



МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЕТЕВОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ УСЛОВИЙ СИРИИ*

А. Рамадан, В.В. Елистратов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
д. 29, ул. Политехническая, Санкт-Петербург, 195251, Россия
тел.: +7(912)411-99-51; e-mail: eng_amer@live.com

doi: 10.15518/isjaee.2020.01-06.12-30

Заключение совета рецензентов: 31.10.19 Заключение совета экспертов: 15.11.19 Принято к публикации: 28.11.19

Разработана методика обоснования технических и экономических параметров сетевой ветроэлектрической станции (ВЭС) для систем энергоснабжения Сирии. Апробация методики проведена на примере проектирования сетевой ВЭС на площадке вблизи города Эс-Сухне (в провинции Хомс), которая обладает одним из наиболее высоких ветровых потенциалов в Сирии. С помощью профессионального программного комплекса WindPRO оценены параметры ВЭС мощностью 12 МВт. Выполнено: численное микромасштабное моделирование ветрового потока местности с учетом рельефа и шероховатости, определены ветроэнергетические ресурсы на высоте башни ветроэлектрической установки (ВЭУ), обоснован выбор оборудования ВЭС и определена выработка энергии ВЭС с конкретным типом ВЭУ. Результаты технической оценки данной ВЭС в WindPRO показали, что удельная плотность ветрового потока рассматриваемой площадки для строительства ВЭС на высоте башни ВЭУ составляет 333–459 Вт/м² при среднегодовом скорости ветра 6,5–7,7 м/с. Для ВЭС мощностью 12 МВт с восемью ВЭУ мощностью 1,5 МВт получено значение среднегодовой выработки энергии, равное 38 391,1 МВт·ч/год с учетом потерь. Коэффициент использования установленной мощности рассмотренной ВЭС составил 36,5 % при 3 199 часах использования установленной мощности. Экономическая оценка рассмотренной ВЭС выполнена в программе Excel, где рассчитаны экономические показатели проекта: чистый дисконтированный доход, дисконтированный срок окупаемости, внутренняя норма доходности, индекс доходности, нормированная стоимость энергии. Результаты расчетов показали, что предлагаемый проект ВЭС является полностью прибыльным для условий Сирии.

Ключевые слова: техническая оценка; экономическая оценка; ВЭС; Сирия; WindPRO; ВЭУ; скорость ветра; выработка; дисконтированный доход (NPV); нормированная стоимость энергии (LCOE).

ASSESSMENT METHOD OF TECHNICAL AND ECONOMIC PARAMETERS OF A GRID-CONNECTED WIND POWER PLANT FOR CONDITIONS IN SYRIA

A. Ramadan, V.V. Elistratov

Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University
29 Politehnicheskaya Str., Saint Petersburg, 195251, Russia
tel.: +7 (912) 411 99 51, e-mail: eng_amer@live.com

doi: 10.15518/isjaee.2020.01-06.12-30

*Рамадан А., Елистратов В.В. Методика обоснования технических и экономических параметров сетевой ветроэлектрической станции для условий Сирии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2020;01-06:12-30.



In this study, a methodology is developed to evaluate the technical and economic parameters of a grid-connected wind power plant in Syria. The methodology was used for designing a grid-connected wind power plant in the area close to the Al-Sukhnah town (in Homs province), which is one of the most promising areas in Syria to build wind farms. Technical assessment of a 12 MW grid-connected wind power plant, which consists of 8 wind turbines with rated power of 1.5MW for each one, is performed using the WindPRO software. The following tasks are carried out in WindPRO: the microscale numerical modeling of the wind flow of the area with consideration the terrain and roughness, determination of wind resources at wind turbine tower height, selection of suitable wind turbine and definition of energy production. The results of the technical assessment show that the wind power density in the power plant site at wind turbine tower height is 333–459 W/m² with average annual wind speed of 6.5–7.7 m/s, energy production is 38391.1 MWh/year with consideration the losses, capacity factor is 36.5% with full load hours of 3199 h/year. Economic assessment of the considered power plant is performed in Excel program. The following economic indicators are calculated in Excel: net present value (NPV), discounted payback period (DPP), internal rate of return (IRR), profitability index (PI), the normalized cost of energy (LCOE). The results of calculations show that the proposed grid-connected wind power plant is completely profitable for conditions in Syria.

Keywords: technical assessment; economic assessment; grid-connected wind power plant; Syria; WindPRO; wind turbine; wind speed; energy production; NPV; LCOE.



Амер Рамадан
Amer Ramadan

Сведения об авторе: аспирант Высшей школы высоковольтной энергетики, Институт энергетики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

Образование: бакалавриат электромеханического факультета Университета Дамаска (2009 г.); магистратура на кафедре водохозяйственного и гидротехнического строительства Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (2016 г.).

Область научных исследований: электротехника; солнечная и ветровая энергия; электрические станции и сети; моделирование режимов работы электротехнических систем и возобновляемые виды энергии и установки на их основе.

Публикации: 15.

Publons: <https://publons.com/a/1609242>

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2239-447X>

Information about the author: Ph.D. Student at the Higher School of High Voltage Energy, Institute of Energy, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University.

Education: a bachelor's degree, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering of Damascus University, 2009; a master's degree at the Department of Water Resources and Hydrotechnical Engineering, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 2016.

Research interests: electrical engineering; solar and wind energy; power stations and networks; modeling operational modes of electrical systems and renewable energy and installations based on them.

Publications: 15.

Researcher ID: U-1795-2018

Scopus Author ID: 57203214224



Виктор Васильевич
Елистратов
Viktor Elistratov

Сведения об авторе: д-р техн. наук, директор научно-образовательного центра «Возобновляемые виды энергии и установки на их основе» (НОЦ «ВИЭ»); профессор Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства СПбПУ.

Награды: заслуженный энергетик РФ; медаль «300-летие Санкт-Петербурга» и ряд отраслевых наград.

Образование: Ленинградский политехнический институт, ЛПИ им. М.И. Калинина (1977 г.).

Область научных исследований: разработка теоретических и технологических основ преобразования, комплексного использования и аккумулирования возобновляемой энергии со случайно детерминированным характером образования (солнечной, ветровой и гидравлической) при создании энергетических объектов на основе ВИЭ для сетевой и распределенной генерации.

Публикации: более 250, в том числе 8 монографий, 13 авторских свидетельств и патентов РФ, более 20 учебников и учебных пособий.

Researcher ID: C-3627-2016

ORCID: 0000-0001-7051-6027

Information about the author: D.Sc. in Engineering, the Director of Scientific Center "Renewable Energy Sources"; Professor of the Higher School of Hydraulic Engineering and Power Engineering Construction in Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University.

Awards: Honoured Power Engineering Specialist of the Russian Federation; the Medal of "300 years of St. Petersburg" and other industry awards.

Education: St. Petersburg State Polytechnic University, 1977.

Research interests: development of theoretical and technological basic foundations of conversion, complex use and accumulation of renewable energy (solar, wind and hydro energy) while provision of energy units with RES for network and decentralized system.

Publications: more than 250, including 8 monographs, 13 certificates and patents, more than 20 textbooks and tutorials.

Scopus: 57189578726

Publons: publons.com/a/1610480



1. Введение

В последнее десятилетие мировая совокупная установленная мощность ВЭС, или ветропарков, неуклонно растет. В 2017 г. производство электроэнергии на ВЭС составляло 1 134,5 ТВт·ч, в 2018 г. установленная мощность ВЭС в мире составляла 564 ГВт, в 2019 г. около 4 % всей электрической энергии было произведено на ВЭС [1]. В период с 2007 г. по 2018 г. средняя стоимость ВЭУ имела тенденцию к снижению, и цены сократились в среднем на 44÷64 % в зависимости от мощности самих ВЭУ и рынка [2]. Глобальная средневзвешенная нормированная стоимость энергии (LCOE) наземных ВЭС, введенных в эксплуатацию в 2018 г., составляла 0,056 долл. США/кВт·ч, что на 13 % ниже, чем в 2017 г., и на 35 % ниже, чем в 2010 г., когда стоимость составляла 0,085 долл. США/кВт·ч [2]. Это означает, что электроэнергия, произведенная ВЭС, стала дешевле, чем произведенная тепловыми или ядерными электростанциями. Благодаря технологическим усовершенствованиям глобальное средневзвешенное значение КИУМ ВЭС существенно увеличилось – с 20 % в 1983 г. до 34 % в 2018 г. [2]. Снижение стоимости электроэнергии ВЭУ опирается в первую очередь на общемировую тенденцию сокращения затрат на производство оборудования, снижение затрат на строительство и эксплуатационных расходов на ВЭС, а также быстрое технологическое развитие возобновляемой энергетики и, следовательно, повышение эффективности работы данных систем [3].

Сирия – страна в Западной Азии площадью 185 180 км² с высоким потенциалом возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности солнечной и ветровой. Энергоснабжение на основе ВИЭ может обеспечить энергетическую независимость страны. В 1989 г. при финансовой поддержке ПРООН (Программа развития Организации Объединенных Наций) и в сотрудничестве с национальными датскими лабораториями «RISO» был составлен атлас ветра в Сирии, который содержит результаты измерений скорости ветра за десять лет (1979–1989 гг.) шестьюдесятью станциями метеонаблюдений в Сирии, охватывающими большинство климатических зон. Атлас был разработан для высоты 50 метров [4]. На рис. 1 приведена карта ветра Сирии, на основе анализа которой выделены четыре ветровые зоны, характеризующиеся соответствующими значениями скоростей ветра. Зона, показанная на карте красным цветом, имеет наиболее высокий потенциал и среднегодовые скорости ветра (5÷11,5 м/с для различных типов рельефа). Эта зона включает местности в центральном, юго-западном, юго-восточном и прибрежном горном районах Сирии. Остальные территории имеют меньший потенциал ветровой энергии, так как характеризуются меньшими значениями средних скоростей ветра.

За период 2004–2006 гг. в сотрудничестве с немецкой компанией «DECON» были выявлены 14 перспективных площадок (см. на рис. 1 точки, отмеченные звездочками) с высоким потенциалом ветровой энергии. Затем на этих площадках были установлены станции ветроизмерений, и проведен мониторинг ветрового режима в период 2004–2009 гг. [4].

