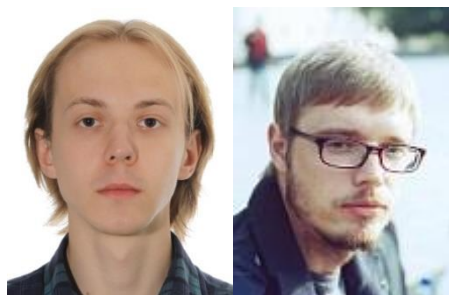


## АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЭУ МАЛОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ РАБОТЫ В СОСТАВЕ МИКРОГРИД КОТТЕДЖНОГО ТИПА



К.К. Веселовский, студент группы 17-ЭЭ,  
e-mail: [weselkirill@mail.ru](mailto:weselkirill@mail.ru)  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

А.Ю. Никишин, канд. техн. наук, доц. кафедры  
«Электрооборудование судов и электроэнергетика»,  
e-mail: [andrej.nikishin@klgtu.ru](mailto:andrej.nikishin@klgtu.ru)  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный  
технический университет»

В представленной работе были определены критерии для функционирования ветрогенераторов в составе микрогрид коттеджного типа. Выполнен обзор и сравнение ветроэнергетических установок для работы в условиях микрогрида коттеджного типа.

*Ключевые слова:* микрогрид, ветроэнергетические установки, малые ветроэнергетические установки, возобновляемые источники энергии

### ВВЕДЕНИЕ

Проблемы, связанные с ростом загрязнения окружающего нас мира, ростом спроса на энергию и сокращением запасов ископаемых источников энергии, побуждают ученых разрабатывать новые решения в сфере энергетики.

К ним относится и микрогрид, достаточно популярное явление на Западе и Европе. MicroGrid – целый новый класс мини-энергосистем, который включает собственные источники генерации энергии, в кризисные ситуации способен взять на себя задачу удовлетворения спроса потребителей. Это своего рода уменьшенная версия централизованной системы электроснабжения. Она может включать: топливные элементы, фотоэлектрические и нагревательные солнечные системы, гидравлические, геотермальные и газопоршневые установки, микро-турбины, работающие на газе, в том числе на биотопливе, и ветроэнергетических установках (ВЭУ). Основная задача микрогрид – это обеспечение электроэнергией потребителя, а также возможность взаимодействия с общей энергосистемой путем продажи излишков электроэнергии в сеть.

В данной работе наиболее подробно будет рассмотрен частный вопрос ВЭУ для микрогрида, не затрагивая другие аспекты микросетей или возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Большая часть ВЭУ создана для промышленных объемов 3-5 МВт. Они выпускаются уже более полувека, требования к ним ясны, решаются технические проблемы, такие как оптимальное размещение ветряных турбин [1], управление ветряными турбинами [2], обледенение лопастей [3] и др. Также есть малые ВЭУ, которые освоены в полной мере и применяются для работы в составе обычных энергосистем.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является ВЭУ в составе микрогрид коттеджного типа. Предметом исследования являются технические характеристики, такие как: номинальная мощность, размер ротора, шум, минимальная и начальная скорость ветра, цена.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью данной работы является обзор существующих конструктивных решений в сфере малых ВЭУ для работы в составе микрогрид, определение особенностей работы и составление сравнительной таблицы для выбора наиболее подходящего варианта.

## ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Микросеть (микрогрид) – это группа взаимосвязанных нагрузок и распределенных энергоресурсов в четко определенных электрических границах, которая действует как единый управляемый объект по отношению к сети (рис. 1). Микросеть может подключаться и отключаться от сети общего электроснабжения, чтобы позволить ей работать как в подключенном к сети, так и в автономном режиме [4].

