

**Дисциплина «Нетрадиционные и возобновляемые источники  
энергии»**

**для специальности «Теплоэнергетика»**

**Дисциплина «Проектирование и эксплуатация установок  
возобновляемой энергетики»**

**для специальности «Электроэнергетика»**

**Факультет энергетики, автоматике и телекоммуникации  
Кафедра «Энергетические системы»**

**Калытка Валерий Александрович**

**Доктор PhD; ассоциированный профессор (доцент); доцент  
кафедры «Энергетические системы»**

# Лекция №4. Ветроэнергетика. Ветровые электростанции и установки



## Лекция №4. Ветроэнергетика. Ветровые электростанции и установки

Цель занятия сводится к изучению физических основ и технологических схем преобразования энергии аэродинамического потока воздуха (ветра) в энергию электрического тока, в условиях ветровых электрических станций (ВЭС), работающих на базе ветровых турбоэлектродгенераторов (ВТЭГ) или ветровых энергоустановок (ВЭУ) и ряда вспомогательных элементов (индукторы, трансформаторы, токоотводящие линии и др.), составляющих основу Ветровой Электроэнергетики.

Видеоролики:

1. Рождение большой ветроэнергетики  
(20 минут 2 секунды)

<https://www.youtube.com/watch?v=sMuSITkBrHg>

2. Принцип работы ветряных турбин  
(5 минут 43 секунды)

<https://www.youtube.com/watch?v=WdZAQMM-c8M>

3. Эта Технология может решить одну из самых больших проблем в Ветроэнергетики  
(9 минут 3 секунды)

<https://www.youtube.com/watch?v=rJajqfqy3XU>

## ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

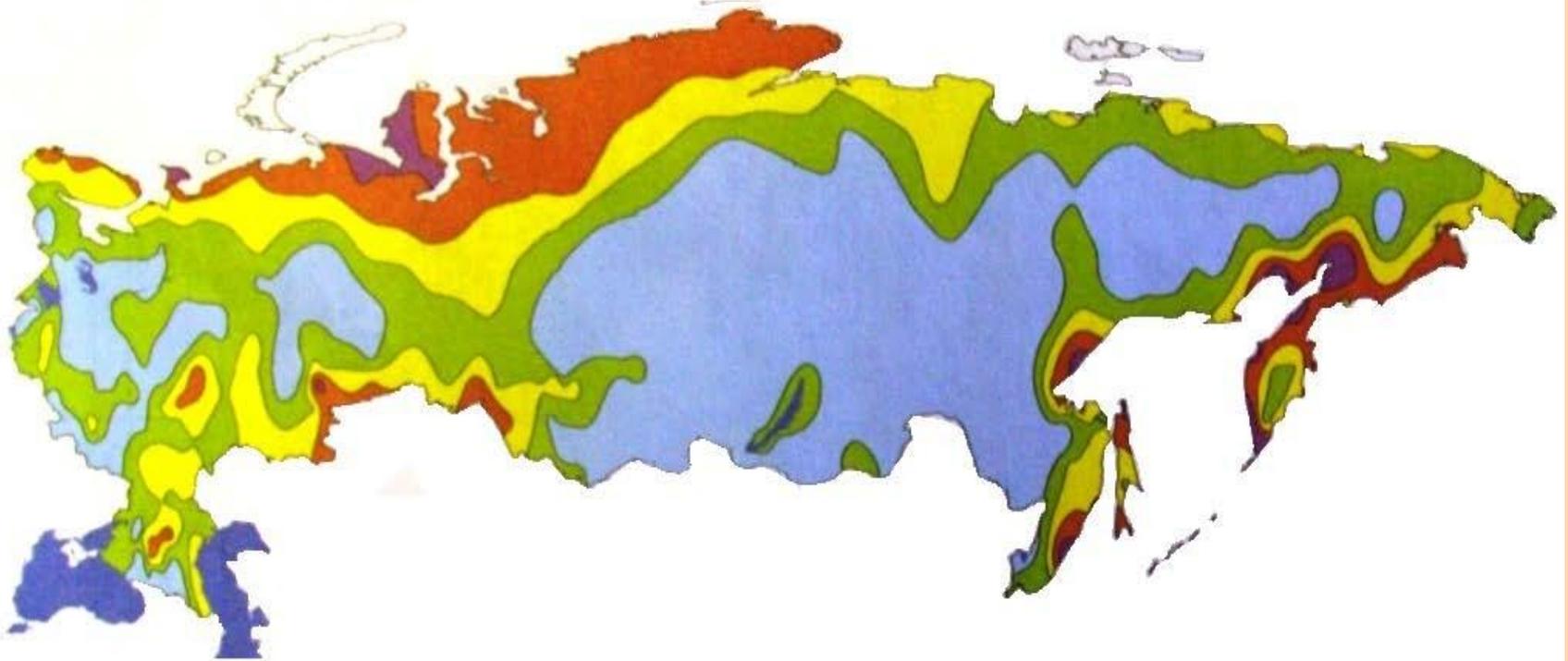
Принцип действия ветроэнергетической установки (ВЭУ) заключается в преобразовании энергии ветра в механическую энергию вращающегося ветроколеса, а затем в электрическую энергию.

