

*Ветроэнергетика*

# Солнечная энергетика

## Определение:

**Ветроэнергетика** - использование движения воздушных масс для получения энергии в каком-либо виде

**Основной причиной** возникновения ветра является неравномерное нагревание солнцем земной поверхности

Энергия ветра – это преобразованная энергия солнечного излучения, и пока светит Солнце, будут дуть и ветры.

<b>Баллы Бофорта</b>	<b>Скорость ветра, м/с</b>	<b>Характеристика силы ветра</b>	<b>Наблюдаемые эффекты действия</b>	<b>Воздействие ветра на ВЭУ</b>	<b>Условия для работы ВЭУ</b>
<b>0</b>	<b>0,0...0,4</b>	<b>Штиль</b>	<b>Дым из труб поднимается вертикально</b>	<b>Нет</b>	<b>Отсутствуют</b>
<b>1</b>	<b>0,4...1,8</b>	<b>Тихий</b>	<b>Дым поднимается не совсем отвесно, но флюгеры неподвижны. На воде поднимается рябь</b>	<b>Нет</b>	<b>Отсутствуют</b>
<b>2</b>	<b>1,8...3,5</b>	<b>Легкий</b>	<b>Ветер ощущается лицом, шелестят листья, на воде отчетливое волнение</b>	<b>Нет</b>	<b>Плохие для всех установок</b>
<b>3</b>	<b>3,6...5,8</b>	<b>Слабый</b>	<b>Колеблются листья на деревьях, развиваются легкие флаги, на отдельных волнах появляются барашки</b>	<b>Начинают вращаться тихоходные ветроколеса</b>	<b>Удовлетворительные для работы насосов и некоторых аэрогенераторов</b>
<b>4</b>	<b>5,8...8,5</b>	<b>Умеренный</b>	<b>Колеблются тонкие ветки деревьев, поднимается пыль и клочки бумаги, на воде много барашков</b>	<b>Начинают вращаться колеса ветрогенераторов</b>	<b>Хорошие для аэрогенераторов</b>

<b>5</b>	<b>8,5...11</b>	<b>Свежий</b>	<b>Начинают раскачиваться лиственные деревья, все волны в барашках</b>	<b>Мощность ВЭУ достигает 30% проектной</b>	<b>Очень хорошие</b>
<b>6</b>	<b>11...14</b>	<b>Сильный</b>	<b>Раскачиваются большие ветки деревьев, гудят телефонные провода, пенятся гребни волн</b>	<b>Мощность в расчетном диапазоне близка к максимальной</b>	<b>Приемлемы для прочных малогабаритных установок</b>
<b>7</b>	<b>14...17</b>	<b>Крепкий</b>	<b>Все деревья раскачиваются, с гребней волн срывается пена</b>	<b>Максимальная мощность</b>	<b>Предельно допустимые</b>
<b>8</b>	<b>17...21</b>	<b>Очень крепкий</b>	<b>Ломаются ветки деревьев, трудно идти против ветра, с волн срываются клочья пены</b>	<b>Ряд ветроустановок начинает отключаться</b>	<b>Недопустимые</b>
<b>9</b>	<b>21...25</b>	<b>Шторм</b>	<b>Небольшие разрушения, срываются дымовые трубы</b>	<b>Все установки отключаются</b>	<b>Недопустимые</b>

<b>10</b>	<b>25...29</b>	<b>Сильный шторм</b>	<b>Значительные разрушения, деревья вырываются с корнем</b>	<b>Предельные нагрузки</b>	<b>Недопустимые</b>
<b>11</b>	<b>29...34</b>	<b>Жесткий шторм</b>	<b>Широкомасштабные разрушения</b>	<b>Повреждения некоторых установок</b>	<b>Недопустимые</b>
<b>12</b>	<b>Более 34</b>	<b>Ураган</b>	<b>Опустошительные разрушения</b>	<b>Серьезные повреждения, вплоть до разрушения установок</b>	<b>Недопустимые</b>

# Перспективы ветроэнергетики в России

Прибрежные зоны северной части страны, Каспийское побережье и северная часть Сахалина отличаются **высокой интенсивностью ветрового режима**. Здесь среднегодовые скорости ветра превышают 6 м/с.

Большинство областей европейской части России относятся к зоне **средней интенсивности ветра**. В этих районах среднегодовая скорость ветра составляет от 3,5 до 6 м/с. К этой же зоне относится часть территории, лежащая юго-восточнее озера Байкал.

