

УДК 621.311.24

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ,
ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЕКТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОДИЗЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Г.В. Дерюгина, Н.Д. Карпов, Т.А. Шестопалова, В.А. Юриков

Проведен анализ влияния различных факторов и математических моделей на показатели энергетической эффективности ВЭС, работающих в составе ветродизельного комплекса (ВДЭС).

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка; энергоэффективность; ветроэлектрическая станция.

**THE STUDY OF FACTORS AND MATHEMATICAL MODELS THAT AFFECT THE DESIGN
INDICATORS OF ENERGY PERFORMANCE OF WIND / DIESEL COMPLEXES**

G.V. Deriugina, N.D. Karpov, T.A. Shestopalova, V.A. Yurikov

The paper deals with the analysis of the influence of different factors and mathematical models on energy WEC efficiency, working with wind / diesel systems (wind-diesel power stations).

Key words: wind power generators; energy efficiency; wind power stations.

Интеграция ВЭС в состав существующих энергокомплексов (ЭК) на базе дизельных электростанций (ДЭС) позволит снизить топливную составляющую в себестоимости вырабатываемой электроэнергии, что существенно повысит технико-экономическую эффективность энергетического производства и социальный уровень жизни местного населения, а также будет способствовать улучшению экологической ситуации в регионе за счет снижения выбросов от работы ДЭС.

В настоящее время нет единой методики проектирования и эксплуатации ветродизельных комплексов (ВДЭС) и оценки технико-экономической эффективности их использования. Также следует отметить, что на ранних стадиях проектирования используются различные допущения и математические модели для моделирования ветровых ресурсов. Ошибки проектирования могут быть выявлены только на стадии эксплуатации. Исследования влияния различных факторов и математических моделей на показатели энергетической эффективности ВДЭС проводятся на примере действующей ВДЭС в поселке Усть-Камчатск (Камчатский край) и проектируемой ВДЭС о. Попова (Владивостокский городской округ).

Исследование влияния модели вертикального профиля ветра на показатели энергоэффективнос-

ти проектируемой ВЭС. Вопросы оптимизации структуры и параметров ЭК требуют рационального выбора моделей и количества ветроэлектрических установок (ВЭУ), что зависит от достоверности данных о скорости ветра на высоте оси ветроколеса (ВК). Эти данные могут быть получены в результате ветромониторинга после принятия решения о строительстве ВЭС. На предпроектных (ранних) стадиях, как правило, данные ветромониторинга отсутствуют. Для поднятия скорости ветра на высоту используют широко известные модели вертикального профиля ветра (степенной и логарифмической). В работе в качестве модели рассматривается степенной закон вертикального профиля ветра, описываемый зависимостью:

$$\frac{v^{h_2}}{v^{h_1}} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^m, \quad (1)$$

где v^{h_2} и v^{h_1} – скорость ветра на высоте h_1 и h_2 соответственно; m – показатель степени (или показатель Хеллмана), зависящий от скорости ветра, рельефа местности, стратификации атмосферы и т. д. [1].

Исследование влияния модели вертикального профиля ветра на показатели энергоэффективности (годовая выработка электроэнергии и коэффициент использования установленной мощности) одиночной ВЭУ и ВЭС в целом проводили в виде оценки влияния точности определения среднемо-

Таблица 1 – Годовые выработки единичной ВЭУ марки NPS и ВЭС в целом по смоделированным рядам скорости ветра с использованием различных моделей определения коэффициента Хеллмана

Источник модели коэффициента Хеллмана	Годовая выработка одной ВЭУ марки NPS		Коэффициент Хеллмана		Годовая выработка ВЭС в целом (с учетом графика нагрузки ЭК)	
	$\mathcal{E}_{\text{год}}, \text{ кВт}$	$\delta\mathcal{E}_{\text{год}}, \%$	$m_{\text{ор}}, \text{ о.е.}$	$\delta m_{\text{ор}}, \%$	$\mathcal{E}_{\text{год}}, \text{ МВт}$	$\delta\mathcal{E}_{\text{год}}, \%$
Фактические, по данным ВИК	198695,5	-	0,222	-	1182,3	-
АМС Владивосток	320787,8	61,5	0,449	102,5	1829,1	54,7
АМС Терней	177594,7	-10,6	0,226	1,9	1200,0	1,5
АМС Иман	233579	17,6	0,318	44	1464,9	23,9
Группа из трех АМС (Владивосток, Терней, Иман)	198929,7	0,1	0,264	19,3	1308,9	10,7
АМС с $m = 0,1$	116903,8	-41,2	0,1	-54,9	871,6	-26,3

