

УДК 621.311.24

DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-35-46

Перспективы оффшорной ветровой энергетики в Республике Союз Мьянма

Г.В. Дерюгина, Е.В. Игнатьев, Тет Мьят Тун, М.Г. Тягунов

В настоящее время актуальная проблема Мьянмы — дефицит электроэнергии, равный 10% от потребляемой электроэнергии в стране. Частично его можно снизить за счет строительства крупных сетевых ветроэлектрических станций (ВЭС).

На протяжении последних четырех лет в мире наблюдается общее сокращение темпов прироста установленной мощности ВЭС, но при этом определенные отрасли ветроэнергетики, прежде всего оффшорная, демонстрируют устойчивый рост. Одним из наиболее динамично растущих рынков в области оффшорной ветроэнергетики в последние годы является рынок стран Азии, в частности, Китая.

Приведен уточненный теоретический ветровой потенциал Мьянмы. Показано, что наибольшая ветровая активность наблюдается на западном и южном побережьях, составляющих около 8% территории страны.

Впервые оценен теоретический ветровой потенциал акватории Андаманского моря у западного побережья Мьянмы на высотах 10 и 100 м. Определены восемь перспективных площадок для строительства оффшорных ВЭС, выбрана расчетная модель эффективных ветроэлектрических установок (ВЭУ).

По разработанной авторами методике найден оптимальный состав комплекса из нескольких оффшорных ВЭС общей мощностью 47,6 МВт, расположенных в удалении друг от друга в районах Андаманского моря, имеющих существенную асинхронность поступления ветрового ресурса. Это позволяет увеличить выработку электроэнергии на 8% и повысить коэффициент использования установленной мощности ВЭС.

Ключевые слова: скорость и асинхронность ветра, теоретический ветропотенциал, оффшорные ветроэлектрические установка и станция, коэффициент использования установленной мощности, энергоэффективность.

Для цитирования: Дерюгина Г.В., Игнатьев Е.В., Тет Мьят Тун, Тягунов М.Г. Перспективы оффшорной ветровой энергетики в Республике Союз Мьянма // Вестник МЭИ. 2020. № 5. С. 35—46. DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-35-46.

Offshore Wind Energy Prospects in the Republic of the Union of Myanmar

G.V. Deryugina, E.V. Ignatiev, Htet Myat Tun, M.G. Tyagunov

Nowadays, one of pressing problems in Myanmar is shortage of electric energy, which makes approximately 10% of all electric energy consumed in the country. This shortage can be partially decreased by constructing large-capacity grid-connected wind farms.

The last four years have seen a general decline in the growth rates of commissioned wind farm capacities around the world; nonetheless, certain wind energy industry sectors, primarily offshore wind energy, demonstrate a steady growth. In recent years, the market of Asian countries, in particular, that of China, is one of the most rapidly growing offshore wind energy markets.

An updated theoretical wind energy potential of Myanmar is given. It is shown that the highest wind intensity is observed on the western and southern coasts of Myanmar, which make approximately 8% of the country's total area.

The theoretical wind energy potential of the Andaman Sea water area near the west coast of Myanmar at heights equal to 10 and 100 m has been evaluated for the first time; eight promising sites for constructing offshore wind farms have been determined, and a model for analyzing efficient wind farms has been selected.

A procedure has been developed, using which the optimal composition of a complex of several wind farms with the total capacity equal to 47.6 MW has been found. These wind farms are located at significant distances from each other in Andaman Sea areas, which are characterized by an essentially non-uniform distribution in time of wind intensities in them. Owing to this feature, it is possible to increase the energy generation by 8% and achieve a higher wind farm capacity utilization factor.

Key words: wind velocity, non-uniform wind intensity distribution in time, theoretical wind energy potential, offshore wind power unit and farm, capacity utilization factor, energy efficiency.

For citation: Deryugina G.V., Ignatiev E.V., Htet Myat Tun, Tyagunov M.G. Offshore Wind Energy Prospects in the Republic of the Union of Myanmar. Bulletin of MPEI. 2020;5:35—46. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2020-5-35-46.

Введение

В Республике Союз Мьянма наблюдается дефицит электроэнергии (10% от потребляемой), понижение которого возможно за счет строительства крупных сетевых ветроэлектрических станций (ВЭС).

Ветроэнергетика — одна из динамично развивающихся в мире отраслей энергетики. На начало 2019 г.

суммарная установленная мощность ветроэлектростанций (ВЭС) в мире составила 591 ГВт, увеличившись за предыдущий год на 51,3 МВт (9%). Суммарная введенная мощность ВЭС в 2018 г. сократилась на 4% по сравнению с 2017 г. [1]. На протяжении последних четырех лет (2015 — 2018 гг.) темпы прироста установленной мощности ВЭС падают (с 14,7% в

2015 г. до 8,6% в 2018 г.). Некоторые отрасли ветроэнергетики (оффшорная ветроэнергетика) демонстрируют устойчивый рост: за последние 4 года ежегодный прирост установленной мощности оффшорных ВЭС — около 20%. Большая часть вновь вводимых мощностей ВЭС наземного базирования относится к странам «Большой пятерки»: Китаю, США, Германии, Индии и Бразилии, на долю которых к началу 2019 г. пришлось около 70% вновь вводимой и 71% суммарной установленной мощностей ВЭС. Более 90% прироста установленной мощности оффшорных ВЭС относится к странам «Большой тройки»: Китаю, Великобритании и Германии. Лидером среди них за последние 2 года является Китай, сохраняющий темпы роста установленной мощности на уровне свыше 65% в год. Только в 2018 г. там было введено 1,7 ГВт установленной мощности оффшорных ВЭС из 4,4 ГВт в мире [1].

Главная проблема при проектировании крупных ВЭС классом мощности более 50 МВт, работающих в объединенных энергетических системах, — несоответствие графиков выдачи и потребления мощности. Из-за этой особенности возникает потребность в ограничении доли их участия в покрытии графика нагрузки, исходя из величины маневренного резерва энергетической системы. Однако существуют примеры регионов, в которых доля ВЭС в покрытии графика нагрузки значительно превышает указанную величину. В 2011 г. в четырех федеральных землях ФРГ ВЭС покрывали более 45% электрической нагрузки. Это стало возможным благодаря эффекту взаиморезервирования, проявляющемуся при работе в объединенной энергетической сети большого количества ВЭС, находящихся на достаточном удалении друг от друга, что позволяет им функционировать при различных ветровых режимах.

Постановка задачи

Цель настоящей работы — исследование эффективности использования ветроэнергетического комплекса, состоящего из нескольких оффшорных ВЭС, работающих в объединенной энергетической системе Мьянмы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести оценку оффшорных ветровых ресурсов прибрежной акватории западного побережья Мьянмы;
- выявить перспективные площадки под размещение оффшорных ВЭС в прибрежной акватории в соответствии с выбранными критериями;
- выбрать расчетную модель ВЭУ;
- определить оптимальную конфигурацию ветроэнергетического комплекса на основании интегрального критерия, учитывающего показатели энергетической эффективности его работы с учетом эффекта асинхронности ветра.