Мировая  
ветроэнергетика



В марте 2008 г. мощность ВЭС в мире превысила 100 ГВт  
Годовой рост мощностей ВЭС в мире в последние годы  $\approx 25\%$   
Инвестиции в мире в ветроэнергетику  $\geq 30$  млрд. EURO/год  
Суммарная мощность ВЭС в мире в 2030 г. – 300 ГВт

## Распределение значений среднегодовых скоростей ветра на территории России.



	Закрытая местность	Открытая местность	Морской берег	Открытое море	Холмы и горы
	>6,0 м/с	>7,5 м/с	>8,5 м/с	>9,0 м/с	>11,5 м/с
	5,0-6,0	6,5-7,5	7,0-8,5	8,0-9,0	10-11,5
	4,5-5,0	5,5-6,5	6,0-7,0	7,0-8,0	8,5-10
	3,5-4,5	4,5-5,5	5,0-6,0	5,5-7,0	7,0-8,5
	<3,5 м/с	<4,5 м/с	<5,0 м/с	<5,5 м/с	<7,0 м/с

Русские ученые являются первопроходцами и создателями теорий описывающих использование энергии ветра.

Теорию идеального ветряка впервые разработал в 1914 г. В.П. Ветчинкин на основе теории идеального гребного винта. В этой работе он установил понятие коэффициента использования энергии ветра идеальным ветряком.

В 1920 г. проф. Н. Е. Жуковский изложил теорию «Ветряной мельницы НЕЖ».

Теория идеального ветряка проф. Н. Е. Жуковского носит название классической теории; она устанавливает, что максимальный коэффициент использования энергии ветра идеальным ветряком равен 0,593.

С точки зрения практического применения, теория идеального ветряка наиболее полно, изложена проф. Г. Х. Сабининым, согласно которой коэффициент использования энергии ветра идеальным ветряком равен 0,687.

Исследования показывают, что Россия обладает самым высоким в мире ветропотенциалом. В европейской части РФ КИУМ станций можно довести до 30%, а в районах Крайнего Севера – до 40%. Около 30% потенциала ветроэнергетики России сосредоточено на Дальнем Востоке, 16% - в Сибири, 14% - в районах Севера и менее, чем 25% в остальных регионах (в районах Нижней и Средней Волги и Каспийского моря, Карелии, Алтая и пр.).

## Технический ветропотенциал субъектов РФ в млрд. кВт час



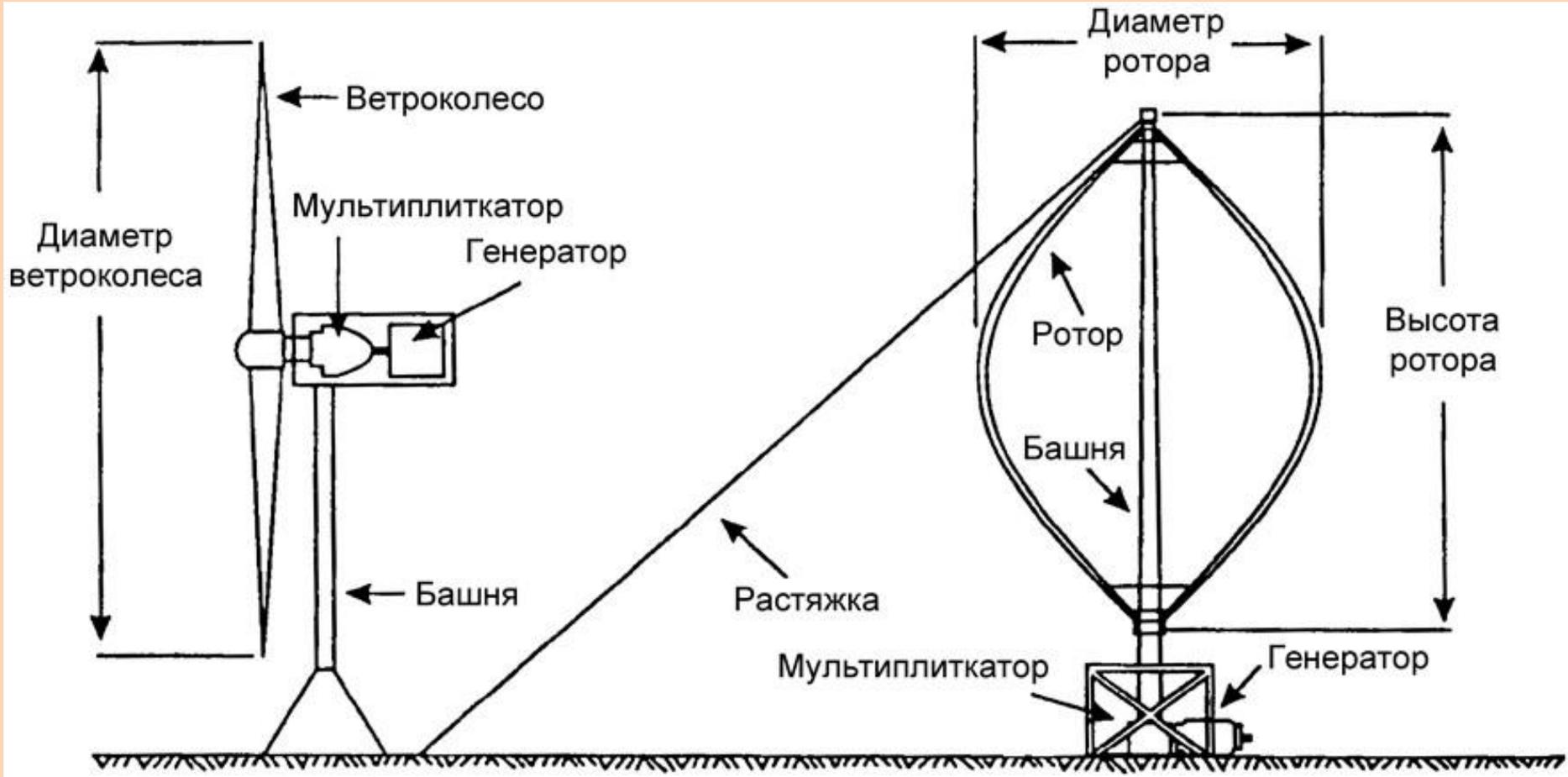
Технический потенциал ветроэнергетических ресурсов Российской Федерации составляет порядка 1 637 ГВт, что примерно в 15 раз больше реальной среднегодовой мощности всех электростанций России. Гипотетическая суммарная выработка при этом могла бы составить 14 342 ТВт\*ч/год. \*