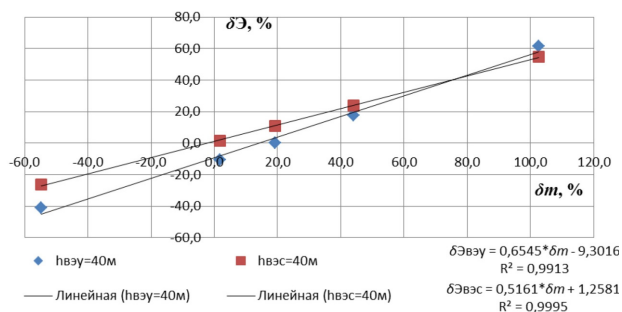


Рисунок 1 – Зависимость относительной погрешности определения выработки ВЭУ и ВЭС от погрешности модели определения коэффициента Хеллмана

голетнего коэффициента Хеллмана на среднеголетнюю выработку ВЭУ марки NPS в условиях площадки ВЭС о. Попова [2]. При определении годовой выработки электроэнергии ВЭС с учетом параллельной работы с ДЭС учитывали ограничения на режимы работы ВЭС и ДЭС, накладываемые графиком нагрузки энергосистемы. Сравнение проводили в виде относительных отклонений от фактической выработки ВЭУ пяти значений годовой выработки ВЭУ, определенных по различным моделям вертикального профиля ветра ближайших аэрологических станций (АМС) из СБД “Вертикальный профиль ветра” для среднеголетних значений m : а) $m = 0,1$ б) $m = 0,225$ в) $m = 0,264$, г) $m = 0,319$, д) $m = 0,448$ [3]. Фактическая выработка определялась по данным ветроизмерительного комплекса (ВИК) о. Попова на высоте 40 м (таблица 1). В соответствии с данными ВИК на высотах 40 и 50 м по зависимости (1) был определен среднеголетний коэффициент Хеллмана $m = 0,222$.

Было выявлено, что завышение (занижение) среднеголетнего коэффициента Хеллмана от-

носительно фактического приводит к прямо пропорциональному завышению (занижению) годовой выработки ВЭУ и всей ВЭС в целом. Также были получены эмпирические зависимости относительной ошибки определения годовой выработки (относительного отклонения годовой выработки от фактической) от относительной ошибки определения коэффициента Хеллмана для одиночной ВЭУ и ВЭС в целом, с коэффициентами корреляции, равными 0,99 для обоих вариантов (рисунок 1).

Анализ результатов выявил зависимость определения годовых показателей энергоэффективности ВЭУ от выбранной модели вертикального профиля ветра и метода определения ее параметров (до 60 % в рассматриваемом примере).

Исследование влияния модели аэродинамических потерь на показатели энергоэффективности ВЭС производили в программном комплексе WindPro, где в качестве модели аэродинамических потерь использовали модель N.O. Jensen Park Model, которая является упрощенной моделью течения в следе [4].

Было рассмотрено два варианта расстановки ВЭУ марки NPS в количестве 9 штук на выбранной площадке с учетом рельефа местности, розы ветров и свободной площади под размещение ВЭС [2]. На рисунке 2 представлен оптимальный вариант расстановки ВЭУ, а также карта скоростей ветра на высоте башни ВЭУ. Второй возможный вариант расстановки ВЭУ (в два ряда) на площадке ВЭС представлен на рисунке 3. При данном варианте расстановки (в сравнении с оптимальной) требуется меньшая площадь размещения, что в свою очередь снижает затраты на строительство-монтажные работы. Однако в этом случае потери на затенение ВЭС, рассчитанные по модели N.O. Jensen, увеличиваются на 2,9 %, что приводит к более