Информационные ресурсы

Выбор перспективных регионов с точки зрения использования энергии ветра значительно облегчается при наличии карт распределения ветровых ресурсов по территории страны, достоверность которых существенно зависит от выбранного информационного источника (или базы данных (БД)). На ранних стадиях проектирования ВЭС рекомендуется проводить ветроэнергетические расчеты (ВЭР) по данным нескольких БД, сравнивать и выбирать наиболее достоверные. Наиболее надежным источником информации считают данные от наземных метеостанций (МС).

Для оценки ветровых ресурсов на территории Мьянмы использованы данные с сайта «Расписание Погоды» [2], достоверность которых доказана в [3], и на базе которых разработана региональная геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии» Мьянмы [4]. На сайте представлены многолетние ряды наблюдений (с 1995 г. по н. вр.) климатических данных, в том числе скорости (на высоте 10 м) и направлений ветра, с интервалом представления от 30 минут до нескольких часов по 49 наземным МС Мьянмы.

В настоящее время наблюдения за климатическими характеристиками в морской акватории Мьянмы не проводятся, поэтому в качестве источников для оценки ветровых ресурсов морской акватории рассмотрены четыре БД: «EmdERA», «ERA5», «MERRA2», «BCW»), доступ к которым осуществляется через программу «WindPro» [5]. В указанных БД представлены многолетние ряды данных, ассимилированные с разным интервалом времени (от 1 до 6 ч) по спутниковым наблюдениям в фиксированных точках (точку выбрать нельзя) на разной высоте (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики баз данных по ветровым ресурсам

База данных	Период наблюдений, гг.	Количество измерений в сутки	Высота, м	Количество точек в акватории западного побережья
EmdERA	1950 — н/в	4	10, 25, 50, 75, 100, 150, 200	19
ERA5		24	10, 100	21
MERRA2	1975 — н/в	24	50	21
BCW		4	10, 25, 50, 75, 100, 150, 200	41

Сравнение среднесуточных энергетических характеристик ветра (скорости и удельной мощности) в восьми точках морской акватории западного побережья Мьянмы по однородным данным (1975 — 2018 гг.) на высоте 10 м из четырех БД не выявило значительных отклонений между сравниваемыми значениями (не превысило 5%, что соответствует допустимой погрешности округления данных). Таким образом, окончательно выбор БД в качестве основного информационного источника проводился по максимальной плотности покрытия точек в морской акватории западного побережья Мьянмы, в соответствии с чем была выбрана БД «BCW» (см. табл. 1).

Исходные данные из выбранных источников получены на высоте 10 м. Все ветроэнергетические расчеты должны проходить на высоте, равной высоте башни предполагаемых ВЭУ (для современных крупных установок — от 80 до 130 м, а иногда и больше). Моделирование (пересчет) среднесуточной скорости ветра на высоту h^2 для условий наземных МС Мьянмы и прибрежных (морских) территорий проводили по степенной зависимости вертикального профиля ветра:

$$V_0^{h_2} = V_0^{h_1} \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{m_0},$$

где $V_0^{h_1}$, $V_0^{h_2}$ — средние скорости ветра на площадках МС на высотах h_1 , h_2 от поверхности земли (или моря); m_0 — средний показатель степени ($m_0 = 0,2$ — для наземных МС, $m_0 = 0,14$ — для морских территорий) [6].

Среднесуточные энергетические характеристики ветра на высотах 10 и 100 м рассчитаны по формулам, приведенным в [7, 8], данным 49 наземных МС (сайт «Расписание Погоды») и в 41-й точке морской акватории (БД «BCW»).

Теоретический ветровой потенциал территории Мьянмы

Исследования ветроэнергетического потенциала Мьянмы проводили и в предыдущие годы [3, 9, 10]. Перспективными регионами использования энергии ветра наземными ВЭС считаются прибрежные районы в южной и западной частях страны. Большая часть территории (около 92%) относится к районам со слабым ветроэнергетическим потенциалом [3, 9, 10]. Это было еще раз доказано на основе выполненных расчетов по данным 43 МС с сайта «Расписание Погоды» (табл. 2).

Теоретический ветровой потенциал \mathcal{E}^r Мьянмы анализировали на 10 и 100 м за один год T по данным среднесуточного года:

$$\mathcal{E}^r = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i^r = \sum_{i=1}^n \frac{N_{\text{уд}i} F_i T}{20}, \quad (1)$$

где n — количество зон, на которые поделена территория Мьянмы; $N_{\text{уд}i}$ — среднесуточная удельная мощность ветрового потока в i -й зоне, кВт/м²; F_i — площадь i -й зоны (суммарная площадь всех зон (площадь территории Мьянмы) — 678500 км²); T — количество часов в году, $T = 8760$.

При делении территории страны на зоны учитывали сложный и разнообразный рельеф местности, что не позволило выполнить разбивку на зоны по сетке с шагом $1^0 \times 1^0$, как это принято в методике NASA [11], и в соответствии с которой проведено межевание территории в [3, 10]. Следует отметить, что в [10] исходные данные получены из швейцарской программы «Meteonorm» [12], основная функция которой — генерирование данных по солнечной радиации, а возможность получения данных по ветровым ресурсам представлена в качестве дополнительной опции, и разработчики программы не рекомендуют их использовать при проектировании ВЭС [7, 8, 12].

Уточненный теоретический потенциал ветровой энергии на территории Мьянмы на высоте 10 м от поверхности земли составляет 5607,45 ТВт·ч в год. Это в 1,1 раза превышает показатель (5230 ТВт·ч/год), полученный в [3], и более чем в 3 раза определенный в [10] (1820 ТВт·ч/год). Теоретический ветровой потенциал всей территории Мьянмы на высоте 100 м — 12452 ТВт·ч в год.

Мониторинг морских акваторий вдоль западного побережья Мьянмы

Оценку доступной территории для размещения оффшорных ВЭС в акватории Андаманского моря на западном побережье Мьянмы, протяженность береговой линии которого составляет около 2224 км, проводили для акваторий, удаленных от берега на расстоянии от 1,5 до 50 км и на глубине моря не более 50 метров. Для изучения глубин на предварительно намеченной территории выполняли мониторинг с использованием программы «GoogleEarthPro» [13]. Получены необходимые данные по рельефу дна и составлена ба-

Таблица 2

Диапазоны изменения среднесуточных характеристик ветра на территории Мьянмы по данным БД «Расписание Погоды»

Высота, м	V_0 , м/с		C_v		$N_{\text{уд}}$, Вт/м ²	
	min	max	min	max	min	max
10	0,8	2,7	0,21	1,19	0,37	27,48
100	1,2	4,3	0,21	1,19	1,48	109,40



Рис. 1. Доступная территория для размещения оффшорных ВЭС в Андаманском море

тиметрическая карта, совмещенная с топографической картой акватории Андаманского моря (рис. 1). На нее нанесена примерная граница в акватории (штрихпунктирная линия), указывающая на превышение глубины в 50 м, строительство оффшорных ВЭС за пределами которой по техническим и экономическим соображениям в настоящее время нецелесообразно. Подводные строительно-монтажные работы на больших глубинах чрезвычайно дороги и опасны. Рассчитанная доступная площадь для размещения оффшорных ВЭС — 80400,9 км² (темная штриховка на рис. 1). По итогам проведенного анализа не было выявлено экологических и других ограничений для размещения оффшорных ВЭС на доступной территории, например, на ней не ведется хозяйственная, военная или природоохранная деятельность.

