

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ РАЗНОРОДНОЙ ТРЕХАГРЕГАТНОЙ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Дано сравнение эффективности работы трехагрегатной системы с моноагрегатной во всем диапазоне скоростей ветра. Доказано, что в определенных периодах многоагрегатная установка имеет более высокую эффективность, чем каждое из ветроколес в отдельности.

Ключевые слова: малая ветроэлектрическая установка, моноагрегатная ветроэлектрическая установка, ветроэнергетика



В.А. Бугреев



С.А. Моренко

Возобновляемая энергетика является бурно развивающейся отраслью [1]. Вместе с этим внимание практически не уделяется секции малых ветроэлектрических установок, хотя их перспективы для повышения электровооруженности труда и обеспечения небольших объектов весьма обширны.

Моноагрегатная ветроэлектрическая установка (рис. 1) — ветроэлектрическая установка, имеющая один электрический генератор и одно ветроколесо, связанное с ним напрямую или через механические преобразователи (мультипликаторы).

Многоагрегатная ветроэлектрическая установка (рис. 2) — ветроэлектрическая установка, имеющая один электрический генератор и более одного ветроколеса, связанного с ним напрямую или через механические преобразователи.

Отличие многоагрегатной установки от моноагрегатной в том, что первая имеет несколько устройств для преобразования поступательной энергии ветра в механическую. При этом оба типа установок имеют только один преобразователь механической энергии в электрическую — генератор.

Многоагрегатные ветроэлектрические установки практически не исследуются в настоящее время. Крупные ветроэлектрические установки как правило трехлопастные. Различные варианты реализаций таких установок уже изучены. В настоящее время исследуются возможности точечного улучшения отдельных элементов этих установок.

Можно представить многоагрегатную ветроэлектрическую установку как станцию. В отличие от традиционного представления о ветроэлектрической

Бугреев Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрификация и электроснабжение» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: надежность сложных технических систем. Автор более 70 научных работ, в том числе трех монографий. Имеет 16 патентов на изобретения.

Моренко Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрификация и электроснабжение» Российской открытой академии транспорта Российского университета транспорта (РОАТ РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: системы энергетики. Автор 23 научных работ, в том числе одной монографии. Имеет три патента на изобретение.

Моренко Константин Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ. Область научных интересов: возобновляемая энергетика. Автор 38 научных работ, в том числе одной монографии. Имеет два патента на изобретение.

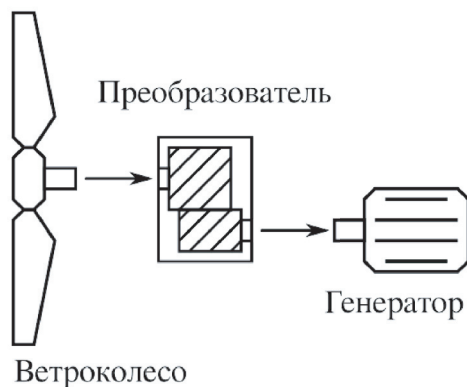


Рис. 1. Поток энергии в моноагрегатной ветроэлектрической установке

станции как наборе однородных установок, разнородная многоагрегатная ветроэлектрическая установка содержит разные типы ветроколес. Это ключевое отличие изменяет энергетическую характеристику станции или установки как целого.

Общая эффективность установки складывается из нескольких частей

$$\eta_{\text{уст}}(v) = \eta_{\text{кол}}(v) \eta_{\text{пр}}(n) \eta_{\text{ген}}(n), \quad (1)$$

где $\eta_{\text{кол}}(v)$ — эффективность ветроколеса в зависимости от скорости ветра;

$\eta_{\text{пр}}(n)$ — эффективность преобразователя в зависимости от частоты вращения вала ветроколеса;

$\eta_{\text{ген}}(n)$ — эффективность генератора в зависимости от частоты вращения вала.

При сравнении моноагрегатных и многоагрегатных установок возникают вопросы: как соотносятся энергетические характеристики разнородной многоагрегатной ветроэлектрической установки и моноагрегатной ветроэлектрической установки соизмеримых параметров? Есть ли преимущества у разнородной установки и при каких внешних условиях они наблюдаются?