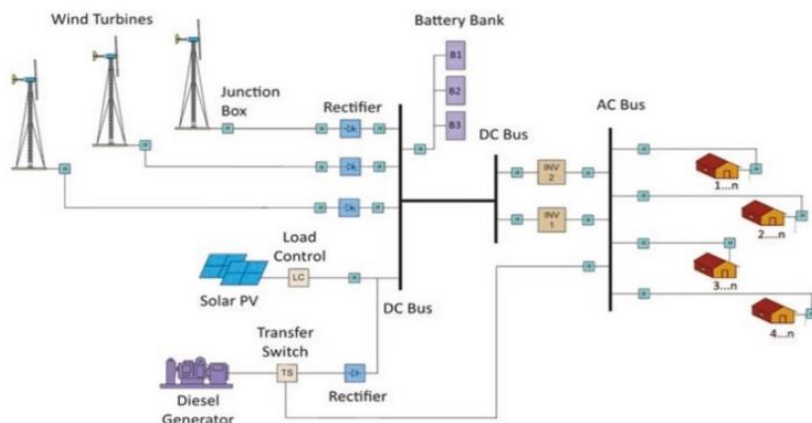


Рисунок 1 – Схематичное изображение примера микрогрида

ВЭУ – комплекс взаимосвязанного оборудования и сооружений, предназначенный для преобразования энергии ветра в другие виды энергии (механическую, тепловую, электрическую и др.) [5].

Скорость ветра – это определяющий фактор объемов годовой выработки электроэнергии. Для достижения максимально эффективного использования этого ресурса ВЭУ микрогрида удобно располагать на зданиях и сооружениях, которые эти микрогриды обслуживают. Это требует использовать башни меньшего размера, но уменьшает длину питающих линий, так как ветрогенератор расположен непосредственно на здании-потребителе и может повысить рациональное использование площади домашнего хозяйства. Но в связи с близким расположением ветрогенератора с жилыми помещениями, возникает серьезное ограничение из-за шума и вибраций от работы установки. Также стоит учитывать массу ветрогенератора и конструкцию крыши, которая должна выдержать вес установки. Для уточнения вопроса ограничений обратимся к работам зарубежных исследователей.

Вопросами зависимости скорости ветра занимались Рехан Джамиль и Захида Хуссейна. Они провели исследования влияния места установки ветрогенератора на крыше высотного здания, по результатам которого можно сказать, что ветровые условия в большинстве мест на крыше очень отличаются от условий естественного ветра. Следовательно, ветряная турбина на крыше в этих местах должна быть рассчитана на особые условия. На большинстве крышных площадок нельзя просто использовать на крыше ветряную турбину, предназначенную для сельской местности [6].

Согласно работе Энтони Л. Роджерс для комфортного пребывания человека в среде с работающим ветрогенератором, уровень шума турбины не должен превышать уровень шума окружающей среды более чем на 9,5 дБа [7].

Ограничения, связанные с расположением ветрогенератора на крыше коттеджа, требуют особенных конструктивных решений ВЭУ, чтобы генератор мог работать в заданных условиях без особой визуальной нагрузки.

Обычно ветряные турбины подразделяются на две категории: ветряные турбины с горизонтальной осью вращения и ветряные турбины с вертикальной осью вращения. Но также есть модификации этих решений.

Ветроэлектрическая установка типа Савониуса (рис. 2), изучением которой занимается Бубенчиков А.А., представляет собой вертикально-осевой ветрогенератор, который характеризуется высоким стартовым моментом, относительно низкой скоростью эксплуатации и способностью работать при любом направлении ветра [8].



Рисунок 2 – Ротор Савониуса

Горизонтально-осевые ВЭУ (рис. 3), основным недостатком которых является необходимость ориентации ротора на ветер, также могут быть использованы в заданных условиях. Основным достоинством ветрогенераторов с горизонтальным ротором является их более высокая эффективность работы, за счет меньшего разброса углов атаки на рабочих режимах, а также из-за возможности у отдельных ВЭУ управлять углом установки лопастей.



Рисунок 3 – Горизонтально-осевые ВЭУ

Также были изучены работы по перспективным техническим решениям, которые находятся на стадии прототипов и постепенно выходят на мировой рынок. Предложение CrossFex (рис.4) представляет собой радикально новую разработку турбины Дарье. Помимо технически инновационной системы гибких лопастей, в нем также используется облегченная система обтекателя, которая может обеспечивать как увеличенный воздушный поток, так и улучшенную визуальную интеграцию в новые и существующие формы зданий. Это

модульная форма, которую можно разместить на гребнях и углах зданий, чтобы обеспечить эффективные уровни генерации [9].