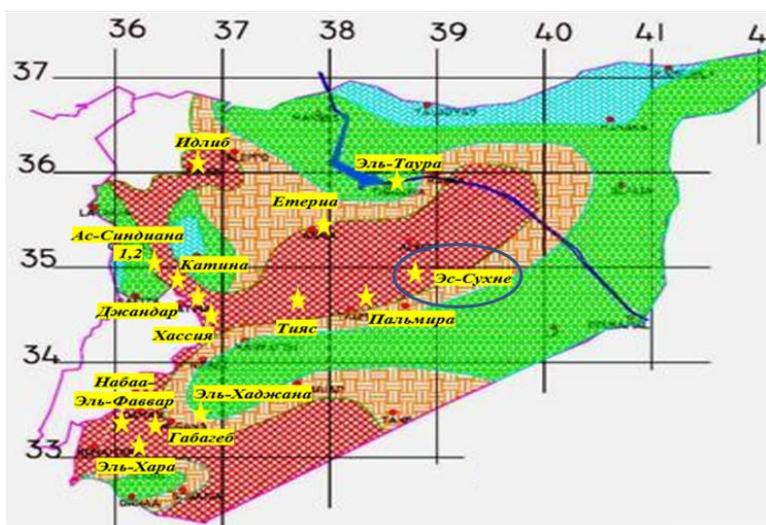


Рис. 1 – Карта ветров Сирии с перспективными ветровыми площадками
Fig. 1 – Wind map of Syria with promising wind sites

Зоны	50 метров над уровнем земли									
	Закрытая местность		Открытая местность		Морское побережье		Открытое море		Холмы и горы	
	м/с	Вт/м ²	м/с	Вт/м ²	м/с	Вт/м ²	м/с	Вт/м ²	м/с	Вт/м ²
1	5 - 6	150-250	6,5 – 7,5	300-500	7 – 8,5	400-700	8 - 9	600-800	10 – 11,5	1200-1800
2	4,5 - 5	100-150	5,5 – 6,5	200-300	6 - 7	250-400	7 - 8	400-600	8,5 - 10	700-1200
3	3,5 – 4,5	50-100	4,5 – 5,5	100-200	5 - 6	150-250	5,5 - 7	200-400	7 – 8,5	400-700
4	<3,5	<50	<4,5	<100	<5	<150	<5,5	<200	<7	<400

Практическое использование ветровой энергии в Сирии началось с подключенной к сети ветровой турбины мощностью 150 кВт, установленной в 1994 г. в городе Эль-Кунейтры, и первой сетевой ВЭУ мегаваттного класса мощностью 2,5 МВт, установленной в 2019 г. в западном пригороде провинции Хомс около деревни Ас-Синдиана. В настоящее время в Сирии существуют планы развития ветровой энергетики с повышением ее доли в производстве электроэнергии. Обсуждаются проекты строительства нескольких ВЭС в вышеуказанных ветровых перспективных местностях, особенно: Эс-Сухне, Катина и Ас-Синдиана в провинции Хомс, Эль-Хиджана в пригороде Дамаска и Габагеб в городе Дерья [5].

В рамках изучения ветрового потенциала Сирии и оценки этих площадок авторами проведено несколько исследований: в [6] разработана методика для оценки валового и технического потенциала ветровой энергии территории Сирии с помощью электронного ресурса GlobalWindAtlas. Для перспективной ветровой площадки Тияс в [7] выполнены исследования ветроэнергетического потенциала и проектирование ветропарка мощностью 3,9 МВт с помощью программы WindPRO. Кроме того, в [8] завершена оценка природного и технического потенциала ветровой энергии площадки Тияс на основе ручных

расчетов в программе Excel. В [9] определена оптимальная система электропередачи для предлагаемой ветровой электростанции мощностью 100 МВт в местности Эль-Хиджана в Пригороде Дамаска.

Цель данного исследования заключается в разработке методики обоснования технических и экономических параметров сетевой ВЭС для систем энергоснабжения Сирии. Апробация методики выполнена на примере проектирования ВЭС на площадке близ города Эс-Сухне в провинции Хомс. Техническая оценка рассмотренной ВЭС мощностью 12 МВт выполнена с помощью профессионального программного комплекса WindPRO, который применялся для численного микромасштабного моделирования ветрового потока местности с учетом рельефа и шероховатости, определения ВЭР на высоте башни ВЭУ, обоснования выбора оборудования ВЭС и определения выработки энергии ВЭС с конкретным типом ВЭУ. Кроме того, в данном исследовании проведена экономическая оценка рассмотренного проекта ВЭС в программе Excel. Рассчитаны некоторые экономические показатели проекта ВЭС: чистый дисконтированный доход (NPV), дисконтированный срок окупаемости (DPP), внутренняя норма доходности (IRR), индекс доходности (PI), нормированная стоимость энергии (LCOE).

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
C	Затраты (расходы), осуществляемые на t -м шаге проекта, \$
CF	Денежный поток в период времени t , \$
D	Диаметр ВК, м
F	Интегральная функция распределения скоростей
f	Распределение Вейбулла
K	Коэффициент возмущения ветрового потока
I_0	Капитальные вложения проекта, \$
p	Вероятность появления скорости
R	Доходы, достигаемые на t -м шаге проекта, \$
r	Ставка дисконтирования, %
r^2	Коэффициент детерминации
T	Жизненный цикл проекта, год
$T_{исп}$	Время, ч
V	Скорость ветра, м/с
z_0	Шероховатость подстилающей поверхности, м
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
β	Параметр масштаба, м/с
γ	Параметр формы
σ^2	Дисперсия (отклонение)
η	КПД ВЭС с учетом потери затенения, %
ρ	Плотность воздуха, кг/м ³
<i>Индексы нижние</i>	
j	Порядок члена в потенциальном потоке
t	Период времени
исп	Использование установленной мощности
ср	Среднемноголетний
пре	Предельный
0	Начало
ост	Останов
<i>Буквы русского алфавита</i>	
Э	Выработка ВЭУ, МВт·ч/год



<i>Аббревиатуры</i>	
CFSR-E	База реанализа (Climate Forecast System Reanalysis)
DPP	Дисконтированный срок окупаемости
IRR	Внутренняя норма доходности
LCOE	Нормированная стоимость энергии
MCP	Корреляционный анализ (Measure-Correlate-Predict)
MERRA-2	База реанализа (Modern-Era Retrospective-Analysis for Research and Applications)
NPV	Чистый дисконтированный доход
O&M	Расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание ВЭС
PEDEEE	Государственное предприятие распределения и эксплуатации электрической энергии
PI	Индекс доходности
АГБК	Асинхронный генератор с беличьей клеткой
АГДП	Асинхронный генератор двойного питания
ВК	Ветроколесо
ВЭР	Ветроэнергетические ресурсы
ВЭС	Ветроэлектрическая станция
ВЭУ	Ветроэлектрическая установка
КИУМ	Коэффициент использования установленной мощности
СПИМ	Синхронный генератор на постоянных магнитах
СГФР	Синхронный генератор с фазным ротором
т н.э.	Тонна нефтяного эквивалента



2. Ресурсно-энергетические оценки строительства ВЭС

2.1. Природно-климатическая характеристика географического положения

Эс-Сухне (Al-Sukhnah) – город на востоке Сирии в районе Пальмиры провинции (мухафазы) Хомс, расположен в Сирийской пустыне. Близ города находятся месторождения природного газа. По данным центрального бюро статистики Сирии численность населения в 2004 г. составляла 16 173 человека. Площадка у города Эс-Сухне, где предполагается строительство ВЭС, расположена на расстоянии примерно 3,5 км к северу от города Эс-Сухне и примерно 3 км к западу от главной дороги. Площадка свободна от любых обременений (отсутствуют здания, деревья или другие объекты). Окружающий ландшафт – это неиспользуемая плоская пустынная территория без растительности. С учетом методологии ветрового атласа характеризуется как несложный рельеф. Земля является государственной собственностью и будет доступна для строительства ВЭС.

Метеостанция Эс-Сухне расположена в открытой местности на расстоянии примерно 3,8 км к западу от города Эс-Сухне и была возведена в ноябре 2005 г. Станция оснащена следующим оборудованием: анемометры на высоте 40 м и 10 м, флюгер на высоте 40 м и датчики давления и температуры на высоте 10 м. Скорость и направление ветра записываются с десятиминутными интервалами в виде средних значений [10].

Климат Эс-Сухне пустынный (субтропический, континентальный, сухой, с теплой зимой и жарким летом). По данным [11], осадки в течение года практически не выпадают, среднегодовая температура составляет +18,4 °С, среднегодовая норма осадков – 146 мм, самый засушливый месяц – июнь с осадками 0 мм.

Большая часть осадков выпадает в марте – в среднем 26 мм. Самым теплым месяцем года является июнь со средней температурой +29,5 °С. Самая низкая средняя температура в течение года в январе составляет +6,5 °С.

2.2. Ввод исходных данных в программе WindPRO

Исходные данные могут загружаться из файлов различных типов, из Online ресурсов WindPRO и создаваться прямо в WindPRO.

– Загрузка карты рассматриваемой площадки:

Для начала работы следует загрузить одну или несколько карт местности. Имеется возможность онлайн загрузки карт OpenStreetMap. В качестве исходных данных была использована топографическая карта местности размером 50x50 км с масштабом 1:250 000.

– Загрузка исходного ряда измерений с метеостанции Эс-Сухне:

Загрузка метеоданных осуществляется с помощью объекта MeteoObject. Координаты объекта соответствуют координатам метеостанции, данные с которой используются в расчетах. Имеются данные с метеостанции за период с ноября 2005 г. по февраль 2008 г. (2 года и 4 месяца) на высоте 40 м [10]. Среднегодовая скорость ветра на высоте 40 м составляет 7,11 м/с.

2.3. Создание цифровой модели рельефа

Орографическая модель учитывает влияние рельефа местности на ветровой поток и применяется для корректировки измеренных ветровых данных с учетом локальных перепадов высоты местности. Рельеф в программе WindPRO загружен из онлайн-базы данных ShuttleRadarTopographyMission (STRM). Размер карты составляет 50 км x 50 км, шаг горизонта-



лей – 5 м. Координаты каждой точки определяются интерполяцией значений между горизонталями.