Третья зона занимает обширную территорию Восточной Сибири и Дальнего Востока, некоторых областей европейской части России. В этой зоне **скорости ветра относительно невелики** – до 3,5 м/с, и широкое применение здесь ветроэнергетических установок не рекомендуется.

Существующие системы ветродвигателей по схеме устройства ветроколеса и его положению в потоке ветра разделяются на три класса:

***Первый класс*** включает ветродвигатели, у которых ветровое колесо располагается в вертикальной плоскости; при этом плоскость вращения перпендикулярна направлению ветра, и, следовательно, ось ветроколеса параллельна потоку. Такие ветродвигатели называются крыльчатými.

Ко **второму классу** относятся системы ветродвигателей с вертикальной осью вращения ветрового колеса.

К **третьему классу** относятся ветродвигатели, работающие по принципу водяного мельничного колеса и называемые барабанными. У этих ветродвигателей ось вращения горизонтальна и перпендикулярна направлению ветра



# Первый класс – крыльчатые ветродвигатели

Крыльчатые ветродвигатели, согласно ГОСТ 2656-44, в зависимости от **типа ветроколеса и быстроходности**, разделяются на три группы

ветродвигатели многолопастные, тихоходные, с быстроходностью  $Z_n \leq 2$

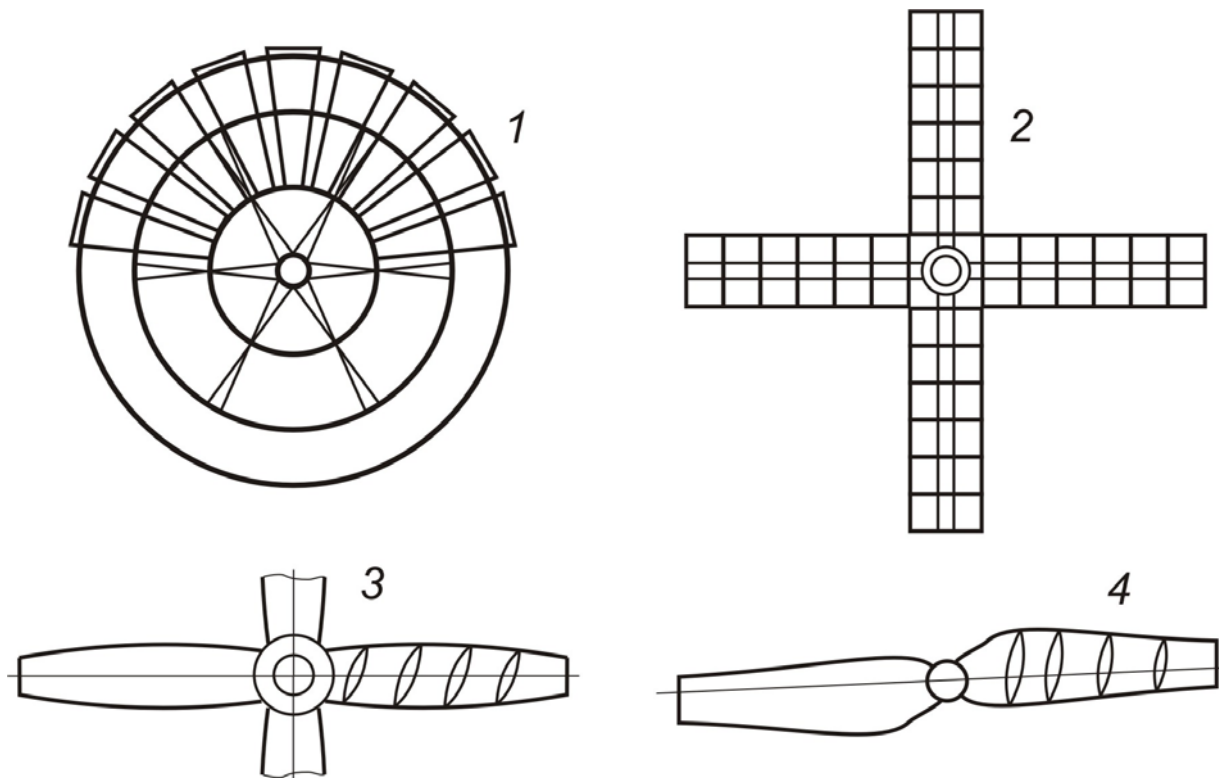
ветродвигатели малолопастные, тихоходные, в том числе ветряные мельницы, с быстроходностью  $Z_n > 2$

