

# РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНОСТИ ВЕТРЯНЫХ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ WINDPOWERLIB

К.Т.Н. Ильичев В.Ю., К.Т.Н. Шевелев Д.В.

Калужский филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»  
patrol8@yandex.ru

Проблема использования альтернативных источников энергии с каждым годом приобретает все большую актуальность. Одним из видов наиболее перспективных установок альтернативной энергетики являются ветряные турбогенераторы.

Статья посвящена созданию и апробации расчетной программы для определения основных показателей ветряных генераторов – зависимости коэффициента мощности (КПД) и вырабатываемой мощности от скорости ветра, кривой изменения мощности по временным интервалам, средней мощности за год.

В начале работы приводятся основные сведения об установках альтернативной энергетики и в частности, о ветрогенераторах, рассматриваются их достоинства, недостатки и способы технико-экономического обоснования целесообразности применения в данной местности по статистическим данным о погодных условиях.

Далее упоминаются модули, используемые в программе, основным из которых является специальная библиотека команд для расчета ветряных турбоустановок Windpowerlib. Описывается последовательность реализации этапов алгоритма расчета: способов ввода погодных данных и основных характеристик турбины, процедуры расчета мощности турбогенератора, вывода результатов в виде качественно оформленных графиков.

Для апробации разработанной программы произведен расчет энергетических характеристик одного из наиболее распространенных и широко применяемых в мире ветрогенераторов – модели Siemens SWT 3.6-120, произведено сравнение результатов расчета с эксплуатационными данными, опубликованными фирмой-изготовителем данной установки. С помощью графиков доказана высокая степень соответствия рассчитанных и фактических характеристик. Определено изменение мощности установки в течение года по часовым временным промежуткам, а также средняя вырабатываемая за год мощность.

Полученный программный продукт позволяет конечному пользователю легко загрузить исходные данные и осуществить автоматический расчет всех вышеуказанных характеристик любой ветряной турбоустановки.

В заключении сделаны выводы о проделанной работе, приведены рекомендации для расширения сфер применения рассмотренной методики к определению характеристик прочих энергетических установок. Указано планируемое направление дальнейших исследований по данному направлению с использованием разработанного программного продукта.

**Ключевые слова:** альтернативная энергетика, ветряная турбина, ветрогенератор, мощность турбины, энергия ветра, модуль Windpowerlib, OpenEnergy Database.

**Для цитирования:** 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. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-23-31.

## Введение

Доля нетрадиционных (альтернативных), особенно возобновляемых, источников электроэнергии в структуре мировой электрогенерации возрастает с каждым годом, что связано с истощением и удорожанием таких ископаемых топлив, как нефть, газ, уголь. Особенно это характерно для регионов, не располагающих традиционными топливными ресурсами, а также для некоторых конечных автономных потребителей. Такими потребителями, к примеру, могут являться производители сельскохозяйственной продукции, фермерские хозяйства, военные части, поселки, расположенные вдали от цивилизации, на большом расстоянии от крупных электростанций и электрических сетей. Следует отметить, что конкурентоспособность установок альтернативной энергетики так же, как и их суммарная установленная мощность, с каждым годом возрастает благодаря улучшению их показателей, в частности уменьшению удельной стоимости энергии и повышению коэффициента полезного действия (КПД).

К наиболее широко применяемым альтернативным источникам электроэнергии относятся солнечные, ветряные, геотермальные электростанции, микро-ГЭС и установки, работающие на таких видах топлива, как дрова, торф, биогаз, иловые осадки и др. [1]. Для оптимального выбора конкретной электрической энергоустановки необходимо произвести сравнительный экономический анализ типов и моделей установок, представленных на рынке, их технических характеристик, условий эксплуатации и эффективности работы в данном регионе. Еще одним из факторов сравнения энергоисточников является их экологичность – минимизация вреда, причиняемого окружающей среде при эксплуатации.

Объектом данного исследования является один из видов установок альтернативной энергетики – ветряные генераторы. Их работа возможна как в составе энергосистемы, так и в качестве автономного источника электроэнергии. Возводятся также площадки с размещением нескольких (в некоторых случаях более 100) ветрогенераторов, работающих на общую электрическую сеть, называемые wind farm – ветряные фермы. Наибольшая установленная мощность ветрогенераторов размещена в Соединенных Штатах, в Германии, Дании, Нидерландах, Великобритании [2]. Всего в мире

насчитывается более 20 тысяч мощных ветроэлектростанций.

