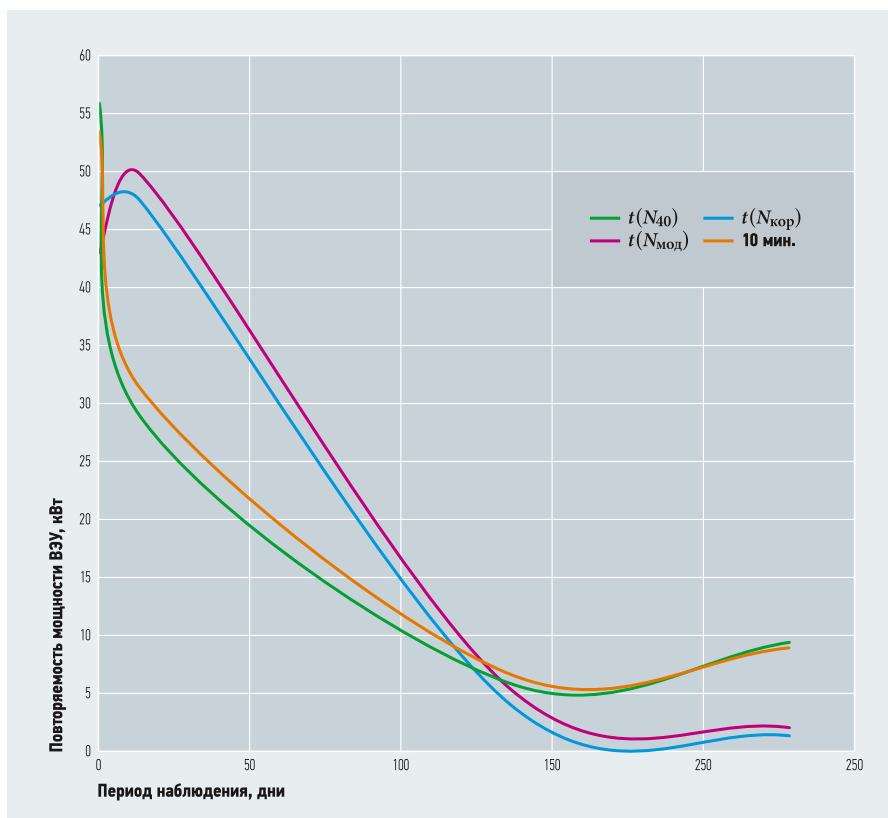


Рис. 2. Повторяемость мощности ВЭУ по расчётным данным ВИК, МС по характерному году и по нескольким МС за общий период наблюдений с ВИК

Данные по расчётам представлены в табл. 3 и на рис. 2, в скобках указан интервал представления данных. Повторяемость мощности ветроэнергостанции определялась по формуле (1), а среднее значение мощности вычислялось по формуле (2):

$$t(N_{ВЭУ}^{rpj}) = \frac{m}{n}; \quad (1)$$

$$\bar{N}_{год} = \sum_{j=1}^k [\bar{N}_{ВЭУ}^{rpj} t(N_{ВЭУ}^{rpj})], \quad (2)$$

где  $m$  — количество значений мощности, попадающее в диапазон градации;  $n$  — общее количество значений мощности;  $k$  — количество градаций.

Если говорить об обеспеченности мощности, то при расчёте по повторяемости значения для 50 % и для 90 % мало зависят от количества исходных данных (в пределах  $\pm 5\%$ ). Значение мощности для разных установок с обеспеченностью в 50 % не превышает  $0,1N_{уст}$ . В общем случае данное значение можно принять

как граничное значение обеспеченности мощности ВЭС.

Определение КИУМ при условии расчёта по повторяемости мощности приводит к заниженным значениям относительно расчёта по фактическим наблюдениям. Получаемые значения будут показывать минимальную границу эффективности станции для любого года по условиям прихода ветроэнергостанции.

Отдельно стоит отметить, что выбор источника исходных данных и расчётной модели будет оказывать наибольшее влияние на получаемые результаты. В большинстве случаев на ВИК имеются наблюдения за скоростью ветра за период меньше года или один год, поэтому построение корреляционной зависимости между МС-аналогом или несколькими ближайшими МС неизбежно. Если модель неточная, то и результаты будут завышены или занижены. Особенно если сильно влияет рельеф местности и сами МС расположены далеко от площадки.

Результаты расчёта годовой выработки ВЭУ по нескольким методикам

табл. 3

| Методика/<br>показатель | windPRO | МС-аналог 1 год<br>(3 ч интервал) | ВИК 1 год (10 мин<br>интервал) | ВИК $n$ лет<br>(3 ч интервал) | Несколько МС<br>(3 ч интервал) |
|-------------------------|---------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| $E_{год}$ , МВт·ч       | 346,5   | 131,2                             | 716,8                          | 290,7                         | 159,9                          |
| $\bar{N}_{год}$ , кВт   | 39,6    | 15                                | 81,8                           | 33,2                          | 18,3                           |
| КИУМ, %                 | 14,4    | 5,4                               | 29,7                           | 12,1                          | 6,6                            |
| $P(N_{ВЭУ})$ 50 %, кВт  | —       | 14,6                              | 12,8                           | 12,3                          | 15,9                           |
| $P(N_{ВЭУ})$ 90 %, кВт  | —       | 2,9                               | 2,6                            | 2,6                           | 3,2                            |

Предлагаемый метод оценки годовой выработки ВЭУ и её КИУМ имеет ряд преимуществ:

1. Получаемые значения не зависят от точности, количества и времени представления данных на ВИК.
2. Метод позволяет оценить нижнюю границу эффективности ВЭУ в конкретном регионе.
3. Результаты использования данного метода могут применяться как проверочные значения для указанных параметров в ТЭО проекта.