ветродвигатели малолопастные, быстроходные

$$Z_n \geq 3$$

Быстроходностью называется отношение окружной скорости конца лопасти к скорости ветра:

$$Z = \frac{\omega \cdot R}{V}.$$



Аслямова Р.Р.	85
Демин И.А.	80
Дутов Л.М.	10
Дьяченко О.С.	45
Захаров Е.В.	55
Кенина И.В.	40
<del>Кипин А.А.</del>	0
<del>Колесников П.В.</del>	0
Манчын А.А.	85
Перцева М.И.	30
Пушкин П.С.	
Сыродой С.В.	65
<del>Цик А.Г.</del>	35
Бардокин Д.А.	60

Арефьев А.В.	75
Беляев Д.О.	50
Григорьев М.В.	45
Дель М.В.	100
Есипенко П.А.	45
Климова Е.А.	40
Кобелева А.Г.	30
Кульчицкая Г.В.	55
Мартынов С.А.	55
Матусевич А.А.	
Параскун А.В.	60
Пиховкина Н.В.	100
Рахматулин С.В.	60
Садовников Е.Р.	85
Фролов Д.М.	50
Чащина Ю.А.	100
Чистяков Д.А.	75
Шакирова Д.Р.	85
Шелпаков И.А.	65
Шихова Т.М.	65

Альфонсов В.В.	40
<del>Бараулин П.И.</del>	0
Беспалова Е.А.	95
Глухова А.Ю.	85
Гончаров М.Н.	
Дьяченко М.С.	70
Лоншаков А.А.	70
Марусина О.А.	45
Пескова И.П.	50
<del>Допев Д.С.</del>	0
Садыков А.Н.	70
Сладков С.О.	50
Смольянинова М.	90
Сошина Е.А.	25
Сошина О.А.	65
Старченков П.А.	70
Суходолов А.В.	65
Хамматов Р.В.	50
<del>Чурикова А.В.</del>	0
Шилов Н.А.	85

Гарин И.В.	60
<del>Змеев А.В.</del>	25
Кошкаров А.В.	10
Крель А.А.	35
<del>Переходько Д.В.</del>	0
Пищальникова К.С.	45
Показаньев Н.В.	40
Протасевич Е.В.	40
<del>Смышляев О.Н.</del>	40
Степанов И.А.	50
Сунин А.А.	15
<del>Чеботарев Е.М.</del>	0
Шаклеин Н.В.	10

# Второй класс ветродвигателей

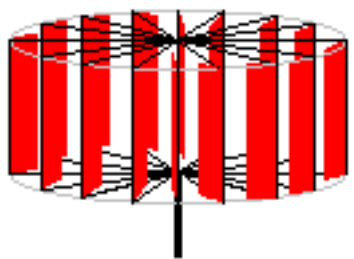
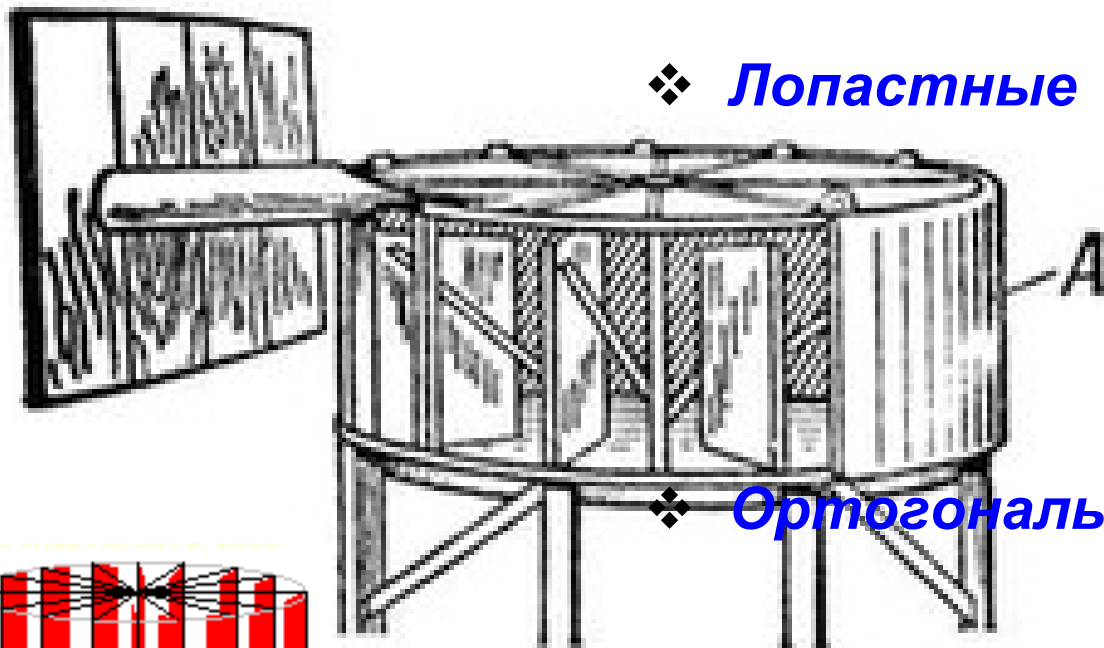
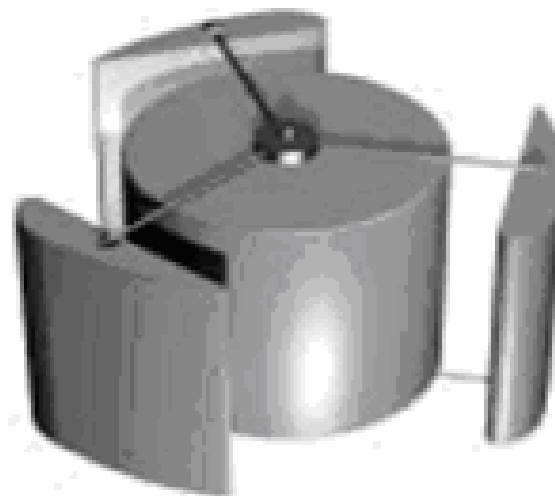
По конструктивной схеме они разбиваются на 2 группы:

**карусельные** – у которых нерабочие лопасти либо прикрываются ширмой, либо располагаются ребром против ветра.

❖ *Лопастные*

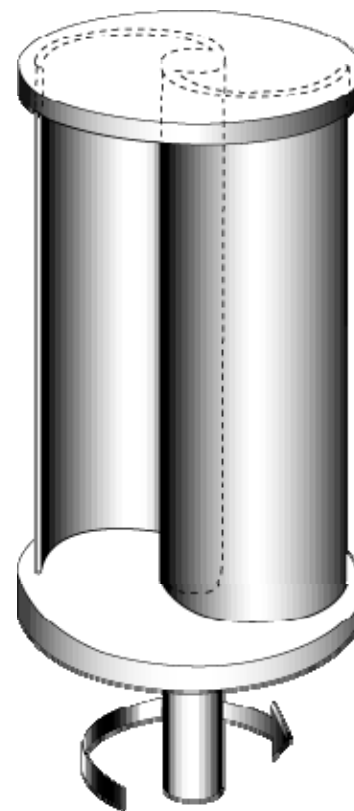
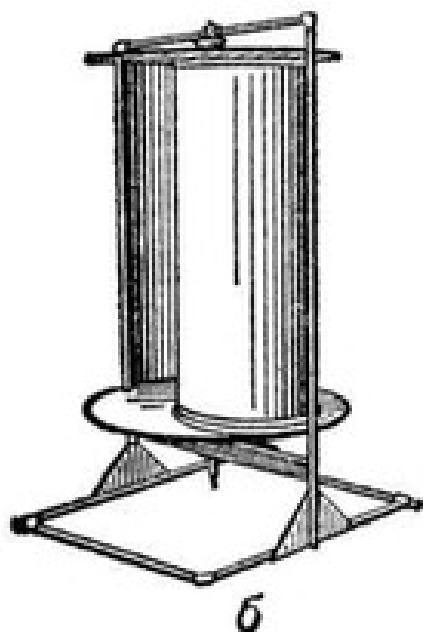