Цель исследования

Сравнить эффективность работы трехагрегатной системы с моноагрегатной во всем диапазоне скоростей ветра.

Материалы и методы

В первую очередь нужно определить понятие эффективности. В разных трудах [2] эффективность рассматривается с разных сторон. Эффективность

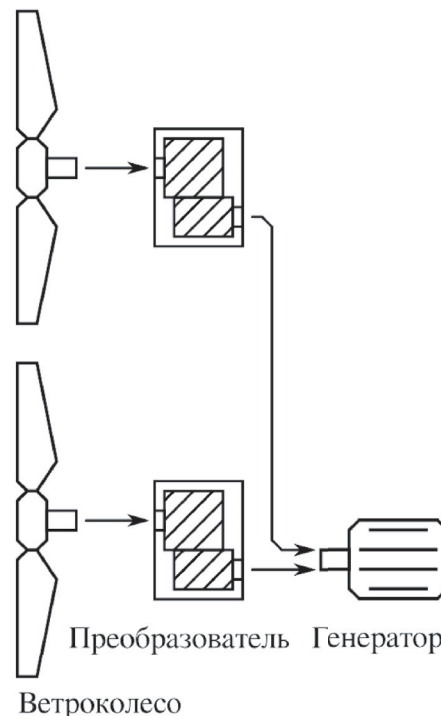


Рис. 2. Поток энергии в многоагрегатной ветроэлектрической установке

должна представлять собой относительный показатель, поскольку иначе сравнение даже незначительно отличающихся друг от друга установок станет искаженным их различиями. Эффективность чаще всего представляет собой отношение значимого показателя результатов работы к базовому показателю.

Значимым показателем результатов выступает чаще всего натуральное или стоимостное выражение основного продукта. В случае с ветроустановкой основным продуктом является электрическая энергия, а значимым показателем — количество электрической энергии за год. В качестве периода выбран год, поскольку это наименьший интервал, за который ветер имеет устойчивую повторяемость.

Список базовых показателей значительно шире [3;4]: стоимость установки, материалоемкость (вес), эксплуатационные затраты, даже энергетические затраты на производство [5]. Стоимость установки должна быть распределена на весь срок эксплуатации, поэтому в качестве базового показателя для годового расчета используют годовую амортизацию.

Экономическая эффективность является важным показателем при организации производства, но тре-

бует большого количества дополнительных расчетов. В инженерной практике чаще оперируют теоретически достижимыми результатами, в нашем случае это полный потенциал энергии ветра. Необходимый нам показатель эффективности — отношение энергии, полученной от ветроустановки, к полной энергии ветрового потока, который прошел через ветроколесо. Тогда показатель эффективности можно выразить формулой

$$k = \frac{W_{\text{уст}}}{W_{\text{ветра}}}, \quad (2)$$

где $W_{\text{уст}}$ — энергия, вырабатываемая установкой за год, Вт · ч;

$W_{\text{ветра}}$ — энергия ветра, проходящего через ометаемую ветроустановкой площадь, Вт · ч.

Ветроустановка работает не в абстрактном диапазоне ветров, а в конкретном регионе, поэтому распределение скоростей ветра оказывает прямое влияние на количество вырабатываемой электрической энергии. Используем средние скорости ветра от 2 до 6 м/с с шагом в 1 м/с. Эти скорости ветра покрывают весь диапазон средних скоростей ветра на территории России. Используется распределение Рэлея для скоростей ветра [6], когда вероятность каждой скорости ветра задается уравнением

$$p(v, \sigma) = \frac{v}{\sigma^2} e^{-\frac{v^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где v — рассчитываемая скорость ветра, м/с;

σ — параметр, равный:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{\pi}} v_{\text{сред}}, \quad (4)$$

где $v_{\text{сред}}$ — средняя скорость ветра, м/с.

Количество часов для каждой скорости ветра определяется тривиально

$$T(v, v_{\text{сред}}) = T \cdot p(v, v_{\text{сред}}), \quad (5)$$

где T — количество часов в рассматриваемом периоде, ч.

Мощность ветрового потока для каждой скорости ветра

$$P(v) = \frac{\rho v^3}{2}, \quad (6)$$

где ρ — плотность воздуха, кг/м³.