По данным БД «BCW» в 41-й точке доступной территории под оффшорные ВЭС на высотах 10 и 100 м определены основные энергетические характеристики ветра (табл. 3), построены карты распределения среднесуточной скорости и удельной мощности ветра (рис. 2, 3), вычислен теоретический ветровой потенциал по (1).

Расчет теоретического ветрового потенциала доступной территории под оффшорные ВЭС проходил отдельно для акваторий, удаленных от берега на рас-

стоянии от 1,5 до 30 км, площадь которых составила около 58,999 тыс. км², и на расстоянии от 30 до 50 км, площадь которых около 21,401 тыс. км² (табл. 4).

Как следует из табл. 3 (рис. 3) интенсивность ветра на доступной для оффшорных ВЭС акватории меняется на высоте 100 м от 6,7/с до 8,6 м/с, а удельная мощность ветрового потока — от 425 до 744,5 Вт/м², то есть строительство оффшорных ВЭС целесообразно на всей акватории. Однако окончательный вывод об эффективности ВЭС можно сделать только после проведения технико-экономического обоснования.

Выбор площадок оффшорных ветроэлектростанций

Выбор доступной территории под размещение оффшорных ВЭС сделан с учетом глубин, не превышающих 50 м, и отсутствия экологических и прочих ограничений. Поэтому дальнейший выбор площадок базировался на критерии возможности технического присоединения проектируемой оффшорной ВЭС к энергосистеме.

На западном побережье страны расположено шесть подстанций (ПС) напряжением 230 кВ, загрузка центров питания которых не превышает 70%, а суммарная свободная установленная мощность оборудования — около 290 МВА (табл. 5). Изучение возможности технического присоединения оффшорных ВЭС к данным ПС выявил восемь перспективных площадок для размещения ВЭС, предполагаемая установленная мощность которой составляет 50 МВт (рис. 4). Информация по ПС и площадкам ВЭС дана в табл. 5, где r_1 , r_2 — средние расстояния от площадки ВЭС до берега и ближайшей ПС; $S_{св}$ — свободная мощность для технического присоединения оффшорных ВЭС.

По совокупности всех критериев (минимальные удаление от берега и расстояние до ПС, максимальная мощность для присоединения, незначительное изменение глубин) в качестве первоочередной была выбрана площадка № 2 (табл. 5), на которой возможно размещение ВЭС с последующим техническим присоединением к ПС Куак Пью, удаленной от площадки ВЭС приблизительно на 23 км. Доступная площадь под размещение ВЭС составляет около 20 км². Глубина моря меняется незначительно — в диапазоне от 25 до 30 м, что позволяет использовать однотипный фундамент для всех устанавливаемых ВЭУ.

Таблица 3

Диапазоны изменения среднесуточных характеристик ветра на доступной территории под оффшорные ВЭС по данным СБД «BCW»

Высота, м	V_0 , м/с			C_v		$N_{уд}$, Вт/м ²		
	min	max	среднее	min	max	min	max	среднее
10	4,8	6,8	5,6	0,37	0,63	161,91	283,06	230
100	6,7	8,6	7,8	0,37	0,63	425,86	744,53	600

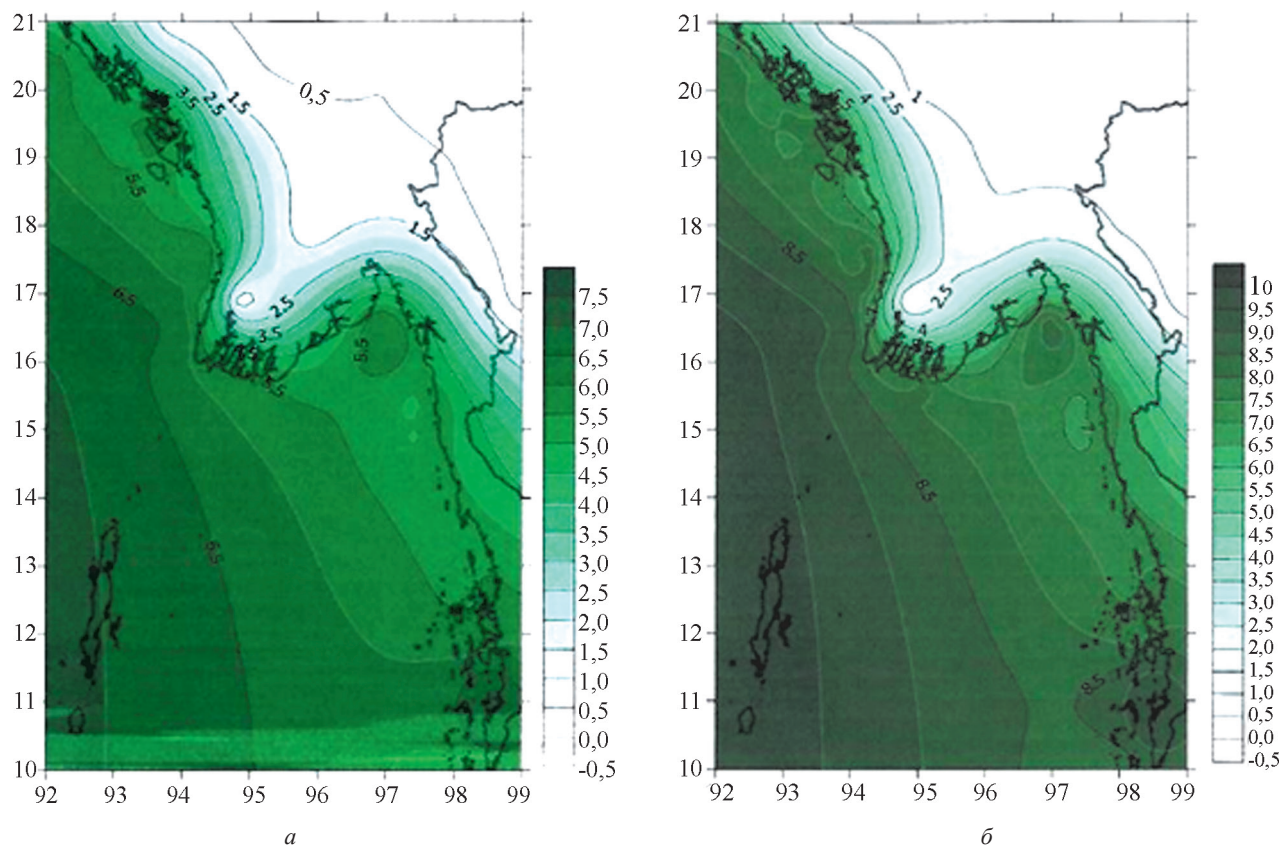


Рис. 2. Карта распределения среднегогодовой скорости ветра на доступной территории под оффшорные ВЭС на 10 (а) и 100 (б) м

