

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 620.92: 621.436

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-45-53

Гибридные ветро-солнечные энергетические установки*

П. Н. Кузнецов, кандидат технических наук, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

В. В. Чебоксаров, кандидат технических наук, доцент, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор, Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

Приведен анализ известных подходов к созданию гибридных ветро-солнечных энергетических установок. На примерах показано, что размещение фотоэлектрических преобразователей на роторах ветрогенераторов, существующих конструкций является неэффективным решением по ряду факторов. Представлено описание конструкции гибридной ветро-солнечной установки, разработанной ООО «НТЦ «Солнечная энергетика», с вертикальным ротором Дарье и фотоэлектрическими преобразователями, расположенными на общей опорной конструкции, позволяющей получить положительный синергетический эффект от использования двух возобновляемых источников энергии. Приведены достоинства данного решения, одними из которых является повышение энергетической эффективности фотоэлектрических преобразователей за счет интенсификации теплоотвода от поверхности фотоэлементов ветровым потоком от ротора Дарье, эффективное использование площади и стабильность выдачи электроэнергии.

Приведены преимущества использования гибридных установок, работающих от возобновляемых источников энергии, в частности ветро-солнечных установок. Описаны возможные пути снижения негативных последствий, вызванных нестабильным характером выработки электроэнергии такими установками.

Описаны результаты проведенных работ, направленных на повышение энергетической эффективности ротора ветроустановки и фотоэлектрических преобразователей за счет установки оптимального угла лопастей и фотоэлектрических модулей. Результатами моделирования показано, что максимальное значение коэффициента использования ветра достигается при установке лопастей под углом 38° , а оптимальный угол установки фотоэлектрических модулей для г. Севастополя составляет 34° . Приведены оценочные расчеты энергетических параметров комбинированной ветро-солнечной установки.

Ключевые слова: ветро-солнечная установка, ветроэнергетика, фотоэнергетика, возобновляемая энергетика, гибридная установка.

Введение

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) многочисленны и по своей физической сущности весьма разнообразны. При этом использование различных видов ВИЭ в настоящий момент находится на неодинаковых стадиях технологического развития. Например, использование градиента солености воды в получении энергии не вышло из стадии лабораторных экспериментов и даже в будущем возможно только ограниченно. Напротив, технологии ветроэнергетики, фотоэлектричества, использование энергии биомассы достаточно давно стали коммерческими и распространены

в большинстве стран мира. По глубокому убеждению авторов, следует поддерживать все виды ВИЭ, каждый из них имеет свою область эффективного использования. Однако для решения проблем глобальных, таких как борьба с изменением климата, необходимо расширять использование наиболее дешевых, максимально экологически чистых и имеющих наибольшие запасы возобновляемых энергоресурсов. По этим критериям в возобновляемой энергетике уже давно сформировались лидеры – ветровая и солнечная энергетика [1].

Объективно использование ВИЭ существенно сдерживается недостатками, присущими ка-

ждому из них. Основным недостатком абсолютного большинства ВИЭ следует признать непостоянство и плохо предсказуемый характер выдаваемой мощности. Данный недостаток приходится преодолевать весьма затратными мерами по аккумулированию энергии или резервированию традиционными энергоустановками. Свойственен он и ветроэнергетическим установкам (ВЭУ), работа которых зависит от скорости ветра. Для фотоэлектрических энергетических установок (ФЭУ) характерна зависимость мощности от интенсивности солнечного излучения (функция времени суток, времени года, погодных условий) и температуры. Указанные факторы непостоянства характеристик ВЭУ и ФЭУ, как правило, имеют слабую корреляцию, что позволяет в существенной степени уменьшить их влияние в комбинированных (гибридных) ветро-солнечных установках.

Цели данной работы – анализ проблемы нестабильности выработки энергии установками на основе ВИЭ, обзор известных подходов

к созданию гибридных установок возобновляемой энергетики, в особенности ветро-солнечных энергетических установок, разработка новых технических решений таких установок, а также повышение их энергетической эффективности.

Проблема нестабильности ВИЭ и гибридные энергоустановки

Как было сказано выше, генерация на основе ВИЭ имеет переменный характер, зависящий от ряда внешних условий, вследствие чего предложение электроэнергии от ВИЭ нестабильно, трудно прогнозируемо и не корректируется под колебания спроса. В настоящее время это действительность, под которую приходится подстраиваться в процессе внедрения энергоустановок, использующих ВИЭ.

На рис. 1 приведена гистограмма суточной энерговыработки ФЭУ в г. Белгороде установленной мощностью 100 кВт и ВЭУ USW-56-100 Судакской ветроэлектростанции в октябре 2016 г.