Влияние рельефа на ветровой поток учитывается с помощью коэффициентов возмущения ветрового потока K_{1j} , определяющихся из кинематических граничных условий для потенциального потока по формуле (1), и заключается в расчете значений возмущения в каждой точке в соответствии с выражением (2) [12]:

$$X_j = K_{nj} \cdot J_n \left(c_j^n \frac{r}{R} \right) \cdot \exp(in\phi) \cdot \exp \left(-c_j^n \frac{z}{R} \right), \quad (1)$$

$$\nabla_{x_j} = \frac{1}{2}(1, i) K_{1j} \frac{c_j^1}{R} \exp \left(-c_j^1 \frac{z}{R} \right), \quad (2)$$

где X_j – j -ый член суммы, определяющий потенциальный поток; K_{nj} – коэффициент возмущения;

$J_n \left(c_j^n \frac{r}{R} \right)$ – функция Бесселя n -го порядка; r – радиус (расстояние от метеостанции до расчетной точки); R – расстояние, на котором потенциал обращается в 0; ϕ – азимут, z – высота расчетной точки; c_j^n – j -й нуль функции Бесселя.

Таким образом, результатом этого этапа моделирования являются нахождение коэффициента K_{1j} и определение возмущения потенциального потока суммированием членов вида (2). Каждому слагаемому ряда соответствует свой горизонтальный масштаб $L_j = \frac{R}{c_j^1}$, представляющий характерную глубину возмущений.

2.4. Создание цифровой модели шероховатости подстилающей поверхности

На стадии расчетов было необходимо оцифровать вручную области одинаковой шероховатости с топографических карт в соответствии с типами подстилающей поверхности. Модель шероховатости подстилающей поверхности создается в программе WindPRO с помощью инструмента AreaObject и учитывает влияние шероховатости подстилающей поверхности местности на ветровой поток. Основное влияние шероховатость оказывает на форму вертикального профиля распределения скоростей ветра, моделируемого по логарифмическому закону [13]:

$$V(h) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{h}{z_0} \right), \quad (3)$$

где $V(h)$ – скорость ветра на высоте h ; z_0 – шероховатость подстилающей поверхности, м; u^* – масштаб скорости, равный $\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$; τ – вектор касательного напряжения в горизонтальной плоскости; ρ – плотность воздуха; k – постоянная Кармана $\approx 0,4$.

Основным типом шероховатости в данном проекте была выбрана пустыня или гладкая песчаная поверхность (соответствует высоте шероховатости $z_0 = 0,0003$ м) [14]. Остальные используемые типы поверхности и соответствующие им высоты шероховатости приведены в табл. 1.

Таблица 1

Классификация подстилающей поверхности

Table 1

Classification of the underlying surface

Тип подстилающей поверхности	Высота шероховатости, м	Класс шероховатости
Гладкая поверхность	0,005	0,6
Сельхозугодья с многочисленными постройками	0,03	1,0
Открытые сельхозугодья	0,055	1,5
Закрытые сельхозугодья	0,10	2,0
Деревья и кусты	0,20	2,5
Пригород	0,40	3,0

2.5. Синтезирование ряда многолетней статистики наблюдений за ветром

Для оценки ВЭР территории использование краткосрочных рядов недопустимо, так как данный ряд может не отражать действительную многолетнюю статистику хода ветра. В целях получения ряда многолетней ветровой статистики было выполнено сопоставление полученных натуральных измерений с многолетними данными путем проведения корреляционного МСР (Measure-Correlate-Predict) анализа. МСР-анализ позволяет попарно сравнивать ряды

метеонаблюдений. Основным показателем степени корреляции между рядами является коэффициент детерминации r^2 , который характеризует дисперсию (отклонение) измеренных значений от прямой, описывающей зависимость между сравниваемыми рядами. Рекомендуемое значение коэффициента детерминации r^2 в международной практике ветромониторинга составляет $0,7 \div 0,8$, что гарантирует хорошую сопоставимость двух рядов [15]. Из множества методов МСР-анализа предлагается наиболее широко

применяемый метод линейной регрессии, в котором основным показателем степени корреляции между рядами является коэффициент детерминации r^2 [16]:

$$r^2 = 1 - \sigma^2 = 1 - \frac{\sum_n (V_i^2 - \bar{V}^2)}{n} \quad (4)$$

Коэффициент детерминации характеризует дисперсию (отклонение) σ^2 измеренных значений от прямой, описывающей зависимость между рядами:

$$V_1 = bV_2, \quad (5)$$

где V_1 и V_2 – значения скоростей ветра в одинаковый момент времени для сравниваемых рядов наблюдений, м/с; b – коэффициент пропорциональности.

Сравниваемыми рядами являются данные баз реанализа в узлах расчетной сетки и данные натур-

ных наблюдений. В данном проекте были рассмотрены данные ближайших баз реанализа ClimateForecastSystemReanalysis (CFSR-E) и Modern-EraRetrospective-AnalysisforResearchandApplications (MERRA-2). Для достоверной оценки ВЭР выбор базы реанализа должен быть обусловлен наилучшей сходимостью с данными натуральных краткосрочных наблюдений (в нашем случае это данные метеостанции Эс-Сухне). MCP-анализ был проведен в расчетном модуле MCP-программы WindPRO, и были последовательно рассчитаны коэффициенты корреляции данных CFSR-E и MERRA-2 с натурными данными метеостанции Эс-Сухне (табл. 2). В результате было выяснено, что коэффициент корреляции в обеих базах реанализа выше необходимого ($\min r \geq 0,7 \div 0,8$), однако у CFSR-E коэффициент наибольший, поэтому CFSR-E была выбрана в качестве расчетной.

Сравнительная характеристика источников метеоданных
Comparative characteristics of weather data sources

Таблица 2
Table 2

Название источника метеоданных	Высота измерений, м	Среднегодовая скорость ветра, м/с	Коэффициент корреляции
Метеостанция Эс-Сухне	40	7,11	–
CFSR-E	10	3,62	0,9576
MERRA-2	50	6,13	0,9464

Для создания карты среднегодовых скоростей ветра вокруг точки строительства ВЭУ необходимо иметь данные многолетних наблюдений за ветром. Однако ближайшие данные реанализа CFSR-E находятся в 14 км от площадки строительства ВЭС. Для решения проблемы в WindPRO предусмотрен вычислительный инструмент STATGEN, который использует данные о шероховатости, рельефе местности и метеоданные CFSR-E для создания статистики ветрового потока в желаемой точке.

Расчет STATGEN произведен на основе данных реанализа CFSR-E в центре предполагаемой площадки на высоте 85 м (соответствует высоте башни ВЭУ). Результатами расчета являются основные характеристики ветрового потока (роза ветров, средняя скорость ветра, распределение Вейбулла и вероятность появления скорости ветра), приведенные на рис. 2.

Распределение Вейбулла в WindPRO определяется по формуле [7]:

$$f(v) = \frac{\gamma}{\beta} \cdot \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\gamma}, \quad (6)$$

$$F(v) = e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\gamma}, \quad (7)$$

где $F(v)$ – интегральная функция распределения скоростей; β – параметр масштаба, м/с; γ – параметр формы.



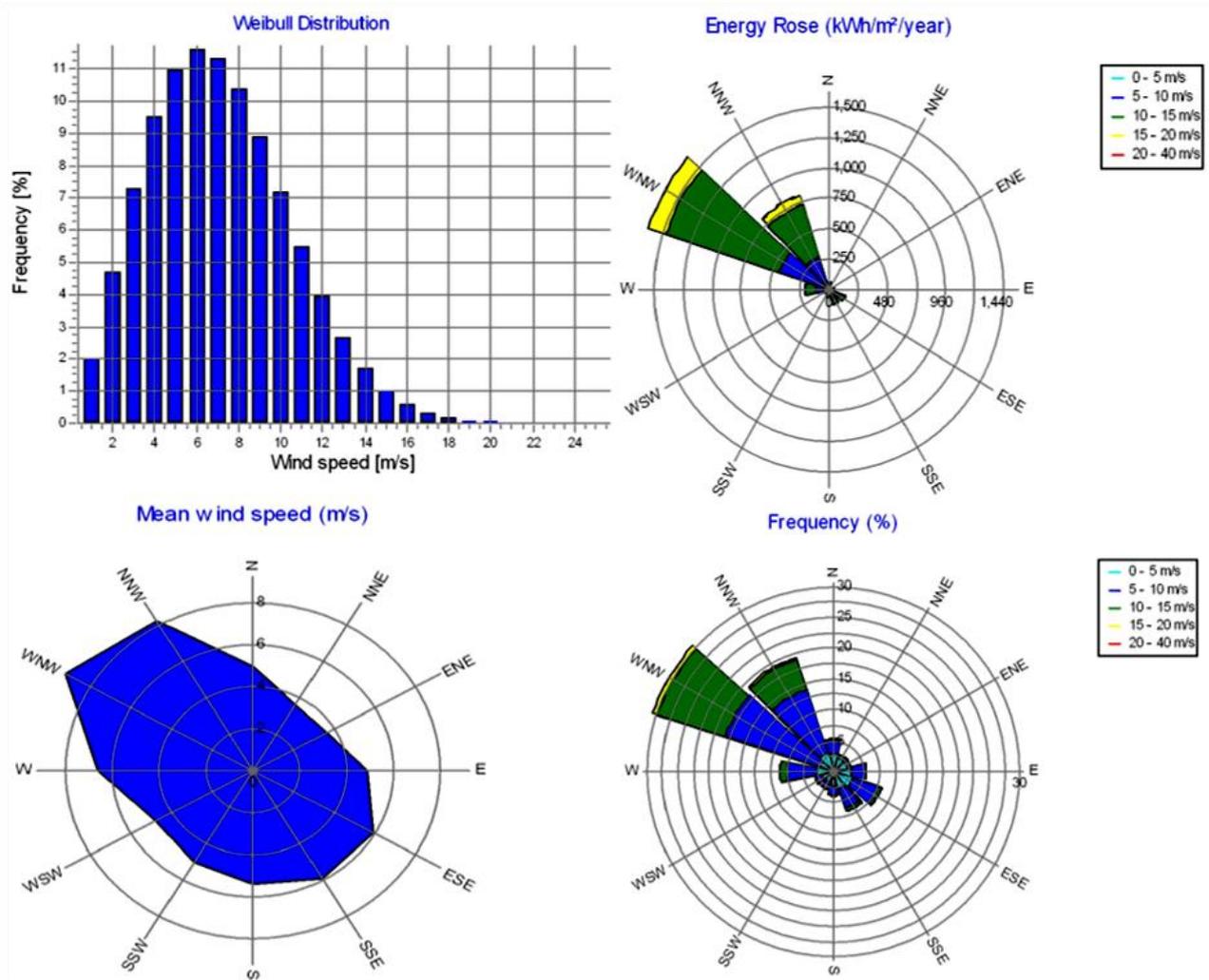


Рис. 2 – Характеристики ветрового потока на высоте 85 м в центре предполагаемой площадки
 Fig. 2 – Characteristics of the wind flow at height of 85 m in the center of the proposed site

2.6. Расчет и построение карты ВЭР площадки строительства ВЭС

Для создания карт средних скоростей ветра и удельных плотностей ветрового потока применялся расчетный модуль RESOURCE, который использует карты рельефа и шероховатости местности, а также результаты расчета STATGEN.