Тогда количество энергии, переносимое ветром на каждой скорости ветра, составит

$$W(v, v_{\text{сред}}) = P(v) T(v, v_{\text{сред}}). \quad (7)$$

Моделирование ветроколеса изучается давно. Разработаны как достаточно простые модели, описы-

вающие только общие закономерности, так и довольно сложные модели, учитывающие множество факторов [7–10]. Общей проблемой сложных моделей является требование множества параметров. Многие параметры трудно получить. Они являются индивидуальными характеристиками конкретных типов и, что самое важное, размеров ветроколес. Этот факт делает их непереносимыми даже между однотипными ветроколесами. В нашем случае более важно установить общую закономерность между моноагрегатной и многоагрегатной установкой. Детальное повышение эффективности будет проводиться с помощью других более подробных исследований.

В качестве ветроколес для обоих видов установок по ряду причин используются нерегулируемые ветроколеса подъемного типа. Ветроколеса подъемного типа обладают самой высокой эффективностью среди всех существующих ветроколес [11;12]. Есть предложения ряда изобретателей [13;14], но эффективность этих ветроколес недостаточно широко изучена. Регулирование ветроколес не рассматривается из-за высокой стоимости и неэффективности регулятора для ветроколес мощностью менее 10 кВт.

Моделирование характеристики ветроколеса сводится к представлению ее в виде треугольной характеристики (рис. 3). Это позволяет упростить модель для оценочных расчетов типов ветроколес. Характеристика конкретного ветроколеса может быть подставлена в соответствующий блок.

В символьном виде эта характеристика имеет следующий вид

$$C_p = \begin{cases} 0 & \text{при } v \leq v_{\text{ст}} \\ k(v - v_{\text{ст}}) & \text{при } v_{\text{ст}} < v \leq v_{\text{раб}} \\ C_{p\text{мах}} - k(v - v_{\text{раб}}) & \text{при } v_{\text{раб}} < v \leq v_{\text{откл}} \\ 0 & \text{при } v > v_{\text{откл}} \end{cases}. \quad (8)$$

где v — расчетная скорость ветра, м/с;

$v_{\text{ст}}$ — стартовая скорость ветроколеса, м/с;

$v_{\text{раб}}$ — рабочая скорость ветроколеса, м/с;

$v_{\text{откл}}$ — скорость отключения ветроколеса, м/с;

$C_{p\text{мах}}$ — эффективность ветроколеса на рабочей скорости ветра, м/с;

k — коэффициент наклона кривой, равный :

$$k = \frac{C_{p\text{мах}}}{v_{\text{раб}} - v_{\text{ст}}}. \quad (9)$$

Ветроколесо работает с конкретным генератором электрической энергии. КПД генератора зависит от его частоты вращения и отбираемой мощности. Упростим модель и оставим только зависимость от частоты вращения. Предположим, что все ветроколеса согласованы с генераторами с помощью мульт-

типликаторов, чтобы на номинальной скорости ветра частота вращения вала генератора соответствовала номинальной.

Этот факт позволяет нам установить линейную связь между скоростью ветра от стартовой до номинальной и частотой вращения вала генератора. В этом диапазоне ветроколесо работает с максимальной быстроходностью. С увеличением частоты вращения вала свыше номинальной эффективность генератора будет падать. Следует так же учесть, что КПД генератора резко снижается при низких частотах вращения. В [15] приведена конструкция генератора на постоянных магнитах, который имеет расширенный диапазон рабочих частот вращения. Его характеристика представлена на рис. 4.

Результаты и обсуждение

Чтобы результаты были сопоставимыми, ометаемая площадь во всех установках должна быть одинаковой. Каждое ветроколесо в моноагрегатной установке будет ометать площадь в 1 м^2 . Ветроколеса в многоагрегатной установке будут ометать площадь в $0,33 \text{ м}^2$ каждое. Рабочие скорости ветра и соответствующие им эффективности приведены в табл. 1.

Для каждого из диапазонов скоростей ветра была построена характеристика распределения по формуле (3) и определены соответствующие количества пере-

носимой энергии по формуле (7). Пример такого распределения приведен на рис. 5.