Рисунок 4 – Ротор CrossFex

Многолопастной ротор RB1 (рис. 5) – это меньшая бытовая версия RidgeBlade®, разработанная для выработки электроэнергии в широком диапазоне ветровых условий (включая низкие скорости ветра) при минимальном визуальном воздействии. Подходит для большинства мест установки, включая городские дома, а также экологически чувствительные объекты, такие как национальные парки и сельские районы [10].



Рисунок 5 – Многолопастной ротор RB1

Эти разработки очень подходят под заданные условия, но не могут использоваться для сравнения, так как они еще не вышли на мировой рынок.

### **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для анализа существующих решений на рынке авторы провели сравнительное исследование, которое поможет определить наиболее подходящий вариант.

В выборке участвовали существующие в продаже ветряные турбины. Особым критерием было отсутствие сильного шума и вибраций (рис. 6), а также работа на низких скоростях ветра. Шум не должен превышать 40 дБа в дневное и 35 дБа в ночное время согласно европейским стандартам [11].

Для работы в составе микрогрид будут рассматриваться домашние и мини-турбины, согласно классификации турбин по размеру мощности (табл. 1) [12].

В связи с возрастающим спросом на экологически чистый способ выработки электроэнергии, на рынке появляются предложения от ведущих производителей ветрогенераторов. Сайты производителей, таких как SOUTHWEST WINDPOWER, SUPERWIND, RUIHUAENERGY, Aeolos, HOMEENERGY были источниками информации.

Сформулировав особые требования, которые включали ограничения по шуму и размеру, был произведен обзор рынка, по результатам которого авторы отобрали 12 ВЭУ оптимальных вариантов для микрогрид коттеджного типа: четыре горизонтального, четыре вертикального типа и четыре с ротором Савониуса (табл. 2). Далее в таблицах и графиках они будут именоваться как HAWT (Horizontal axis wind turbines), VAWT (Vertical axis wind turbines) и Savo (Savonius wind turbine) соответственно.



Рисунок 6 – Уровни шума

Таблица 1 – Классификация турбин по размеру и мощности

Размер	Диаметр ротора, м	Мощность, кВт
Микро	0,5-1,25	0,04-0,025
Мини	1,25-3	0,26-1,4
Домашнего применения	3-10	1,4-25

Таблица 2 – Технические характеристики исследуемых ВЭУ

Название	Тип	Номинальная мощность, кВт	Диаметр ротора, м	Минимальная скорость ветра	Номинальная скорость ветра	Масса, кг	Цена, \$
EN-500W-M3	HAWT	0,5	1,75	2,0	11	11,5	1400
Bergey XL	HAWT	1,0	1,25	2,5	11	55,0	4800
Aeolos H	HAWT	2,0	4,0	3,0	10	125,0	3000
EN-3KW-G	HAWT	3,0	7,8	2,5	11	400,0	2000
EN-500W-Q4	Savo	0,5	1,4	1,5	12	27,0	1500
EN-1KW-Q5	Savo	1,0	2,0	3,0	12	50,0	2000
EN-2KW-Q5	Savo	2,0	2,5	3,0	13	45,0	1750
EN-3KW-Q5	Savo	3,0	2,8	3,0	13	77,0	7000
Aeolos-V05w	VAWT	0,5	1,2	1,5	10	10,0	2000
Aeolos-H1kW	VAWT	1,0	2,0	1,5	10	28,0	3900
Aeolos V	VAWT	2,0	2,8	3,0	11	89,0	5000
Aeolos-V3kW	VAWT	3,0	3,0	2,5	12	106,0	8000