- ❑ ГОСТ Р51237-98. «Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения.»
- ❑ ГОСТ Р51237-98. «Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэлектрические.
- ❑ Требования к испытаниям.»
- ❑ ГОСТ Р51990-2002. «Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Классификация.»

### ВЭУ классифицируют:

- по виду вырабатываемой энергии (механические и электрические);
- по мощности ( большой мощности — свыше 1 МВт; средней мощности — от 100 кВт до 1 МВт; малой мощности — от 5 до 99 кВт; очень малой мощности — менее 5 кВт);
- по областям применения;
- по назначению (автономные, гибридные, сетевые);
- по признаку работы (с постоянной или переменной частотой вращения ветроколеса);
- по способам управления (регулирование управлением ветроколесом, балластное сопротивление, преобразователем частоты);
- по структуре системы генерирования энергии (тип генератора).

# Типы ВЭУ



*С горизонтальной осью вращения ветроколеса*

*С вертикальной осью вращения ветроколеса*

## Типы ВЭУ



*С горизонтальной осью вращения ветроколеса*



*С вертикальной осью вращения ветроколеса*

## Мировая ветроэнергетика



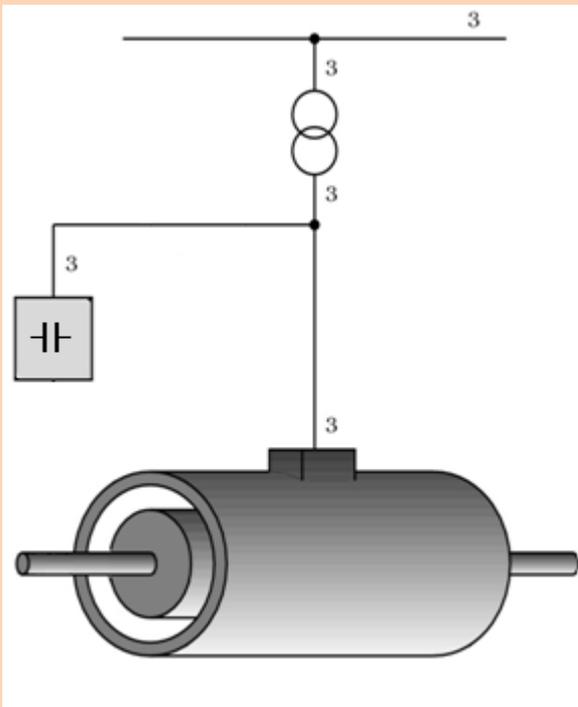
## Устройство современной ВЭУ мощностью от 100кВт