Численное моделирование ветрового потока в расчетном модуле RESOURCE производится на основе теории Джексона и Ханга [17], основным предположением которой является линейность решений системы уравнений Навье – Стокса. Кроме того, при численном моделировании учитываются модели шероховатости и орографии.

Расчет карт с размерами 12,3x16,5 км (203 км²) и разрешением 25 м произведен на высоте 85 м (рис. 3 и 4) для предварительного определения точки с наибольшими средними скоростями ветра и удельной плотностью ветрового потока с целью сравнения в этой точке выработки разных моделей ВЭУ.

На рис. 3 и 4 видно, что средние скорости ветра на рассматриваемой площадке на высоте 85 м изменяются от 4,3 м/с до 7,7 м/с, а удельная плотность ветрового потока варьируется в диапазоне 81÷459 Вт/м². Здесь хорошо видны места с наибольшими значениями ВЭР.

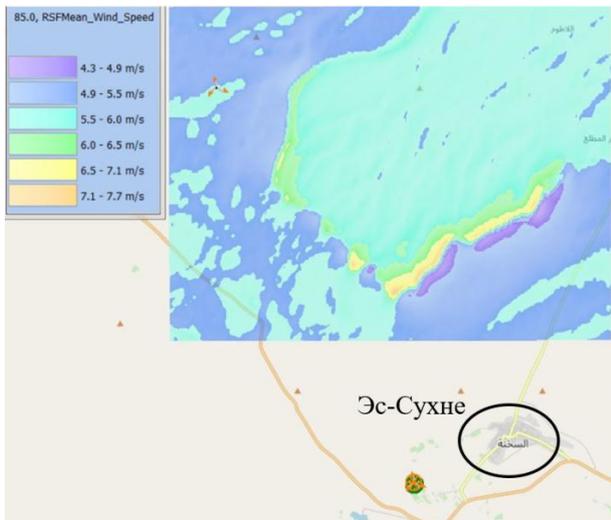


Рис. 3 – Карта средних скоростей ветра
Fig. 3 – Map of average wind speeds

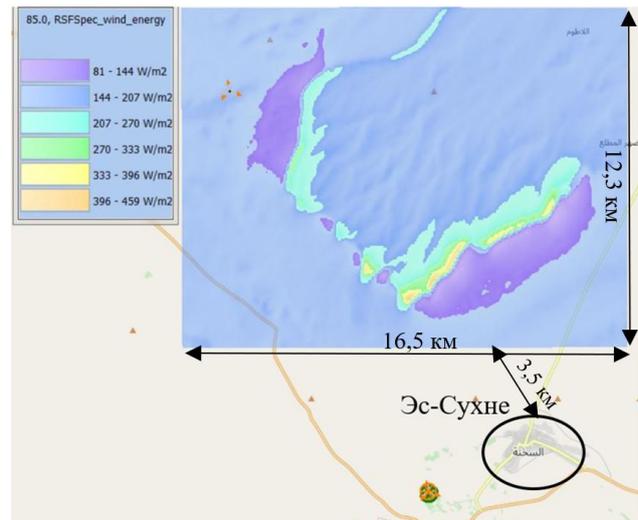


Рис. 4 – Карта удельной плотности ветрового потока
Fig. 4 – Map of wind power density

2.7. Выбор оборудования ВЭУ

Для выбора класса ветроэнергетического оборудования, подходящего для заданной местности, прежде всего по прочности, использована международ-

ная классификация ВЭУ, которая базируется на скорости ветрового потока и параметрах турбулентности (табл. 3) [18].

Международный стандарт по выбору класса ВЭУ

Таблица 3

International standard for the selection of a wind turbine class

Table 3

Классы ВЭУ	I	II	III	S
$V_{пре}$ $V_{пре}$, м/с	50	42,5	37,5	Особый класс Проектируется отдельно
$V_{ср}$, м/с	10	8,5	7,5	
A	$I_{пре} = 0,16$			
B	$I_{пре} = 0,14$			
C	$I_{пре} = 0,12$			

Здесь $V_{ср}$ – среднемноголетняя скорость; $V_{пре}$ – осредненная предельная скорость за десятиминутный интервал; $I_{пре}$ – предельная интенсивность турбулентности.

Согласно табл. 3, для определения класса ВЭУ необходимо знать значения среднемноголетней и предельной скорости.

Основные параметры ветрового потока на рассматриваемой площадке составляют: $V_{ср} = 7,1$ м/с; $\beta = 8$ м/с; $\gamma = 2,24$.

Осредненную предельную скорость ветра за десятиминутный интервал находят по формуле:

$$V_{пре} = \frac{V_{ср}}{0,2} = \frac{7,1}{0,2} = 35,5 \text{ м/с.}$$

При выборе класса ВЭУ необходимо знать, какое значение $V_{пре}$ должно быть в качестве определяющего. Для определения вероятности возникновения скорости ветрового потока в интервале 1 м/с используется следующая формула [12]:

$$p(V_{пре}) = \int_{V_{пре}-0,5}^{V_{пре}+0,5} f(v) dv. \tag{8}$$

Вероятность появления скорости $V_{пре} = 35,5$ м/с рассчитывается по (8):

$$p(35,5) = \int_{35,5-0,5}^{35,5+0,5} f(v) dv = \int_{35,5-0,5}^{35,5+0,5} \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\gamma} dv = \int_{35,5-0,5}^{35,5+0,5} \frac{2}{8} \left(\frac{v}{8}\right)^{2,24-1} e^{-\left(\frac{v}{8}\right)^2} dv = 1,184 \cdot 10^{-12}.$$



Поскольку вероятность появления скорости $V_{пре} = 35,5$ м/с исчезающе мала, подбираем скорость $V_{пре}$ с большей вероятностью появления (соответствующей вероятности появления предельной скорости по классификации примерно $2 \cdot 10^{-9}$). В результате получаем скорость, окончательно определяющую класс ВЭУ:

$$V_{пре} = 30,8 \text{ м/с},$$

$$p(30,8) = \int_{30,8-0,5}^{30,8+0,5} f(v) dv = 2,055 \cdot 10^{-9}.$$

Данная скорость соответствует III классу ВЭУ по международной классификации.

2.8. Выбор модели ВЭУ и компоновки ВЭС

Для достижения наибольшей эффективности и суммарной выработки ВЭС был проведен отбор подходящей модели ВЭУ класса IIIа.

На основе анализа рынка производителей ВЭУ были рассмотрены хорошо зарекомендовавшие себя в 2018 г. компании [19]: Vestas (Дания); GeneralElectric (США); Goldwind (Китай);

SiemensGamesa (Испания); Enercon (Германия); Nordexgroup (Германия); Guodian (Китай); Senvion (Германия); MingYang (Китай); EnvisionEnergy (Китай); UnitedPower (Китай); Suzlon (Индия); Vensys (Германия).

Генератор и силовой преобразователь в составе оборудования ВЭУ являются двумя основными электрическими компонентами. Различные конструкции и комбинации этих двух компонентов приводят к большому разнообразию конфигураций ВЭУ, которые можно классифицировать по трем группам [20]:

- 1) ВЭУ с постоянной частотой вращения с асинхронным генератором с беличьей клеткой (АГБК).
- 2) ВЭУ с частично-переменной частотой вращения с асинхронным генератором двойного питания (АГДП) или синхронным генератором с фазным ротором (СГФР).
- 3) ВЭУ с полно-переменной частотой вращения с генератором АГБК, СГФР или синхронным генератором на постоянных магнитах (СГПМ).

Основные достоинства и недостатки всех типов и конфигураций основного оборудования ВЭУ приведены в табл. 4.

Таблица 4

Основные достоинства и недостатки типов и конфигураций ВЭУ [20]

Table 4

Main advantages and disadvantages of wind turbine configuration types [20]

	ВЭУ с постоянной частотой вращения	ВЭУ с частично переменной частотой вращения		ВЭУ с полно-переменной частотой вращения
Генератор	АГБК	АГФР	АГДП	АГБК, СГФР, СГПМ
Диапазон изменения частоты вращения	1 %	10 %	±30 %	0÷100 %
Силовой преобразователь	не требуется	диод+ прерыватель	AC/DC+DC/AC	AC/DC+DC/AC
Мощность силового преобразователя	0 %	10 %	30 %	100 %
Устройство плавного пуска	требуется	требуется	не требуется	не требуется
Редуктор	требуется	требуется	требуется	требуется / не требуется
Конденсаторные батареи	требуется	требуется	не требуется	не требуется
Аэродинамическое регулирование лопастей	Active Stall, Stall, Pitch	Pitch	Pitch	Pitch
Слежение за точкой максимальной мощности	невозможно	узкое	достижимое	достижимое
Доля на рынке	10÷15 %	10÷15 %	50 %	30÷35 % с СГПМ

Следует отметить, что безредукторная ВЭУ с СГПМ является наиболее перспективной конструкцией ВЭУ (см. табл. 4).