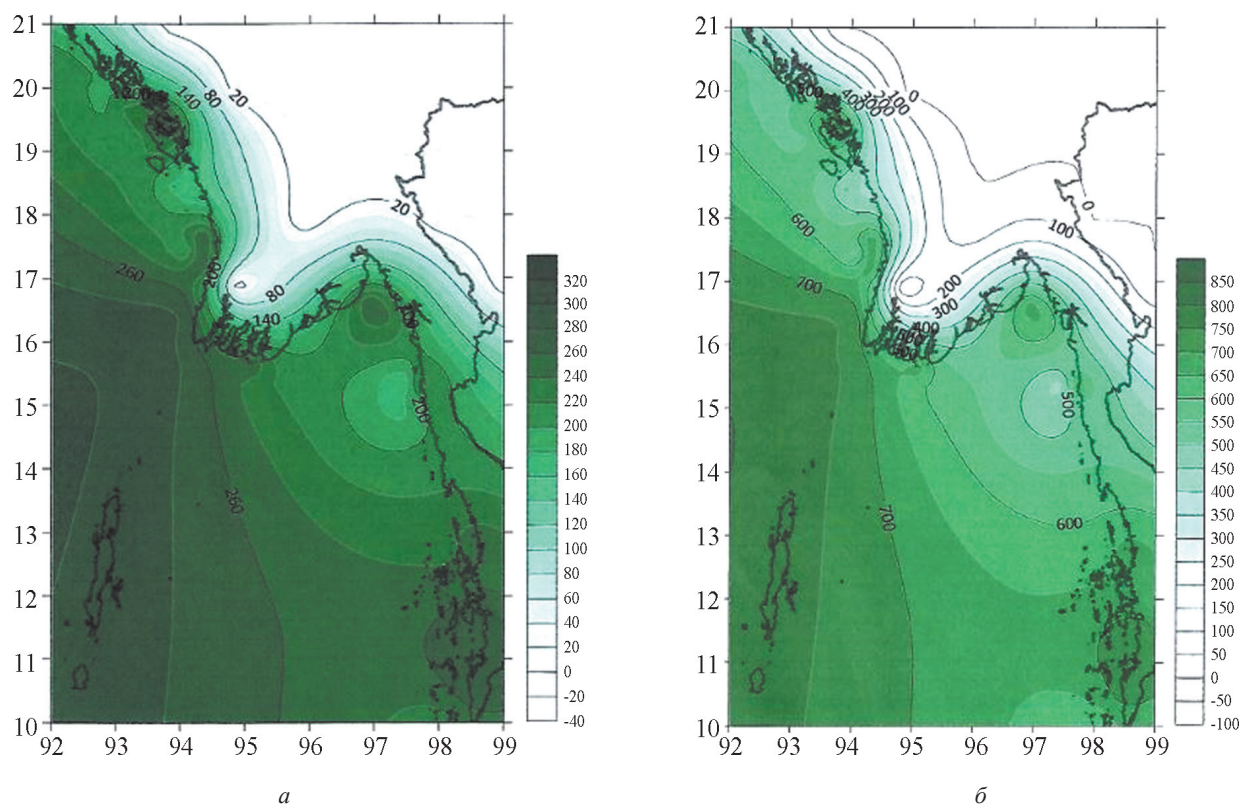


Рис. 3. Карта распределения среднегогодовой удельной мощности ветра на доступной территории под оффшорные ВЭС на 10 (а) и 100 (б) м

Таблица 4

Теоретический ветровой потенциал (в ТВт·ч в год) доступной территории под оффшорные ВЭС

Высота над уровнем моря, м	Удаление от берега L , км		
	1,5...30	30...50	1,5...50
10	5918,13	2146,68	8064,82
100	15566,28	5646,35	21212,63

Таблица 5

Данные по электрическим подстанциям и площадкам ВЭС

Номер площадки ВЭС	Наименование ПС	r_1 , км	Диапазон глубины, м	r_2 , км	Мощность ТР,		Загрузка ЦП, %	$S_{св}$, МВА
1	Пон Наа Куйн	17,5	8...17,1	49,3	1×100	100	70	30
2	Каук Пью	12,8	25,0...30,0	23,1	1×100 + 1×50	150	43	85
3	Таунг Гок	32,8	20,0...30,0	77,8	1×100	100	64	36
4	А Ток	5,0...9,0	6,0...43,0	74,0	1×100	100	55	45
5	П Тейн	11,0...16,0	17,0...36,0	116,0	2×50	100	65	35
6	П Тейн	20,0...30,0	13,0...27,0	165,0	2×50	100	65	35
7	Мо Ла Майн	16,0...20,0	9,0...12,0	52,0	3×50	150	60	60
8	Мо Ла Майн	26,0...30,0	22,0	130,0	3×50	150	60	60

