

УДК 551.55: 551.556.3

**Лейсан Раисовна Гайнуллина**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной экологии и безопасности труда, Россия, Казань, e-mail: gainullina7819@mail.ru

**Хассан Фуад Алхадж**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», аспирант кафедры инженерной экологии и безопасности труда, Россия, Казань, e-mail: fouadhajjhassan42@gmail.com

## **О влиянии неопределенностей на прогнозы ветрового ресурса и выработки электроэнергии**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Годовое производство энергии ветроэнергетической установки является одним из наиболее важных показателей, определяющих прибыльность проекта ветроэнергетики. Методы, используемые для оценки годового производства энергии ветровой электростанции, требуют учета неопределенностей на всех этапах жизненного цикла проекта. При разработке финансовой модели ветроэнергетического проекта требуется учитывать информацию о неопределенностях в целях уменьшения ошибки и повышения надежности проекта. Специалистами различных стран ведется работа по повышению эффективности ветроэнергетических установок, исследованию ветроэнергетических ресурсов, а также по оценке эффективности их использования. При этом в специальной литературе не уделяется должного внимания проблеме оценки влияния различных неопределенностей на прогнозы ветрового ресурса и выработки электроэнергии.

**Материалы и методы.** Для расчета неопределенностей предложены два метода: детерминированный метод, основанный на предположении о независимости различных неопределенностей, и метод Монте-Карло, моделирующий поведение физической системы большое количество раз.

**Результаты.** Рассмотрены неопределенности, которые необходимо учитывать при проектировании ветровой электростанции, представлены диапазоны их изменения. Приведены графики выработки электроэнергии с различным уровнем вероятности достижения или превышения общей неопределенности для трех вариантов. Показано, что учет различных неопределенностей позволяет с повышенной точностью создавать прогноз выработки электроэнергии.

**Выводы.** Полученные результаты необходимы для разработки модели обработки данных ветроизмерений, позволяющей с повышенной точностью создавать прогноз выработки существующими ВЭС электроэнергии.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ветровые электростанции, расчет неопределенностей, метод Монте-Карло, ветроизмерения

**Leysan Raisovna Gainullina**

Kazan State Energy University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Environmental Engineering and Occupational Safety Department, Russia, Kazan, e-mail: gainullina7819@mail.ru

**Hassan Fouad Alhajj**

Kazan State Energy University, Postgraduate Student of the Environmental Engineering and Occupational Safety Department, Russia, Kazan, e-mail: fouadhajjhassan42@gmail.com

## **On the impact of uncertainties on wind resource and power generation forecasts**

### **Abstract**

**Background.** The annual power generation of a wind farm is one of the most important indicators determining the profitability of a wind power project. The methods used to estimate the annual power generation of a wind farm have to consider uncertainties at all stages of the project life cycle. When developing a financial model of a wind power project, it is required to consider information about uncertainties to reduce the error and increase the

reliability of the project. Specialists of various countries are improving the efficiency of wind power plants, studying wind energy resources, as well as assessing the efficiency of their use. However, special studies do not pay due attention to the problem of assessing the impact of various uncertainties on the forecasts of wind resource and power generation.

**Materials and methods.** Two methods are proposed to calculate uncertainties. They are a deterministic method based on the assumption of independence of various uncertainties, and a Monte Carlo method that simulates the behavior of a physical system many times.

**Results.** The paper considers the uncertainties to be considered during the design of a wind farm and presents the variation ranges. The authors have presented the plots of power generation with various levels of probability of being reached or exceeded the total uncertainty for three variants. It is shown that considering the various uncertainties allows a power generation forecast to be made with increased accuracy.

**Conclusions.** The results obtained are necessary to develop a wind measurement data processing model that allows us to forecast electricity generation by existing wind power plants with increased accuracy.

**Key words:** wind power, wind farms, calculation of uncertainties, Monte Carlo method, wind measurements

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2024.3.055-063

**Введение.** Производство энергии на ветровой электростанции следует стохастическому принципу и требует статистического анализа, в котором оценки производства электроэнергии должны быть связаны с вероятностями событий.

Анализ неопределенностей часто выполняется как часть оценки выработки энергии ветровой электростанции. Экономическая жизнеспособность ветровой электростанции требует анализа рисков, связанных с неопределенностью производства.