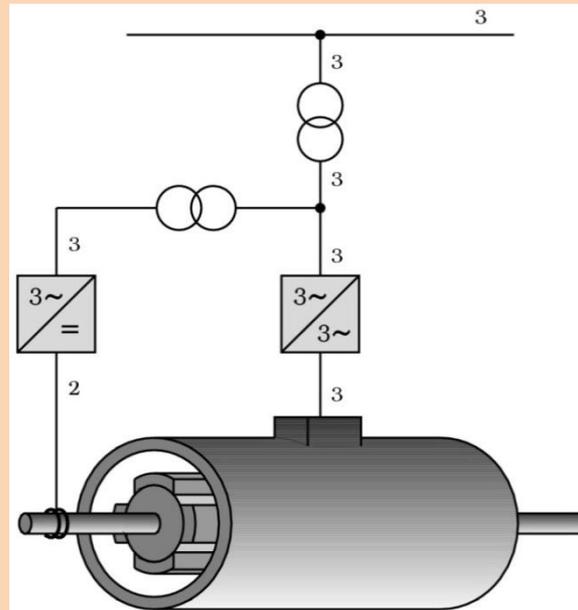
1. Лопасть
2. Ротор
3. Механизм поворота лопастей
4. Тормозное устройство
5. Тихоходный вал
6. Мультипликатор
7. Генератор
8. Контроллер
9. Анемометр
10. Флюгер
11. Гондола
12. Быстроходный вал
13. Редуктор поворота гондолы
14. Двигатель поворота гондолы
15. Башня

# Типы генераторов применяемых в ВЭУ

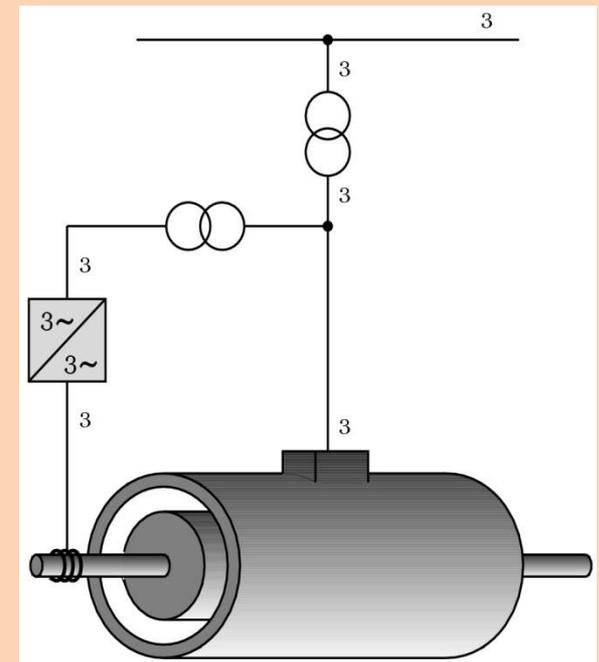
АГ



СГ (с ПЧ)



АМДП



Мощность воздушного потока можно определить из выражения:

$$P = \rho \frac{V^3 S}{2}, \text{ Вт}$$

где

$S$  - площадь поперечного сечения ветрового потока, м<sup>2</sup>;

$V$  - скорость ветра, м/с;

$\rho$  - плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

или если  $S$  ометаемая ветроколесом площадь, тогда

$$P_{\text{ветроколесо}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3$$

Мощность и момент ветротурбины определяются из следующих выражений:

$$P_m = \frac{1}{2} C_P \rho \pi R^2 V^3$$

и

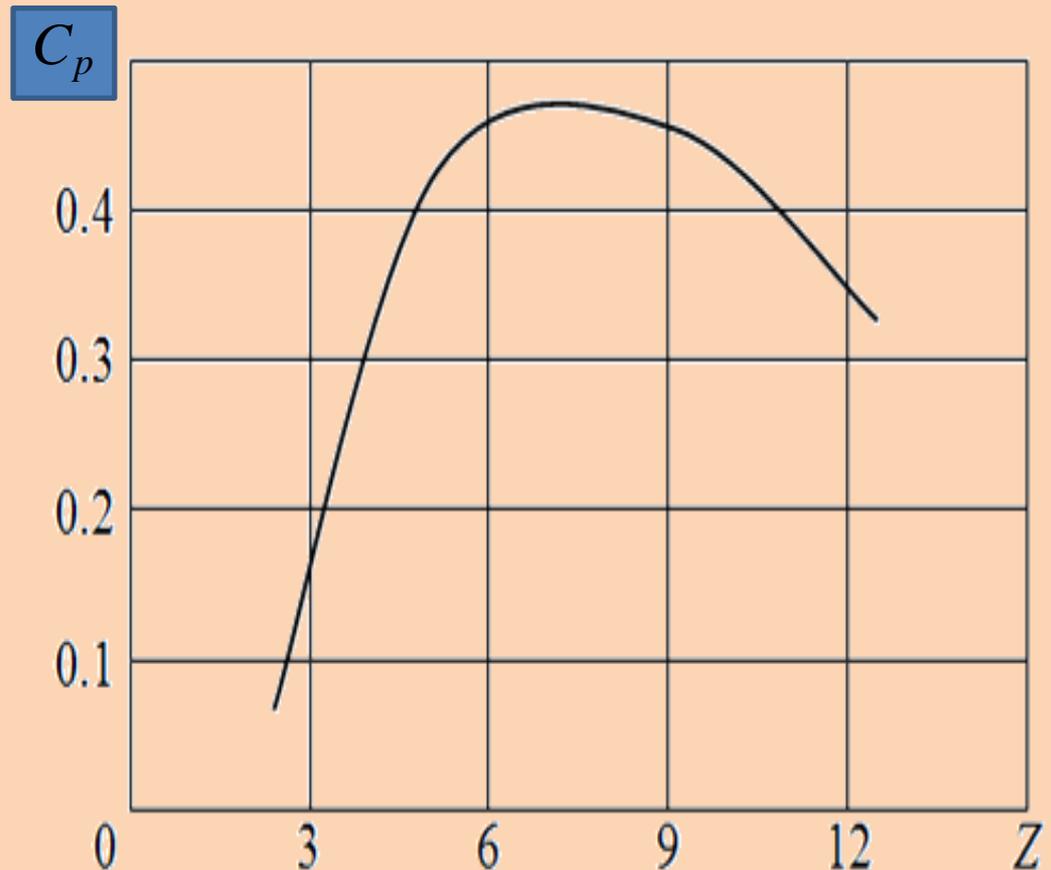
$$C_P = \frac{P_m}{P}$$

$$T_m = \frac{1}{2} C_T \rho \pi R^2 V^3$$

Любой ветродвигатель характеризуется коэффициентом использования энергии ветра  $C_p$ , который определяется как отношение механической мощности на валу ветроколеса  $P_m$  к мощности ветрового потока  $P$ :

Коэффициент использования энергии ветра определяет максимум части энергии ветрового потока, которая может быть использована ветродвигателем.

Максимальное значение коэффициента мощности ветроколеса зависит от его быстроходности и достигает теоретического максимума, равного 0,593, которое впервые было вычислено Бетцом.



Быстроходность ветроколеса  $Z$  характеризует отношение окружной скорости конца лопасти к скорости ветра  $V$ . Ее можно рассчитать, если известны расчетное число оборотов  $n$  при заданной скорости ветра:

$$Z = \frac{\omega R}{V},$$

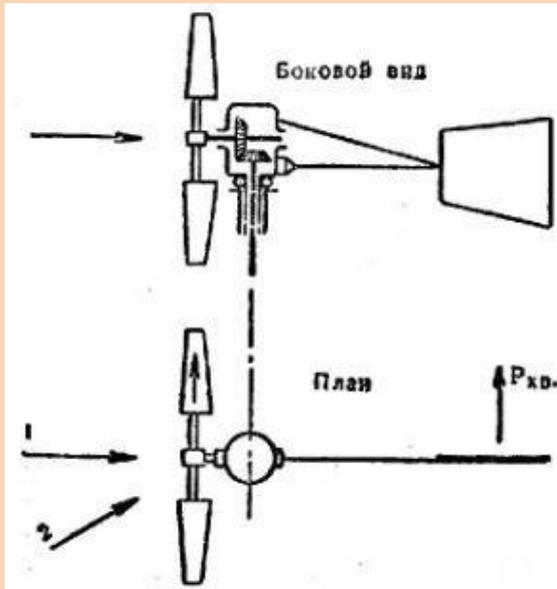
Электрическая мощность, развиваемая ветроэнергетической установкой, может быть определена из выражения:

$$P_{ВЭУ} = \eta P_m$$

где  $\eta$  - КПД электромеханического преобразования энергии (в пределах 0,7 – 0,85) .

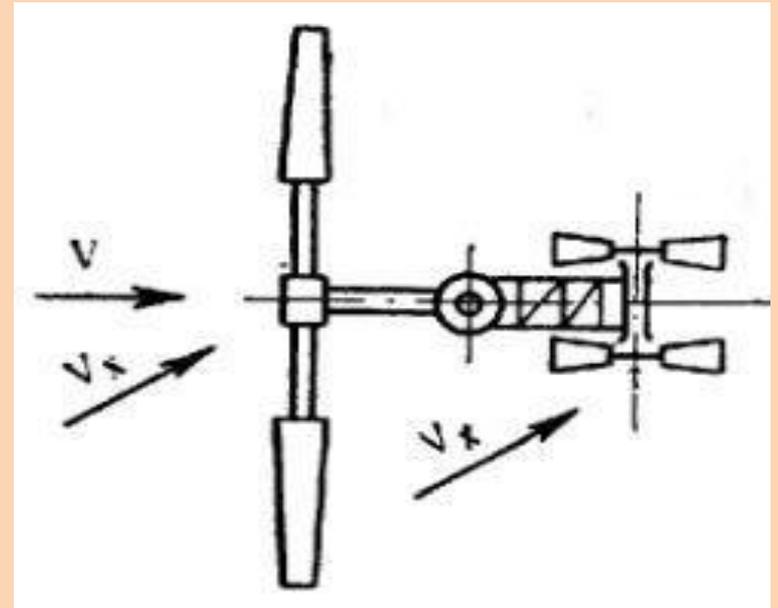
Крыльчатые ветродвигатели с горизонтальной осью вращения наиболее эффективны, когда поток воздуха перпендикулярен плоскости вращения лопастей. Для обеспечения этого условия в составе ВЭУ требуется устройство автоматического поворота оси вращения.