При расчете многоагрегатной установки было произведено суммирование энергии с учетом КПД суммирования 80%. В данном случае не рассматривается связь с частотой вращения вала генератора, поскольку она требует дополнительного уровня сложности. В случае отрицательного результата на этапе предварительной оценки дальнейшие рассмотрения этой модели будут бессмысленными.

Многоагрегатная ветроустановка ни в одном из режимов не имеет эффективности выше одиночного ветроколеса одинаковой ометаемой площади (табл. 2). Это же означает, что количество вырабатываемой электрической энергии будет ниже.

Эти расчеты будут справедливы в том случае, если рассматривать годовую среднюю скорость ветра. Если сузить диапазон до 4 дней, то результаты будут выглядеть иначе, поскольку в этом случае распределение превращается в нормальное.

В определенных периодах многоагрегатная установка имеет более высокую эффективность, чем каждое из ветроколес в отдельности. На практике это означает, что поступление энергии от нее является более равномерным по скоростям ветра.

Факт равномерности поступления энергии может показаться незначительным. Он приобретает особое

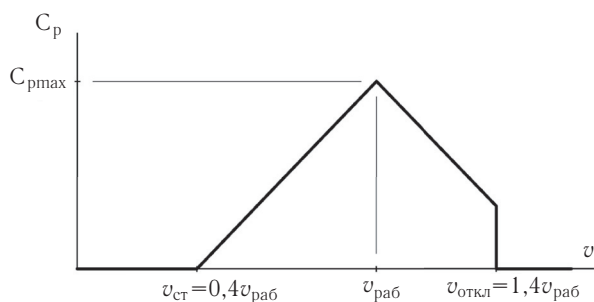


Рис. 3. Треугольная характеристика

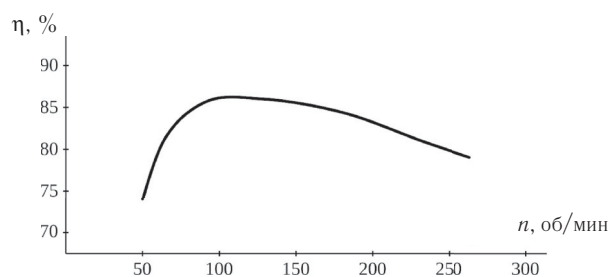


Рис. 4. КПД генератора

Таблица 1

Параметры ветроколес

Тип ветроколеса	Рабочая скорость ветра, м/с	Эффективность на рабочей скорости ветра (максимальная)
Двухлопастное	9	0,47
Трехлопастное	6	0,40
Ротор Дарье	4	0,36

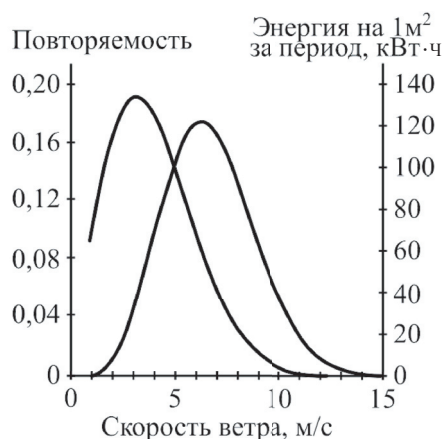


Рис. 5. Пример распределения повторяемости при средней скорости ветра 4 м/с и количество энергии, протекающее через 1 м² в течение года

значение в свете балансировки поступления и потребления энергии с помощью аккумуляторных батарей. Более стабильное поступление энергии позволяет значительно уменьшить емкость аккумуляторных батарей, которые составляют значительную долю расходов на эксплуатацию установки.

Использование накопителей электрической энергии для ветроэлектрических станций является обяза-

тельным из-за неравномерности поступления энергии ветра. Преимущества балансировки поступления и потребления энергии при использовании аккумулятора уравниваются снижением эффективности системы за счет прохождения энергии через еще один элемент. Возможности использования этой системы с аккумуляторами требуют дополнительного рассмотрения.

При использовании более эффективного ветроколеса количество часов его работы в году снижается. Вместе с этим количество вырабатываемой энергии остается примерно на том же уровне. Это означает, что аккумулятор будет работать в режиме более быстрой зарядки, что приведет к более низкому КПД. Этот же факт отразится на сроке службы аккумулятора.