В результате анализа рынка ВЭУ и характеристик современных моделей ВЭУ были предварительно отобраны две безредукторные ВЭУ с СГПМ мега-

ваттного класса от компаний VENSYS и GOLDWIND, которые имеют одинаковую мощность (1,5 МВт), высоту башни (85 м) и диаметр ветроколеса (82 м). Технические характеристики данных ВЭУ приведены в табл. 5.

Технические характеристики рассмотренных ВЭУ [21–22]

Table 5

Technical characteristics of the wind turbines considered [21–22]

Параметры	VENSYS	GOLDWIND
Мощность, кВт	1 500	1 500
Диапазон рабочих скоростей ветра, м/с	3÷22	3÷22
Номинальная скорость ветра, м/с	12,5	10,3
Класс ИЕС	IIIa	IIIa
Диаметр ветроколеса (ВК), м	82,3	82
Число лопастей, шт	3	3
Высота башни, м	85	85
Материал башни	Сталь	Сталь
Частота, Гц	50	50
Тип генератора	Трехфазный СГПМ	Трехфазный СГПМ
Диапазон рабочих температур, °С	-20÷ +40	-30÷+40
Номинальное напряжение генератора, В	690	690
Номинальная частота вращения ротора генератора, об/мин	17,3	17,3

На основании карты ВЭР (см. рис. 4) выбрана перспективная зона с наиболее высоким ветропотенциалом для строительства ВЭС. Ветропотенциал этой зоны составляет 333÷459 Вт/м², скорость ветра – 6,5÷7,7 м/с. Зона расположена на расстоянии 7 км к северу от города Эс-Сухне и на расстоянии 3 км к западу от главной дороги, что обуславливает небольшие потери электроэнергии при передаче ее потребителю и невысокую стоимость.

Размещение ВЭУ основывается на розе ветров площадки (см. рис. 2) и рекомендуемых расстояниях между соседними установками, равных 8÷11 диаметров ротора [12]. Основным показателем оптимальности расположения ВЭУ в составе ВЭС является коэффициент $\eta_{ВЭС}$, учитывающий эффект затенения соседними установками, который должен составлять не менее 98 %. С учетом диаметра ВК выбранных ВЭУ 82 м и мощности 1,5 МВт на площадке можно разместить 8 ВЭУ на рекомендуемом расстоянии (рис. 5).

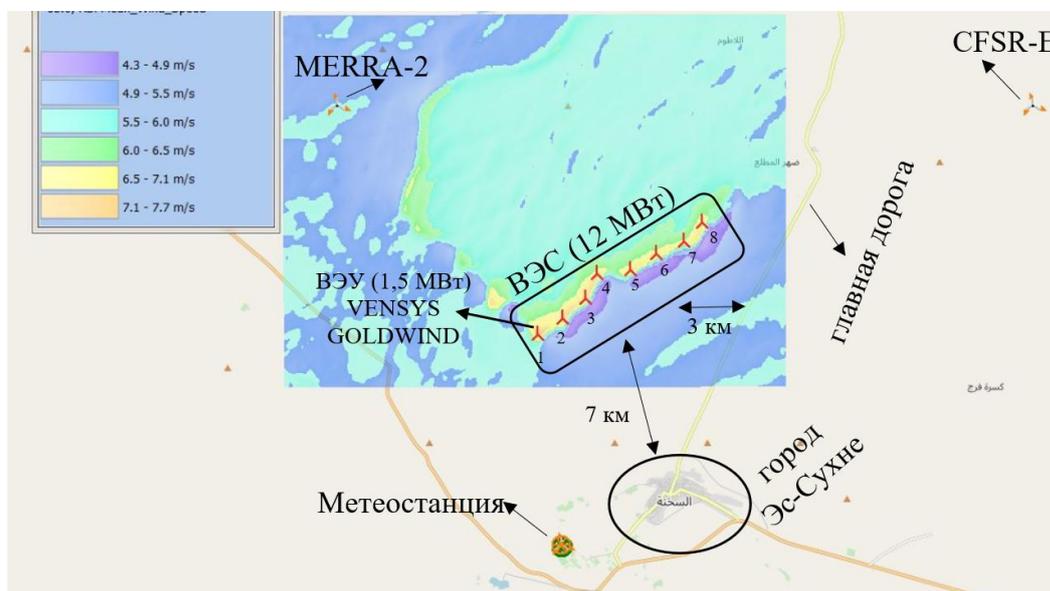


Рис. 5 – Размещение ВЭУ и предлагаемая компоновка ВЭС в перспективной зоне
 Fig. 5 – Placement of wind turbines and proposed layout of wind farm in the perspective zone

Таким образом, суммарная установленная мощность ВЭС составит $8 \cdot 1,5 = 12$ МВт. Следует отметить, что размещение ВЭУ на местности в WindPRO осуществляют с помощью модуля New WGT.

2.9. Расчет выработки ВЭС

Расчет выработки одной ВЭУ производится на основании результатов численного моделирования в точке размещения ВЭУ и рабочей характеристики $P_{ВЭУ}(v)$ по формуле [7]:

$$\mathcal{E}_{ВЭУ} = 8760 \int_{V_0}^{V_{ост}} P_{ВЭУ}(v) \cdot f(v) \cdot dv, \quad (9)$$

где V_0 – скорость начала вращения ветроколеса; $V_{ост}$ – скорость останова.

Оценка потерь выработки электрической энергии ВЭС основана на учете потерь энергии, обусловленных преобразованием ветровой энергии в электрическую, ее транспортировкой, техническими простоями и другими факторами. При проектировании ВЭС удельные значения потерь (кроме затенения) задаются экспертами исходя из рекомендуемых диапазонов, основанных на международном опыте эксплуатации ВЭС.

При проектировании ВЭС в WindPRO учитывалось затенение каждой ВЭУ соседними установками

на основе модели затенения по методике N.O. Jensen и описываемой уравнением [17]:

$$V = U \left[1 - \left(1 - \sqrt{1 - C_{тяг}} \right) \cdot \left(\frac{D}{D + 2k_3 x} \right)^2 \right], \quad (10)$$

где V – скорость ветрового потока на расстоянии x за ротором ВЭУ; U – скорость невозмущенного ветрового потока перед ротором ВЭУ; D – диаметр ВК; $C_{тяг}$ – коэффициент тяги; k_3 – коэффициент затенения, зависящий от турбулентности ветрового потока, и, соответственно, шероховатости подстилающей поверхности. Коэффициент затенения k_3 может принимать значения от 0 до 0,1 и фактически отражает расширение «зоны затенения».

В работе рассмотрены следующие виды потерь и их значения (табл. 6).

Оценка потерь выработки ВЭС

Таблица 6

Estimation of generation losses of wind power plant

Table 6

№	Виды потерь	Удельное
1	Потери от затенения	0,2
2	Потери по технической готовности	3,7
2.1	Потери по технической готовности ВЭС	2,2
2.2	Потери по технической готовности трансформаторного и коммутационного оборудования	0,5
2.3	Потери по технической готовности сети	1
3	Потери при эксплуатации ВЭС	1,4
3.1	Различие фактических и расчетных кривых мощности ВЭУ	0,8
3.2	Гистерезис при буревых скоростях ветра	0,1
3.3	Неоптимальность угла набегания ветрового потока на ротор ВЭУ	0,5
4	Электрические потери во всех элементах электрической цепи (соединительных кабелях, силовых трансформаторах, преобразователях и пр.)	2,5
5	Климатические потери	2,4
5.1	Изменение шероховатости поверхности лопасти	0,5
5.2	Обледенение лопастей ВЭУ	0,5
5.3	Отключение ВЭУ в результате неблагоприятных погодных условий	0,5
5.4	Простой в работе ВЭУ из-за нерабочего диапазона температур	0,9
	Суммарные потери	10,2

Таким образом, суммарные потери выработки рассматриваемой ВЭС составили 10,2 %.

В расчетном модуле PARK в WindPRO был произведен расчет основных показателей проектируе-

мой ВЭС. Результаты расчета выработки предлагаемой ВЭС для рассматриваемых моделей ВЭУ приведены в табл. 7.



Таблица 7

Анализ показателей выработки сетевой ВЭС 12 МВт при рассмотренных типах ВЭУ

Table 7

Analysis of output indicators of 12 MW grid-connected wind power plant for the considered types of wind turbines

Тип ВЭУ	VENSYS	GOLDWIND	
Установленная мощность, кВт	1 500	1 500	
Количество ВЭУ, шт	8	8	
Диаметр ВК, м	82,3	82	
ВЭС (12 МВт)	Выработка ВЭС (без учета потерь), МВт·ч/год	42 762,8	42 181
	Выработка ВЭС (с учетом только потерь от затенения 0,2 %), МВт·ч/год	42 656,8	42 081
	Выработка ВЭС (с учетом суммарных потерь 10,2 %), МВт·ч/год	38 391,1	37 872,9
	$\eta_{\text{ВЭС}}$ (с учетом только потерь от затенения 0,2 %), %	99,8	99,8
	Число часов использования установленной мощности ($T_{\text{исп}}$), ч/год	3 199	3 156
	КИУМ _{ВЭС} , %	36,5	36
	Среднегодовая скорость ветра на высоте оси ВК, м/с	7,1	7,1
	Средняя выработка одной ВЭУ в составе ВЭС (с учетом суммарных потерь 10,2 %), МВт·ч/год	4 798,9	4 734,1
	Расстояние между ВЭУ, м (диаметры ВК)	881÷990 (10,7÷12,1 Ø)	881÷990 (10,6÷12 Ø)



Согласно полученным результатам, выбрана установка VENSYS, имеющая лучшие значения выработки и КИУМ.

2.10. Подключение ВЭС к сети

Рассматриваемая ВЭС мощностью 12 МВт подключается к сети кабелями длиной 7 км с напряжением 20 кВ через трансформатор 20 кВ/66 кВ мощностью 20 МВт, расположенный на подстанции в городе Эс-Сухне (рис. 6).