❖ *Ортогональные*

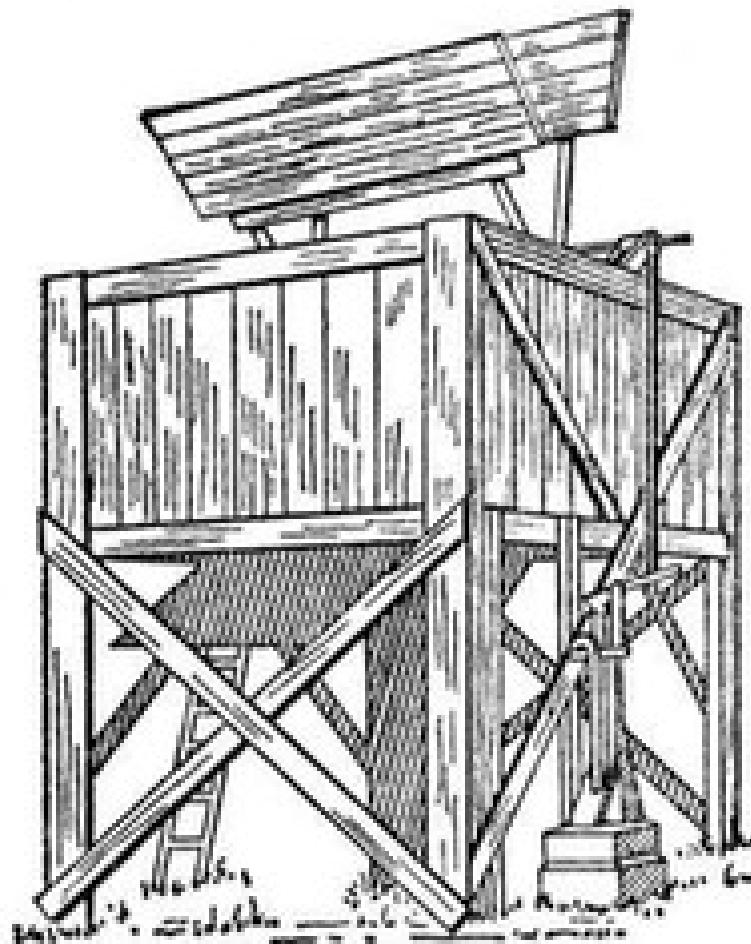


# Второй класс ветродвигателей

**роторные** ветродвигатели системы Савониуса



# Третий класс ветродвигателей - барабанные



6

# Недостатки карусельных и барабанных

Основные **недостатки** карусельных и барабанных ветродвигателей вытекают из самого принципа расположения рабочих поверхностей ветроколеса в потоке ветра, а именно:

- ❖ так как рабочие лопасти колеса перемещаются в направлении воздушного потока, ветровая нагрузка действует не одновременно на все лопасти, а поочерёдно. В результате каждая лопасть испытывает прерывную нагрузку, коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ) получается весьма низким и не превышает 10%

# Недостатки карусельных и барабанных

❖ движение поверхностей ветроколеса в направлении ветра не позволяет развить большие обороты, так как поверхности не могут двигаться быстрее ветра

❖ размеры используемой части воздушного потока (ометаемая поверхность) малы по сравнению с размерами самого колеса, что значительно увеличивает его вес, отнесённый к единице установленной мощности ветродвигателя

У роторных ветродвигателей системы Савониуса наибольший коэффициент использования энергии ветра КИЭВ=18%.



# Достоинства карусельных и барабанных

## Карусельные

- ❖ могут работать при любом направлении ветра не изменяя своего положения
- ❖ намного больше момент вращения. Он максимален для карусельных лопастных агрегатов при нулевой относительной скорости ветра
- ❖ при увеличении скорости ветра они быстро наращивают силу тяги, после чего скорость вращения стабилизируется
- ❖ тихоходны и это позволяет использовать простые электрические схемы, например, с асинхронным генератором, без риска потерпеть аварию при случайном порыве ветра

# Достоинства карусельных и барабанных

- ❖ способность без дополнительных ухищрений следить за тем "откуда дует ветер", что весьма существенно для приземных рыскающих потоков
- ❖ наиболее просты в эксплуатации. Конструкция обеспечивает максимальный момент при запуске ветродвигателя и автоматическое саморегулирование максимальной скорости вращения в процессе работы. С увеличением нагрузки уменьшается скорость вращения и возрастает вращающий момент вплоть до полной остановки

Ортогональные: В реалистичной установке мощностью 2000 кВт диаметр кольца, по которому движутся крылья, составит около 80 метров.

