

ПОТЕРИ И РЕАЛЬНЫЙ КПД ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЕВОЙ ВЕТРОТРУБИНЫ
ГОРИЗОНТАЛДЫК СЫЗЫКТУУ ШАМАЛ ТУРБИНАСЫНЫН ЖОГОТУУЛАРЫ ЖАНА
РЕАЛДУУ ПАЙДАЛУУ АРАКЕТ КОЭФФИЦЕНТИ
LOSSES AND REAL EFFICIENCY OF THE HORIZONTAL-AXIAL WIND TUBE

Белеков Т.Э. – к.т.н., доцент, ЖАГУ
Султаналиева К. К. – преподаватель, ЖАГУ
Жуманалиева М. У. – аспирант, ЖАГУ

Аннотация: В статье рассмотрены проблемы и перспективы развития ветроэнергетики в Кыргызской Республике. Проведен расчет потерь и коэффициент полезного действия горизонтально-осевой ветротурбины.

Аннотация: Макалада Кыргыз Республикасындагы шамал энергетикасынын көйгөйлөрү жана өнүгүү келечеги каралды

Annotation: Problems and perspectives of wind energy development in the Kyrgyz Republic are considered in the article. The calculation of losses and the efficiency of a horizontal axial wind turbine are carried out.

Ключевые слова: ветер, солнечная энергия, ветроэнергетическая установка, аэродинамическая труба, коэффициент, энергоресурс, кинетическая энергия

Ачык сөздөр: шамал, күн энергиясы, шамалэнергетикалык орнотмолору, аэродинамикалык трубалар, коэффициент, энергия ресурстары, кинетикалык энергия

Key words: wind, solar energy, wind power plants, wind tunnel, coefficient, energy resource, kinetic energy

На первый взгляд ветер кажется самым доступным из возобновляемых источников энергии. В самом деле: не в пример Солнцу, он вполне "работоспособен" на юге и на севере, зимой и летом, днем и ночью, в дождь и туман. Однако на этом все достоинства и кончаются; дальше, увы, - сплошные недостатки... Прежде всего, это очень рассеянный энергоресурс. Природа не собрала ветры в каких-то отдельных "месторождениях", подобно горючим ископаемым. И не пустила их течь по руслам, подобно рекам. Всякая движущаяся воздушная масса "размазана" по огромной территории. Правда, рассеянность, малая концентрация характерна и для солнечной энергии. Но с ветром еще хуже. Его основные параметры - скорость и направление - меняются гораздо быстрее, в более широких пределах и совершенно непредсказуемо. В итоге по надежности он почти везде уступает Солнцу. Отсюда и вытекают две главные проблемы проектирования ветроэнергетических установок (ВЭУ) [2, 3, 8,9,10,11].

Во-первых, с учетом рассеянности ветра стремятся "снимать" его кинетическую энергию с максимальной площади. Что имеется в виду? Для ВЭУ обычной конструкции (ветровое колесо на горизонтальной оси) - это площадь круга, который описывают лопасти при вращении; у специалистов она называется сметаемой площадью. Отсюда вроде бы следует, что диаметр колеса (длину лопастей) надо всячески наращивать. И действительно: известны проекты гигантских ВЭУ с диаметром ветроколеса до 120 м. Но для таких габаритов сильные ветры, в принципе более "выгодные", становятся уже нежелательными - из соображений безопасной эксплуатации. К тому же, рассчитывая прочность, тут приходится дополнительно страховаться даже от маловероятных ураганных порывов и тем еще больше утяжелять громоздкую конструкцию. Путь явно тупиковый.

Во-вторых, еще важнее добиться равномерности, постоянства ветрового потока на лопастях. Ведь в конечном счете качество электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, определяется именно стабильностью момента вращения и угловой скорости на валу ее генератора. Но если предыдущая проблема решается хотя бы до известного предела, то эта пока не решается никак [2,3, 8, 9, 10, 11].

Общий вывод, видимо, ясен: нужна установка принципиально новой конструкции. Нашупать подходы к ней помогут несложные математические изыскания. Посмотрим, от каких основных параметров зависит энергетическая эффективность ВЭУ.