Затем были введены коэффициенты (1)-(4), которые учитывали увеличение цены, размера ротора, массы и номинальной скорости ветра. Коэффициент эффективного использования площади позволяет определить выработку энергии с занимаемой территории. Коэффициент стоимости позволяет определить наиболее выгодное соотношение цены за кВт энергии. Коэффициент энерговооруженности представляет собой отношение мощности к массе ветрогенератора и позволяет выбрать тот ветрогенератор, который при установке на крыше будет иметь меньший вес. Коэффициент выхода на номинальную мощность показывает возможность работы ветрогенератора в заданных условиях (для расчетов скорость ветра равна 6 м/с). Чем больше эти коэффициенты, не считая коэффициента стоимости, тем больше ветрогенератор подходит для заданных условий эксплуатации:

$$k1 = S/\pi R^2 - \text{коэффициент эффективного использования площади} \quad (1)$$

$$k2 = \$/S - \text{коэффициент стоимости} \quad (2)$$

$$k3 = S/m - \text{коэффициент энерговооруженности} \quad (3)$$

$$k4 = v_{\text{среды}}/v_n - \text{коэффициент выхода на номинальную мощность,} \quad (4)$$

где  $S$  – номинальная мощность, кВт;  
 $v_n$  – номинальная скорость ветра, м/с;  
 $v_{\text{среды}}$  – среднегодовая скорость ветра в месте установки, м/с;  
 $\$$  – цена, в долларах;  
 $m$  – масса, кг;  
 $R$  – радиус ротора, м.

Все расчеты производились в программе Microsoft Excel.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

После подсчетов всех коэффициентов была составлена табл. 3 для определения результирующего показателя, коэффициента совокупной эффективности, на основе которого можно сказать, какой ветрогенератор подходит для заданных условий на конкретной мощности.

Таблица 3 – Анализ показателей коэффициентов

Тип	кВт	K1	K2	K3	K4
HAWT	0,5	0,052	2800,000	0,043	0,545
Savo	0,5	0,081	3000,000	0,019	0,500
VAWT	0,5	0,111	4000,000	0,050	0,600
HAWT	1,0	0,204	4800,000	0,018	0,545
Savo	1,0	0,080	2000,000	0,020	0,500
VAWT	1,0	0,080	3900,000	0,036	0,600
HAWT	2,0	0,040	1500,000	0,016	0,600
Savo	2,0	0,102	875,000	0,044	0,462
VAWT	2,0	0,081	2500,000	0,022	0,545
HAWT	3,0	0,016	666,667	0,008	0,545
Savo	3,0	0,122	2333,333	0,039	0,462
VAWT	3,0	0,106	2666,667	0,028	0,500

Исходя из данных табл. 3 был построен график, который отражает количество наивысших показателей ветрогенераторов по всем коэффициентам.