## Способы ориентации по ветру:



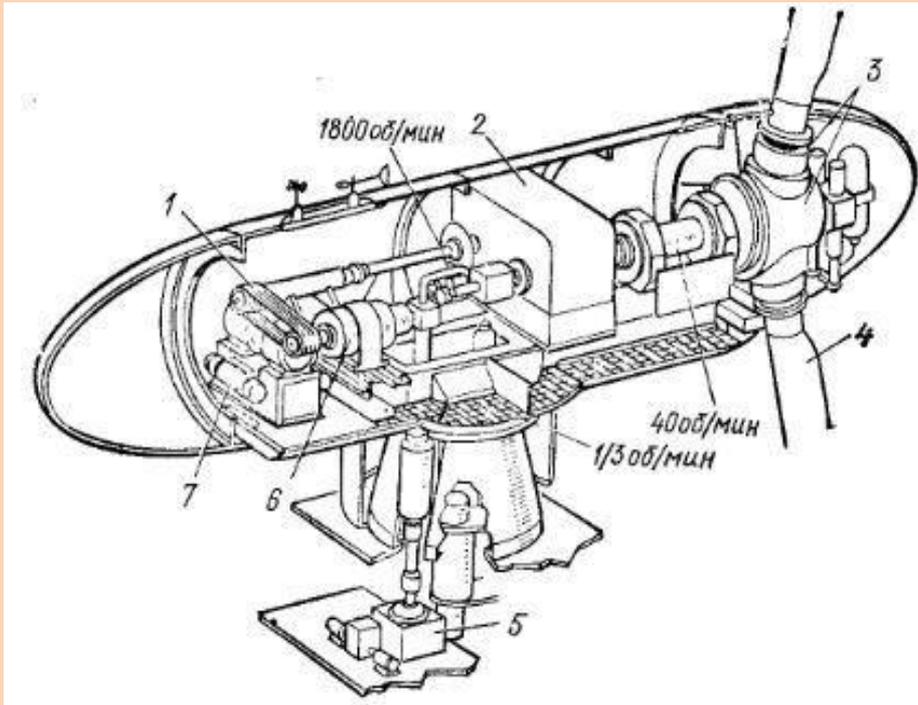
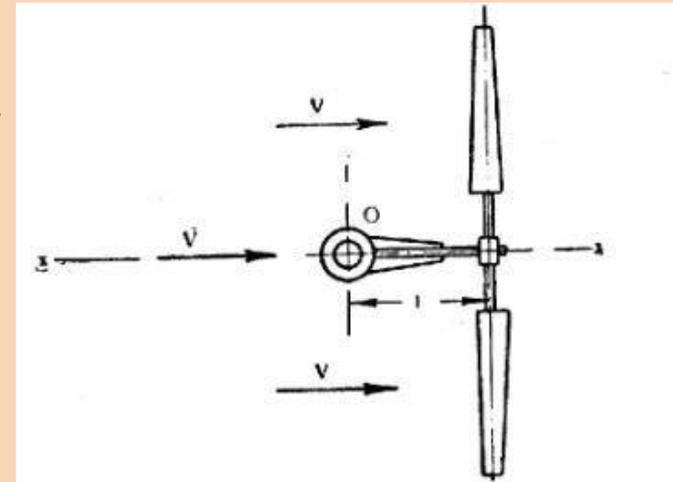
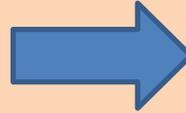
Хвостовым оперением, действующим аналогично флюгеру;

Виндрозами, действующими на поворотную часть ВЭУ через зубчатую передачу;