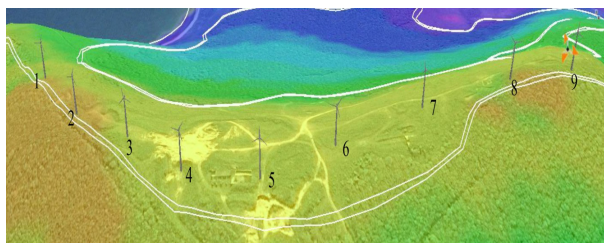


Рисунок 2 – Оптимальная расстановка 9 ВЭУ модели NPS

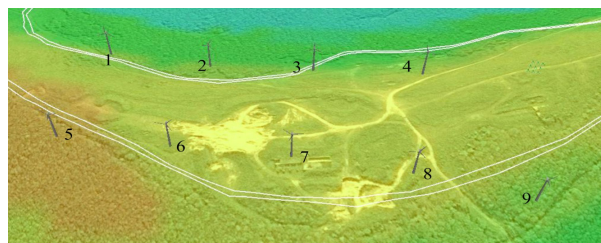


Рисунок 3 – Расстановка 9 ВЭУ марки NPS в два ряда

существенному снижению выработки ВЭС на 6,7 % в сравнении с вариантом ВЭС при оптимальной схеме расстановки, поскольку некоторые ВЭУ располагаются в точках с меньшей интенсивностью ветра. Расчет и сравнение моделирования проводили в программе WindPro (таблица 2).

На основе проведенных исследований для рассматриваемого объекта было выявлено существенное влияние аэродинамических потерь на затенение ВЭУ в составе ВЭС, на которые также накладываются потери, связанные с выбором площадок размещения ВЭУ с меньшей интенсивностью ветра. Установлено, степень влияния дополнительных потерь, связанных с точками размещения отдельных ВЭУ существенно зависит от рельефа местности и может быть оценена конкретно для каждого проекта.

Таблица 2 – Показатели энергетической эффективности при различных схемах компоновки ВЭС (9 ВЭУ модели NPS)

Схема компоновки ВЭС	Выработка ВЭС, МВт·ч/год	Потери ВЭС на затенение, %	$K_{\text{иум}}$, %
Оптимальная	1839,6	1	21
Неоптим. (в 2 ряда)	1715,7	3,9	19,6
$\Delta(\text{Опт-неопт})$, %	6,7	-	6,7

Исследование влияния учета фактического расхода топлива на показатели энергоэффективности ВДЭС. При технико-экономическом обосновании внедряемых ВЭУ в ЭК оценка экономии топлива на ДЭС, как правило, проводится при неизменном удельном расходе топлива $b_{\text{уд}}$, соответствующем номинальной мощности ДЭС, и указанном в паспортных данных производителя. Тем не менее, в зависимости от распределения нагрузки между ДЭС и ВЭС возможен значительный процент времени работы ДЭС в зоне менее 50 %

от номинальной мощности, что приводит к существенному увеличению расхода топлива на ДЭС.

Используя фактические данные по вырабатываемой энергии ДЭС о. Попова и расходу топлива на ней за каждые 8 часов, было выявлено, что большую часть времени года (а именно 55 %) ДЭС работает в режиме с повышенным расходом топлива. Была получена аппроксимирующая зависимость удельного расхода топлива от рабочей мощности ДЭС (рисунок 4):

$$b_{\text{уд}} = 864,82 (N_{\text{ДЭС}})^{-0,208}, \quad (2)$$

где $b_{\text{уд}}$ – удельный расход дизельного топлива на ДЭС, г/кВт·ч, $N_{\text{ДЭС}}$ – рабочая мощность ДЭС, кВт.

Годовой расход топлива, рассчитанный по формуле (2) на 0,6 % отличается от фактического, что позволяет верифицировать данную формулу и использовать в дальнейших расчетах по анализу влияния учета фактического расхода топлива на энергетическую эффективность внедряемой ВЭС.

Исследование влияния учета аппроксимирующей зависимости $b_{\text{уд}}(N_{\text{ДЭС}})$ на годовой расход топлива на ДЭС проводили в соответствии с уравнением баланса мощности локальной энергосистемы, состоящей из ВЭС, ДЭС и потребителя электроэнергии [2]. На основе проведенных расчетов в таблице 3 представлены: годовой расход топлива на ДЭС ($V_{\text{ДЭС}}$, т/год), экономия топлива на ДЭС при внедрении ВЭС (ΔV , т/год) при условии постоянного удельного расхода (223,2 г/кВтч) и расхода, определяемого по зависимости (2).

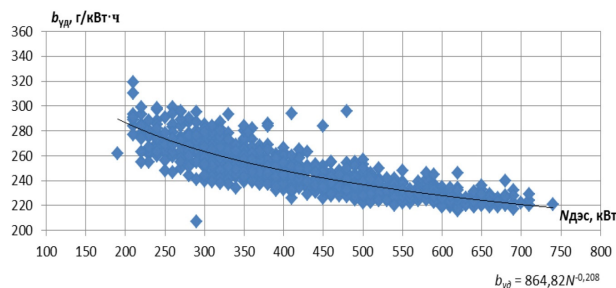


Рисунок 4 – Табулированная и аппроксимирующая зависимости $b_{\text{уд}}(N_{\text{ДЭС}})$

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

- учет характеристики $b_{уд}(N_{дэс})$ приводит к повышению экономии топлива на 2,8 % за счет внедряемой ВЭС (и, соответственно, к повышению экономических показателей внедряемой ВЭС), и зависит от распределения нагрузок между ВЭС и ДЭС;
- технико-экономическое обоснование с учетом характеристики $b_{уд}(N_{дэс})$ рекомендуется проводить лишь в тех случаях, когда при внедрении ВЭС в ЭК на базе ДЭС происходит существенное увеличение годовой доли работы ДЭС с пониженной мощностью. Для исследуемого объекта не учет характеристики $b_{уд}(N_{дэс})$ приводит к занижению планируемого расхода топлива на ДЭС на 13 % и, соответственно, к занижению себестоимости электроэнергии от ВДЭС в целом.

Таблица 3 – Годовой расход топлива на ДЭС с учетом (без учета) характеристики $b_{уд}(N_{дэс})$

Состав ЭК	Расчет при $b_{уд} = \text{const}$ (223,2 г/кВт·ч)		Расчет по характеристике $b_{уд}(N_{дэс})$	
	$V_{дэс}$, т/год		$V_{дэс}$, т/год	
ДЭС	$V_{дэс}$, т/год	815,7	$V_{дэс}$, т/год	935,0
	ΔV , т/год	0	ΔV , т/год	0
ДЭС + ВЭС	$V_{дэс}$, т/год	557,2	$V_{дэс}$, т/год	612,0
	ΔV , т/год	258,5	ΔV , т/год	323,0

Исследование влияния средней плотности воздуха на энергетические показатели ВЭУ проводили в соответствии с ГОСТ Р 54418.12.1–2011 (МЭК 61400-12) на площадке Усть-Камчатской ВЭС, где среднее значение плотности воздуха составило 1,278 кг/куб. м (в отличие от стандартного значения 1,226 кг/куб. м более чем на 0,05 кг/куб. м, т. е. выше на 4,2 %) [5].

По паспортной и скорректированной с учетом средней плотности воздуха мощностным характеристикам ВЭУ фирмы Komai для функционирующей Усть-Камчатской ВЭС (3 ВЭУ фирмы Komai с установленной мощностью 300 кВт) были определены выработки электроэнергии по данным ВИК Усть-Камчатск за период наблюдений с 04.02.2016 по 31.10.2016 г., которые составили 498,3 МВт·ч и 515,8 МВт·ч соответственно.

В исследуемом примере отклонение средней плотности воздуха на 4,2 % от стандартного значе-

ния приводит к занижению в определении проектной выработки ВЭС на 3,4 %. Поскольку теоретически отклонение плотности воздуха от стандартного значения может достигать $\pm 15\%$, то не учет этого фактора может привести к ошибке в определении проектной выработки ВЭС на $\pm 12\%$ [1].

Исследование расхождения проектных и эксплуатационных показателей энергоэффективности ВДЭС. Поскольку, как показано выше, на площадке Усть-Камчатской ВЭС влияние плотности воздуха невелико, то выработка по данным ВИК определялась по паспортной мощностной характеристике. Анализ полноты ряда 10-и минутных значений скорости ветра по показаниям анемометров, установленных на гондолах ВЭУ, выявил большое количество пропущенных данных, которое для всех трех ВЭУ составляет около 30 %. За этот же период времени на высоте оси ВК имеется полный 10-и минутный смоделированный ряд по данным наблюдений ВИК на разной высоте с использованием зависимости (1).

Без учета интервалов времени пропуска фактических данных по мощности трех ВЭУ и ВЭС в целом, был произведен расчет эксплуатационной выработки по данным измерений и проектной выработки для каждой из трех ВЭУ и ВЭС (полнота ряда 70 %) (таблица 4, строки 1, 3), а также рассчитаны соответствующие коэффициенты использования установленной мощности ($K_{нум}$) (таблица 4, строки 2, 4).

Также был проведен расчет проектной выработки за полный период наблюдений (таблица 4, строка 6, полнота ряда 100 %) и произведена оценка проектной выработки за период пропуска фактических данных наблюдений на гондолах ВЭУ (таблица 4, строка 8, полнота ряда 30 %).

Как видно из данных таблицы 4, за наблюдаемый период имеется большая часть проектной недовыработки, причины которой в работе не исследовались.

Существенная разница между эксплуатационной и проектной выработками (до 10 %) наблюдается только на площадке ВЭУ 2. Анализ средних скоростей ветра и средних рабочих мощностей за период наблюдений по фактическим данным на гондолах ВЭУ выявил, что при большей средней скорости ветра за ВК у ВЭУ 2 наблюдается наименьшая средняя мощность (таблица 5). Причина может заключаться в том, что ВЭУ 2 за наблюдаемый период работала в неоптимальном режиме, что привело к существенному расхождению между эксплуатационной и проектной выработкой на площадке этой ВЭУ.

Таблица 4 – Энергетические показатели ВЭУ и ВЭС в целом: годовая выработка электроэнергии и коэффициент использования установленной мощности

№ п/п	Энергетические показатели	ВЭУ 1	ВЭУ 2	ВЭУ3	ВЭС
1	Эксплуатационная выработка, МВт·ч	304,2	217,8	299,8	821,8
2	$K_{\text{нум}}$ %	22,9	16,2	22,1	20,4
3	Проектная выработка по данным ВИК, МВт·ч	292,4	241,8	301,4	835,6
4	$K_{\text{нум}}$ %	22,0	18,2	22,7	20,9
5	Относительное расхождение между проектной и эксплуатационной выработкой, %	-4,0	10,0	0,5	1,7
6	Проектная выработка по данным ВИК, МВт·ч	498,3	498,3	498,3	1494,8
7	$K_{\text{нум}}$ %	25,5	25,5	25,5	25,5
8	Проектная недовыработка, МВт·ч	205,8	256,4	196,9	659,2
9	Доля проектной недовыработки от полной проектной выработки, %	41,3	51,4	39,5	44,1

Таблица 5 – Средние скорости и средние рабочие мощности ВЭУ по данным фактических измерений на ВЭУ

Показатель	ВЭУ 1	ВЭУ 2	ВЭУ 3
Ср. скорость ветра за ВК, м/с	4,53	4,9	4,55
Ср. мощность, кВт	100,7	76,9	97,6

Все изложенное выше позволяет сделать следующие выводы.

Расхождение между проектной и эксплуатационной выработкой электроэнергии ВЭС существенно зависит от выбранной модели вертикального профиля ветра и модели определения ее параметров, а также от аэродинамических потерь на затенение ВЭУ в составе ВЭС, на которые также накладываются потери, связанные с выбором площадок размещения ВЭУ с меньшей интенсивностью ветра, зависящих от рельефа местности. Степень влияния этих потерь должна быть оценена конкретно для каждого проекта.

Технико-экономическое обоснование ВДЭС с учетом характеристики $b_{\text{уд}}(N_{\text{ДЭС}})$ рекомендуется проводить в тех случаях, когда существует значительная доля работы ДЭС с пониженной мощностью.

При оценке проектной выработки ВЭС на ранних стадиях проектирования необходимо учитывать факторы, влияющие на среднюю плотность воздуха, поскольку отклонение плотности воздуха от стандартного значения может привести к отклонению от эксплуатационной выработки до $\pm 12\%$.

Выявлено, что одной из причин расхождения между проектной и эксплуатационной выработкой

отдельных ВЭУ и ВЭС стать неоптимальный режим управления отдельными ВЭУ и ВЭС в целом.

Литература

1. Дерюгина Г.В. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие / Г.В. Дерюгина, Н.К. Малинин, Р.В. Пугачев, Т.А. Шестопалова. М.: Изд. МЭИ, 2012.
2. Дерюгина Г.В. Исследование влияния различных факторов на энергоэффективность ветроэлектрической станции, внедряемой в локальную энергосистему о. Попова / Г.В. Дерюгина, Н.Д. Карпов, Д.А. Чернов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2016. №10. С. 20–29.
3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2012620870. Специализированная база данных “Вертикальный профиль ветра” / А.Г. Васьков, Г.В. Дерюгина, М.Г. Тягунов, Д.А. Чернов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Национальный исследовательский университет МЭИ”. № 2012620664; заявл. 28.06.2012; опублик. 28.08.2012.
4. Investigation of Observed and Modeled Wake Effects at Horns Rev using WindPRO: David Ryan VanLuvanee. Technical University of Denmark, 2006.
5. ГОСТ Р 54418.12.1–2011. Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Измерение мощности, вырабатываемой ветроэлектрическими установками.