Как известно, кинетическая энергия движущегося тела [5,6]:

$$W = mV^2 / 2$$

Если речь идет о воздушном потоке, то V , естественно, и есть его скорость. С массой m чуть сложнее. В данном случае берется масса объема воздуха, проходящего через ОП в единицу времени. Значит,

$$m = \rho SV$$

где ρ - плотность воздуха, S - ОП, V - та же скорость ветра. И тогда исходное выражение принимает вид

$$W = \rho SV^3 / 2$$

Это величина энергии в единицу времени, по сути - мощность. Итак, значение W определяется двумя переменными - S и V . Как в принципе можно ее увеличить? Если за счет S , то придется смириться с неизбежным ростом габаритов и массы ВЭУ.

Но из полученной формулы виден и другой порок такого "лобовного" подхода: ВЭУ связана с площадью S прямо пропорционально, линейно. Зато влияние скорости V гораздо сильнее - зависимость тут уже кубическая. Насколько важна эта разница, поясним на примере.

Допустим, нам удалось каким-то путем удвоить величину V . Понятно, что мощность воздушного потока на лопастях возрастет в 8 раз. И если теперь мы решим сохранить прежнюю мощность установки, то сможем соответственно уменьшить ОП ветрового колеса. Тогда его диаметр (то есть, в первом приближении, и остальные линейные размеры ВЭУ) сократился бы в корень кубический из $8 = 2,83$ раза. Если же сумеем увеличить V втрое, выиграем в габаритах более чем в 5 раз (корень кубический из 27), и т.д.

Что ж, ускорить ветер в принципе нетрудно: нужно загнать его в некое подобие аэродинамической трубы, попросту говоря - в сужающийся канал. В нем, как известно, скорость потока растет обратно пропорционально площади сечения. А общий коэффициент ускорения равен отношению площадей входного и выходного отверстий. Даже для обычных ВЭУ уже разработаны подобные устройства - так называемые конфузоры, или дефлекторы. Смысл их применения в том, что они собирают ветер с гораздо большей площади, чем ОП.

Но почему, ступив на верный путь, конструкторы не пошли по нему дальше? Сделаем входное сечение конфузора переменным - и сразу решим ту, "нерешаемую", проблему - поддержания постоянной скорости потока на лопастях независимо от капризов ветра! Проще всего тут применить поворотное воздухозаборное устройство (ВУ). Легко понять, что его эффективное сечение максимально в направлении "фордевинд" и уменьшается при отклонении в любую сторону. Причем такое ВУ способно ловить ветер со всех румбов, и потому остальные элементы можно сделать неподвижными, да и смонтировать прямо на земле, что гораздо удобнее.

Коэффициент полезного действия без потерь по [1]

$$\eta = 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - 2\mu \left(\frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right). \quad (1)$$

В (1) необходимо учесть концевые потери, происходящие за счет образования вихрей, сходящих с концов лопастей. Часть этих потерь учитывается при выводе идеального коэффициента использования энергии ветра C_{PI} , а неучтенную часть рассчитывают по формуле

$$\eta = \frac{e}{1-e} \left[\frac{\sqrt[8]{1 + \left(\frac{1-e}{Z} \right)^2}}{(1+e)iZ} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{iZ}{\pi \left(1 - \frac{e}{2} \right)} \right)^2}} \right]. \quad (2)$$

Кроме вихревых потерь существуют также профильные потери, возникающие как следствие трения воздушных струй о поверхности лопастей. Эти потери зависят только от профиля лопастей.

Для элементарных лопастей длиной dr на радиусе r мощность профильных потерь

$$dP_{cp} = iC_p b dr \rho v v^2 / 2 \quad (3)$$

где C_p – коэффициент профильного сопротивления, который для крыла бесконечного размаха равен C_x , т.е. $C_p = C_x$.

Поскольку $C_x = \mu C_\gamma$, то $C_p = \mu C_\gamma$. Подставляя это значение C_p и соотношение $v = (V - v_1) \sqrt{1 + Z_u^2}$ (3), получаем

$$dP_{cp} = ibC_\gamma \mu dr \frac{\rho}{2} (V - v_1)^3 (1 + Z_u^2) \sqrt{1 + Z_u^2}. \quad (4)$$

где $ibC_\gamma = 8\pi \frac{e}{(1+e)(1-e)^2 (Z_u + \mu) \sqrt{1 + Z_u^2}}$.