Преимуществами ветряных электростанций перед другими возобновляемыми энергоисточниками являются [3]:

- 1) использование неисчерпаемого и бесплатного источника энергии;
- 2) отсутствие отходов и выбросов вредных газов;
- 3) быстрота монтажа и простота обслуживания;
- 4) отсутствие ярко выраженной зависимости вырабатываемой мощности от сезона;
- 5) возможность обеспечения полной независимости от других источников электроэнергии при использовании аккумуляторов и инверторов напряжения;
- 6) длительный срок службы (обычно не менее 20–30 лет).

Целесообразность применения ветряной установки в рассматриваемом регионе в основном определяется средней скоростью ветра в течение года. При первом приближении, если средняя скорость ветра превышает 4 м/с, то установка ветрогенератора считается экономически целесообразной, а при скорости 7–10 м/с обычно достигается максимальный КПД. Особенно эффективна работа ветрогенераторов в открытом море и в прибрежных районах, отличающихся особенно высокой скоростью ветра [4]. Желательно размещать ветряное колесо на как можно большей высоте, т.к. скорость ветра с увеличением высоты также возрастает. Скорость ветра выше 25 м/с может привести к ускоренному износу и выходу из строя узлов установки, хотя современные ветряные турбогенераторы кратковременно выдерживают без разрушения нагрузки от ветра, дующего со скоростью до 70 м/с.

Основными недостатками ветряных электрогенераторов являются длительный срок окупаемости и очень высокая неравномерность выработки энергии, связанная с постоянным изменением скорости и направления ветра.

Теоретическая мощность ветроустановки пропорциональна кубу скорости ветра [5], однако в реальных условиях начиная с некоторого значения скорости ветра мощность не возрастает из-за стремительно увеличивающихся потерь энергии. Эти потери возникают из-за нерасчетных режимов обтекания лопастей, спрофилированных для работы на номинальном режиме; то есть лопасти имеют

фиксированные аэродинамические формы, которые могут обеспечивать максимальный КПД только при определенном направлении и скорости ветра [6].

Целью данной работы является разработка программы, позволяющей рассчитать и представить в виде графиков характеристики мощности ветрогенератора для заданного промежутка времени. Необходимо рассчитать изменение мощности по часовым промежуткам времени и среднюю вырабатываемую мощность в течение года. Эти данные необходимы для проведения технико-экономического обоснования использования исследуемой ветроустановки в заданном регионе.

### Методы и средства проведения исследований

Традиционные средства расчета ветрогенераторов характеризуются следующими недостатками: реализация точных методов (с использованием трехмерного моделирования, моделей течения и пр.) является трудоемкой и дорогой для конечного пользователя, а оценочные расчеты (с использованием приближенных формул) дают низкую точность результатов. Однако в последние годы появились доступные программные средства, позволяющие реализовать совершенные и точные методы расчета энергоустановок достаточно простыми способами. Одно из наиболее подходящих с точки зрения авторов программных средств применяется в данном исследовании и кратко описывается в статье.

Программа расчета характеристик ветряного турбогенератора реализована с использованием языка Python, отличающегося универсальностью и удобством применения для создания научных приложений, и специальной, свободно распространяемой (freeware) библиотеки для работы с характеристиками энергетических ветроустановок Windpowerlib

[7], также созданной на языке Python. Данная библиотека ранее являлась частью модуля Feedinlib [8], объединяющего функции расчета солнечных и ветряных электростанций, но затем была выделена в качестве отдельного модуля для расчета только ветрогенераторов, т.к. появилась потребность в более подробном изучении и развитии именно этого направления электрогенерации.

Разработанная программа состоит из четырех функциональных блоков:

- 1) импорт данных о погоде по заданным временным отсчетам;
- 2) инициализация (задание характеристик) ветряной турбины;
- 3) расчет изменения мощности турбогенератора с течением времени с использованием функций модуля Windpowerlib;
- 4) визуализация рассчитанной зависимости с помощью библиотеки графического вывода Matplotlib.

Кроме библиотеки Windpowerlib, в начале программы загружаются следующие необходимые для осуществления вспомогательных операций модули Python: Os – для обработки системных событий, Pandas – для работы с базой погодных данных, Requests – для осуществления http-запросов к данным из сети интернет, Logging – для записи сообщений в log-файл при выполнении программы с целью ее отладки.

Импорт погодных данных осуществляется из базы данных, представленной в виде файла формата csv, размещаемого в директории с программой. Файл содержит почасовые данные за все дни 2010 г. о следующих параметрах: дата и время, атмосферное давление в Па, шероховатость местности [9] в м, температура в К и скорость ветра в м/с на двух разных высотах (таким образом задается так называемый профиль скорости ветра, необходимый для вычисления скорости ветра на высоте размещения ветряных колес (ветряков).

Таблица 1

#### Часть файла погодных данных для расчета ветрогенератора

Table 1. Part of the weather data file for calculating the wind turbine

| variable_name, pressure, temperature, wind_speed, roughness_length, temperature, wind_speed |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2010-01-01 00:00:00+01:00, 98405.7, 267.6, 5.32697, 0.15, 267.57, 7.80697                   |
| 2010-01-01 01:00:00+01:00, 98382.7, 267.6, 5.46199, 0.15, 267.55, 7.86199                   |
| 2010-01-01 02:00:00+01:00, 98362.9, 267.61, 5.67899, 0.15, 267.54, 8.59899                  |
| 2010-01-01 03:00:00+01:00, 98340.9, 267.63, 5.68466, 0.15, 267.56, 7.89466                  |
| 2010-01-01 04:00:00+01:00, 98336.8, 267.63, 5.38084, 0.15, 267.61, 7.57084                  |
| 2010-01-01 05:00:00+01:00, 98334.2, 267.61, 5.28286, 0.15, 267.55, 7.51286                  |

Начальная часть файла данных приведена в табл. 1. Данные по каждому временному отсчету представлены в отдельных строках и разделены запятыми.

В случае, если в директории с программой нет файла с погодными данными, данный файл скачивается из сети интернет по указанному пути и сохраняется на диск для дальнейшей работы с ним.

Для инициализации турбины необходимо задать ее номинальную мощность, высоту расположения ветряка, диаметр ротора и характеристику зависимости коэффициента мощности (КПД) от скорости ветра.

Ввод исходных данных для расчета ветряных турбин может выполняться одним из трех способов:

- 1) загружаться из открытой базы данных по турбинам OpenEnergy Database (oedb), которая поставляется вместе с модулем Windpowerlib;
- 2) вводиться непосредственно в виде параметров команд программы;
- 3) загружаться в виде пользовательского файла данных.

Для проведения расчета примера ветряной турбоустановки в данном исследовании был использован первый подход – загрузка из базы OpenEnergy Database характеристики ветрогенератора Siemens SWT 3.6-120. Данный ветрогенератор выбран потому, что для него на сайте компании-производителя приведе-

ны графики коэффициентов мощности и собственно мощности в зависимости от скорости ветра. Также эта установка является одной из самых популярных в мире для использования как в море, так и на суше.

Ветроэнергетическая установка SWT-3.6-120 [10] производится компанией Siemens Wind Power A/S из Дании. Номинальная мощность рассматриваемой установки – 3,6 МВт, максимальный диаметр ветроколеса – 120 м, высота его установки – 90 м.

Энергетические характеристики данного ветрогенератора приведены на рис. 1.

Коэффициент мощности показывает какая часть теоретической мощности ветрогенератора используется на совершение полезной работы (остальное уходит на потери мощности от трения, от неоптимального угла обтекания лопастей воздухом, потери в генераторе, контроллерах, проводах и др.). Таким образом, полезной работой является энергия, передаваемая ветроколесу, преобразуемая генератором в электрическую мощность и поставляемая в энергосистему [11].

Коэффициент мощности зависит от типоразмера ветроколеса и скорости ветра. Из кривой коэффициента мощности для установки SWT-3.6-120 (рис. 1) видно, что ветряк начинает вращаться при скорости ветра 3 м/с (скорость включения), далее коэффициент мощности растет и при скорости ветра 6–10 м/с (номинальная скорость) достигает максималь-

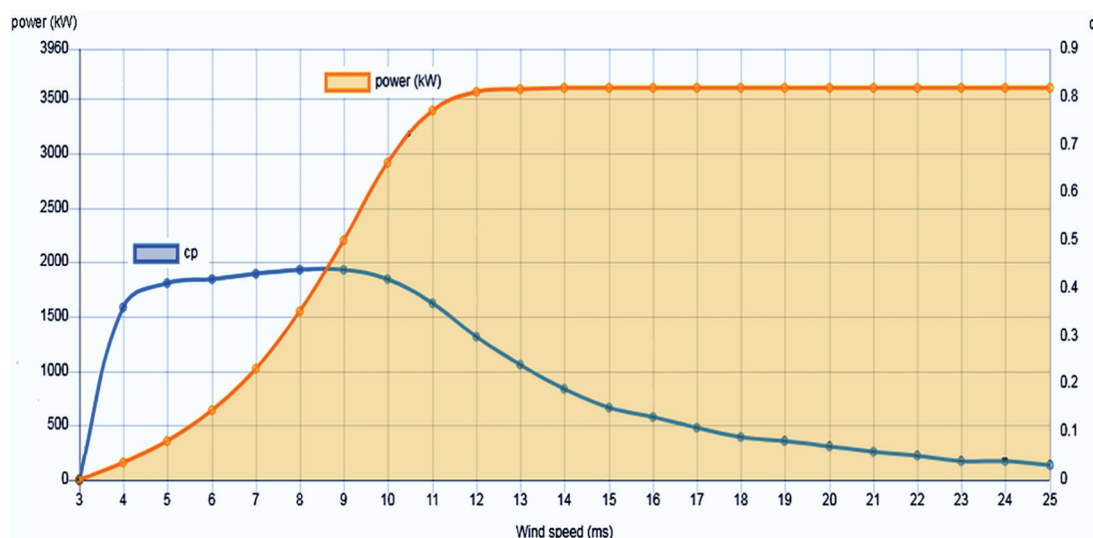


Рис. 1. Зависимость коэффициента мощности ( $c_p$ ) и мощности (power – кривая с заливкой под ней), кВт, от скорости ветра, м/с, для ветрогенератора Siemens SWT 3.6-120.

Fig. 1. Dependence of the power factor ( $c_p$ ) and power (power – the curve with filling under it), kW, on the wind speed, m/s, for the Siemens SWT 3.6-120 wind generator

ного значения (0,47–0,49), далее он начинает резко уменьшаться. Именно для номинальной скорости ветра спроектированы лопасти ветряка, и она должна соответствовать преобладающей скорости ветра в месте установки ветрогенератора.

Из рис. 1 видно, что начиная со скорости ветра 12 м/с мощность ветрогенератора становится максимальной и далее не увеличивается. Также не изменяется и скорость вращения ротора. Это достигается за счет системы автоматического управления ветряка (с использованием различных датчиков), а также с помощью системы регулирования генератора и того факта, что генератор не может выдать мощность выше максимально достижимой для него.

Указанные выше характеристики турбогенератора используются в качестве аргументов функции создания расчетной модели WindTurbine.

Имея характеристики мощности и зная погодные условия для каждого промежутка времени, можно рассчитать соответствующую им выходную мощность турбогенератора. Для этого используется функция ModelChain библиотеки Windpowerlib. Для ее использования необходимо также выбрать модель преобразования скорости ветра в показатели мощности из двух вариантов – логарифмическая или модель Хеллмана [12], модель плотности (зависимость плотности от высоты) – барометрическая или модель идеального газа, температурная модель (зависимость температуры от высоты) – линейный градиент или интерполяционная и другие параметры модельной цепи.

Далее с помощью описанных функций производится расчет ветрогенератора и с использованием возможностей библиотеки Matplotlib в графическом виде выводится зависимость мощности установки в Вт от времени. Данная библиотека позволяет получать графический материал, качественно оформленный согласно требованиям, принятым в международном научном сообществе.

### Результаты исследований и их обсуждение

Приведенные выше исходные данные (погодные данные, типоразмер установки, высота размещения и диаметр ветроколеса) были использованы для расчета примера и демонстрации возможностей созданной программы.

Кривая коэффициента мощности  $c_p$  подгружалась автоматически из базы данных OpenEnergy Database. Она приведена на рис. 2 и имеет высокую степень соответствия с кривой, взятой с сайта фирмы-производителя (рис. 1).

По описанному алгоритму с помощью разработанной программы была вычислена и выведена в виде графика зависимость мощности ветрогенератора от скорости ветра, изображенная на рис. 3.

На рисунке видно, что вычисленная кривая мощности соответствует кривой, взятой с сайта производителя ветрогенератора (рис. 1), что доказывает высокую точность применяемого для расчета метода.

На следующем этапе вычислялась мощность установки по заданным в файле погодных данных временным промежуткам, которая с помощью команд библиотеки Matplotlib была представлена в виде графика (рис. 4).

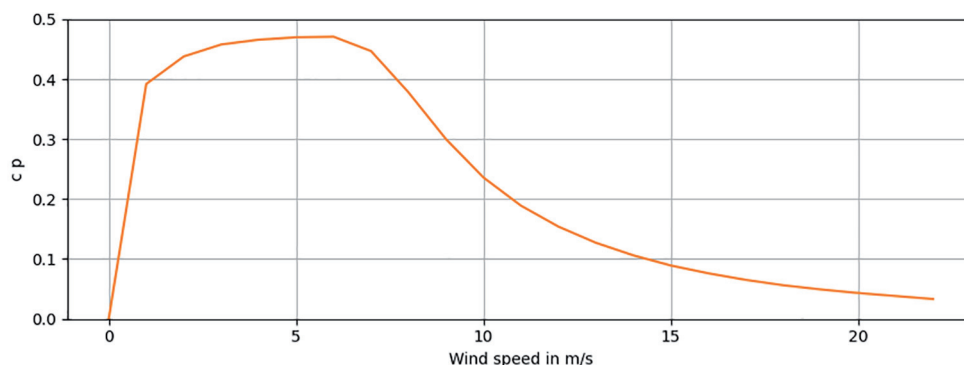


Рис. 2. Кривая мощности ветрогенератора Siemens SWT 3.6-120, полученная из базы данных OpenEnergy Database

Fig. 2. Power curve of a Siemens SWT 3.6-120 wind turbine obtained from the OpenEnergy Database

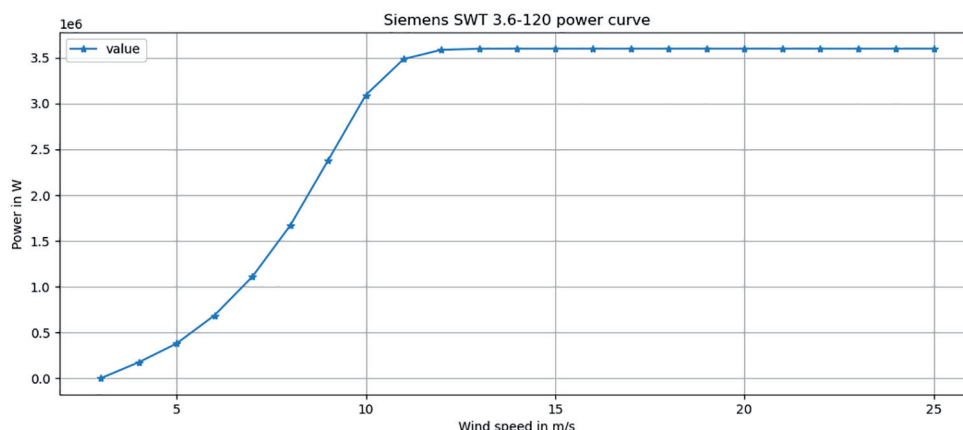


Рис. 3. Кривая мощности ветрогенератора Siemens SWT 3.6-120, полученная с помощью программы

Fig. 3. Power curve of wind turbine Siemens SWT 3.6-120, obtained using the program

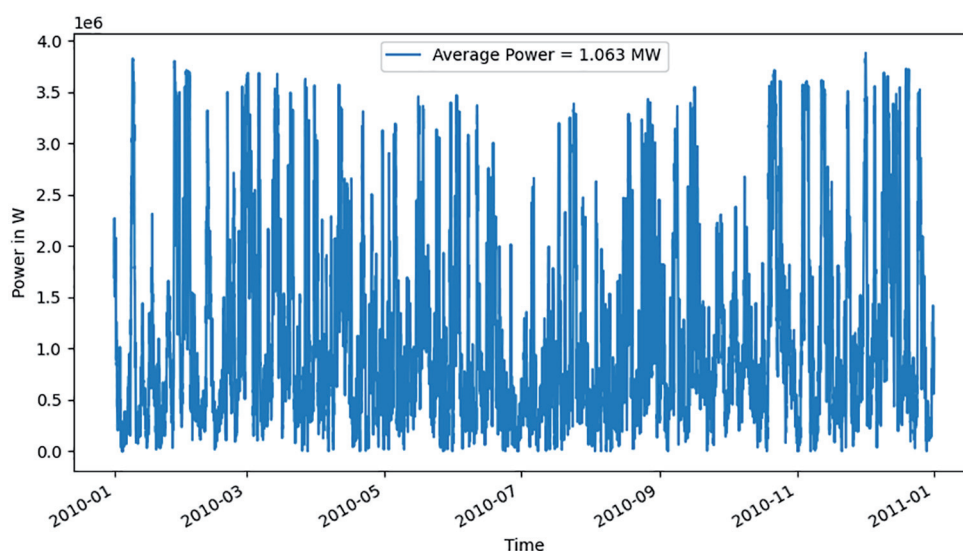


Рис. 4. Изменение мощности ветрогенератора по временным промежуткам

Fig. 4. Change in the power of the wind generator over time intervals

Из рисунка видно, что кривая изменения мощности имеет крайне неравномерный характер, что является одним из главных недостатков ветряных генераторов.

В верхней части графика выводится средняя за год вырабатываемая мощность установки. Она составила 1,063 МВт, то есть в 3,4 раза меньше, чем номинальная мощность.

### Заключение

Таким образом, для достижения целей данной работы были решены следующие задачи:

- произведен краткий обзор альтернативных источников электрической энергии и в частности достоинств и недостатков энергетических ветряных установок;

- выбраны и описаны программные средства для реализации расчета характеристик ветряных турбогенераторов;

- разработана программа для определения коэффициентов мощности и выходной мощности заданного (инициализированного) ветрогенератора в зависимости от скорости ветра и других условий;

- в качестве примера произведен расчет мощностных характеристик установки Siemens SWT 3.6-120, показавший высокую степень соответствия результатов эксплуатационным данным, приведенным на сайте фирмы-производителя;

- произведен расчет изменения мощности ветрогенератора Siemens SWT 3.6-120 в течение года, а также его среднегодовая мощ-

ность, которая оказалась в несколько раз ниже номинальной, следовательно, доказана низкая целесообразность применения данной установки в регионе с заданными погодными условиями.

Проведенная работа доказывает удобство использования языка Python для создания программ расчета и исследования характеристик установок альтернативной энергетики. В рассматриваемом случае задача загрузки данных и расчета сильно упрощается (не в ущерб достигаемой точности) с помощью применения специального модуля Windpowerlib. Ранее преимущество использования библиотек Python было доказано авторами при рассмотрении других типов энергетического оборудования [13, 14].

Так как созданная в ходе данного исследования программа позволяет для заданных погодных условий в рассматриваемой местности рассчитать изменение мощности и среднегодовую мощность ветрогенератора, то с ее помощью можно обосновать выбор наиболее подходящей для конечного потребителя модели энергоустановки.

Программа позволяет определять как характеристики уже используемых установок, так и вновь проектируемых. Достигнутая автоматизация при ее внедрении приводит к уменьшению трудозатрат на этапе проектирования ветряных турбинных установок, а также к повышению их надежности и эффективности работы. Разработанная программа может использоваться при изучении основ расчета турбинных двигателей студентами вузов, персоналом, проектирующим и обслуживающим ветряные электростанции, и как наглядная иллюстрация применения языка Python для проведения расчетов в отрасли энергетики и турбиностроения.

В качестве дальнейшего развития описанных исследований по приведенной тематике планируется с помощью разработанного программного продукта произвести сравнительный технико-экономический анализ целесообразности применения различных моделей ветряных турбоустановок в различных регионах России.

### Литература

1. Бухарицин П.И. Альтернативные источники энергии // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 8–2. 189 с.
2. Бухтияров В.В., Рябыкин А.А., Рындин Р.А., Золкин Д.О., Лютиков М.П. Сравнительный анализ альтернативных источников энергии // В сборнике: Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Сборник научных статей 3-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ответственный редактор А.А. Горюхов. 2018. С. 50–53.
3. Плюсы и минусы ветроэнергетики. URL: <https://alternativenergy.ru/vetroenergetika/581-plyusy-minusy-vetroenergetiki.html> (дата обращения: 29.07.2020).
4. Мощные ветрогенераторы: сравнительная характеристика. URL: <https://mirenergii.ru/energiyavetra/moshhnye-vetrogeneratory-sravnitel'naya-kharakteristika.html> (дата обращения: 29.07.2020).
5. Квитко А.В., Хицкова А.О. Характеристики ветра, особенности расчета ресурса и экономической эффективности ветровой энергетики // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 97. С. 359–374.
6. Что определяет мощность ветрогенератора. URL: [http://e-veterok.ru/otvety\\_na\\_voprosy/3.php](http://e-veterok.ru/otvety_na_voprosy/3.php) (дата обращения: 29.07.2020).
7. Windpowerlib documentation. URL: <https://windpowerlib.readthedocs.io/en/stable/> (дата обращения: 29.07.2020).
8. Feedinglib. Project description. URL: <https://pypi.org/project/feedinlib/0.1.0rc2/> (дата обращения: 29.07.2020).
9. Чернов Д.А., Тягунов М.Г., Дерюгина Г.В. Обоснование моделей вертикального профиля ветра на территории дальневосточного федерального округа России // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 3 (13). С. 222–225.
10. Siemens SWT-3.6-120 Offshore. Техническое описание. URL: <https://ru.wind-turbine-models.com/turbines/669-siemens-swt-3.6-120-offshore> (дата обращения: 29.07.2020).
11. Пушкарев А.Э., Морозов Д.А., Пушкарева Л.А. Синтез структурной схемы и параметров ветроустановки малой мощности // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2010. № 4. С. 25–29.
12. Дерюгина Г.В., Карпов Н.Д., Чернов Д.А. Исследование влияния различных факторов на энергоэффективность ветроэлектрической станции, внедряемой в локальную энергосистему // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2016. № 10. С. 20–29.

13. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Исследование и оптимизация термодинамического цикла газотурбинного двигателя // Научное обозрение. Физико-математические науки. 2020. № 1. URL: <https://physics-mathematics.ru/article/view?id=90> (дата обращения: 29.07.2020).
  14. Ильичев В.Ю., Юрик Е.А. Разработка программы для исследования термодинамического цикла Ренкина // Научное обозрение. Технические науки. 2020. № 2. С. 32–36.
- ### References
1. Bukharitsin P.I. Alternative energy sources. *Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya*. 2015. No 8–2. 189 p.
  2. Bukhtiyarov V.V., Ryabykin A.A., Ryndin R.A., Zolkin D.O., Lyutikov M.P. Comparative analysis of alternative energy sources. V *sbornike: Perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii. Sbornik nauchnykh statey 3-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem* [In the collection: Prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering. Collection of scientific articles of the 3rd All-Russian scientific and technical conference with international participation]. *Otvetstvennyy redaktor A.A. Gorokhov*. 2018, pp. 50–53 (in Russ.).
  3. Plyusy i minusy vetroenergetiki [Pros and cons of wind energy]. URL: <https://alternativenergy.ru/vetroenergetika/581-plyusy-minusy-vetroenergetiki.html> (accessed: 29.07.2020).
  4. Moshchnyye vetrogeneratory: sravnitel'naya kharakteristika [Powerful wind turbines: comparative characteristics]. URL: <https://mirenergii.ru/energiyavetra/moshhnye-vetrogeneratory-sravnitel'naya-kharakteristika.html> (accessed: 29.07.2020).
  5. Kvitko A.V., Khitskova A.O. Wind characteristics, features of calculating the resource and economic efficiency of wind energy. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. No 97, pp. 359–374 (in Russ.).
  6. Chto opredelyayet moshchnost' vetrogeneratora [What determines the power of a wind generator]. URL: [http://e-veterok.ru/otvety\\_na\\_voprosy/3.php](http://e-veterok.ru/otvety_na_voprosy/3.php) (accessed: 29.07.2020).
  7. Windpowerlib documentation. URL: <https://windpowerlib.readthedocs.io/en/stable/> (accessed: 29.07.2020).
  8. Feedinglib. Project description. URL: <https://pypi.org/project/feedinglib/0.1.0rc2/> (accessed: 29.07.2020).
  9. Chernov D.A., Tyagunov M.G., Deryugina G.V. Substantiation of models of the vertical wind profile in the territory of the Far Eastern Federal District of Russia. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2015. No 3 (13), pp. 222–225 (in Russ.).
  10. Siemens SWT-3.6-120 Offshore. *Tekhnicheskoye opisaniye*. URL: <https://ru.wind-turbine-models.com/turbines/669-siemens-swt-3.6-120-offshore> (accessed: 29.07.2020).
  11. Pushkarev A.E., Morozov D.A., Pushkareva L.A. Synthesis of the structural diagram and parameters of a low-power wind turbine. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010. No 4, pp. 25–29 (in Russ.).
  12. Deryugina G.V., Karpov N.D., Chernov D.A. Study of the influence of various factors on the energy efficiency of a wind power plant introduced into the local power system. *Elektrooborudovaniye: ekspluatatsiya i remont*. 2016. No 10, pp. 20–29 (in Russ.).
  13. Il'ichev V.YU., Yurik YE.A. Research and optimization of the thermodynamic cycle of a gas turbine engine. *Nauchnoye obozreniye. Fiziko-matematicheskiye nauki*. 2020. No 1. URL: <https://physics-mathematics.ru/article/view?id=90> (data obrashcheniya: 29.07.2020).
  14. Il'ichev V.YU., Yurik YE.A. Development of a program for the study of the Rankine thermodynamic cycle. *Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskkiye nauki*. 2020. No 2, pp. 32–36 (in Russ.).

## CALCULATION OF WIND TURBINE GENERATOR POWER CHARACTERISTICS USING WINDPOWERLIB SOFTWARE MODULE

PhD in Engineering **V.YU. Ilichev**, PhD in Engineering **D.V. Shevelev**  
Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University  
patrol8@yandex.ru

*The problem of using alternative energy sources is becoming more and more urgent every year. Wind turbogenerators are one of the most promising alternative power plants.*

*The article is devoted to the creation and testing of a calculation program for determining the main indicators of wind generators – the dependence of the power factor (efficiency) and the generated power on wind speed, the power change curve by time intervals, and the average power per year.*

*At the beginning of the work, basic information is given about alternative power plants, in particular, about wind generators, their advantages, disadvantages and methods of feasibility study for use in a given area according to weather statistics.*

*The following are the modules used in the program, the main of which is a special command library for calculating wind turbines Windpowerlib. The sequence of implementation of the calculation algorithm stages is described: methods of entering weather data and the main characteristics of the turbine, the procedure for calculating the power of the turbine generator, and the output of results in the form of qualitatively formalized graphs.*

*To test the developed program, the energy characteristics of one of the most common and widely used wind generators in the world were calculated – the Siemens SWT 3.6-120 model, the calculation results were compared with operational data published by the manufacturer of this plant. The graphs proved a high degree of conformity between the calculated and actual characteristics. The plant capacity change during the year is determined by hourly time intervals, as well as the average capacity generated per year.*

*The resulting software product allows the end user to easily download input data and automatically calculate all the above characteristics of any wind turbine.*

*In conclusion, conclusions were drawn on the work done, recommendations were made to expand the scope of the methodology to determine the characteristics of other power plants. The planned direction of further research in this area using the developed software product is indicated.*

**Keywords:** alternative energy, wind turbine, wind generator, turbine power, wind power, Windpowerlib module, OpenEnergy Database.

**Cite as:** Ilichev V.YU., Shevelev D.V. Calculation of wind turbine generator power characteristics using Windpowerlib software module. Izvestiya MGTU «MAMI». 2021. No 1 (47), pp. 23–31 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-47-1-23-31.