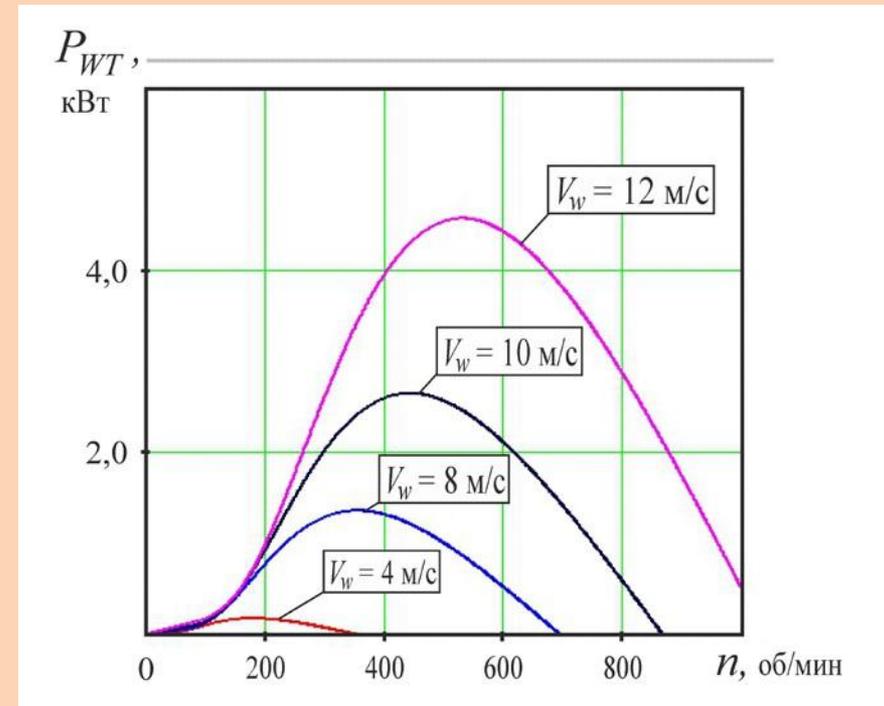
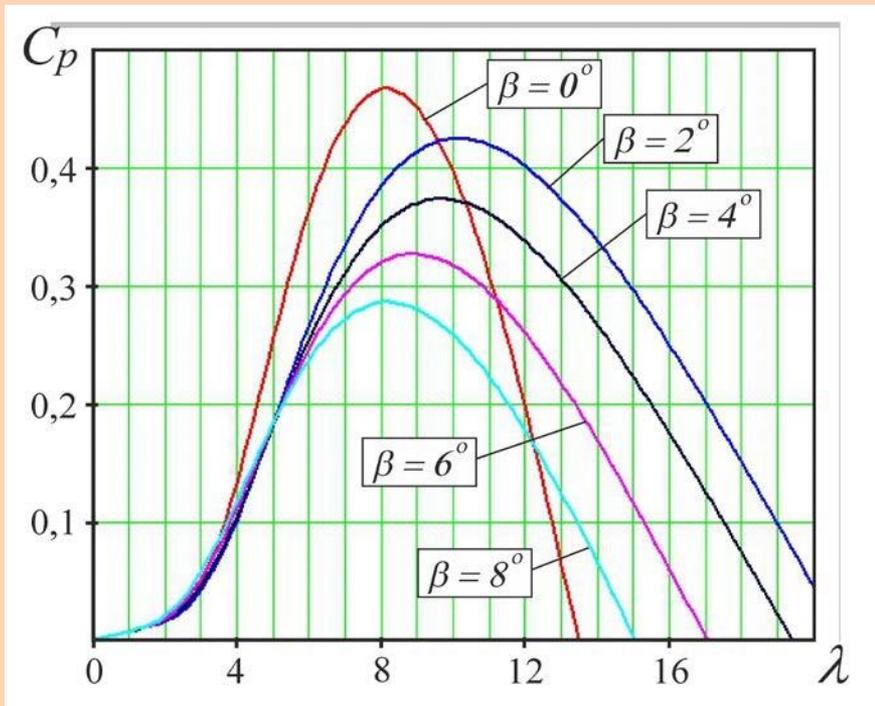
## ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Расположением ветроколеса  
позади башни ВЭУ;