Неопределенности развития каждой ветровой электростанции должны определяться индивидуально, а затем рассчитываться для всего проекта. Существует несколько методов, таких как метод IEC (IEC 61400-12 Power Performance Testing), для оценки неопределенности измерения или метод Монте-Карло, которые приводят к различным результатам, связанным с различными процессами [1, 2].

Интересным способом представить неопределенности проекта является указание вероятности ожидаемого годового производства ветровой электростанции [3, 4].

При включении ветроэлектростанции (ВЭС) в энергосистему необходимы гарантии того, что оценка вырабатываемой электрической энергии имеет наименьшую возможную погрешность. В России штраф уплачивается в случае, если выработка электроэнергии ВЭС не соответствует согласованной мощности; превышенная энергия продается по более низкой цене, чем оговоренная<sup>1</sup>.

Чтобы снизить риск того, что произведенной энергии будет меньше, чем по контракту, физическая гарантия выработанной энергии ветра должна быть рассчитана с учетом всех источников неопределенностей в проекте, чтобы сертифицированная энергия могла иметь вероятность 90 % (достижение или превышение этого значения). Это значение называется P90 [5, 6].

Экономическая целесообразность производства ветровой энергии в рамках нормативно-правовой базы рынка электроэнергии Российской Федерации возникла из-за необходимости разработки комплекса конкретных правил, направленных на достижение следующих целей:

- минимизировать стоимость энергии поощрением эффективной закупки ветровой энергии, снизить финансовую стоимость проектов, смягчить неопределенность в доходах от продажи энергии;
- снизить риск несоблюдения контрактного объема энергии.

В соответствии с действующими правилами энергетических аукционов, предприниматели наказываются за производство меньшего количества энергии, чем предусмотрено контрактом с учетом допустимой погрешности.

Снижение неопределенности за счет повышения качества их критериев – единственный способ удержать финансовый риск в приемлемых пределах при условии обеспечения большей безопасности и удовлетворении спроса на энергию.

<sup>1</sup> Постановление от 27 декабря 2010 г. № 1172 «Об утверждении правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности».

Важно определить основные источники неопределенностей в проекте ветровой электростанции, чтобы уменьшить их величину, а затем точно рассчитать их влияние на прогнозы выработки электроэнергии.

Расчет оценочного производства энергии ветровой электростанцией подвержен неопределенностям, которые необходимо учитывать, чтобы оценить риск инвестиций на основе точности расчетного производства энергии [7].

Основная цель проекта состоит в том, чтобы представить основные источники неопределенности в процессе оценки производства энергии, определить ожидаемое улучшение энергетической надежности и снизить финансовые риски проектов ветровых электростанций.

**Методы исследования.** Существует два метода расчета неопределенностей: детерминированный метод и метод Монте-Карло.

Детерминированный метод основан на предположениях о том, что различные неопределенности независимы и что существует линейная зависимость между входными неопределенностями и выходной неопределенностью. Различные отдельные погрешности суммируются с использованием среднеквадратичного значения. Этот метод позволяет определить величину отдельных неопределенностей.

Метод Монте-Карло для оценки энергетических неопределенностей является стохастическим методом, моделирующим поведение физической системы большое количество раз. При анализе неопределенностей проекта ветровой электростанции эти симуляции производят выходные данные ветровой электростанции, в то время как неопределенности случайным образом варьируются в соответствии с определенным распределением вероятностей. Окончательные оценки неопределенности затем определяются из распределения смоделированных выходных данных. Это допускает нелинейные отношения между различными неопределенностями, поскольку окончательное значение не является результатом суммирования различных неопределенностей [8].

**Результаты исследования.** Основные источники неопределенностей можно

разделить на две группы: неопределенности ветрового ресурса и неопределенности производства энергии.

**Неопределенности ветрового ресурса.** Эти неопределенности связаны с ограничениями процесса измерения на метеорологической вышке. В эту группу входят неопределенности (погрешности), связанные с типом датчика, установкой и калибровкой датчиков, расположением вышек и др.

Для превращения неопределенности ветрового ресурса в неопределенность производства энергии требуется коэффициент чувствительности. Коэффициент чувствительности соответствует изменению выработки энергии, вызванному изменением скорости ветра, и является специфическим значением для каждого проекта. Производство энергии и скорость ветра не имеют линейной зависимости.

**Точность датчика.** Качество результатов измерения напрямую зависит от качества оборудования и способа его установки на метеовышке. Затраты на качественную измерительную систему и ее правильную установку невелики по сравнению со стоимостью ветровой электростанции.

Согласно IEC 61400-12-1 (2005 г.), операционную стандартную неопределенность можно рассчитать по уравнению

$$u_j = (0,05 + 0,005 \cdot u_i) \frac{k}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

где  $u_i$  – бин скорости ветра;  $k$  – классификационный номер.

Простой диапазон неопределенности относительно скорости ветра, связанный с точностью прибора для изолированного датчика, включает значения примерно от 1 до 6 %<sup>2</sup>.

**Калибровка датчика.** Одним из важных аспектов, касающихся гарантии качества измерения скорости ветра, является калибровка анемометров в соответствующей аэродинамической трубе [9]. Есть исследования, которые показывают погрешность более 3,5 % от анемометров, калиброванных в различных аэродинамических трубах. По этой причине MEASNET – измерительная сеть институтов ветроэнергетики – предложила метод измерения для калибровки мерных чашечных анемометров, специально разработанных для ветроэнергетики.

<sup>2</sup> Полтраф: Промышленная автоматика / [официальный сайт]. URL: [https://poltraf.ru/nablyudatelnye\\_stantsii\\_i\\_komplekсы/datchiki\\_skorosti\\_napravleniya\\_vetra/datchiki\\_napravleniya\\_vetra/skorosti\\_vetra](https://poltraf.ru/nablyudatelnye_stantsii_i_komplekсы/datchiki_skorosti_napravleniya_vetra/datchiki_napravleniya_vetra/skorosti_vetra)

Следуя этой практике, MEASNET гарантирует, что используемые аэродинамические трубы не будут отличаться от эталонных по скорости ветра более чем на 0,5 %, и, таким образом, такая процедура обеспечит небольшую и контролируруемую погрешность анемометров, сертифицированных вышеупомянутым методом. В настоящее время подавляющее большинство исследовательских учреждений и учреждений по оценке ветровой энергии требуют, чтобы анемометры имели сертификаты калибровки, выданные учреждениями, имеющими штамп MEASNET, т. е. они соблюдают стандарт калибровки, установленный этим учреждением.

Использование индивидуально калиброванных анемометров оказывает непосредственное влияние на снижение погрешности измерения скорости ветра [9].

Средняя относительная неопределенность калибровки различных моделей чашечных и пропеллерных анемометров представлена в табл. 1.

Таблица 1. Средняя относительная неопределенность

Модель чашечного анемометра	Средняя относительная неопределенность, %
NRG №40	1,48
NRG IF3	1,66
Risoe Cup	1,43
R.M. Young Propeller	0,50
R.M. Young Wind Monitor	0,75
R.M. Young Wind Sentry	1,02
Second Wind C3	1,64
Thies First Class	2,04
Vaisala WAA252	1,98
Vector A100LK	2,06
Vestas Cup	1,09

*Неопределенность при установке датчика.* Анемометры и датчики направления (флюгеры) должны быть закреплены на башне с помощью жестких стрел, чтобы датчики не подвергались вибрации и, таким образом, измерение данных не подвергалось помехам. Длина установленной стрелы должна соответствовать рекомендациям Международной энергетической

ассоциации (МЭА). Расстояние между мачтой и датчиками должно отражать уровень неопределенности, который считается приемлемым [10].

На рис. 1 и 2 показаны графики изо-скорости с возмущением потока из-за близости к башне.