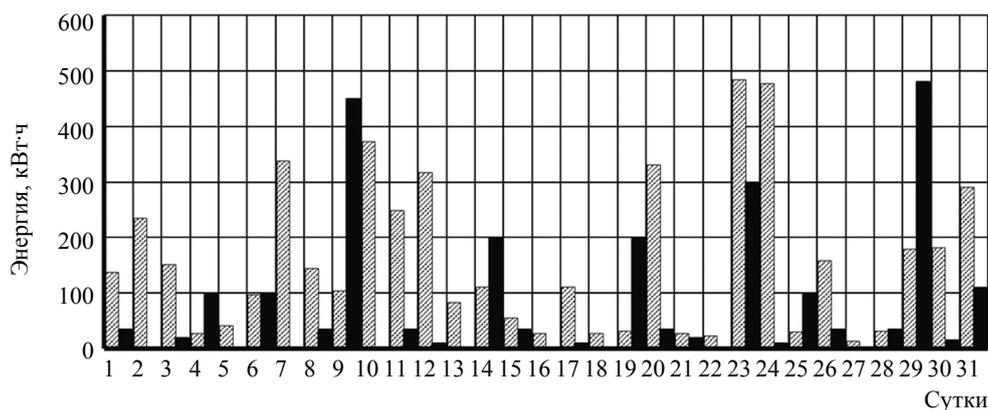


Рис. 1. Суточная энерговыработка: ▨ – ФЭУ установленной мощностью 100 кВт; ■ – ВЭУ USW-56-100 в октябре 2016 г.

Fig. 1. Daily power output: ▨ – 100 kW photovoltaic power plant; ■ – wind turbines USW-56-100 in October 2016

Однако негативные последствия от естественно нестабильного характера выработки на абсолютном большинстве видов установок с ВИЭ могут быть исключены или по крайней мере уменьшены несколькими путями. Во-первых, путем подключения этих энергоустановок к разветвленным магистральным электрическим сетям, простирающимся на многие сотни и тысячи километров. В этом случае, например, падение выработки из-за слабого ветра на ВЭУ, расположенных в одном районе, компенсируется выработкой энергии на ВЭУ в другом районе, где ослабления ветра не наблюдается. При этом требуется некоторое резервирование мощности энергоустановок, растут расходы на поддержа-

ние сетевой инфраструктуры и возникают неизбежные потери в сетях. Помочь здесь могут технологии Smart Grid, развитие которых во многом было инициировано увеличением доли возобновляемой генерации.

В перспективных планах развития электроэнергетики России согласно «дорожной карте» Национальной технологической инициативы «Энерджинет» предусмотрен переход на интеллектуальные активно-адаптивные сети Smart Grid, предполагающие увеличение масштабов использования ВИЭ и, в частности, фото- и ветроэнергетики [2, 3]. До 2020 г. включительно в РФ планируется ввод более пятидесяти солнечных электростанций суммарной установлен-

ной мощностью 1520 МВт и 21 ветроэлектростанций установленной мощностью 2261 МВт до 2022 г. [4–7].

Во-вторых, широко используется компенсация уменьшенной выработки с ВИЭ за счет включения в той же сети резервных мощностей традиционной генерации, например тепловой. Однако тем самым ограничиваются возможности для значительного увеличения доли ВИЭ в энергобалансе в целях борьбы с изменением климата. Если энергоустановка с ВИЭ работает автономно, например, в удаленном от магистральных электросетей районе, то она также чаще всего резервируется традиционной генерацией, как правило, дизель-генератором. Однако весьма высокая стоимость дизель-генератора, его эксплуатации и обслуживания ухудшает экономические показатели такой гибридной энергоустановки.

В-третьих, применяется включение в энергосистему или в автономную энергоустановку с ВИЭ накопителей энергии различных видов с соответствующим оборудованием для заряда и разряда [8]. Емкость накопителей и мощность нагрузки должны соответствовать ожидаемой длительности перерывов в работе основного генератора на ВИЭ и его мощности соответственно. Недостатком этого решения является очень высокая стоимость установленной мощности накопителя и оборудования преобразования энергии. К примеру, стоимость такого оборудования для ФЭУ установленной мощностью до 10 кВт составляет 50–75 % стоимости всей установки [9]. Кроме того, у большинства типов накопителей энергии весьма ограничен ресурс работы, например, число циклов заряд/разряд, достаточно жесткие требования по режимам заряда, наблюдается эффект памяти, снижающий емкость накопителя, используются редкие и очень часто токсичные материалы.

Полностью исключить необходимость аккумуляции в энергокомплексах с ВИЭ при переходе к энергетике устойчивого развития, по-видимому, не удастся, однако затраты на аккумуляцию можно значительно уменьшить за счет рационального комбинирования возобновляемых источников различной физической природы. Такой подход можно рассматривать как четвертый, наиболее рациональный и «чистый» путь решения проблемы нестабильности выработки. При этом создаются гибридные установки, в которых недостатки одного из преобразователей возобновляемой энергии частично компенсируются работой преобразователя (преобразователей) энергии другого типа с выдачей

энергии всех преобразователей в сеть в одной точке. Немногочисленными примерами здесь являются ветро-солнечные установки, позволяющие в светлое время суток компенсировать выработку электроэнергии при отсутствии ветра, термофотоэлектрические гелиоустановки, позволяющие получать тепловую и электрическую энергию с одной рабочей поверхности (абсорбера), солнечно-геотермальные системы теплоснабжения и др.

Известные подходы к созданию гибридных ветро-солнечных установок

Поскольку, как выше указывалось, ветроэнергетика и прямое преобразование солнечной энергии являются и, очевидно, долгое время останутся лидерами в возобновляемой энергетике, то одним из самых перспективных направлений создания гибридных энергоустановок, по мнению авторов, следует рассматривать разработку ветро-солнечных установок (ВЭУ-ФЭУ).

В настоящее время уже разработан ряд гибридных ветро-солнечных установок различных конструкций [10, 11]. Одна из них, описанная в патенте РФ № 2535899 «Система автономного электро- и теплоснабжения жилых и производственных помещений», включает в себя ВЭУ и размещенную отдельно ФЭУ. Использование данных источников генерации в комплексе с системой аккумуляции позволяет обеспечить бесперебойное электропитание потребителей и собственных нужд в различных погодных условиях. Основными недостатками такого решения являются: необходимость использования дополнительной свободной площади для размещения батареи фотоэлектрических преобразователей, а также снижение эффективности фотоэлектрических преобразователей из-за температурного нагрева, вызванного плохим теплоотводом от их поверхности.

Решить данную проблему позволяет использование комбинированных гибридных установок, конструкция одной из которых описана в патенте РФ № 2551913 «Способ отбора электрической энергии от батарей фотоэлектрических преобразователей». В основе данной установки используется комбинированная вертикально-осевая ВЭУ с соосно расположенными роторами Савониуса и Дарье, причем ротор Савониуса располагается внутри ротора Дарье, и на всей поверхности его скрученных лопастей с двух сторон закреплены фотоэлектрические преобразователи. Электрическая энергия от электрического генератора ВЭУ и фотоэлектрических преобразователей поступает в накопи-

тель электрической энергии через контроллер и индукционный токопередающий узел. От накопителя электрическая энергия распределяется потребителю.

Достоинством данной установки является то, что за счет совместного использования ветровой и солнечной энергии она позволяет повысить стабильность вырабатываемой электроэнергии от альтернативных источников при изменчивости погодных условий, а также увеличить мощность и эффективность гибридной установки. Однако, несмотря на достоинства, конструкция установки содержит некоторые недостатки, существенно снижающие ее эффективность. Основными недостатками этого решения являются малая мощность и низкая эффективность работы ФЭУ из-за непрерывной, неравномерной смены освещенности фотоэлектрических преобразователей [13] при вращении ротора Савониуса, а также дополнительного затенения фотоэлектрических преобразователей лопастями расположенного вокруг них ротора Дарье.

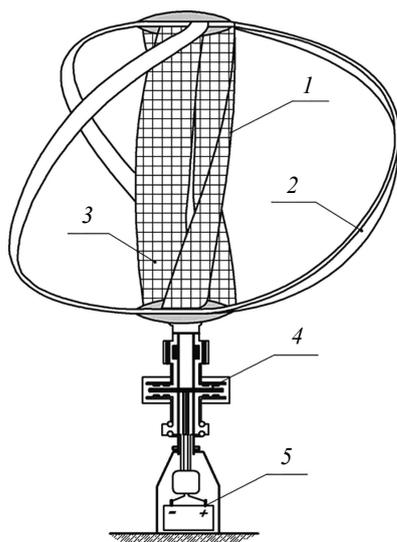


Рис. 2. Комбинированная гибридная ветро-солнечная установка с вертикальной осью вращения: 1 – ротор Савониуса; 2 – ротор Дарье; 3 – фотоэлектрические преобразователи; 4 – индукционный токопередающий узел; 5 – накопитель электрической энергии

Fig. 2. Combined hybrid vertical axis wind-solar power plant: 1 - Savonius rotor; 2 - Darrieus rotor; 3 - photovoltaic cells; 4 - induction current-transmitting unit; 5 - electric energy storage

Еще одна конструкция комбинированной гибридной ветро-солнечной установки (рис. 3) описана в патенте РФ № 2611923 «Энергоэффективная солнечно-ветровая энергетическая установка». Данная установка основана на горизонтально-осевой трехлопастной конусно-шнековой ВЭУ, на наружные стороны ротора кото-

рой нанесены фотоэлектрические преобразователи пленочного типа. Солнечная энергия на фотоэлектрические преобразователи поступает в концентрированном виде через двояковыпуклые продольные линзы. Для повышения эффективности работы ВЭУ конструкция включает конфузур-диффузор, позволяющий увеличить скорость ветрового потока на роторе. Электрическая энергия от фотоэлектрических преобразователей и электрического генератора ВЭУ передается посредством пары токопередающих узлов в аккумуляторную батарею через контроллер заряда-разряда. Запасенная в аккумуляторах энергия передается к потребителю через инвертор напряжения.

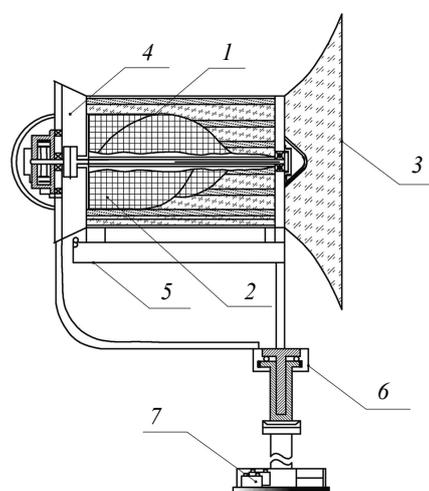


Рис. 3. Комбинированная гибридная ветро-солнечная установка с горизонтальной осью вращения: 1 – ротор ВЭУ; 2 – фотоэлектрические преобразователи; 3 – конфузур; 4 – диффузор; 5 – поворотная платформа; 6 – опора поворотной опоры; 7 – контроллер заряда-разряда и аккумуляторная батарея

Fig. 3. Combined hybrid horizontal axis wind-solar power plant: 1 - wind turbine rotor; 2 - photovoltaic cells; 3 - confuser; 4 - diffuser; 5 - rotary platform; 6 - support swivel bearings; 7 - charge-discharge controller and battery

Основным достоинством данной гибридной установки является способность вырабатывать электроэнергию при малых скоростях ветра за счет конструктивных особенностей и комплексного использования энергии ветра и солнца. Однако такая способность требует существенного усложнения конструкции и материалоемкости, а также снижает надежность. Учитывая то, что мощность ветрового потока зависит от скорости ветра в кубе, использование данной ВЭУ не позволит существенно увеличить энерговыработку по сравнению с классическими конструкциями, существенно уступая последним в стоимости и надежности. Также недостатком этого решения является низкая эф-

фektivность работы ФЭУ. Причиной этого является неравномерная, непрерывно изменяющаяся освещенность фотоэлектрических преобразователей, вызванная вращением лопастей ротора и поворотной платформы, а также использованием способа их освещения посредством оптических концентраторов [13]. Такое неравномерное освещение практически не позволяет использовать последовательную и смешанную коммутацию фотоэлектрических преобразователей. Это связано с тем, что в модуле, состоящем из последовательно соединенных фотоэлектрических преобразователей, ток ограничивается током наименее освещенного преобразователя, а в случае отключения затененного преобразователя – шунтирующим диодом, снижается выходное напряжение модуля, что не позволяет ему передавать энергию потребителю при параллельном соединении с другими модулями. Использование параллельной коммутации фотоэлектрических преобразователей также не решает данную проблему ввиду сложностей, связанных с преобразованием электроэнергии из-за низкого выходного напряжения и больших значений тока ФЭУ и, как в случае смешанной коммутации, но в меньшей мере, наличия рассогласованности по напряжению преобразователей имеющих различную освещенность [14].

Решить проблему неравномерной освещенности ФЭУ позволяет использование схем комбинированных установок, предполагающих их размещение вне ветрогенератора. Пример такой схемы приведен в патенте РФ № 2535899. Однако данные решения требуют использования дополнительной свободной площади для размещения батареи фотоэлектрических преобразователей, а также приводят к снижению эффективности фотоэлектрических преобразователей из-за их нагрева при работе по причине плохого теплоотвода.

Комбинированная ветро-солнечная энергетическая установка

Приведенный выше анализ показывает, что совмещение фотоэлектрической установки с ветроэнергетическими установками представляет существенные трудности и при существующих конструкциях ВЭУ не приносит заметного синергетического эффекта. Объяснением этого является, очевидно, тот факт, что у традиционных ВЭУ фактически нет поверхностей для установки фотоэлектрических модулей (ФЭМ). Наибольшую площадь в ветротурбинах с горизонтальной осью вращения имеют криволинейные поверхности лопастей. Размещение ФЭМ на них практически невозможно по целому ряду

причин. В связи с этим при проектировании данных установок нужно изначально учитывать конструктивные особенности ФЭУ и ВЭУ, а также особенности их работы.

Для решения данной задачи ООО «НТЦ «Солнечная энергетика» было предложено разместить фотоэлектрические модули на опорной конструкции ветроустановки с вертикально-осевым ротором типа Дарье. Такая конструкция позволяет не только эффективнее использовать площадь, занимаемую установкой, но и увеличить количество вырабатываемой энергии фотоэлектрическими преобразователями. Такой эффект достигается за счет интенсификации теплоотвода от поверхности модулей в окружающую среду из-за конструктивных особенностей ветроустановки, позволяющих обеспечить дополнительный конвективный теплообмен. Измерения температуры тыльной поверхности фотоэлектрических модулей, выполненные пирометрическим методом, показали, что вращение ротора ветроустановки позволяет снизить температуру с 41,1 до 32 °С при скорости ветра 5 м/с, имеющего южное направление, температуре окружающей среды 25 °С и интенсивности солнечной радиации около 650 Вт/м². Оценочные расчеты энергетических параметров такой установки были проведены согласно методикам [15, 16], и их результаты приведены в заключении. На рис. 4 приведена фотография комбинированной ветро-солнечной установки предложенной конструкции, разработанной и установленной в г. Севастополе на территории студенческого спортивно-оздоровительного лагеря «Горизонт».