Из недостатков подхода стоит отметить:

1. Годовая выработка ВЭУ и её КИУМ сильно занижены относительно проектных или фактических значений.
2. Данный метод учитывает только правильность определения ветроэнергостанции на площадке ВЭУ и совершенно не учитывает остальные ограничения, которые могут быть для ветроэнергостанции со стороны работы в системе или совместно с дизельной электростанцией.
3. Применим только на этапе проектирования ВЭС.

## Выводы

1. Рассмотрена возможность использования повторяемости выдачи мощности ВЭУ для оценки эффективности работы проектируемой ВЭС, с определением мощности одной установки при обеспеченности в 50 %.
2. Проведено сравнение получаемых результатов с действующими методиками, используемыми в отечественном и зарубежном ПО.
3. Отмечены преимущества и недостатки предлагаемой методики оценки КИУМ.

1. Проектирование и эксплуатация ветроэнергостанций / А.Г. Васильев, Г.В. Дерюгина, Е.В. Игнатьев [и др.]. — М.: Изд-во МЭИ, 2025. 560 с.
2. Sharma P.K., Warudkar V., Ahmed S. A comparative analysis of wind resource parameters using WAsP and windPRO. International Journal of Green Energy. Vol. 16. Issue 2. Pp. 152–166.
3. Дерюгина Г.В., Игнатьев Е.В., Метт В.Д. Апробация программного комплекса Wind Turbine // Вестник МЭИ, 2023. №4. С. 80–90.
4. windPRO Use Cases [Электр. текст]. European Media Distribution (EMD). Режим доступа: emd-international.com. Дата обращения: 15.05.2026.
5. Алиходжина Н.В., Тягунов М.Г., Шестопалова Т.А. Обзор существующих моделей и методов расчёта основных характеристик ветра в определённой точке // Вестник КГЭУ, 2024. Т. 16. №3. С. 76–93.
6. Alihodzhina N., Titov D. Improving the methodology for conducting wind energy calculations by taking into account the influence of terrain and climate. Proc. of the 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon-2025). Novosibirsk State Technical University (NSTU), September 25–28, 2025. Magnitogorsk, Russia. Pp. 369–374.
7. Технический регламент. Сборник основных документов №2. Т. I: Общие метеорологические стандарты и рекомендуемые практики. ВМО-№49. — Женева, Швейцария: ВМО, 2019. 77 с.

References — see page 80.

Determination of wind turbine energy output with a specified level of reliability, taking into account the repeatability of power output, at the design stage of the station. Pp. 77–79.

**Nadezhda V. Alikhodzhina**, Assistant, Department of "Hydropower and Renewable Energy Sources" (HPRES), National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Dmitry S. Sychev**, PhD, Associate Professor, Department of HPRES, NRU "MPEI"; **Dmitry A. Titov**, Associate Professor, Department of "Mathematical and Computer modeling" (MCM), NRU "MPEI"

1. A.G. Vas'kov, G.V. Deryugina, E.V. Ignat'ev et al. *Proektirovanie i ekspluatatsiya vetroelektricheskikh stantsij* [Design and operation of wind power plant]. Moscow. *Izd-vo MEI* [Publishing House of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI)]. 2025. 560 p. [In Russian]
2. P.K. Sharma, V. Warudkar, S. Ahmed. A comparative analysis of wind resource parameters using WAsP and windPRO. *International Journal of Green Energy*. Vol. 16. Issue 2. Pp. 152–166.
3. G.V. Deryugina, E.V. Ignat'ev, V.D. Mett. *Aprobatsiya programmnogo kompleksa Wind Turbine* [Testing the wind turbine software package]. *Vestnik MEI* [Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute (MPEI)]. 2023. No. 4. Pp. 80–90. [In Russian]
4. windPRO Use Cases. European Media Distribution (EMD). Web-source: emd-international.com. Access date: May 15, 2026.
5. N.V. Alikhodzhina, M.G. Tyagunov, T.A. Shestopalova. *Obzor sushchestvuyushchikh modelej i metodov rascheta osnovnykh kharakteristik vetra v opredelennoj toчке* [Review of existing models and methods for calculating the main wind characteristics at a given point]. *Vestnik KGEU* [Bulletin of the Kazan State Power Engineering University]. 2024. Vol. 16. No. 3. Pp. 76–93. [In Russian]
6. N. Alihodzhina, D. Titov. Improving the methodology for conducting wind energy calculations by taking into account the influence of terrain and climate. *Proc. of the 2025 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon-2025)*. Novosibirsk State Technical University (NMSTU). September 25–28, 2025. Magnitogorsk, Russia. Pp. 369–374.
7. *Tekhnicheskij reglament. Sbornik osnovnykh dokumentov No. 2. T. I: Obshchie meteorologicheskie standarty i rekomenduemye praktiki. VMO-No.49* [Technical regulations. Collection of basic documents No. 2. Vol. I: General meteorological standards and recommended practices. WMO-No. 49]. *Vsemirnaya meteorologicheskaya organizatsiya (WMO)* [World Meteorological Organization (WMO)]. Geneva, Switzerland. 2019. 77 p. [In Russian]