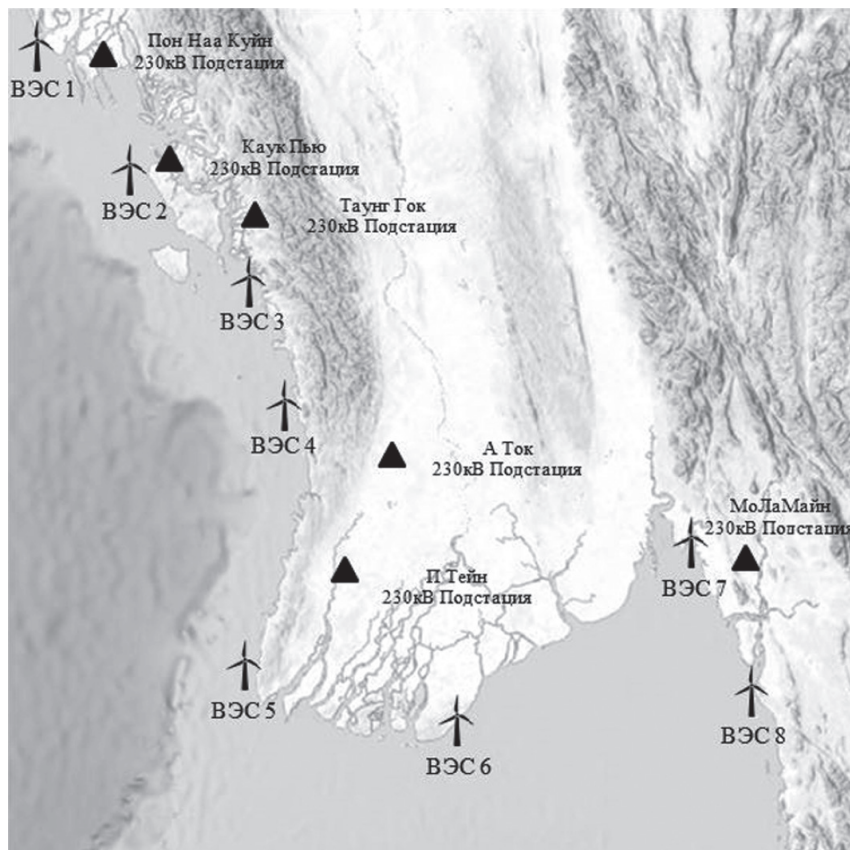


Рис. 4. Местоположение перспективных площадок под оффшорные ВЭС и подстанций на западном побережье Мьянмы

Выбор расчетной модели ветроэнергетической установки для акватории западного побережья Мьянмы

Выбор расчетной модели ВЭУ для размещения в составе оффшорной ВЭС основан на максимальном значении показателей энергоэффективности (годовой выработке электроэнергии ВЭУ $\mathcal{E}_{ВЭУ}$ и коэффициенте использования установленной мощности $k_{ВЭУ}^{исп}$) из предварительно выбранных 11 установок оффшорного исполнения. Все варианты установок подходят по единичной мощности, классу безопасности и климатическому исполнению согласно IEC61400-3 [6] (табл. 6) для условий 8 выбранных площадок. Для дальнейших исследований по критерию максимального значения коэффициента использования установленной мощности $k_{ВЭУ}^{исп}$ для условий морской акватории западного побережья Мьянмы в качестве расчетной выбрана модель Senvion 3.4M140 (Германия, мощность 3,4 МВт, $k_{ВЭУ}^{исп} = 0,42...0,48$ для условий 8 площадок).

Оценка показателей эффективности оффшорных ветроэлектростанций, расположенных в акватории Андаманского моря

В качестве показателей эффективности, характеризующих режим работы оффшорной ВЭС, рассмотрены $\mathcal{E}_{ВЭС}$ — выработка электрической энергии ВЭС за расчетный период, равный одному году, ГВт·ч; $N_{P=90\%}/N_{уст}$ — относительное значение мощности, генерируемой ВЭС с обеспеченностью, равной 90%, по ветровому ресурсу, за расчетный период, равный одному году.

Определение $N_{P=90\%}/N_{уст}$ проходит по эмпирической кривой обеспеченности по аналогии с расчетом обеспеченности отдачи по мощности при регулировании речного стока водохранилищем ГЭС [14]. Построение эмпирических кривых распределения вероятности или плотности вероятности в математической статистике

делают либо по дискретной, либо по интервальной выборкам данных. В ветроэнергетике чаще используется метод построения по интервальной выборке, а в гидрологии — по дискретной. Точность построения по интервальной выборке ниже, чем по дискретной, так как весь дискретный ряд наблюдений скорости ветра предварительно разбивается на 11 интервалов в соответствии с методикой ГГО им. А.И. Воейкова, в то время, как дискретная выборка содержит число данных, равное числу наблюдений.

Выработку электрической энергии оффшорной ВЭС вычислим без учета различных потерь и при допущении, что все ВЭУ работают в одинаковых ветровых условиях:

$$\mathcal{E}_{ВЭС} = Z_{ВЭУ} \mathcal{E}_{ВЭУ},$$

где $Z_{ВЭУ}$ — количество ВЭУ в составе ВЭС; $\mathcal{E}_{ВЭУ}$ — выработка электрической энергии единичной ВЭУ.

Найдены показатели эффективности ($\mathcal{E}_{ВЭС}$ и $N_{P=90\%}/N_{уст}$) оффшорной ВЭС мощностью 47,6 МВт в составе 14 ВЭУ модели Senvion 3.4M140 для восьми вариантов ее размещения на выбранных площадках (табл. 7, рис. 5).

Как следует из табл. 7 выработка электрической энергии оффшорной ВЭС при ее расположении на различных площадках составляет от 195,3 до 233,52 млн кВт·ч в год, и соответствующая им мощность, генерируемая ВЭС с обеспеченностью 90%, меняется от 4,43 до 8,57% от установленной мощности. Анализ полученных результатов показал, что по показателям эффективности первоочередная площадка №2 вблизи ПС Куак Пью наихудшая. Площадки, обладающие наибольшей величиной показателей эффективности, находятся на удалении от 74 до 165 км от ближайших к ним ПС, имеющих ограничения по присоединяемой мощности от 35 до 45 МВА (см. табл. 5).

Таблица 6

Показатели энергоэффективности вариантов ВЭУ в условиях площадки № 2

Номер варианта	Страна-производитель	Модель	Мощность, МВт	Класс	$\mathcal{E}_{ВЭУ}$, млн кВт·ч	$k_{ВЭУ}^{исп}$
1	Германия	Aerodyn Scd 8/168	8000	Ia	23,65	0,34
2	Дания	Bonusb82/2300	2300	IIs	6,530	0,32
3	Германия	Multibrid M5000	5000	Ib	13,89	0,32
4	Дания	Vestas V112	3000	IIb	10,69	0,41
5	Дания	Vestas V164-8.0	8000	IIb	24,72	0,35
6	Дания	Siemens SWT-3.6-130	3600	IIb	13,40	0,42
7	Дания	Siemens SWT-3.6-120	3600	IIb	12,27	0,39
8	Германия	Senvion 3.4M140	3400	IIIb	14,37	0,48
9	Германия	Senvion 3.2M122	3200	IIIb	11,43	0,41
10	Германия	Aerodyn Scd 5/139	5000	IIb	17,11	0,39
11	Германия	Aerodyn Scd 5/130	5000	IIb	15,40	0,35

Показатели эффективности оффшорной ВЭС

Номер площадки ВЭС	$N_{p=90\%}/N_{уст}, \%$	$\mathcal{E}_{ВЭУ}$, млн кВт·ч	$k_{\text{авт}}, \text{о. е.}$	$\mathcal{E}_{ВЭС}$, млн кВт·ч
1	4,49	14,71	0,48	205,94
2	4,43	14,37	0,48	201,18
3	5,71	14,49	0,49	202,86
4	8,05	45,59	0,52	218,26
5	8,57	16,68	0,56	233,52
6	6,12	15,60	0,52	218,40
7	4,83	15,34	0,52	214,76
8	4,76	13,95	0,47	195,30