Номинальная мощность разработанного ветрогенератора составляет 3 кВт (при скорости ветра 13 м/с), а фотоэлектрических преобразователей – 0,5 кВт.

Исследование энергетической эффективности

Проведено цифровое аэродинамическое моделирование работы ротора Дарье ветроустановки с тремя лопастями, имеющими профили NASA 0021, с использованием метода конечных объемов. Разработана 2D-расчетная область с длиной, превышающей диаметр ротора в 5 раз, что позволяет получить параметры процесса обтекания ротора с точностью, достаточной для инженерных расчетов. Для ускорения вычислений без снижения точности их результатов расчетная область была составлена из трех подобластей, имеющих различную плотность сетки: наружного пространства вокруг ротора – наибольший размер ячеек сетки, внутреннего пространства ротора – средний размер ячеек, и при-

стеночных областей вокруг каждой лопасти – наименьший размер ячеек. Моделирование проводилось в среде пакета ANSYS 14.5 с использованием модуля Fluid Flow (ANSYS Fluent). Основная цель моделирования заключалась в определении угла установки лопастей ротора φ (угол между хордой лопасти и касательной к траектории ее движения на оси закрепления), при котором значение коэффициента использования энергии ветра C_p будет принимать максимальное значение. Коэффициент использования энергии ветра является безразмерной величиной, показывающей эффективность преобразования энергии ветра в механическую энергию ротора. Его значение вычислялось как отношение механической мощности ротора ВЭУ к мощности ветрового потока:

$$C_p = \frac{P_M}{P_B} = \frac{\omega M}{0,5\rho S V^3}, \quad (1)$$

где P_M – механическая мощность ротора ВЭУ; P_B – мощность ветрового потока; ω – угловая скорость вращения ротора; M – крутящий момент; ρ – плотность воздуха; S – ометаемая площадь ротора; V – скорость ветра.



Рис. 4. Комбинированная гибридная ветро-солнечная установка с трехсекционным ротором Дарье и двумя фотоэлектрическими модулями

Fig. 4. Combined hybrid wind-solar power plant with a three-section Darier rotor and two photoelectric modules

Значение крутящего момента вычислялось с использованием моментных коэффициентов,

рассчитанных в модуле Fluid Flow для каждой лопасти за один полный оборот по следующей формуле:

$$M = 0,5(C_{M1} + C_{M2} + C_{M3})\rho S V^2 R, \quad (2)$$

где $C_{M1...3}$ – моментные коэффициенты лопастей ротора; R – радиус ротора.

На рис. 5 приведены примеры эпюр скоростей потока в поперечном сечении ветротурбины диаметром 2 м, полученные в результате моделирования при скорости ветра 10 м/с.

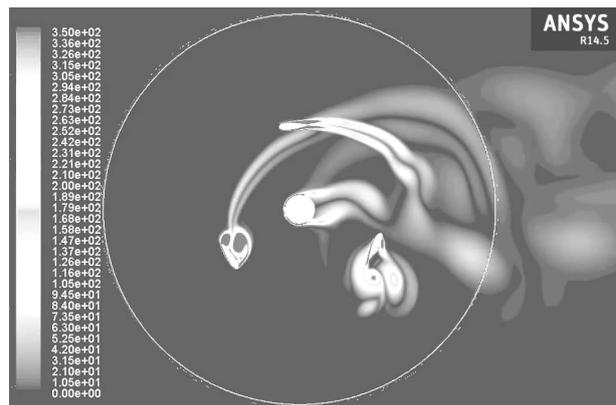


Рис. 5. Эпюры скоростей потока в поперечном сечении ветротурбины при скорости ветра 10 м/с

Fig. 5. Velocity map in the turbine's cross section at 10 m/s of wind speed

В ходе моделирования была определена зависимость коэффициента использования энергии ветра C_p при разных углах установки лопастей ротора. Полученные результаты приведены на сводном графике (рис. 6), из которого следует, что максимальное значение коэффициента использования энергии ветра C_p достигается при установке угла лопастей $\varphi = 3,8^\circ$, в то время как проектное значение данного угла, регламентируемое заводом изготовителем, составляет $7,8^\circ$.

Таким образом, моделирование показало, что в исходном варианте ветроустановка работала на ограниченной мощности. Также было проведено экспериментальное исследование, цель которого заключалась в проверке результатов, полученных при цифровом моделировании. На рис. 7 приведены мощностные характеристики ветроустановки (зависимости мощности от скорости ветра) при угле установки лопастей $3,8^\circ$ и $7,8^\circ$. Теоретические характеристики были построены с использованием формулы мощности:

$$P = 0,5\rho S C_p \eta_r \eta_m V^3, \quad (3)$$

где P – мощность ветроустановки; $\eta_r \eta_m$ – КПД генератора и механической передачи ветроустановки соответственно.

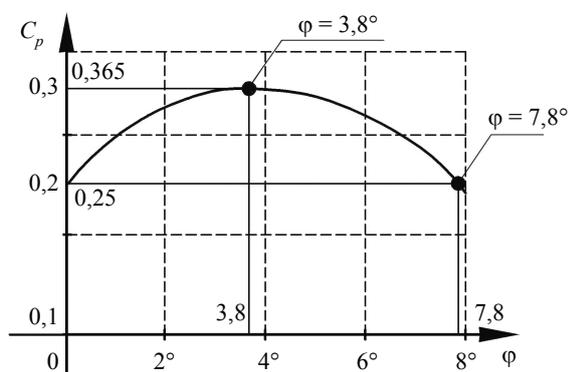


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования C_p от угла установки лопастей ϕ

Fig. 6. Power efficiency C_p as a function of the blade pitch angle ϕ

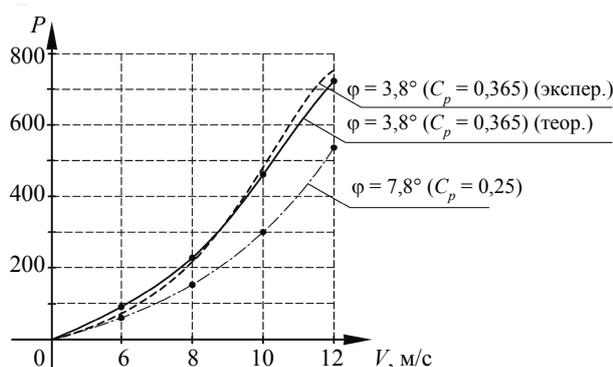


Рис. 7. Мощностные характеристики ветроустановки

Fig. 7. Power curves of the wind turbine

Из характеристики следует, что изменение угла установки лопастей позволило увеличить энергетическую эффективность работы ветроустановки более чем на 30 % практически во всем измеряемом диапазоне скорости ветра.

Для оценки эффективности работы фотоэлектрических модулей комбинированной установки был проведен расчет годовой выработки электрической энергии при различных углах ее установки к горизонту. Расчет был произведен с использованием онлайн-программы PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html).

Результаты расчета показали, что оптимальный угол установки фотоэлектрической установки для г. Севастополя составляет 34° . Из этого следует, что фотоэлектрическая установка также работала на ограниченной мощности вследствие того, что модуль был закреплен под

неоптимальным углом 50° , установленным заводом-изготовителем. На рис. 8 приведены диаграммы годовой энерговыработки для оптимального (34°) и неоптимального (50°) угла.

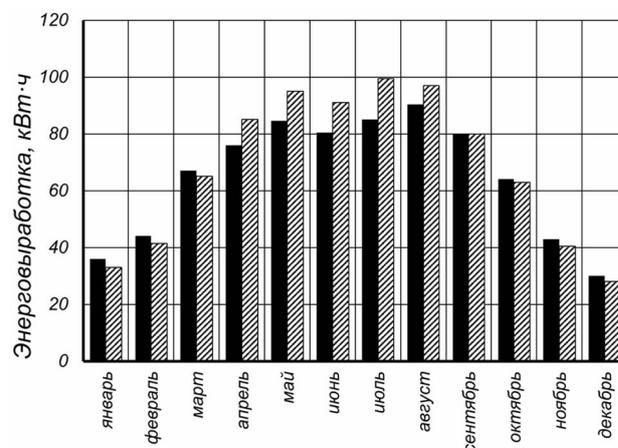


Рис. 8. Диаграмма месячной энерговыработки фотоэлектрических модулей, установленных под углом 34° и 50° к горизонту

Fig. 8. Diagram of monthly energy output of photoelectric modules installed at an angle of 34° and 50° to the horizon

Из диаграммы следует, что при установке угла фотоэлектрических модулей, равного 34° , годовая энерговыработка составляет 817 кВт·ч, а при угле 50° – 783 кВт·ч. Таким образом, изменение угла, позволяет увеличить энерговыработку фотоэлектрической установки на 4,3 %. Из диаграммы также видно, что для еще большего увеличения эффективности требуется в процессе эксплуатации менять угол: в холодный период года устанавливая угол 50° , а в теплый – 34° . Это мероприятие позволит вырабатывать электрической энергии на 6,2 % больше.

Заключение

Таким образом, в статье показаны преимущества использования гибридных установок, работающих от возобновляемых источников энергии, в особенности ветро-солнечных энергетических установок. При этом на примерах показано, что совместить фото- и ветроэлектрическую установку, используя существующие конструкции последних, является нецелесообразным решением по ряду факторов. Однако в настоящее время ведется работа над проектами ветроустановок нового типа, в конструкции которых использование фотоэлектрических преобразователей представляется весьма перспективным решением. Одной из таких установок является гибридная ветро-солнечная установка, разработанная ООО «НТЦ «Солнечная

энергетика», имеющая в своей конструкции поверхность, пригодную для размещения фотоэлектрических модулей. Немаловажным достоинством такого решения является также то, что оно позволяет повысить энергетическую эффективность фотоэлектрических преобразователей за счет интенсификации теплоотвода от поверхности фотоэлементов, что значительно повышает ее суммарные энергетические характеристики и увеличивает выработку тепловой и электрической энергии.

Оценочные расчеты энергетических параметров комбинированной ветро-солнечной установки показывают, что потенциальная годовая выработка энергии на ВЭУ составляет 9000 кВт·ч, а ФЭУ – 817 кВт·ч.

Библиографические ссылки

1. Мингалеева Р. Д., Зайцев В. С., Бессель В. В. Оценка технического потенциала ветровой и солнечной энергетики России // Территория Нефтегаз. 2014. № 3. С. 84–92.
2. Дорофеев В. В., Макаров А. А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 28–34.
3. Микросеть на основе ВИЭ для энергоснабжения сельских территорий / В. В. Харченко, В. Б. Адомавичюс, В. А. Гусаров, Д. С. Стребков // International conference “Energy of moldova – 2012”, Regional aspects of development (October 4-6, Chisinau, Republic of Moldova, 2012). Chisinau, Republic of Moldova, 2012, pp. 562-567.
4. Антипов В. Н., Грозов А. Д., Иванова А. В. Мировая ветроэнергетика мегаваттного диапазона мощностей // Инноватика и экспертиза. 2019. № 2 (27). С. 94–105. DOI: 10.35264/1996-2274-2019-294-105.
5. Прокофьева П. Е., Качалкина К. Г., Буренина И. В. Анализ перспектив развития отрасли возобновляемой энергетики в России // Экономика и предпринимательство. 2018. № 6 (95). С. 40–45.
6. Шилкина С. В. Экономика развития электроэнергетики на возобновляемых источниках энергии в России с учетом мировых тенденций // Вестник гражданских инженеров. 2018. № 3 (68). С. 137–146. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-3-137-146.
7. Кузнецов П. Н., Гусева Е. В., Борисов А. А. Современное состояние и направления развития фотоэлектрических энергоустановок // Энергетические установки и технологии. 2018. № 3. С. 51–57.
8. Beaudin M. Energy storage for mitigating the variability of renewable energy sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 2010, vol. 14, pp. 302-314. DOI: 10.1016/j.esd.2010.09.007.
9. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. *Solar Photovoltaics*, June, 2012, vol. 1, Power Sector Issue 4/5. IRENA, United Arab Emirates June, 2012.
10. Ветро-солнечная система автономного электроснабжения / Г. В. Никитенко, Е. В. Коноплев, А. А. Лысаков, П. В. Коноплев [и др.] // Сельский механизатор. 2018. № 4. С. 28–29.
11. Чижма С. Н., Молчанов С. В., Захаров А. И. Критерии выбора типа ветроустановок для мобильных ветро-солнечных электростанций // Вестник балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия «Физико-математические и технические науки». 2018. № 1. С. 53–62.
12. Соломин Е. В. Масштабируемые гибридные ветро-солнечные установки малой мощности // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 2 (106). С. 49–60.
13. Кузнецов П. Н., Юферев Л. Ю. Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при последовательном подключении // Вестник аграрной науки Дона. 2017. № 37. С. 15–25.
14. Кузнецов П. Н., Юферев Л. Ю. Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при параллельной и смешанной коммутации // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2018. № 8 (200). С. 78–81.
15. Влияние аэрозольного загрязнения атмосферы на работу солнечных приемников / Б. И. Назаров, М. А. Салиев, А. Н. Махмудов, С. Ф. Абдуллаев // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. Душанбе : Президиум Академии наук Республики Таджикистан, 2016, С. 206–213.
16. Савенко А. Е., Османов Э. Ш. Расчет реализуемой мощности и выработки электроэнергии одиночно стоящей ветроустановкой // Вестник казанского государственного энергетического университета. 2019. № 1 (41). С. 68–78.

References

1. Mingaleeva R.D., Zaitsev V.S., Bessel V.V. [Assessment of the technical potential of wind and solar energy in Russia]. *Territoriya Neftegaz*, 2014, no. 3, pp. 84-92 (in Russ.).
2. Dorofeev V.V., Makarov A.A. [Actively adaptive network - new quality of UES of Russia]. *Energoekspert*, 2009, no. 4, pp. 28-34 (in Russ.).
3. Kharchenko V.V., Adomavicius V.B., Gusarov V.A., Strebkov D.S. [The Micro-grid based on renewable energy for power supply in rural areas]. International conference “Energy of moldova – 2012”, Regional aspects of development (October 4-6, Chisinau, Republic of Moldova, 2012). Chisinau, Republic of Moldova, 2012, pp. 562-567 (in Russ.).
4. Antipov V.N., Grozov A.D., Ivanova A.V. [World wind energy megawatt power range]. *Innovatika i ekspertiza*, 2019, no. 2, pp. 94-105 (in Russ.). DOI: 10.35264 / 1996-2274-2019-2-94-105.
5. Prokofiev P.E., Kachalkina K.G., Burenina I.V. [Analysis of the prospects for the development of the renewable energy industry in Russia]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*, 2018, no. 6, pp. 40-45 (in Russ.).
6. Shilkina S.V. [Economics of the development of electric power industry on renewable energy sources in Russia, taking into account global trends]. *Vestnik*

grazhdanskikh inzhenerov, 2018, no. 3, pp. 137-146 (in Russ.). DOI: 10.23968 / 1999-5571-2018-15-3-137-146.