Выводы

Многоагрегатная установка не имеет преимуществ по количеству электрической энергии при соизмеримых размерах ветроколес. Использование же в контексте аккумуляторной ветроэлектрической станции может оказаться выгодным: более равномерное поступление энергии увеличивает срок службы аккумулятора и снижает потери в нем. Эти возможности требуют дополнительного рассмотрения и оценки технической и экономической перспективы такой конструкции. 

Таблица 2

Показатели эффективности по среднегодовым скоростям ветра

Средняя скорость ветра, м/с	Моно двухлопастная	Моно трехлопастная	Моно типа Дарье	Многоагрегатная
2	0,00414	0,06115	0,07614	0,03771
3	0,05172	0,15486	0,06501	0,07242
4	0,13343	0,15535	0,03472	0,08627
5	0,17474	0,11197	0,01716	0,08103
6	0,16688	0,07203	0,00872	0,06604

Литература

1. Марцинкевич Б. Развитие ВИЭ энергетики в России: первые результаты и кадровые перспективы. URL: <http://geoenergetics.ru/2019/09/27/razvitie-vie-energetiki-v-rossii/> (дата обращения: 12.06.2020).
2. Моренко, К.С. Модель мощности малой ветроэлектрической установки / К.С. Моренко, С.А. Моренко // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. — 2020. — Т.67, № 1(38). — С. 60–63. DOI: 10.22314/2658-4859-2020-67-1-60-63
3. Винников, А.В. К расчёту экономического потенциала ветровой энергетики и выбора ветроэлектрических установок / А.В. Винников, Е.А. Денисенко, А.О. Хицкова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2016. — № 115. — С. 1311–1323.
4. Вийтович, О.И. Коэффициент эксплуатационной надёжности как показатель эффективности ветроустановок на стадии проектирования / О.И. Вийтович // Ученые записки Забайкальского государственного университета. — 2014. — № 3(56). — С. 6–14.
5. Безруких, П.П. Эффективность возобновляемой энергетики. Мифы и факты / П.П. Безруких // Вестник аграрной науки Дона. — 2015. — № 1(29). — С. 5–17.
6. Николаев, В.Г. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России / В.Г. Николаев, С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов. — М.: Издательство «Атмограф», 2007.
7. G. Li, F. Yang, B. Du, J. Xu, M. Liu. Design and modelling of wind wheel of wind mill based on MATLAB and Pro/E / Journal of Machine Design. 2009. #6.
8. C. Fu, Y. Wang. Research of 3D finite element modelling on wind wheel blade of wind power generator / Journal of Machine Design. 2009. #9.
9. Цгоев, Р.С. Математическое моделирование аэродинамических характеристик ветроколеса / Р.С. Цгоев // Электротехника. — 2009. — № 11. — С. 47–52.
10. Черников, В.Г. Оценка энергоэффективности работы ветроустановки в режиме максимальной мощности с использованием спектральной модели ветра Ван дер Ховена / В.Г. Черников // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. — 2014. — № 2(26). — С. 78–84.
11. Моренко, К.С. Выбор типа ветроэлектрического агрегата для автономного электроснабжения фермерского хозяйства / К.С. Моренко, С.А. Моренко // Электротехнологии и электрооборудование в сельскохозяйственном производстве: Сборник научных трудов ФГБОУ ВПО АЧГАА. Вып. 8. Т. 1. — Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2011. — С. 20–24.
12. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 392 с.
13. Pat. WO 2009/067210 A1, B63H1/26; High efficiency turbine and method of generating power / Sauer C., McGinnis P., Yatskar I., Firebaugh M. Publication date: 2009.05.28.
14. Пат. 2059109 Российская Федерация, МПК6 F 03 D 7/02A. Ветродвижитель / С.А. Никонов, Л.И. Терентьев; заявитель и патентообладатель Научно-производственная фирма «Ветэн» — №93012591/06; заявл. 09.03.1993; опубл. 27.04.1996.
15. Azeem Khan M., Pillay P. Design of a PM wind generator, optimised for energy capture over a wide operating range // Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference. 2005. DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195919