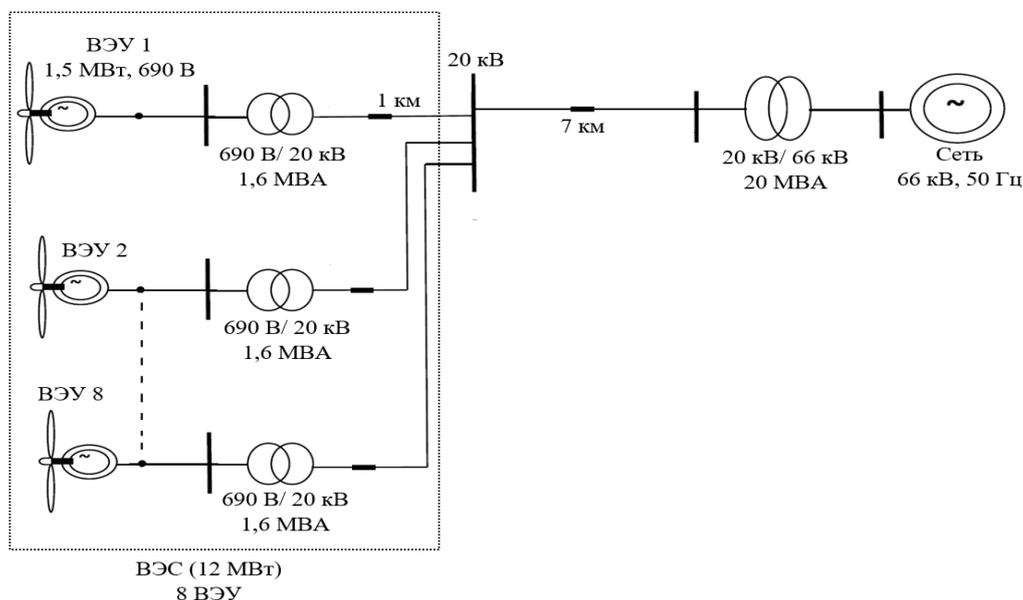


Рис. 6 – Электрическая схема рассмотренной ВЭС
Fig. 6 – Electrical diagram of the considered wind power plant

Каждая ВЭУ в составе ВЭС имеет повышающий трансформатор 690В/20 кВ мощностью 1,6 МВА и подключается на общую шину.

3. Оценки экологической и экономической эффективности проекта

Потребление электроэнергии на душу населения в Сирии в 2010 г. составляло 2 232 кВт·ч [23], значит,



ВЭС с выработкой электроэнергии 38 391,1 МВт·ч/год обеспечит около 17 200 человек в год (что превышает потребности всего населения города Эс-сухне) и позволит сэкономить около 3 301,04 тонн нефтяного эквивалента (т н.э.) в год (1 т н.э. = 11 630 кВт·ч). Согласно [24], коэффициент эмиссии углекислого газа при производстве электроэнергии для Сирии составляет 0,65 тCO₂/МВт·ч, поэтому среднее значение снижения эмиссии CO₂ за счет предлагаемой ВЭС составит 24 954,2 тCO₂/год.

Оценка эффективности данного проекта выполнена на основе следующих показателей:

Чистый дисконтированный доход (Net Present Value, NPV) определяется как разность между текущей стоимостью будущих доходов и текущей стоимостью будущих затрат на проект в течение всего срока службы [25]:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 = \sum_{t=1}^T \frac{R_t - C_t}{(1+r)^t} - I_0, \quad (11)$$

где I_0 – инвестиционный капитал (капитальные вложения), представляет собой затраты инвестора в первоначальном временном периоде; R_t – доходы, достигаемые на t -м шаге проекта; C_t – затраты (расходы), осуществляемые на том же шаге; CF_t – денежный поток в период времени t , для расчета необходимо из притока денежных средств R_t отнять отток C_t ; r – норма дисконта (ставка дисконтирования), которая является процентной ставкой, ее используют при анализе дисконтированного денежного потока для определения сегодняшней стоимости будущих денежных потоков; T – горизонт расчета (жизненный цикл проекта).

Проект является эффективным, если NPV положителен, то есть денежные поступления от проекта превышают затраты на его осуществление. С ростом NPV эффективность проекта увеличивается.

Дисконтированным сроком окупаемости (Discounted Payback Period, DPP) называют минимальный временной интервал от начала осуществления проекта, после которого первоначальные вложения и другие затраты, связанные с осуществлением инвестиционного проекта, покрываются суммарными результатами его реализации. Срок окупаемости определяется с учетом дисконтирования следующим образом [26]:

$$DPP = \min T, \text{ при котором } \sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t} > I_0. \quad (12)$$

Более эффективным является проект с меньшим сроком окупаемости.

Внутренняя норма доходности (Internal Rate of Return, IRR) представляет собой норму дисконта, при которой суммарное значение доходов равно

суммарному значению расходов, то есть (NPV = 0). IRR должна быть как минимум равна норме доходности, которую инвесторы могут получить от альтернативных вложений. IRR определяется следующим образом [27]:

$$0 = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - C_t}{(1+IRR)^t} - I_0. \quad (13)$$

Значение IRR должно превышать ставку дисконтирования.

Индекс доходности (Profitability Index или benefit cost ratio, PI) – показатель эффективности инвестиций, представляющий собой отношение дисконтированных доходов к размеру инвестиционного капитала. Другие синонимы индекса доходности, которые несут аналогичный экономический смысл: индекс прибыльности и индекс рентабельности. PI определяется следующим образом [28]:

$$PI = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{CF_t}{(1+r)^t}}{I_0} = 1 + \frac{NPV}{I_0}. \quad (14)$$

Индекс доходности зависит от тех же показателей, что и NPV. Эти показатели тесно связаны: если NPV положителен, то PI > 1 – проект эффективен; при PI < 1 – проект неэффективен.

Нормированная стоимость энергии (Levelized Cost of Energy, LCOE) – средняя расчетная себестоимость производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции. LCOE определяется следующим образом [29]:

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{\mathcal{E}_t}{(1+r)^t}}, \quad (15)$$

где \mathcal{E}_t – производство (выработка) электроэнергии ВЭС за год, которое составляет в нашем случае 38 391,1 МВт·ч/год.

Показатель используется для оценки минимальной рыночной цены, по которой должна быть продана электроэнергия для обеспечения окупаемости всех видов затрат по проекту в течение срока реализации.

Для расчета предыдущих экономических показателей предлагаемой ВЭС (12 МВт) необходимо определить следующие параметры:

1. Ставка дисконтирования и срок службы установок: в данном исследовании ставка дисконтирования r принимается равной 9 %, а срок службы установки ВЭУ $T = 20$ лет.



2. Капитальные вложения I_0 ВЭС значительно снижаются в течение последних десяти лет. Согласно [2], удельная стоимость за кВт установленной мощности ВЭС снизилась с 1 913 \$/кВт в 2010 г. до 1 497 \$/кВт в 2018 г. Капитальные вложения сетевой ВЭС можно разделить на следующие основные категории [2]:

– стоимость ВЭУ (64 % от капитальных вложений ВЭС), включая лопасти, башню, генератор, силовой преобразователь и трансформатор;

– строительные-монтажные работы (16 %), включая затраты на строительство для подготовки площадки и фундаментов для башен;

– затраты на подключение к сети (11 %); сюда могут входить трансформаторы и подстанции, а также подключение к распределительной или передающей сети;

– прочие капитальные затраты (9 %), которые могут включать в себя строительство зданий, систем управления, расходы на консультирование по проектам и т.д.

Капитальные вложения на ВЭС в этом исследовании определены на основе текущих рыночных цен (1 497 \$/кВт), сложившихся в 2018 г. [2]. Таким образом, капитальные вложения I_0 рассмотренной ВЭС при установленной мощности 12 МВт составляют:

$$I_0 = 12000 \text{ кВт} \cdot 1497 \frac{\$}{\text{кВт}} = 17964000 \$ \approx 18 \text{ млн. долл.}$$

В годовые эксплуатационные расходы (C_t) включаются годовые постоянные расходы на эксплуата-

цию и техническое обслуживание ВЭС (O&M), при этом наибольшая доля затрат на O&M приходится на ремонт и техническое обслуживание (67 %), затем следует зарплата (14%) и затраты на материалы и запасные части (7 %) [2]. Текущие затраты на O&M для наземных ветропарков оцениваются в среднем с 20 \$/кВт/год до 60 \$/кВт/год, в зависимости от рынка и страны. Кроме того, годовые расходы на O&M могут оцениваться в среднем от 1,5 % до 2 % капитальных вложений [2]. Стоимость рабочей силы в Сирии намного ниже, чем в США или Европе, поэтому расходы на O&M приняты 1,5 % капитальных вложений, или 22,45 \$/кВт в год.

Таким образом, годовые расходы рассмотренной ВЭС

$$C_t = 0,015 \cdot 17964000 = 269460 \$/\text{год}.$$

Ежегодные доходы R_t в этом исследовании состоят из доходов от сокращения выбросов парниковых газов и доходов от продажи электроэнергии, произведенной данной ВЭС. Министерство электричества Сирии издало в 2016 г. закон № 1763, который определяет закупочные цены на электроэнергию, произведенную из возобновляемой энергии. На основании этого закона инвестор может продать произведенную энергию от своей ВЭС государственному предприятию распределения и эксплуатации электрической энергии (PEDEEE) по цене, указанной в табл. 8 [30].

Закупочные цены электроэнергии по PEDEEE

Таблица 8

Purchase prices for electricity by PEDEEE

Table 8

Закупочные цены электроэнергии по PEDEEE, €/кВт·ч	Число часов использования установленной мощности ($T_{исп}$), ч/год
0,08	$\leq 2 500$
$2 500/T_{исп} \cdot 0,08$	$> 2 500$

В данном исследовании число часов использования установленной мощности ($T_{исп}$) рассматриваемой ВЭС с ВЭУ фирмы VENSYS при установленной мощности 12 МВт составило 3 199 ч/г (см. таб. 7). Поскольку это более 2 500 часов, закупочная цена электроэнергии по PEDEEE (или продажная цена электроэнергии инвестором), составит $(2 500 / 3 199) \cdot 0,08 = 0,063$ €/кВт·ч (или 0,071 \$/кВт·ч при курсе валюты 1€ = 1,12\$). Таким образом, предлагаемая ВЭС с выработкой электроэнергии 38 391,1 МВт·ч/год обеспечит годовой доход, равный $38 391 100 \cdot 0,071 = 2 725 768,1$ \$/г.