7. Kuznetsov P.N., Guseva E.V., Borisov A.A. [The current state and development directions of photovoltaic power plants]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*, 2018, no. 3, pp. 51-57 (in Russ.).

8. Beaudin M. Energy storage for mitigating the variability of renewable energy sources: An updated review. *Energy for Sustainable Development*, 2010, vol. 14, pp. 302-314. DOI: 10.1016/j.esd.2010.09.007.

9. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. *Solar Photovoltaics*, June, 2012, vol. 1, Power Sector Issue 4/5. IRENA, United Arab Emirates June, 2012.

10. Nikitenko G.V., Konoplev E.V., Lysakov A.A., Konoplev P.V. [Wind-solar autonomous power supply system]. *Sel'skii mekhanizator*, 2018, no. 4, pp. 28-29 (in Russ.).

11. Chizhma S.N., Molchanov S.V., Zakharov A.I. [Criteria for choosing the type of wind turbines for mobile wind-solar power plants]. *Vestnik baltiiskogo federal'nogo universiteta im. I. Kanta. Seriya "Fiziko-matematicheskie i tekhnicheskie nauki"*, 2018, no. 1, pp. 53-62 (in Russ.).

12. Solomin E.V. [Scalable hybrid wind-solar installations of low power]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya*, 2012, no. 2, pp. 49-60 (in Russ.).

13. Kuznetsov P.N., Yuferev L.Yu. [Improving the efficiency of photovoltaic converters in series connection]. *Vestnik agrarnoi nauki Dona*, 2017, no. 37, pp. 15-25 (in Russ.).

14. Kuznetsov P.N., Yuferev L.Yu. [Improving the efficiency of photovoltaic converters in parallel and mixed switching]. *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie*, 2018, no. 8, pp. 78-81 (in Russ.).

15. Nazarov B.I., Saliev M.A., Makhmudov A.N., Abdullaev S.F. [The effect of aerosol pollution on the work of solar receivers]. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadjikistan. Dushanbe : Prezidium Aka-demii nauk Respubliki Tadjikistan*. Dushanbe, 2016, pp. 206-213 (in Russ.).

16. Savenko A.E., Osmanov E.Sh. [Calculation of realized capacity and power generation by a single-standing wind turbine]. *Vestnik kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2019, no. 1, pp. 68-78 (in Russ.).

Hybrid Wind-Solar Power Plants

P.N. Kuznetsov, PhD in Engineering, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

V.V. Cheboxarov, PhD in Engineering, Associate Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

B.A. Yakimovich, DSc in Engineering, Professor, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

The paper gives the analysis of well-known approaches to the creation of hybrid wind-solar power plants. The examples show that the placement of photovoltaic converters on the rotors of wind generators of existing design is an ineffective solution for a number of factors. The design description is presented for the hybrid solar-wind system with a vertical Darier rotor and photovoltaic converters located on a common support structure, which allows to obtain a positive synergistic effect from the use of two renewable energy sources. The advantages of this solution are given, one of which is to increase the energy efficiency of photovoltaic converters due to the intensification of heat removal from the surface of the solar cells by the wind flow from the Darier rotor, the efficient use of the area and the stability of electricity output.

The paper also describes the advantages of using hybrid plants powered by renewable energy sources, in particular, wind-solar installations. Possible ways of reducing the negative consequences caused by the unstable character of electric energy generation by such installations are described.

The results of the work aimed at increasing the energy efficiency of the rotor of the wind turbine and photovoltaic converters by setting the optimal angle of the blades and photovoltaic modules are described. The simulation results show that the maximum value of the wind utilization coefficient is achieved when the blades are installed at an angle of 38°, and the optimal installation angle of the photovoltaic modules for Sevastopol is 34°. The estimated calculations of the energy parameters of the combined wind-solar installation are given.

Keywords: wind-solar plant, wind energy, photovoltaic energetics, renewable energy, hybrid installation.

Получено 02.09.2019

Образец цитирования

Гибридные ветро-солнечные энергетические установки / П. Н. Кузнецов, В. В. Чебоксаров, Б. А. Якимович // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 1. С. 45–53. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-45-53.

For Citation

Kuznetsov P.N., Cheboxarov V.V., Yakimovich B.A. [Hybrid Wind-Solar Power Plants]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 1, pp. 45-53 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-1-45-53.