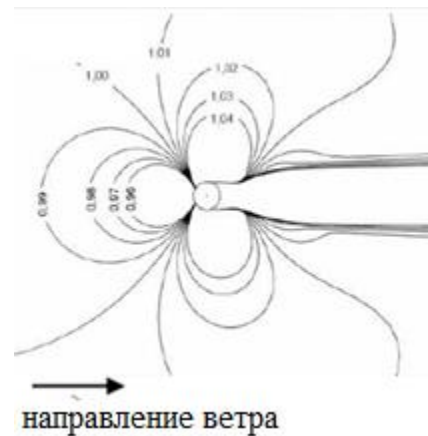


Рис. 1. Вмешательство метеорологической вышки в ветровой поток (трубчатая башня)

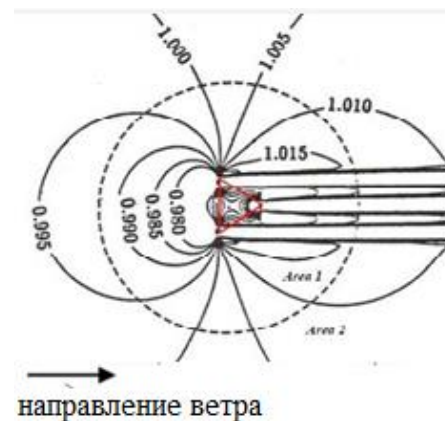


Рис. 2. Вмешательство метеорологической вышки в ветровой поток (треугольная решетчатая башня)

Чтобы свести к минимуму влияние мачты на анемометр, это оборудование должно находиться на минимальном расстоянии от метеорологической мачты и располагаться там, где интерференция изолиний скорости ветра достигает ближайшего к единице значения, используя преобладающее направление ветра в качестве эталона.

Стандартные рекомендации МЭА предписывают для трубчатых мачт погрешность 0,5 %, минимальное расстояние между датчиками и мачтой, равное 8,5 диаметров мачты, измеренному от центра мачты. Для решетчатых башен погрешность составляет

0,5 %, расстояние должно быть не менее чем в 5,7 раза больше диаметра мачты. Однако рекомендуется, чтобы установленная стрела не была намного больше этой меры для уменьшения вибрации [11].

*Неопределенность в долгосрочном прогнозе ветра.* Ветер имеет стохастический характер, при котором наблюдается значительная межгодовая изменчивость, т.е. средняя скорость ветра может меняться от года к году.

Измерения скорости ветра в короткие периоды (1–3 года) не отражают долгосрочный ветровой ресурс в силу изменчивости.

Следовательно, для правильной оценки местного ветрового потенциала требуются данные за длительный период, чтобы уменьшить ошибку, связанную с изменениями поведения ветра в разные годы. Таким образом, чтобы уменьшить ошибки в оценке производства энергии ветровой электростанцией, выполняется коррекция данных, измеренных на месте, с многолетними данными. Эта поправка улучшает долгосрочную оценку скорости ветра, но также вносит неопределенность в процесс.

Для анализа неопределенности в долгосрочном ветровом прогнозе важно учитывать как исторические данные параметров ветра, так и неопределенность будущей изменчивости ветра.

Неопределенность ретроспективных данных ветровых характеристик связана с корреляцией между целевым участком (данные измерений) и опорной измерительной станцией (долгосрочные данные). Чем слабее корреляция с опорной станцией, тем больше неопределенность скорректированного долгосрочного ветрового ресурса на целевом участке. Некоторые оценки неопределенности корреляции скорости ветра приведены в табл. 2.

Неопределенность будущей изменчивости ветра должна составлять примерно 1,4 % (10 лет) и 2,2 % (25 лет) [12, 13].

*Неопределенность в моделировании ветрового потока.* Сложность рельефа, местная неровность, наличие препятствий и удаленность турбин от метеорологических вышек входят в число факторов, определяющих величину неопределенностей. Диапазон неопределенностей может быть очень широким и определяется для каждого целевого участка проекта, но типичный диапазон составляет 3–6 %.

Таблица 2. Неопределенность корреляции скорости ветра как функция  $R^2$

Коэффициент корреляции ( $R^2$ )	Неопределенность корреляции скорости ветра
> 0,9	< 1 %
0,9–0,8	1–2 %
0,7–0,6	3–5 %

*Другие неопределенности.* Для повышения точности прогноза при расчетах выработки электроэнергии должны быть приняты во внимание и другие источники неопределенностей ветрового ресурса: неопределенность в вертикальной экстраполяции ветра, в численном моделировании волн, неопределенность в наличии данных о ветре и т.д. [8]

*Неопределенность оценки энергии.* Неопределенность кривой мощности. Кривая мощности ветровой турбины представляет собой кривую, которая отражает выходную мощность для каждой конкретной скорости ветра и, таким образом, является одним из основных показателей для оценки производства энергии [14]. Однако особенности рельефа могут значительно влиять на выходную мощность турбин. Такие переменные, как турбулентность и топография, могут играть значительную роль в изменении выходной мощности ветровой турбины.

Когда тест измерения мощности проводится производителем в соответствии с международными процедурами, типичная погрешность составляет от 4 до 6 %. Если тест измерения мощности не выполнен, неопределенность кривой мощности может составлять от 8 до 10 % [12].

Существуют и другие неопределенности: неопределенность из-за электрических потерь, неопределенность доступности энергии и т.д.

*Выработка энергии и вероятность ее превышения.* Для правильной оценки производства энергии в дополнение к оценке неопределенностей проекта важно учитывать все потери энергии, такие как электрические потери, недоступность ветровой турбины, потери в следе и т.д.

После расчета производства энергии и дисконтирования всех потерь энергии получается значение чистой годовой выработки электроэнергии.



Чистая годовая выработка электроэнергии и общая неопределенность определяют, соответственно, среднее значение и стандартное отклонение для нормального распределения Гаусса. Абсолютное стандартное отклонение получается путем умножения общей неопределенности на чистую годовую выработку электроэнергии.

Расчетная чистая годовая выработка электроэнергии представляет собой значение производства энергии, называемое P50, оценку центрального производства энергии в нормальном распределении Гаусса. P50 представляет собой значение энергии с 50 %-ной вероятностью превышения.

Вероятность распределения производства энергии при нормальном Гауссовом распределении определяется выражением

$$f(E) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(E-E_m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2)$$

где  $f(E)$  – вероятность производства энергии  $E$ , %;  $E_m$  – среднее нормального распределения Гаусса;  $\sigma$  – абсолютное стандартное отклонение оценки от среднего значения годовой выработки энергии.

Уравнение (2) графически показано на рис. 3 с указанием значения P50.

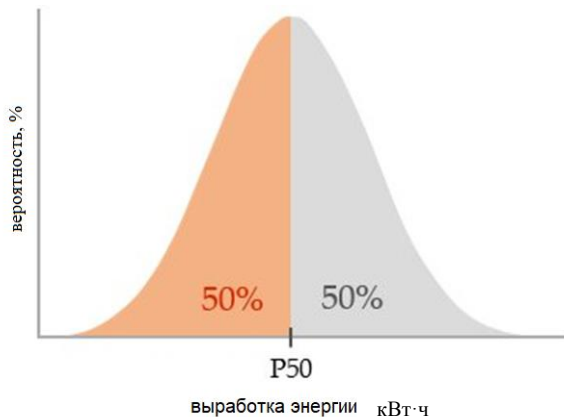


Рис. 3. Вероятность распределения производства энергии при нормальном Гауссовом распределении

Чтобы использовать табличные значения (табл. 3), их необходимо преобразовать в нормальное распределение Гаусса.

Чтобы определить выработку энергии с определенным уровнем вероятности, необходимо использовать таблицы нормального распределения для конкретных вероятностей и соответствующих значений  $z$ , определяющих вероятность того, что случайная величина из

стандартного нормального распределения меньше или равна заданному значению.

Расчет чистой выработки электроэнергии с учетом P50 и неопределенностей проекта для желаемой вероятности превышения следует выполнять по следующему уравнению:

$$P_x = P_{50} (1 - z \cdot Uncertainty_{total}), \quad (3)$$

где  $P_x$  – чистая выработка энергии до желаемой вероятности превышения;  $Uncertainty_{total}$  – общая неопределенность проекта (значение, найденное в таблице вероятностей); значение  $z$  зависит от желаемой вероятности.

В табл. 3 приведены значения  $z$  для различных уровней вероятности.

Таблица 3. Таблица нормального распределения конкретных вероятностей и соответствующих им значений  $z$

Вероятность превышения, %	$z$
99	2326
95	1645
90	1282
85	1036
84	1000
80	0,842
75	0,674
50	0
25	0,674
10	1282
1	2326

Важно отметить, что полная неопределенность связана со значением энергии P50. Чистая годовая выработка электроэнергии P90 означает 90 %-ную вероятность достижения или превышения среднего значения годовой выработки энергии.

Рекомендуется, чтобы общая неопределенность проекта составляла около 15 %. Чем выше значение общей неопределенности, тем выше разница между P50 и другими уровнями вероятности превышения [7, 15].

*Примеры расчета вероятности превышения.* Ниже приведены три примера с одинаковым количеством энергии (P50), но с разными значениями полной неопределенности. Количество выработанной электроэнергии с вероятностями P75 и P90 (вероятность превышения 75 и 90 %) используется для демонстрации влияния общей неопределенности.

**Пример 1:** P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 10 % (табл. 4).

В этом примере значения энергии P75 и P90 соответственно на 7 и 13 % ниже, чем значение энергии P50.

Таблица 4. **Пример 1: P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 10 %**

P50, ГВт·ч/год	Неопределенность	P75, ГВт·ч/год	P90, ГВт·ч/год
120	10 %	112	105
Отличие от P50		-7 %	-13 %

На рис. 4 показаны различные уровни вероятности превышения для этого примера.

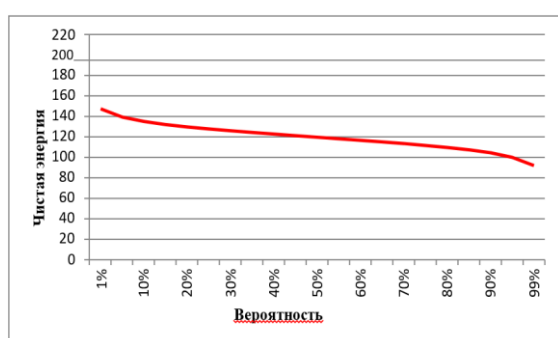


Рис. 4. Вероятность превышения: P50 120 ГВт·ч/год и неопределенность 10 %

**Пример 2:** P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 15 % (табл. 5, рис. 5).

В этом примере значения энергии P75 и P90 соответственно на 10 и 19 % ниже, чем значение энергии P50.

Таблица 5. **Пример 2: P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 15 %**

P50, ГВт·ч/год	Неопределенность, %	P75, ГВт·ч/год	P90, ГВт·ч/год
120	15	108	97
Отличие от P50		-10 %	-19 %

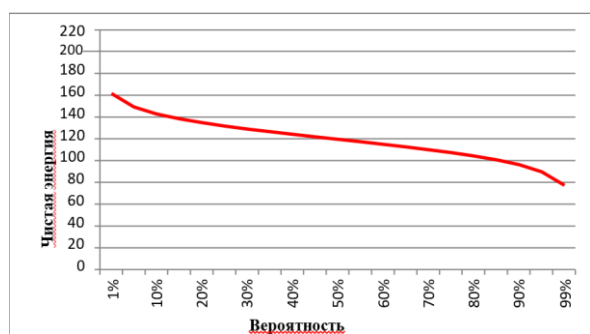


Рис. 5. Вероятность превышения: P50 120 ГВт·ч/год и неопределенность 15 %

**Пример 3:** P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 30 % (табл. 6, рис. 6).

В этом примере значения энергии P75 и P90 соответственно на 20 и 38 % ниже, чем значение энергии P50.

Таблица 6. **Пример 3: P50 120 ГВт·ч/год и общая неопределенность 30 %**

P50, ГВт·ч/год	Неопределенность	P75, ГВт·ч/год	P90, ГВт·ч/год
120	30 %	96	74
Отличие от P50		-20 %	-38 %

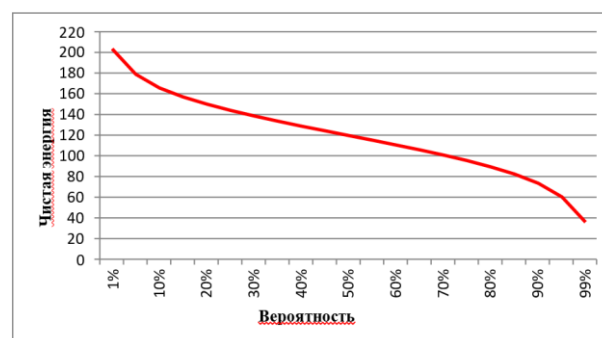


Рис. 6. Вероятность превышения: P50 120 ГВт·ч/год и неопределенность 30 %

Важно правильно определить количество неопределенностей проекта ветроэнергетики, поскольку они могут отражать значительные изменения в производстве энергии. В примерах расчетов выработки электроэнергии для 120 ГВт·ч/год при общей неопределенности 10 % разница между P50 и P90 составляет 15 ГВт·ч/год; при общей неопределенности 15 % разница между P50 и P90 составляет 23 ГВт·ч/год; при общей неопределенности 30 % разница между P50 и P90 составляет 46 ГВт·ч/год.

**Выводы.** Таким образом, анализ неопределенностей имеет первостепенное значение при оценке экономической жизнеспособности ветроэнергетического проекта.

Дополнительные затраты на точный мониторинг ветра относительно малы по сравнению с инвестициями в проект ветроэнергетики.

Рекомендуется использовать анемометры первого класса, которые должны быть правильно откалиброваны. Наличие нескольких измерительных вышек очень важно для снижения неопределенностей. Максимальное расстояние между предполагаемым расположением турбины и метеорологической вышкой должно быть менее

6 км для равнинной местности и 2 км для сложной местности.

Правильная модель ветрового потока важна для уменьшения неопределенностей. Линейная модель рекомендуется для равнинной местности и нейтральных климатических условий. Для сложной местности обычно рекомендуется модель вычислительной гидродинамики.

Чтобы избежать существенных различий в расчетах энергии от различных независимых сертификационных органов, важно определить стандартную методологию для расчета неопределенностей в производстве энергии на ветровых электростанциях.

### Список литературы

1. **Владимирова Л.В., Овсянников Д.А., Рубцова И.Д.** Методы Монте-Карло в прикладных задачах. – СПб.: Изд-во ВВМ, 2015. – 166 с.
2. **Кашникова А.П.** Метод Монте-Карло в задачах моделирования процессов и систем // *Modern Science*. – 2021. – № 1-2. – С. 358–362.
3. **The renewable energy policy Paradox /** B. Jorge, F.B. Rolando, A.B. Carlo, N. Nora // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Т. 82 (Part 1). – P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.002>.
4. **Alhaji Hassan F., Sidorov A.** Study of power system stability: Matlab program processing data from Zahran power plant (Beirut, Lebanon) // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Т. 1, No. 2. – P. 60–70. DOI:10.28991/HEF-2020-01-02-02.
5. **Practical study on heat pump enhancement by the solar energy /** O. Almohammed, F. Philippova, F. Alhaji Hassan, et al. // *E3S Web of Conferences*. – 2021. – Issue 288. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801069>.
6. **Mestnikov N., Hassan F.A., Alzakkar A.** Study of operation of combined power supply system based on renewable energy in territory of far east of Russia // *International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*. – 2021. – P. 114–118. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM51226.2021.9446439>.
7. **Филиппова Т.А., Русина А.Г., Дронова Ю.В.** Модели и методы прогнозирования электроэнергии и мощности при управлении режимами электроэнергетических систем. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 368 с.
8. **Алхадж Хассан Ф., Алали Ш., Гайнуллина Л.Р.** Повышение эффективности ветровых электростанций // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2022. – № 26(2). – С. 217–227. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-217-227>.
9. **Coquilla R.V., Obermeier J.** Calibration Uncertainty Comparisons Between Various Anemometers // *American Wind Energy Association AWEA*, 2008.
10. **Ismail A., Yoshida S.** Aeroelastic analysis for side-booms of a coplanar twin-rotor wind turbine // *International Review of Aerospace Engineering*. – 2020. – Т. 13(4). – P. 135–140. <https://doi.org/10.15866/irease.v13i4.18355>
11. **Alhaji Hassan F.** Multi-criteria Approach and Wind Farm Site Selection Analysis for Improving Power Efficiency // *Journal of Human, Earth, and Future* – 2020. – Т. 1(2) – P. 60–70. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-02-02.
12. **Alhaji Hassan F., Mahmoud M., Al-mohammed O.A.M.** Analysis of the Generated Output Energy by Different Types of Wind Turbines // *Journal of Human, Earth, and Future*. – 2020. – Т. 1(4) – P. 181–187. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-04-03.
13. **Samokhvalov D.V., Jaber A.I., Almah-turi F.S.** Maximum Power Point Tracking of a Wind-Energy Conversion System by Vector Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator // *Russ. Electr. Engin.* – 2021. – Т. 92. – P. 163–168.
14. **Ильичев В.Ю., Шевелев Д.В.** Расчет характеристик мощности ветряных турбогенераторов с применением программного модуля Windpowerlib // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2021. – № 1(47). – С. 23–31.
15. **Возобновляемые источники энергии и смягчение воздействий на изменение климата: специальный доклад межправительственной группы экспертов по изменению климата.** – Женева, 2011. – 215 с.

### References

1. Vladimirova, L.V., Ovsyannikov, D.A., Rubtsova, I.D. *Metody Monte-Karlo v prikladnykh zadachakh* [Monte Carlo methods in applied problems]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo VVM, 2015. 166 p.
2. Kashnikova, A.P. Metod Monte-Karlo v zadachakh modelirovaniya protsessov i system [Monte Carlo method in the problems of modeling processes and systems]. *Modern Science*, 2021, no. 1-2, pp. 358–362.
3. Jorge, B., Rolando, F.B., Carlo, A.B., Nora, N. The renewable energy policy Paradox. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82 (Part 1), pp. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.002>.
4. Alhaji Hassan, F., Sidorov, A. Study of power system stability: Matlab program processing



data from Zahrani power plant (Beirut, Lebanon). *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 1, no. 2, pp. 60–70. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-02-02.

5. Almohammed, O., Philippova, F., Alhajj Hassan, F., Timerbaev, N., Fomin, A. Practical study on heat pump enhancement by the solar energy. *E3S Web of Conferences*, 2021, issue 288. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801069>.

6. Mestnikov, N., Hassan, F.A., Alzakkar, A. Study of operation of combined power supply system based on renewable energy in territory of far east of Russia. *International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*, 2021, pp. 114–118. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM51226.2021.9446439>.

7. Filippova, T.A., Rusina, A.G., Dronova, Yu.V. *Modeli i metody prognozirovaniya elektroenergii i moshchnosti pri upravlenii rezhimami elektroenergeticheskikh sistem* [Models and methods for forecasting electricity and power in the control of modes of electric power systems]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2009. 368 p.

8. Alkhadzh Khassan, F., Alali, Sh., Gaynulina, L.R. Povyshenie effektivnosti vetrovykh elektrostantsiy [Increasing the efficiency of wind power plants]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2022, no. 26(2), pp. 217–227. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-217-227>.

9. Coquilla, R.V., Obermeier, J. Calibration Uncertainty Comparisons Between Various Anemometers. *In American Wind Energy Association AWEA*, 2008.

10. Ismaiel, A., Yoshida, S. Aeroelastic analysis for side-booms of a coplanar twin-rotor wind

turbine. *International Review of Aerospace Engineering*, 2020, vol. 13(4), pp. 135–140. <https://doi.org/10.15866/irease.v13i4.18355>

11. Alhajj Hassan, F. Multi-criteria Approach and Wind Farm Site Selection Analysis for Improving Power Efficiency. *Journal of Human, Earth, and Future*, 2020, vol. 1(2), pp. 60–70. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-02-02.

12. Alhajj Hassan, F., Mahmoud, M., Almohammed, O.A.M. Analysis of the Generated Output Energy by Different Types of Wind Turbines. *Journal of Human, Earth, and Future*, 2020, vol. 1(4), pp. 181–187. DOI: 10.28991/HEF-2020-01-04-03.

13. Samokhvalov, D.V., Jaber, A.I., Almahuri, F.S. Maximum Power Point Tracking of a Wind-Energy Conversion System by Vector Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator. *Russ. Electr. Engin.*, 2021, vol. 92, pp. 163–168.

14. Il'ichev, V.Yu., Shevelev, D.V. Raschet kharakteristik moshchnosti vetryanykh turbogeneratorov s primeneniem programmnoy modulya Windpowerlib [The calculation of power characteristics of wind turbine generators using the software module Windpowerlib]. *Izvestiya MGTU «MAMI»*, 2021, no. 1(47), pp. 23–31.

15. Vozobnovlyaemye istochniki energii i smyagchenie vozdeystviy na izmeneniye klimata [Renewable Energy and Climate Change Mitigation]. *Spetsial'nyy doklad mezhpriatel'stvennoy gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata* [Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change]. Zheneva, 2011. 215 p.