В конце 2018 г. в Европейской системе торговли квоты на тонну выбросов в эквиваленте CO₂ выросли до 20 евро [31]. При стоимости тонны выбросов CO₂ 20 €/тCO₂ (или $20 \cdot 1,12 = 22,4$ \$/тCO₂), годовой доход от сокращения выбросов парниковых газов для предлагаемой ВЭС составит $24 954,2$ тCO₂/г ·

$\cdot 22,4$ \$/тCO₂ = 558 974, 08 \$/г. Таким образом, суммарные годовые доходы рассматриваемой ВЭС

$$R_t = 2 725 768,1 + 558 974,08 = 3 284 742,18 \$/\text{г} \approx 3,3 \text{ млн долл./г.}$$

Результаты расчетов экономических показателей LCOE, NPV, DPP, PI и IRR для предлагаемой ВЭС мощностью 12 МВт в Сирии показали:

- ВЭС имеет положительный NPV = 9561141,08 \$ \approx 9,6 млн долл.;
- Первоначальные инвестиции, исходя из накопленного чистого дисконтированного денежного потока (см. рис. 7), будут возвращены через DPP = 8,92 лет \approx 9 лет;

- Проект приемлемый и прибыльный, так как $PI = 1,53 > 1$;
- IRR составляет 16 %, а это означает, что до ставки дисконтирования, равной 16 %, проект будет иметь $NPV > 0$;

- LCOE составляет 0,058 \$/кВт·ч; это свидетельствует о том, что стоимость электроэнергии ниже покупной цены электроэнергии, принадлежащей PEDEEE (0,071 \$/кВт·ч), поэтому с точки зрения инвестора проект является полностью прибыльным.

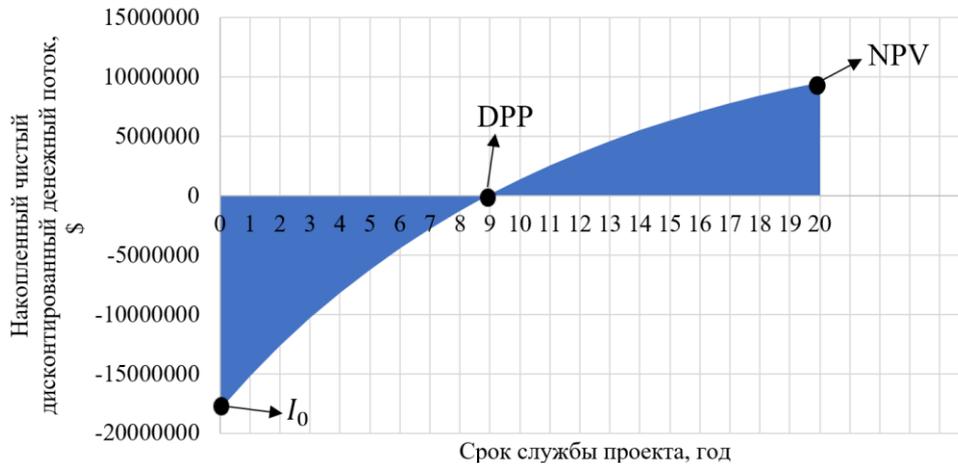


Рис. 7 – Накопленный чистый дисконтированный денежный поток данной ВЭС
Fig. 7 – Cumulative discounted cash flow of the wind power plant

С другой стороны, стоимость электроэнергии, вырабатываемой государственными электростанциями на ископаемом топливе в Сирии, оценивалась в 2010 г. в 0,16 \$/кВт·ч, поэтому, если сирийское государство профинансирует этот проект, он также будет прибыльным.

4. Заключение

В работе проведены оценки технических и экономических параметров строительства ВЭС для условий Сирии, площадки близ города Эс-Сухне (в провинции Хомс), так как она имеет высокий ветровой потенциал.

Анализ технических параметров ВЭС мощностью 12 МВт, состоящей из 8 ВЭУ фирмы Vensys, каждая мощностью 1,5 МВт, проведен с помощью лицензированного ПО WindPRO. Результаты показали, что выработка электроэнергии ВЭС с учетом всех потерь составит 38 391,1 МВт·ч/г.

Полученное значение выработки обеспечит электроэнергией все население города Эс-Сухне, сэкономит около 3 301,04 т н.э./г и позволит снизить выбросы парниковых газов в объеме 24 954,2 тCO₂/г.

Экономические оценки предлагаемой ВЭС показали, что проект полностью прибыльный с точки зрения инвестора и сирийского государства, если оно профинансирует этот проект.

Полученные результаты могут быть практически использованы для строительства реальной ВЭС в предлагаемом месте в Сирии. Рекомендуется проведение других детальнейших исследований для строительства ВЭС в остальных районах Сирии, которые характеризуются высоким ветровым потенциалом.

Список литературы

- [1] International renewable energy agency (IRENA) // Renewable energy statistics 2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2019.pdf. – (Дата обращения: 10.09.2019.).
- [2] International renewable energy agency (IRENA) // Renewable power generation costs in 2018 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf. – (Дата обращения: 10.09.2019.).
- [3] International renewable energy agency (IRENA) // Wind Power: Technology brief 2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_Wind_Power_E07.pdf. – (Дата обращения: 10.09.2019.).
- [4] Рамадан, А. Потенциал традиционных и возобновляемых источников энергии в Сирии / А. Рамадан, В.В. Елистратов // Энергохозяйство за рубежом. – 2017. – Т. 5. – № 294. – С. 15–21.
- [5] Рамадан, А. Использование возобновляемых источников энергии в Сирии / А. Рамадан, В.В. Елистратов / А. Рамадан // В сборнике: Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы. Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов. Материалы V Международной конференции, 2017. – С. 135–141.
- [6] Elistratov, V. Energy potential assessment of solar and wind resources in Syria / V. Elistratov, A. Ramadan // Journal of Applied Engineering Science. – 2018. – Vol. 16. – No. 2. – P. 208–216.



[7] Рамадан, А. Исследование и расчёт параметров ветроэлектростанции для условий Сирии / А. Рамадан. Магистерская диссертация, СПб, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. – 110 с.

[8] Рамадан, А.М. Использование потенциала ветровой энергии для энергоснабжения провинции Хомс (Сирия) / А. Рамадан, В.В. Елистратов // В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018 по материалам международной научно-практической конференции. Севастополь, 2018. – С. 983–986.

[9] Refa't Hasoneh. Grid Integration of Al Haijana Wind Park in Syria / Refa't Hasoneh. Master thesis, Germany, Kassel University, 2011. – 120 p.

[10] NERC (National Energy Research center), Damascus, Syria [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nerc.gov.sy/>. – (Дата обращения: 01.09.2019.).

[11] CLIMATE-DATA.ORG, Climate data for cities worldwide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://en.climate-data.org/asia/syria/homs/as-sukhna-429511/>. – (Дата обращения: 27.09.2019.).

[12] Сливканич, М.А. Методики оценки ветроэнергетических ресурсов в условиях ограниченности природно-климатической информации / М.А. Сливканич. Магистерская диссертация, СПб, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016. – 128 с.

[13] Van Ackere, S. Wind resource mapping using landscape roughness and spatial interpolation methods / S. Van Ackere [et al.] // *Energies*. – 2015. – Vol. 8. – No. 8. – P. 8682–8703.

[14] Albani, A. Wind Energy Potential and Power Law Indexes Assessment for Selected Near-Coastal Sites in Malaysia / A. Albani, M.Z. Ibrahim // *Energies*. – 2017. – Vol. 10. – No. 3. – P. 307.

[15] Yue, C.-D. Prediction of Power Generation by Offshore Wind Farms Using Multiple Data Sources / C.-D. Yue [et al.] // *Energies*. – 2019. – Vol. 12. – No. 4. – P. 700.

[16] Lee, J.C.-Y. Assessing Variability of Wind Speed: Comparison and Validation of 27 Methodologies / J.C.-Y. Lee, M.J. Fields, J.K. Lundquist // *Wind Energy Science*. – 2018. – Vol. 3. – P. 845–868.

[17] WindPRO / PARK Introduction to the Estimation of Extreme Wind Speeds and Wind Loads, EMD International A/S [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.emd.dk/files/windpro/manuals/for_print/Appendices-all_UK.pdf. – (Дата обращения: 27.09.2019).

[18] Ramadan, H.S. Wind energy farm sizing and resource assessment for optimal energy yield in Sinai Peninsula, Egypt / H.S. Ramadan // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 161. – P. 1283–1293.

[19] U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), 2018 Wind Technologies Market Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/08/f65/2018%20Wind%20Technologies%20Market%20Report%20FINAL.pdf>. – (Дата обращения: 27.09.2019.).

[20] Рамадан, А. Моделирование режимов работы сетевой ветроэнергетической установки с синхронным генератором на постоянных магнитах / А. Рамадан, В.В. Елистратов // *Электричество*. – 2019. – № 7. – С. 11–21.

[21] VENSYS 82-1.5 MW, TechnicalData [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.vensys.de/fileadmin/user_upload/Windkraftanlagen/1.5_MW-Plattform/Vensys_82/DS-VENSYS-82-1.5MW.pdf. – (Дата обращения: 01.08.2019.).

[22] GOLDWIND 1.5 MW, TechnicalSpecifications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.goldwindamericas.com/sites/default/files/Goldwind%20Americas_Goldwind%201.5MW%20Brochure%20%282017%29_0.pdf. – (Дата обращения: 01.08.2019.).

[23] Public Establishment of Electricity for Generation (PEEG), Technical statistical report [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://peeg.gov.sy/>. – (Дата обращения: 01.12.2018.).

[24] International Energy Agency (IEA), Highlights version of CO₂ emissions from Fuel combustion database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iea.org>. – (Дата обращения: 01.01.2014.).

[25] Cali, U. Techno-economic analysis of high potential offshore wind farm locations in Turkey / U. Cali [et al.] // *Energy Strateg. Rev.* – 2018. – Vol. 22. – P. 325–336.