После подстановки комплекса ibC_γ и преобразования (4) имеем

$$dP_{i\partial} = 4\pi \frac{e}{(1+e)(1-e)^2 (Z_u + \mu) \sqrt{1 + Z_u^2}} \mu dr \rho (V - v_1)^3 (1 + Z_u^2) \sqrt{1 + Z_u^2}.$$

$$\text{или } dP_{i\partial} = \frac{4\pi dre}{(1+e)(1-e)^2} \rho (V - v_1)^3 (1 + Z_u^2) / (\sqrt{Z_u + \mu}) \mu. \quad (5)$$

Учитывая соотношения

$$R = ZV / \Omega, \quad dr = (V / \Omega) dZ, \quad Z_u = \frac{Z}{1-e}$$

и отбрасывая в знаменателе (5) μ как малую величину по сравнению с Z_u получаем

$$dP_{i\partial} = 4\pi \frac{V^2}{\Omega^2} Z dZ \frac{e}{(1+e)(1-e)^2} \rho V^3 (1-e)^3 \frac{1 + \frac{Z^2}{(1-e)^2}}{\frac{Z}{1-e}} \mu,$$

$$\text{или } dP_{i\partial} = 4\pi \rho \frac{V^5 e (1-e)^2}{\Omega^2 (1+e)} \mu \left(1 + \frac{Z^2}{(1-e)^2} \right) dZ. \quad (6)$$

Интегрируя (6) в пределах от 0 до Z, находим профильные потери всей ветротурбины

$$D_{i\partial} = 4\pi \rho \frac{V^5}{\Omega^2} \frac{e(1-e)^2}{1+e} \int_e^Z \mu \left(1 + \frac{Z^2}{(1-e)^2} \right) dZ = \pi R^2 \frac{\rho V^3}{2} \frac{4e(1-e)^2}{1+e} \frac{V^2}{\Omega^2 R^2} 2\mu \left(Z + \frac{Z^3}{3(1-e)^2} \right); \quad (7)$$

где $\mu = C_x / C_\gamma$ - средняя величина всей лопасти.

Поскольку $\frac{4e(1-e)}{1+e} = C_{pi}$ и $V/(\Omega R) = 1/Z$, то, подставив значения этих соотношений в

(7) и разделив его на $\pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} C_{pi}$, получим окончательную формулу профильных потерь в

$$\text{безразмерном виде: } \bar{P}_{i\partial} = \frac{P_{i\partial}}{\pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} C_{pi}} = 2\mu \left[\frac{1-e}{Z} + \frac{Z}{3(1-e)} \right]. \quad (8)$$

Вследствие кручения струи за ветротурбиной возникают потери от тангенциальных скоростей уходящей струи. Эти потери могут быть вычислены для всех элементарных

струй в пределах от r_0 до R по формуле $P_T = \int_{r_0}^R (2\pi r dr \rho V) \frac{u_2^2}{2}. \quad (9)$

Заменяя в (9) u_2 на $2u_1$, получаем соотношения

$$\frac{u_1}{V} = \frac{e}{1+e} \frac{1-\mu Z_u}{Z_u + \mu} = \frac{e}{1+e} \frac{1-\mu Z_u}{\left(1 + \frac{\mu}{Z_u}\right) Z_u}, \quad Z_u = \frac{Z}{1-e}, \quad \eta = \frac{1-\mu Z_u}{1 + \frac{\mu}{Z_u}}. \text{ Имеем } u_1 = \frac{e}{Z} \frac{1-e}{1+e} \eta V,$$

$$u_2 = 2u_1 = \frac{2e}{Z} \frac{1-e}{1+e} \eta V, \text{ откуда } u_2 = \frac{V}{2Z} C_{pi} \eta, \text{ или } u_2 = \frac{V}{2Z} \frac{R}{r} C_{pi} \eta. \quad (10)$$

Подставляя в (10) значение u_2 из (9), определяем

$$P_T = \int_{r_0}^R \pi r dr \rho V^3 \frac{R^2}{r^2} \frac{C_{pi}^2 \eta^2}{4Z^2}.$$

Вынеся постоянные за знак интеграла и заменив η некоторым его значением η_1 , средним для всего радиуса r , получаем

$$P_T = \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \frac{C_{pi}^2 \eta_1^2}{2Z^2} \int_{r_0}^R \frac{dr}{r} = \pi R^2 \rho \frac{V^3}{2} \frac{C_{pi}^2 \eta_1^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0}.$$

Делением обеих частей этого неравенства на мощность идеального ветряка

$P_1 = \pi R^2 \frac{\rho V^3}{2} C_{pi}$ находим относительную величину потерь на кручение струи за

ветротурбиной $P_t = \frac{C_{pi} \eta_1^2}{2Z^2} \ln \frac{R}{r_0}.$

Необходимо рассчитать еще потери, происходящие из-за неполного использования всей ометаемой площади. Они учитываются введением сопротивления $(r_0 / R)^2$.

Таким образом, полезную мощность ветротурбины получаем, вычитанием рассмотренные потери из мощности идеального ветряка:

$$P = P_i \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - P_j - P_{i\partial} - P_T. \quad (11)$$

Делением (11) на P_i , получаем $\frac{P}{P_i} = 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \frac{P_j}{P_i} - \frac{P_{i\partial}}{P_i} - \frac{P_T}{P_i}$,

$$\text{откуда } P = P_i \left[\left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - \bar{P}_j - \bar{P}_{i\partial} - \bar{P}_T \right]. \quad (12)$$

Разделив правую и левую части (12) на соотношение для энергии ветра $\pi R^2 \rho V^3 / 2$, имеем коэффициент использования энергии ветра реального ветряка

$$C_p = C_{pi} \left[\left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - \bar{P}_j - \bar{P}_{i\partial} - \bar{P}_T \right]. \quad (13)$$

И, наконец, с учетом того, что $C_p = C_{pi} \eta$, находим окончательное выражение для коэффициента полезного действия η ветротурбины в относительных единицах:

$$\eta = 1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \bar{P}_j - \bar{P}_{i\partial} - \bar{P}_T. \quad (14)$$

Как показывают простейшие расчеты, стоит поставить несколько лишних ВУ да немного увеличить их диаметр - и мы быстро подойдем к пределу возможностей даже авиационных турбин. То есть данное условие само по себе определяет число и размеры ВУ проектируемой установки вряд ли больше 10. Правда, тут важен и еще один фактор - среднегодовая скорость ветра в данном районе, его, так сказать, ветрообеспеченность. Если этот показатель меньше тех же 5 м/с, то для стабильной работы генератора может понадобиться и более 10 воздухопроводов. Чтобы оценить целесообразность такого решения, понадобятся, конечно, детальные исследования и расчеты, в том числе экономические. Но даже приближенные оценки говорят, что подумать есть над чем.

Список использованной литературы:

1. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Книга 1. Ветроэлектрогенераторы. –Х.: ХАИ. 2003
2. Астахов О.Е., Титов Г.В., Гейко С.П. Опыт эксплуатации стеклопластиковых лопастей для ветроагрегатов. //Тез.докл. III Междунар. конф. «Нетрадиционная энергетика в XXI веке» 9-15 сент. 2002г., г. Сулак. –С. 115-117.
3. Конечников А.Е., Шмидт Г.Б. Ветровой проект века Миддельгруденская ВЭС // Электропанорама. -2001. -№12. –С. 54-55.
4. Янукович В. Ф., А. А. Минаев Перспективы большой ветроэнергетики// Энергетика и электрификация. - 2000. - № 5. - С. 1 - 6.
5. Голубенко Н.С., Цыганов В.А. Опыт разработки, создания и экспериментальной отработки ветроэлектрических агрегатов средней мощности в ГKB «Южное» //Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразователи энергии. -1997. -№1. с, 23-24.
6. Малышев Н.А. Лятхер В.М. Ветроэлектрические станции. –М.: Энергоатомиздат, 1988. -165с.

7. Абрамовский Е.Р., Городько С.В., Свиридов Н.В. Аэродинамика ветродвигателей. – Днепропетровск: Издательство Днепропетровского государственного университета. 1987. 219с.
8. Мировая энергетика: прогноз развития до 2020 года/Пер. с англ. под ред. Ю.Н.Старшинова. – М.: Энергия, 1980. – 256 с.
9. Лазарев П.П. Энергия, ее источники на Земле и ее происхождение. –Госэнергоиздат. - 1947.
10. Шидловский А.К., Лищенко А.И., Резцов В.Ф. Проблемы преобразования энергии ветроэлектрических установок//Техническая электродинамика. -1993. -№3. –С. 41-45.
11. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. –М.: Энергоатомиздат, 1983. -193с.