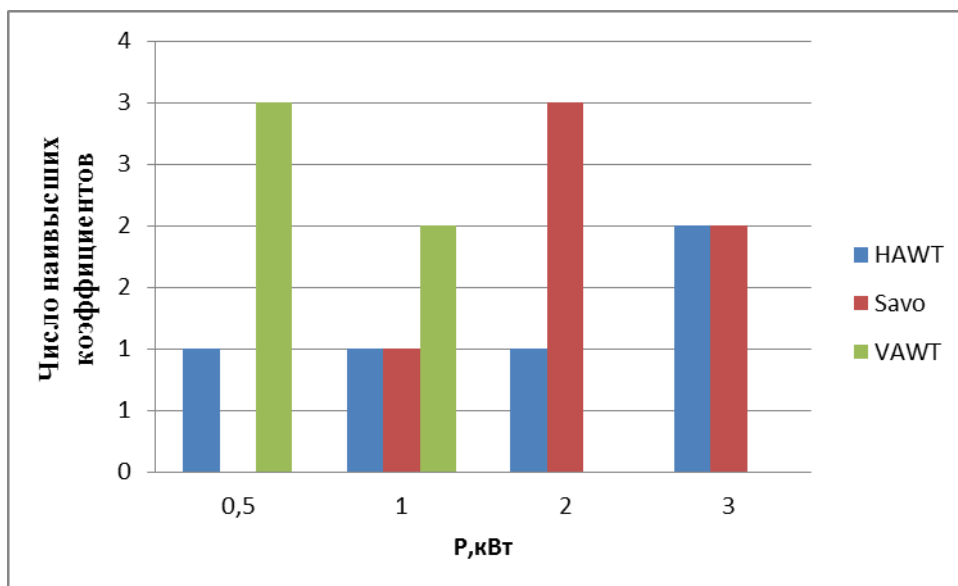


Рисунок 7 – Коэффициент совокупной эффективности

По результатам сравнительного анализа можно сделать вывод, что на мощностях от 0,5 до 1 кВт подойдет ветрогенератор вертикального типа. На более высоких мощностях следует выбрать ветрогенераторы с ротором Савониуса. Также важно отметить, что классический ветрогенератор горизонтального типа можно устанавливать во всех случаях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование состояло из поиска существующих решений в области ВЭУ малой мощности для работы в составе микрогрид. Был произведен обзор существующих конструктивных решений в сфере малых ВЭУ, определены особенности работы, а именно: малые габариты и вес, минимальный шум и вибрация, а также работа на низких скоростях ветра. Важным аспектом также является внешний вид ветрогенератора. Он должен вписываться в окружающую среду человека и осуществлять минимальную визуальную нагрузку. Составлены сравнительные таблицы для выбора наиболее подходящего варианта.

В результате проделанной работы можно сказать, что область ВЭУ домашнего и городского типа постоянно развивается. Уже сейчас можно обеспечить свой дом необходимой мощностью. Новые конструктивные решения с использованием современных материалов и технологий позволяют создавать более эффективные генераторы для городов и поселений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эмами А., Ногре П. Новый подход к оптимизации размещения ветряных турбин внутри ветряных электростанций с помощью генетических алгоритмов // Возобновляемая энергия. –2010. – № 35. – 1559-1564.
2. D. REARDON, WELEITHEAD & MJGRIMBLE (1990). Обзор управления ветряными турбинами, International Journal of Control, 52: 6, 1295-1310, DOI:10.1080/00207179008953597.
3. Gao, Linyue & Liu, Yang & Hu, Hui. (2019). An Experimental Investigation of Dynamic Ice Accretion Process on a Wind Turbine Blade Model Considering Various Icing Conditions. International Journal of Heat and Mass Transfer. 133. 930-939. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.181.
4. D.T. Ton, M.A. Smith. The US department of energy's microgrid initiative Electr J, 25 (2012), pp. 84-94.

5. ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения.
6. Mertens S. The Energy Yield of Roof Mounted Wind Turbines. Wind Engineering. 2003; 27(6):507-518. DOI: 10.1260/030952403773617472.
7. Rogers, Anthony & Manwell, James. (2002). Wind Turbine Noise Issues.
8. Bubenchikov A.A. et al. THE STUDY OF AERODYNAMICS AND POWER CHARACTERISTICS OF SAVONIUS ROTOR. Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal (International Research Journal), No. 12 (54), part 3, (2017): 28. Fri. 20. Jan. 2017.
9. Sharpe, T., & Proven, G. (2010). Crossflex: concept and early development of a true building integrated wind turbine. Energy and Buildings, 42(12), 2365-2375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.032>.
10. RB1 Residential // The power collective [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://thepowercollective.ca/products/rb1/> (дата обращения: 01.10.2020 г.).
11. External industrial noise2guidelines 1978:5. The Swedish Environmental Protection Agency ISBN 91-38-04488-9 (in Swedish).
12. Shea K., and Howard, B.C., 2011. Build your own small wind power system. McGraw Hill Books. ISBN 978-0-07-176157-4. pp.1-512.

## ANALYSIS OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF LOW POWER WIND TURBINE FOR WORK ON THE COTTAGE TYPE MICROGRIDS

K.Veselovskiy, student,  
e-mail: [weselkirill@mail.ru](mailto:weselkirill@mail.ru)  
Kaliningrad Technical State University

A. Nikishin, PhD,  
e-mail: [andrej.nikishin@klgtu.ru](mailto:andrej.nikishin@klgtu.ru)  
Kaliningrad Technical State University

In this paper, we defined the criteria's for work of wind turbines in cottage-type microgrids. Also we made review and comparison of wind turbines for work in cottage-type microgrids.

***Key words:*** *microgrid, wind turbines, small wind turbines, renewable energy sources*