[26] Rodrigues, S. A Multi-Objective Optimization Framework for Offshore Wind Farm Layouts and Electric Infrastructures / S. Rodrigues [et al.] // *Energies*. – 2016. – Vol. 9. – No. 3. – P. 216.

[27] Serdari1, E. The feasibility study of a 12 MW grid-connected wind power farm in Albania using RETScreen / E. Serdari1 [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2075. – No. 1. – P. 200021.

[28] AL-Rawashdeh, H.A. Evaluation the wind turbines farm in the town of Tafila / H.A. AL-Rawashdeh, A.O. Hasan, R.A. Ahmad // *International Journal of Development Research*. – 2018. – Vol. 8. – No. 10. – P. 23218–23224.

[29] Bakić, V. Technical and economic analysis of grid-connected PV/Wind energy stations in the Republic of Serbia / V. Bakić // *FME Transactions*. – 2016. – Vol. 44. – P. 71–82.

[30] Ministry of electricity of Syria [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.moe.gov.sy/>. – (Дата обращения: 01.08.2019.).

[31] Financial markets platform, investing.com. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.investing.com/commodities/carbon-emissions>. – (Дата обращения: 12.04.2019.).

References

[1] International renewable energy agency (IRENA). Renewable energy statistics 2019 [E-resource]. Available



- on: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2019.pdf (09.10.2019.).
- [2] International renewable energy agency (IRENA). Renewable power generation costs in 2018 [E-resource]. Available on: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/May/IRENA_A_Renewable-Power-Generations-Costs-in-2018.pdf (09.10.2019.).
- [3] International renewable energy agency (IRENA). Wind Power: Technology brief 2016 [E-resource]. Available on: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_Wind_Power_E07.pdf (09.10.2019.).
- [4] Ramadan A., Elistratov V.V. Potential of traditional and renewable energy sources in Syria (Potensial traditsionnykh i vobnovlyayemykh istochnikov energiyv Sirii). *Energokhozyaystvo za rubezhom*, 2017;5(294):15–21 (in Russ.).
- [5] Ramadan A., Elistratov V.V. Use of renewable energy sources in Syria (Ispol'zovaniye vobnovlyayemykh istochnikov energii v Sirii). In the collection: Renewable energy: problems and prospects. Actual problems of renewable energy resources development. Proceedings of the V International conference – Makhachkala (V sbornike: Vobnovlyayemaya energetika: problem I perspektivy. Aktual'nyyeproblemyosvoyenyavobnovlyayemykhenergoresursovMaterialy V Mezhdunarodnoy konferentsii), 2017; pp. 135–141 (in Russ.).
- [6] Elistratov V., Ramadan A. Energy potential assessment of solar and wind resources in Syria. *Journal of Applied Engineering Science*, 2018;16(2):208–216.
- [7] Ramadan A. Study and calculation of wind power plant parameters for Syria conditions (Issledovaniyeiraschotparametrovetroelektrostantsiidlya usloviySirii). Master thesis, Saint Petersburg, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 2016; 110 p. (in Russ.).
- [8] Ramadan A.M., Elistratov V.V. Using of wind energy potential to power supply the province of Homs (Syria) (Ispol'zovaniye potentsiala vetrovoy energii dlya energosnabzheniya provintsii Khoms (Syria). In the collection: Environmental, industrial and energy security-2018 based on the materials of the international scientific and practical conference, Sevastopol (V sbornike: Ekologicheskaya, promyshlennaya I energeticheskaya bezopasnost' – 2018 po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sevastopol'), 2018; pp. 983–986 (in Russ.).
- [9] Hasoneh Refa't. Grid Integration of Al Haijana Wind Park in Syria. Master thesis, Germany, Kassel University, 2011; 120 p.
- [10] NERC (National Energy Research center), Damascus, Syria [E-resource]. Available on: <http://www.nerc.gov.sy/> (09.01.2019).
- [11] CLIMATE-DATA.ORG, Climate data for cities worldwide [E-resource]. Available on: <https://en.climate-data.org/asia/syria/homs/as-sukhna-429511/> (09.27.2019).
- [12] Slivkanich M.A. Methods of assessing wind energy resources in conditions of limited natural-climatic information (Metodiki otsenki vetroenergeticheskikh resursov v usloviyakh ogranichennosti prirodno-klimaticheskoy informatsii). Master thesis, Saint Petersburg, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 2016; 128 p. (in Russ.).
- [13] Van Ackere S., van Eetvelde G., Schillebeeckx D., van Wyngene K., Vandeveldel L. Wind resource mapping using landscape roughness and spatial interpolation methods. *Energies*, 2015;8(8):8682–8703.
- [14] Albani A., Ibrahim M. Z., Wind Energy Potential and Power Law Indexes Assessment for Selected Near-Coastal Sites in Malaysia. *Energies*, 2017;10(3):307.
- [15] Yue C.-D., Liu C.-C., Tu C.-C., Lin T.-H. Prediction of Power Generation by Offshore Wind Farms Using Multiple Data Sources. *Energies*, 2019;12(4):700.
- [16] Lee, J. C.-Y., M. J. Fields, J. K. Lundquist., Assessing Variability of Wind Speed: Comparison and Validation of 27 Methodologies. *Wind Energy Science*, 2018;3:845–868.
- [17] WindPRO / PARKIntroduction to the Estimation of Extreme Wind Speeds and Wind Loads, EMD International A/S [E-resource]. Available on: http://www.emd.dk/files/windpro/manuals/for_print/Appendices-all_UK.pdf (09.27.2019).
- [18] Ramadan H.S. Wind energy farm sizing and resource assessment for optimal energy yield in Sinai Peninsula, Egypt. *Journal of Cleaner Production*, 2017;161:1283–1293.
- [19] U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), 2018 Wind Technologies Market Report [E-resource]. Available on: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/08/f65/2018%20Wind%20Technologies%20Market%20Report%20FINAL.pdf> (09.27.2019).
- [20] Ramadan A., Elistratov V.V., Modeling the Operation Modes of a Grid Windmill Equipped with a Permanent Magnet Synchronous Generator (Modelirovaniye rezhimov raboty setevoy vetroenergeticheskoy ustanovki s sinkhronnym generatorom na postoyannykh magnitakh). *Elektrichestvo*, 2019;(7):11–21 (in Russ.).
- [21] VENSYS 82-1.5 MW, TechnicalData [E-resource]. Available on: https://www.vensys.de/fileadmin/user_upload/Windkraftanlagen/1.5_MW-Plattform/Vensys_82/DS-VENSYS-82-1.5MW.pdf (08.01.2019).
- [22] GOLDWIND 1.5 MW, TechnicalSpecifications [E-resource]. Available on: https://www.goldwindamericas.com/sites/default/files/Goldwind%20Americas_Goldwind%201.5MW%20Brochure%20%282017%29_0.pdf (08.01.2019).
- [23] Public Establishment of Electricity for Generation (PEEG), Technical statistical report [E-resource]. Available on: <http://peeg.gov.sy/> (12.01.2018).
- [24] International Energy Agency (IEA), Highlights version of CO₂ emissions from Fuel combustion data-



base [E-resource]. Available on: <http://www.iea.org> (01.01.2014).

[25] Cali U., Erdogan N., Kucuksari S., Argin M. Techno-economic analysis of high potential offshore wind farm locations in Turkey. *Energy Strateg. Rev.*, 2018;22:325–336.

[26] Rodrigues S., Restrepo C., Katsouris G., Teixeira Pinto R., Soleimanzadeh M., Bosman P., Bauer P., A Multi-Objective Optimization Framework for Offshore Wind Farm Layouts and Electric Infrastructures. *Energies*, 2016;9(3):216.

[27] Serdari E., Muda V., Buzra U., Bërdufi I., Halili D., Halili M., Mitrushi D., Berberi P., The feasibility study of a 12 MW grid-connected wind power farm in Albania using RETScreen. *AIP Conference Proceedings*, 2019;2075(1):200021.

[28] Al-Rawashdeh H.A., Hasan A.O., Ahmad R.A. Evaluation the wind turbines farm in the town of Tafila / Jordan. *International Journal of Development Research*, 2018;8(10):23218–23224.

[29] Bakić V., Pezo M. V., Stojković L., Technical and economic analysis of grid-connected PV/Wind energy stations in the Republic of Serbia. *FME Transactions*, 2016;44:71–82.

[30] Ministry of electricity of Syria. Available on: <http://www.moe.gov.sy> (08.01.2019).

[31] Financial markets platform, investing.com [E-resource]. Available on: <https://www.investing.com/commodities/carbon-emissions> (04.12.2019).

Транслитерация по BSI



Offshore wind vessels' market has been constantly changing, facing new challenges and taking new opportunities. With the development of digital technology, an emphasis put on environment and sustainability, and requirements of designing bigger and better wind turbines, offshore vessels' operators and owners need to adjust themselves to the market and keep up with current trends and demands.

ACI's 6th edition of Operating Specialist Wind Vessels Summit will bring together senior executives and experts from ship owners, ship operators, wind turbines' manufacturers, naval architects, and technology companies, market analysts, among others, to discuss the latest innovations, challenges and developments within the offshore wind industry.

The two days event will give you an insight into the development of non-established markets, a demand on bigger wind turbines and requirement of bigger installation vessels, digitalization, environmental standards, crew maintenance and many more.

Key Topics 2019 Include

- Responding To Today's Challenges Within The Wind Vessels' Market: Focusing On The Global Overview Of New Trends And New Markets
- Evaluating The Contracting Principles Within The Wind Vessels' Market
- Focusing On Offshore Installation Vessels And Challenges Faced By The Wind Vessels' Operators
- Elaborating On Transfer Systems And Predictability Of Services
- Assessing The Future Requirements And Maintenance Of Wind Turbines
- Elaborating On The Crew Maintenance And Training In The View Of Wind Vessels' Demand
- Wind Vessels' Design In Cybersecurity And Digital Context
- Analysing The Environmental Standards Within The Wind Vessels' Operations
- Analysing Future Investments And Evaluating The Ways Of Financing The Offshore Vessels' Operations
- Deliberating On Renewable Projects And The Future Of Wind Vessels' Market

<https://www.wplgroup.com/aci/event/operating-wind-vessels-summit/>