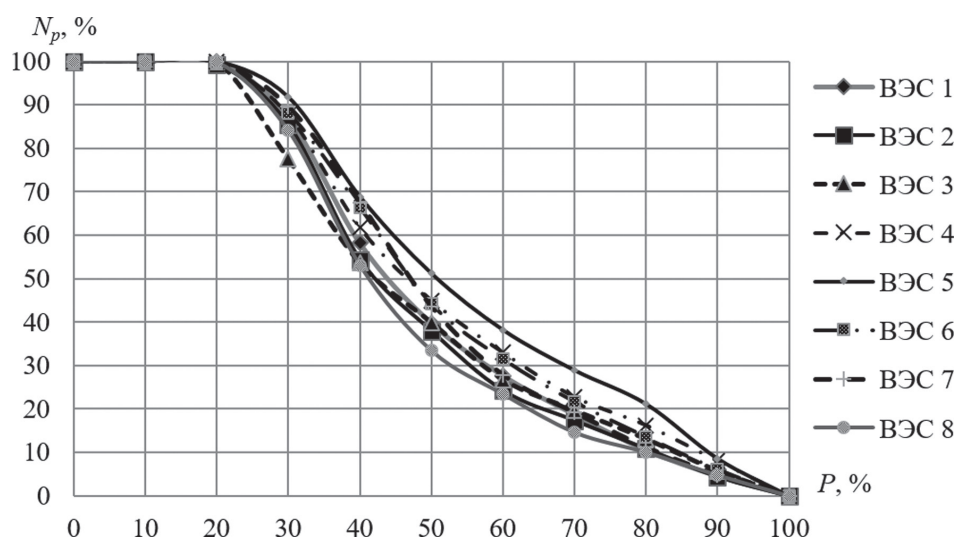


Рис. 5. Эмпирические кривые обеспеченности значений мощности, генерируемой оффшорными ВЭС, расположенными на перспективных площадках размещения

Оценка характеристик режима работы комплекса оффшорных ВЭС, расположенных в акватории Андаманского моря

Рассмотрим повышение энергетической эффективности для ветроэнергетического комплекса мощностью 47,5 МВт при условии расположения ВЭУ на площадке № 2 и площадках № 5 и 6 с наибольшими показателями эффективности. Данное повышение возможно благодаря использованию асинхронности ветрового режима на различных площадках ВЭС. Наличие асинхронности поступления ветрового ресурса позитивно влияет на показатели качества электроэнергии и управление энергетическими системами, в которых работают изучаемые ВЭС. Точное значение сокращения неравномерности выработки электрической мощности от распределения связанных между собой ВЭС в акватории зависит от ветровых условий, а также величины акватории, на которой размещены анализируемые ВЭС, имеющие между собой энергетические, информационные и инфраструктурные связи [15]. Рисунок 6 иллюстрирует эффект асинхронности

поступления ветрового ресурса, который может быть использован при размещении оффшорных ВЭС на площадках № 2 и 5, расположенных на значительном расстоянии друг от друга.

Методика определения оптимального состава комплекса ВЭС разработана авторами и изложена в [16]. Эффективность применения асинхронности поступления ветрового ресурса к площадкам ВЭС в свою очередь зависит от мощности оффшорных ВЭС $N_{ВЭСi}$ и числа ВЭУ $n_{ВЭУ}^{ВЭСi}$ в каждой из ВЭС, работающих на асинхронных ветровых потоках. Для поиска оптимального состава комплекса ВЭС взят интегральный критерий, учитывающий, как эффективность использования асинхронности поступления ветрового ресурса в рамках комплекса, так и условие энергетической эффективности. Он основан на ранжировании факторов, характеризующих режим совместной работы ВЭС в рамках комплекса при различных вариантах его состава. Вариант состава комплекса, при котором достигается наименьший средний ранг по сумме рассматриваемых критериев, является оптимальным:

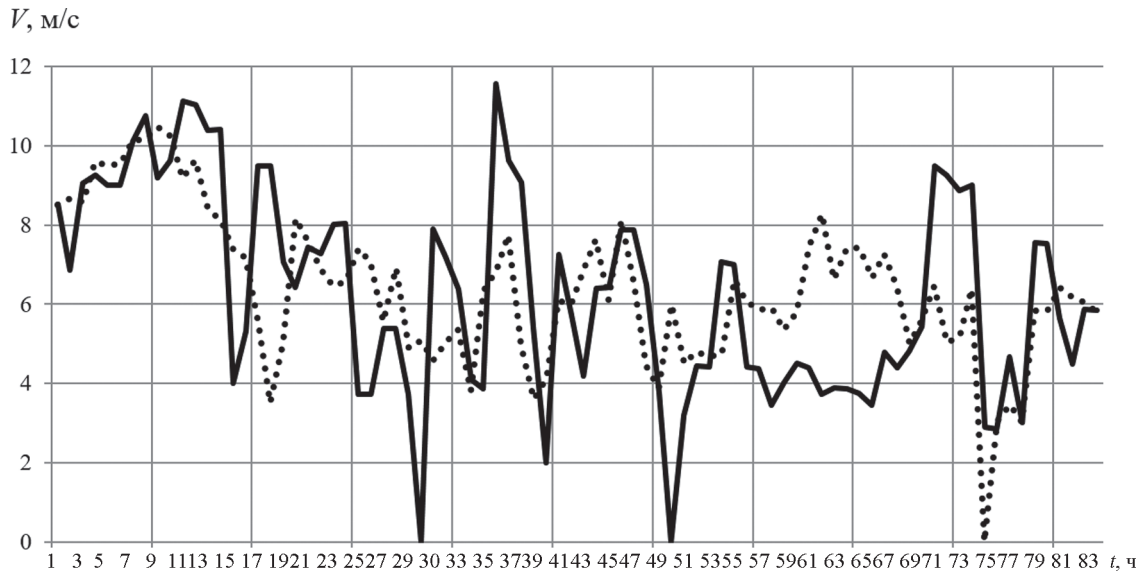


Рис. 6. Графики изменения скорости ветра на высоте 100 м на площадках № 2 (—) и 5 (•••)

$$R_{opt} = \min \{ R_{COMP_i}^{cp} \};$$

$$R_{COMP_i}^{cp} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_j,$$

где R_{opt} — оптимальный ранг варианта состава комплекса по рассматриваемым критериям, имеющий наименьшее значение; $R_{COMP_i}^{cp}$ — среднее значение ранга i -го варианта состава комплекса по n критериям; R_j — ранг i -го варианта состава комплекса по j -му критерию; n — число рассматриваемых критериев.

Первый критерий — максимум значения величины производства электроэнергии комплексом ВЭС за рассматриваемый период. Вторым критерием является максимум относительного значения мощности, генерируемой комплексом ВЭС с обеспеченностью, равной 90%, по ветровому ресурсу за расчетный период. При совпадении значений $R_{COMP_i}^{cp}$ считаем, что:

— наиболее значимым критерием является второй, для которого задается весовой коэффициент $k = \{1,5\}$;

— первый критерий менее значим, соответственно его вес сохраняется $k = \{1\}$.