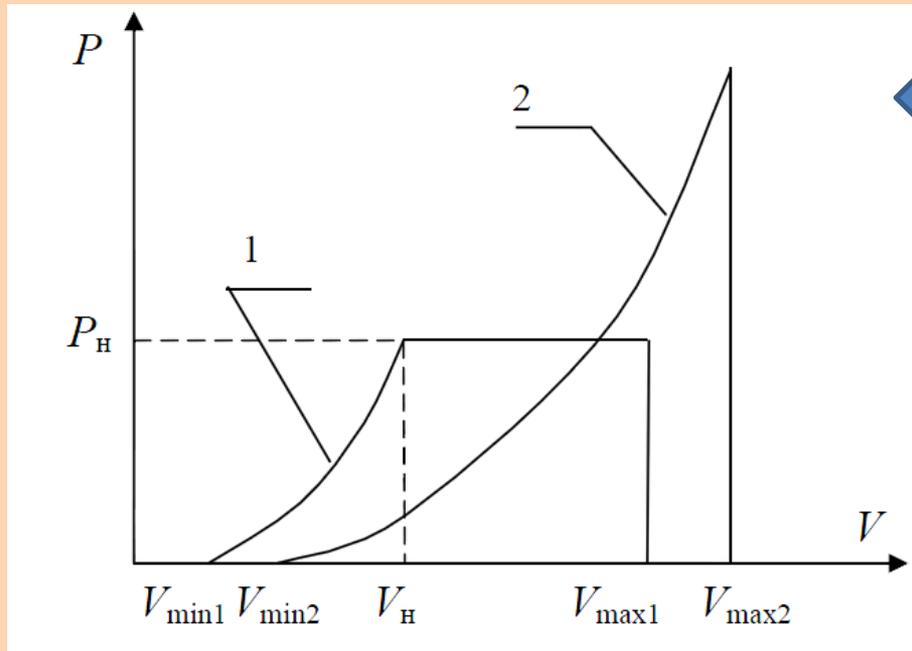


Установка на ветер  
системой следящего  
электропривода.

# ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ



## Зависимость выходной мощности ВЭУ



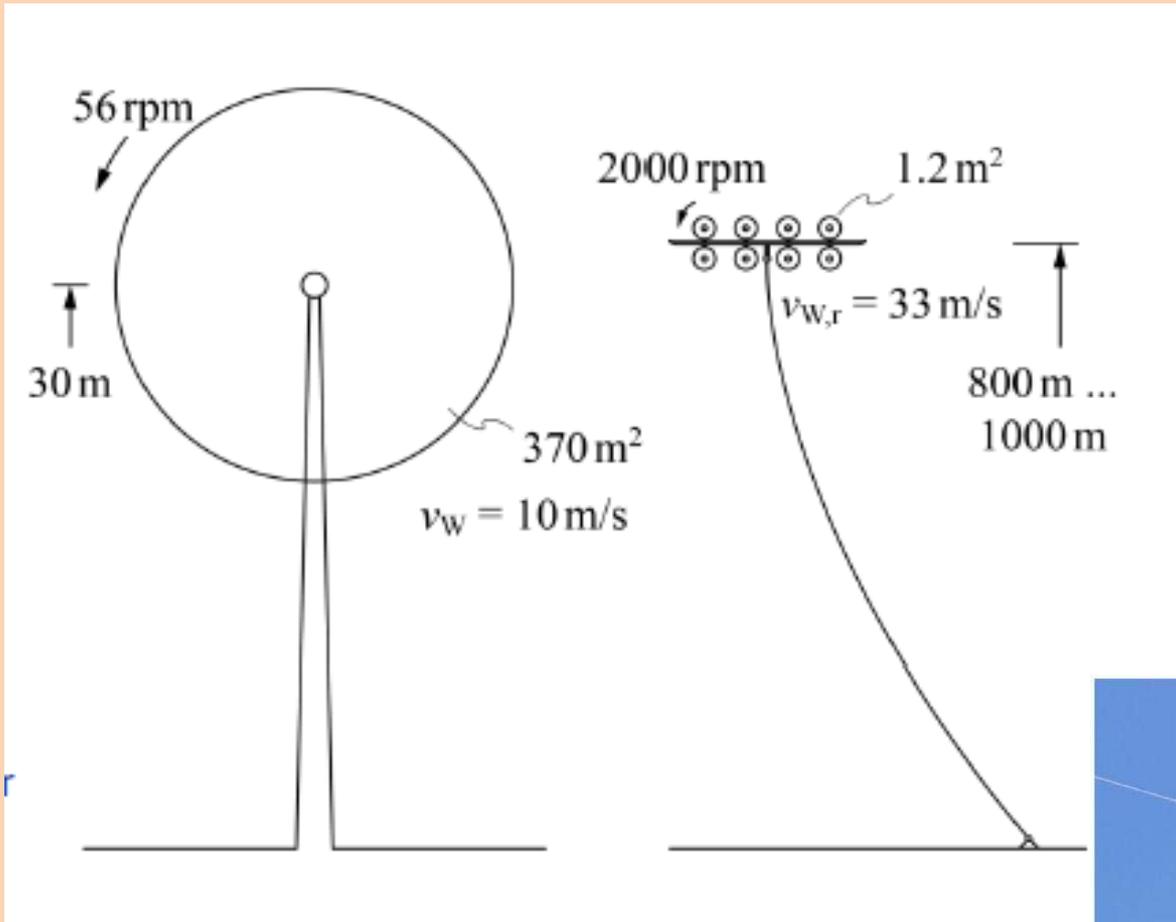
1 – при аэродинамическом регулировании скорости вращения;  
2 – без регулирования

Важной технической характеристикой ВЭУ является количество электрической энергии  $W$ , которое она может выработать в определенном месте за расчетный период времени

$$W = \frac{0.92 \cdot R^2 \cdot V_c^3 \cdot T}{1000},$$

Важной эксплуатационной характеристикой ВЭУ является коэффициент использования установленной мощности  $K_{и}$

$$K_{и} = \frac{W_{г}}{8760 \cdot P_{НОМ}}$$



**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich