

ПАРУСНЫЕ, ЛОПАСТНЫЕ И РОТОРНЫЕ ВЕТРОУСТАНОВКИ

Лопастная ветроустановка состоит из следующих основных элементов (рис. 13.1): 1 – ветроколесо; 2 – регулятор установки лопастей ветроколеса, который обеспечивает изменение угла поворота лопасти пропорционально изменению скорости ветра и вывод лопастей во флюгерное положение (отключение агрегата) при достижении аварийной скорости ветра; 3 –

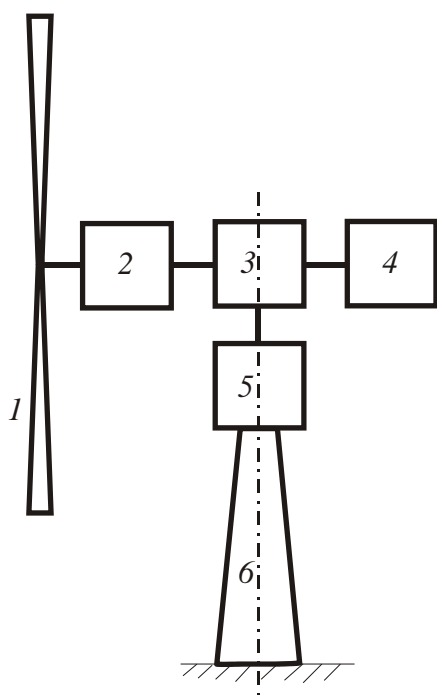


Рис. 13.1.

Структурная схема

редуктор, который обеспечивает необходимую частоту вращения ротора генератора; 4 – электрический генератор; 5 – механизм поворота оси ветроколеса параллельно ветровому потоку; 6 – опора.

Одним из наиболее важных показателей работы ветроустановки является ее мощность:

$$N = N_{\text{вп}} \eta,$$

где $N_{\text{вп}} = \frac{1}{2} \rho v^3 S = \frac{\pi}{8} \rho v^3 D^2$ – мощность

ветрового потока, Вт; S – ометаемая площадь ветроколеса, м^2 ; D – диаметр ветроколеса, м;

$\eta = \xi_i \eta_a \eta_m \eta_{\text{пр}}$ – КПД ветровой установки; ξ_i –

коэффициент использования энергии ветра идеальным ветроколесом, который представляет собой отношение мощности идеального ветроколеса (т. е. при отсутствии

аэродинамических потерь) к мощности ветрового потока, проходящего через сечение,

равное ометаемой площади ветроколеса; η_a – коэффициент аэродинамических потерь в ветроколесе; η_m – коэффициент механических потерь (редуктор, подшипник); $\eta_{\text{пр}}$ – коэффициент потерь в системе преобразования энергии после редуктора.

Крыльчатые ветродвигатели также характеризуются коэффициентом

быстроходности, который равен отношению окружной скорости конца лопасти u к скорости ветра v :

где ω – угловая частота вращения ветроколеса; R – радиус ветроколеса.

Основным параметром, определяющим эффективность любой ветроустановки, является коэффициент использования энергии ветрового потока

$$Z = \frac{u}{v} = \frac{\omega R}{v},$$

где ω – угловая частота вращения ветроколеса; R – радиус ветроколеса.

Основным параметром, определяющим эффективность любой ветроустановки, является коэффициент использования энергии ветрового потока

$$\xi_i = \frac{2N_{\text{ВЭУ}}}{S\rho v^3}.$$

Рассмотрим поверхность площадью S , поставленную перпендикулярно к направлению ветра. Воздушный поток вследствие торможения его поверхностью получит подпор, будет обтекать ее и производить давление силой F . Вследствие действия этой силы поверхность будет перемещаться в направлении потока с некоторой скоростью u (рис. 13.2).

Мощность N , получаемая пластиной, определяется из выражения

$$N = F u = S \frac{\rho}{2} (v - u)^2 u.$$

Уравнение для определения коэффициента использования энергии имеет вид:

$$\xi_i = \frac{u}{v} \left(1 - \frac{u}{v} \right)^2 = e(1 - e)^2,$$

где $e = u/v$ – коэффициент торможения.

Из уравнения видно, что ξ_i зависит от скорости перемещения поверхности в направлении ветра. Если скорость перемещения поверхности равна нулю $u = 0$, то работа ветра также равна нулю. Если $v = u$, т. е. поверхность перемещается со скоростью ветра, работа также будет равна нулю, так как нет силы сопротивления, за счет которой совершается работа. ξ_i принимает максимальное значение, когда $e = 1/3$, при этом $\xi_{i\max} = 0,149$. Следовательно, максимальный коэффициент использования энергии ветра при работе поверхности силой сопротивления не может быть больше 0,149.

Рассмотрим предложенное Н. Е. Жуковским идеальное ветроколесо у которого: ось вращения параллельна скорости ветра; бесконечно большое число лопастей очень малой ширины; профильное сопротивление лопастей равно нулю, и циркуляция вдоль лопасти постоянна; потерянная скорость воздушного потока на ветроколесе постоянна по всей ометаемой поверхности; угловая скорость стремится к бесконечности.

Равномерный поток ветра, набегающий на идеальное ветроколесо со скоростью v в сечении AA' , в сечении BB' (рис. 13.3) на ветроколесе имеет значение скорости $v_1 = v_0 - \Delta v_1$, а на некотором расстоянии позади ветряка в сечении CC' – $v_2 = v_0 - \Delta v_2$.

При этом вращающееся ветроколесо создаст подпор, вследствие чего скорость потока, по мере приближения к ветряку и некоторое время за ветряком, падает, как показано кривой 1 на рис. 13.3. Вместе с этим давление воздуха p , по мере приближения к ветряку, повышается (кривая 2), и при прохождении через ометаемую поверхность оно резко падает. За ветряком образуется некоторое разрежение $p_0 - p_2$, которое, по мере удаления от ветряка, асимптотически приближается к нулю, т. е. восстанавливается нормальное давление.

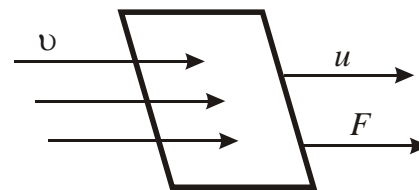


Рис. 13.2. Действие силы

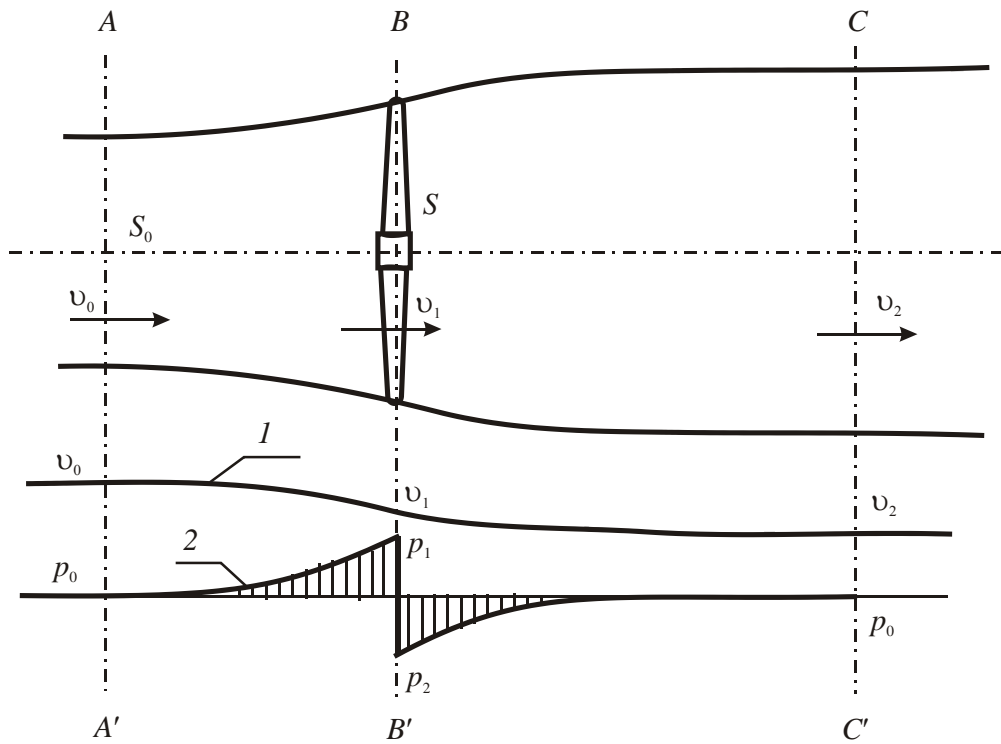


Рис. 13.3. Характеристика воздушного потока, протекающего через ветроколесо

Через ометаемую поверхность S ветроколеса протекает воздух с массовым расходом G :

$$G = \rho S v_1.$$

Идеальный коэффициент использования энергии ветра ξ_i равен

$$\xi_i = 4e(1-e)^2,$$

где $e = \Delta v_1 / v_0$ – коэффициент торможения.

$\xi_i = 0,593$ принимает максимальное значение, когда $e = 1/3$, а $v_2 = v_0/3$.

Таким образом, из классической теории идеального ветряка вытекают следующие основные положения.

1. Максимальный коэффициент использования энергии ветра идеального ветроколеса равен $\xi_i^{\max} = 0,593$.

2. При этом скорость ветра за ветроколесом будет в три раза меньше скорости ветра перед ветроколесом.

Если на вращающийся круглый цилиндр набегаёт поток воздуха со скоростью v в направлении, перпендикулярном к оси цилиндра (рис. 13.4), то вокруг него возникает циркуляция $v_\theta = -2v \sin \theta$. При этом возникает избыточное давление воздуха на поверхности цилиндра, обусловленное взаимодействием двух потоков. Циркуляция вокруг цилиндра создаёт силу, действующую на цилиндр в направлении, перпендикулярном к направлению потока, и называемую поперечной силой. Это явление называется эффектом Магнуса, по имени ученого, впервые открывшего его в 1852 г. Значение поперечной силы определяется путем интегрирования проекции удельной силы давления на вертикальную ось по контуру:

$$F = -lr \int_0^{2\pi} p \sin \theta d\theta = 2\pi r \rho u l ,$$

где r, l – радиус и длина цилиндра, м.

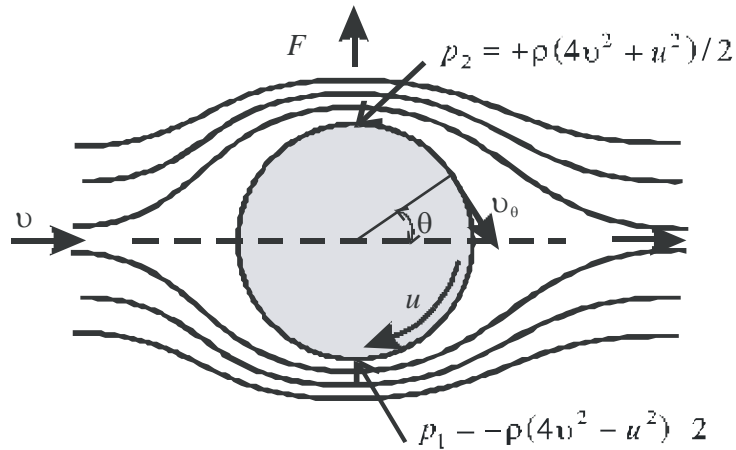


Рис. 13.4. Эффект Магнуса

Схема роторной ветроустановки на основе эффекта Магнуса представлена на рис. 13.5.

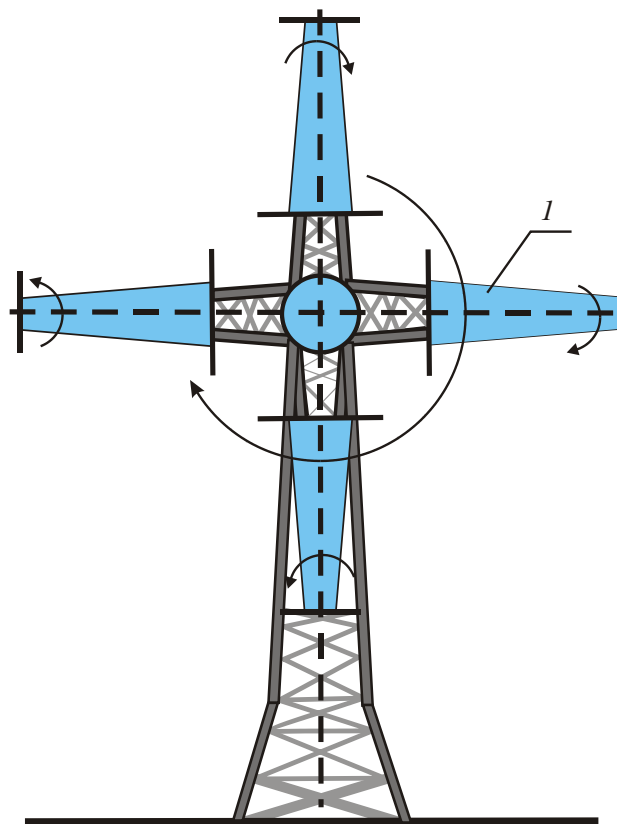


Рис. 13.5. Роторная установка на основе эффекта Магнуса

Мощность $N_{\text{ВЭУ}}$ и КПД роторной ветроустановки определяют по формулам:

$$N_{\text{ВЭУ}} = M \omega = m F l \omega, \quad \text{КПД}_{\text{рот.ВЭУ}} = \frac{N_{\text{ВЭУ}} - N_{\text{цил}}}{N_{\text{вп}}},$$

где ω – угловая частота вращения ветроколеса, с^{-1} ; m – количество цилиндров; $N_{\text{цил}}$ – мощность, затрачиваемая на вращение цилиндров, Вт; $N_{\text{вп}}$ – мощность ветрового потока, Вт.

Задачи для практических занятий

Задача 13.1

Быстроходность ветроколеса при любой скорости $Z = 4 + 0,2 \cdot N$. При какой скорости ветра скорость концов лопастей ветроколеса достигнет скорости звука 330 м/с?

Задача 13.2

Быстроходность ветроколеса диаметром $d = 20 + N$ м составляет $Z = 5 + 0,2 \cdot N$ при угловой скорости $\omega_0 = 3$ рад/с. Какое количество энергии ветрового потока будет использовано этим колесом при коэффициенте торможения $e = 0,22 + 0,002 \cdot N$. Плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³.

Задача 13.3

Определить максимальную энергию, передаваемую пластине площадью $500 + 10 \cdot N$ см² при использовании силы лобового сопротивления, если скорость ветрового потока $v = 3 + 0,2 \cdot N$ м/с, а аэродинамический коэффициент полезного действия $\eta_a = 0,8$. Плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³.

Задача 13.4

Скорость ветрового потока за лопастным ветроколесом $v_2 = 3,5 - 0,1 \cdot N$ м/с, а коэффициент торможения $e = 0,22 + 0,002 \cdot N$. Определить скорость ветрового потока перед колесом и диаметр ветроколеса, если мощность ветроустановки $N_{\text{вы}} = 20 - 0,5 \cdot N$ кВт. Аэродинамический коэффициент полезного действия $\eta_a = 0,85$. Плотность воздуха $\rho = 1,2$ кг/м³.

Задача 13.5

Роторная установка на основе эффекта Магнуса имеет четыре цилиндра длиной 10 м и диаметром 2 м. При этом диаметр ветроколеса 30 м. Угловая частота вращения цилиндров $\omega = 0,15 + 0,01 \cdot N$ рад/с, момент цилиндров $M = 1 + 0,1 \cdot N$ кН·м, а скорость ветрового потока $v = 5,5 - 0,1 \cdot N$ м/с. Определить полезную мощность и КПД ветроустановки, если ее частота вращения 25 об/мин.