Состав комплекса определяется путем вариации числа ВЭУ, устанавливаемых на каждой из ВЭС комплекса. При этом суммарное количество ВЭУ постоянно.

В качестве головной площадки комплекса оффшорных ВЭС взята ранее выбранная площадка № 2 вблизи ПС Куак Пью. Оптимизация такая же, как и при размещении ВЭУ на площадках № 2, 5, 6. При этом максимальное количество ВЭУ на площадках № 5, 6 принято равным семи в соответствии с нагрузкой ближайших к ним ПС (см. табл. 5). В таблице 8 даны показатели эффективности трех наиболее предпочтительных вариантов состава комплекса ВЭС и четвертого варианта, подразумевающего концентрацию всех ВЭУ на одной площадке. Результаты определения среднего ранга по интегральному критерию оптимального варианта состава комплекса представлены в табл. 9.

Таблица 8

Показатели эффективности различных вариантов состава комплекса оффшорных ВЭС

Номер варианта комплекса ВЭС	Номер площадки ВЭС	Количество ВЭУ	Выработка ВЭС, млн кВт·ч	Выработка комплекса ВЭС, млн кВт·ч	$N_{p=90\%}/N_{вет}, \%$
1	2	7	100,59	217,35	6,50
	5	7	116,76		
2	2	4	57,48	219,96	6,37
	5	6	100,08		
	6	4	62,40		
3	2	7	100,59	209,79	5,27
	6	7	109,20		
4	2	14	201,18	201,18	4,43

Результаты определения среднего ранга по интегральному критерию

Номер варианта комплекса ВЭС	R_1	R_2	R_2 с учетом весового коэффициента	$R_{\text{СМР}}^{\text{СП}}$
1	2	1	1,5	1,75
2	1	2	3,0	2,00
3	3	3	4,5	3,75
4	4	4	6,0	5,00

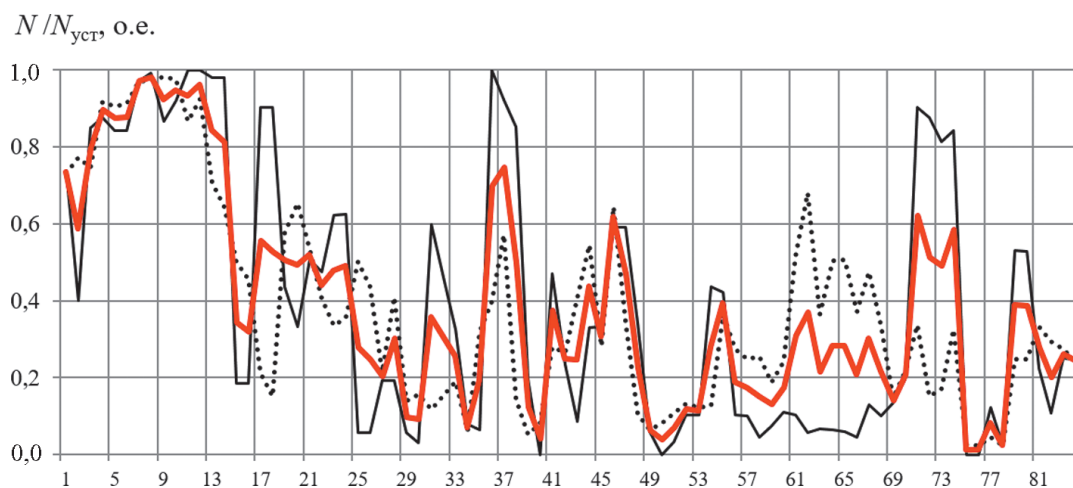


Рис. 7. Графики изменения средней мощности трех вариантов состава оффшорной ВЭС в долях относительно установленной мощности:

— № 2; ••• № 5; — № 2 + № 5

Как следует из табл. 9 с учетом весового коэффициента, наименьший ранг имеет первый вариант состава комплекса ВЭС, при котором наблюдается наибольшее значение относительного значения мощности, генерируемой комплексом ВЭС с обеспеченностью, равной 90%, по ветровому ресурсу за расчетный период. В данном варианте выполняется установка 14 ВЭУ на площадках № 2 и 5. На рисунке 7 изображено использование эффекта асинхронности ветрового режима при равном размещении 14 ВЭУ на площадках № 2 и 5 по сравнению с вариантами их расположения только на одной площадке № 2 или № 5.

Подобный вариант состава комплекса оффшорных ВЭС позволяет увеличить выработку электроэнергии на 8% и относительное значение мощности, генерируемой комплексом ВЭС с обеспеченностью, равной 90%, по ветровому ресурсу, за расчетный период с 4,43 до 6,50% по сравнению с четвертым вариантом, рассматривающим концентрацию всех ВЭУ на площадке головной оффшорной ВЭС.

Выводы

Уточнен теоретический (валовый) потенциал ветровой энергии Мьянмы, равный 5607,45 ТВт·ч в год на высоте 10 метров от поверхности земли и 12452 ТВт·ч в год на высоте 100 метров. Выявлены наиболее перспективные районы для строительства сетевых береговых ВЭС, суммарная площадь которых около 8% от всей территории страны.

Оценены доступная акватория для размещения оффшорных ВЭС на западном побережье Мьянмы (80,4 тыс. км²), и ее теоретический ветровой потенциал на высоте 10 метров (8064,82 ТВт·ч в год) и 100 метров (21212,63 ТВт·ч в год). Проведенный расчет энергетических характеристик ветра в 41-й точке выделенной акватории показал целесообразность строительства ВЭС в любой ее части.

На доступной для оффшорных ВЭС акватории определены восемь перспективных площадок для ВЭС мощностью от 30 до 80 МВА, из которых по лучшим условиям технического присоединения выбрана первоочередная.

Выбрана расчетная модель ВЭУ — Senvion 3.4M140 (Германия, мощность 3,4 МВт, $k_{\text{ВЭУ}}^{\text{исп}} = 0,42...0,48$ для ветровых условий восьми площадок). Сделан расчет годовой выработки оффшорной ВЭС мощностью 47,5 МВт в составе 14 установок выбранной модели при ее размещении на намеченных восьми площадках. Выявлено, что показатели эффективности оффшорной ВЭС, установленной на ранее выбранной первоочередной площадке, наихудшие.

По разработанной авторами методике выявлен оптимальный состав комплекса из двух ВЭС, установленных на двух площадках с асинхронным поступлением ветра, который позволит увеличить выработку электроэнергии данными станциями на 8% и повысить коэффициент использования установленной мощности комплекса ВЭС.

Литература

References

1. **Global Wind Report 2019** [Электрон ресурс] www.gwec.net/global-wind-report-2019/ (дата обращения 05.10.2019).
2. **Метеорологический сайт «Расписание Погоды»** [Официальный сайт] www.rp5.ru/ (дата обращения 05.10.2019).
3. **Дерюгина Г.В., Тягунов М.Г., Зай Яр Лин.** Верификация данных для использования в региональной геоинформационной системе «Возобновляемые источники энергии» // Энергетик. 2017. № 5. С. 36—40.
4. **Tyagunov M., Zay Yar Lin.** Creating Regional Geographic Information System to Determining Optimal Placement of Power Generation Based on Renewable Energy Resources // Proc. 16th Intern. Multidisciplinary Sci. Geo. Conf. Albena, 2016. No. 4. Pp. 245—253.
5. **Wind Pro Meteo Data Export** [Официальный сайт] www.emd.dk/windpro/windpro-modules/energy-modules/meteo/ (дата обращения 02.10.2019).
6. **IEC 61400-3-1:2019.** Wind Energy Generation Systems. Pt. 3—1. Design Requirements for Fixed Offshore Wind Turbines.
7. **Васьков А.Г., Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В.** Ветроэнергетика. М.: Изд-во МЭИ, 2016.
8. **Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В., Шестопалова Т.А.** Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета. М.: Изд-во МЭИ, 2012.
9. **Saw Si Thu Hlaing.** Wind Power Resources, Potential and Recent Initiatives in Myanmar [Электрон. ресурс] www.oilseedcrops.org/wp-content/uploads/2013/06/Ministry-of-Electric-Power-Myanmar-Wind-Power-Resources-Survey-2012-.pdf (дата обращения 02.10.2019).
10. **Зай Я Минт, Виссарионов В.И.** Исследование энергетических характеристик региональной ветровой энергетики в республике союза Мьянмы: автореферат ... дис. канд. техн. наук. М.: Изд-во МЭИ, 2013.
11. **Метеорологический сайт «NASA»** [Официальный сайт] www.power.larc.nasa.gov (дата обращения 07.10.2019).
12. **Meteonorm Software** [Официальный сайт] www.meteonorm.com/en/product/meteonorm-software (дата обращения: 07.10.2019).
13. **Google Earth Pro** [Официальный сайт] www.google.com/earth/versions/ (дата обращения 05.11.2019).
14. **Гидроэнергетика** / под ред. В.И. Обрезкова. М.: Энергоиздат, 1981.
15. **Söderand L., Ackermann T.** Wind Power in Power Systems: an Introduction. Chichester: John Wiley&Sons, 2005.
16. **Ignatev E.** Energy Efficiency Increasing Assessment of the Wind Energy Complex in the United Power System. М.: Moscow Power Engineering Institute, 2019.
1. **Global Wind Report 2019** [Elektron Resurs] www.gwec.net/global-wind-report-2019/ (Data Obrashcheniya 05.10.2019).
2. **Meteorologicheskiy Sayt «Raspisanie Pogody»** [Ofits. Sayt] www.rp5.ru/ (Data Obrashcheniya 05.10.2019). (in Russian).
3. **Deryugina G.V., Tyagunov M.G., Zay Yar Lin.** Verifikatsiya Dannykh dlya Ispol'zovaniya v Regional'noy Geoinformatsionnoy Sisteme «Vozobnovlyaemye Istochniki Energii». Energetik. 2017;5:36—40. (in Russian).
4. **Tyagunov M., Zay Yar Lin.** Creating Regional Geographic Information System to Determining Optimal Placement of Power Generation Based on Renewable Energy Resources. Proc. 16th Intern. Multidisciplinary Sci. Geo. Conf. Albena, 2016;4:245—253.
5. **Wind Pro Meteo Data Export** [Ofits. Sayt] www.emd.dk/windpro/windpro-modules/energy-modules/meteo/ (Data Obrashcheniya 02.10.2019).
6. **IEC 61400-3-1:2019.** Wind Energy Generation Systems. Pt. 3—1. Design Requirements for Fixed Offshore Wind Turbines.
7. **Vas'kov A.G., Deryugina G.V., Malinin N.K., Pugachev R.V.** Vetroenergetika. M.: Izd-vo MEI, 2016. (in Russian).
8. **Deryugina G.V., Malinin N.K., Pugachev R.V., Shestopalova T.A.** Osnovnye Kharakteristiki Vetra. Resursy Vetra i Metody Ikh Rascheta. M.: Izd-vo MEI, 2012. (in Russian).
9. **Saw Si Thu Hlaing.** Wind Power Resources, Potential and Recent Initiatives in Myanmar [Elektron. Resurs] www.oilseedcrops.org/wp-content/uploads/2013/06/Ministry-of-Electric-Power-Myanmar-Wind-Power-Resources-Survey-2012-.pdf (Data Obrashcheniya 02.10.2019).
10. **Zay Ya Mint, Vissarionov V.I.** Issledovanie Energeticheskikh Kharakteristik Regional'noy Vetrovoy Energetiki v Respublike Soyuza M'yanmy: Avtoreferat ... Dis. Kand. Tekhn. Nauk. M.: Izd-vo MEI, 2013. (in Russian).
11. **Meteorologicheskiy Sayt «NASA»** [Ofits. Sayt] www.power.larc.nasa.gov (Data Obrashcheniya 07.10.2019). (in Russian).
12. **Meteonorm Software** [Ofits. Sayt] www.meteonorm.com/en/product/meteonorm-software (Data Obrashcheniya: 07.10.2019).
13. **Google Earth Pro** [Ofits. Sayt] www.google.com/earth/versions/ (Data Obrashcheniya 05.11.2019).
14. **Gidroenergetika** / pod red. V.I. Obrezkova. M.: Energoizdat, 1981. (in Russian).
15. **Söderand L., Ackermann T.** Wind Power in Power Systems: an Introduction. Chichester: John Wiley&Sons, 2005.
16. **Ignatev E.** Energy Efficiency Increasing Assessment of the Wind Energy Complex in the United Power System. M.: Moscow Power Engineering Institute, 2019.

Сведения об авторах:

Дерюгина Галина Владимировна — старший преподаватель кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: derugina63@mail.ru

Игнатъев Евгений Витальевич — кандидат технических наук, ассистент кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: jeniya_ig@mail.ru

Тет Мьят Тун — магистрант кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: htetmyat69646@gmail.com

Тягунов Михаил Георгиевич — доктор технических наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», академик Академии электротехнических наук РФ, e-mail: mtyagunov@mail.ru

Information about authors:

Deryugina Galina V. — Senior Lecturer of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: derugina63@mail.ru

Ignatiev Evgeniy V. — Ph.D. (Techn.), Assistant of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: jeniya_ig@mail.ru

Htet Myat Tun — Master Student of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: htetmyat69646@gmail.com

Tyagunov Mikhail G. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Hydro Power Engineering and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, Academician of the Russian Academy of Electrical Sciences, e-mail: mtyagunov@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 29.11.2019

The article received to the editor: 29.11.2019