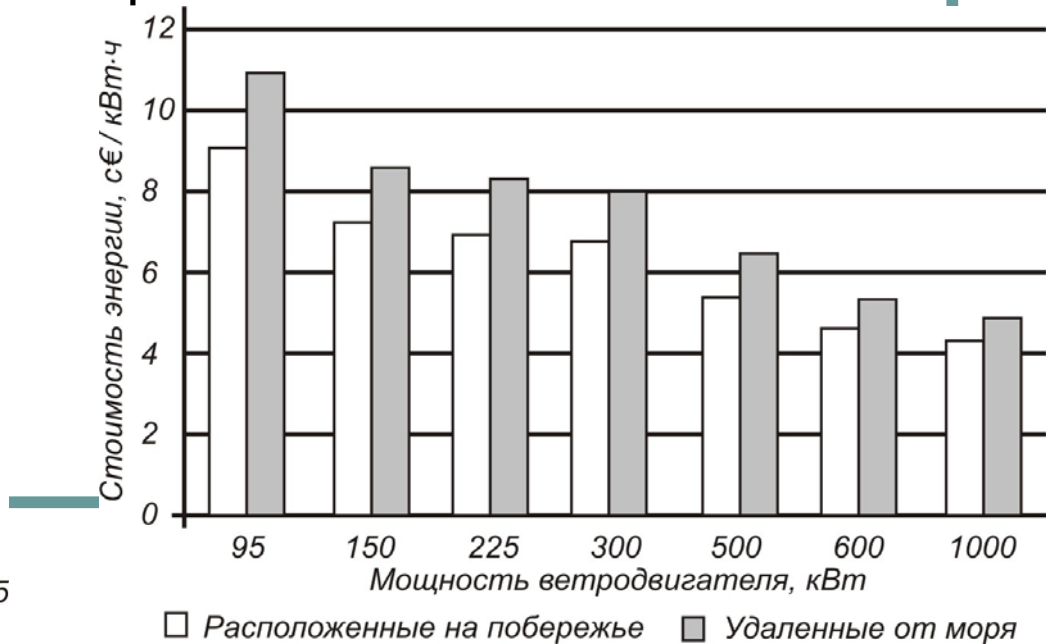
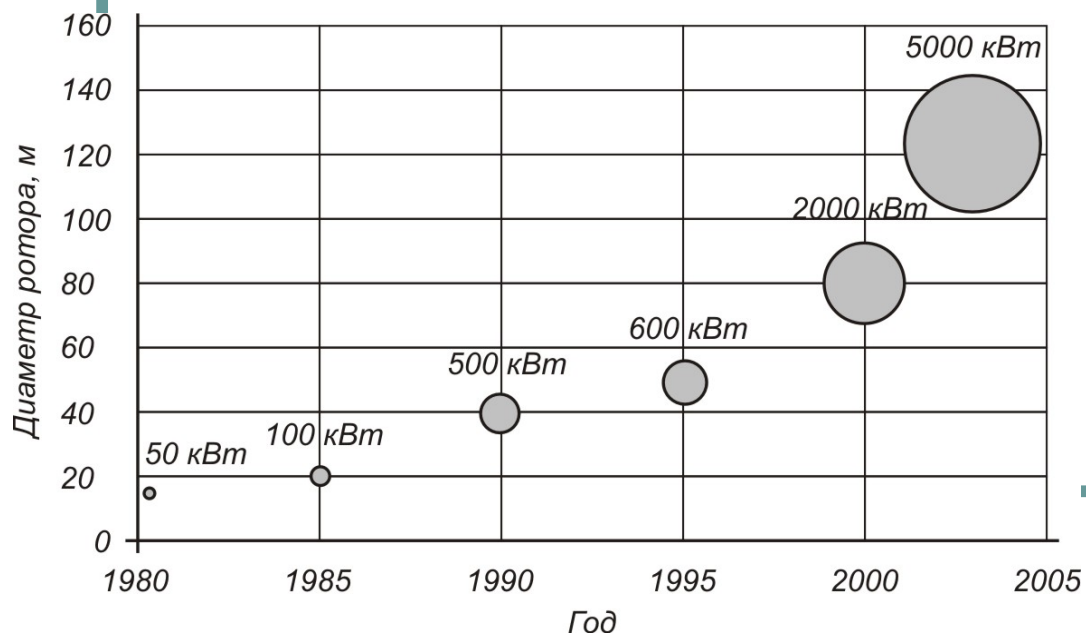
# Достоинства крыльчатых

Крыльчатые ветродвигатели свободны от перечисленных выше недостатков карусельных и барабанных ветродвигателей.

- ❖ хорошие аэродинамические качества крыльчатых ветродвигателей - КИЭВ у крыльчатых ветродвигателей намного выше чем у карусельных
- ❖ конструктивная возможность изготавливать их на большую мощность - относительно лёгкий вес на единицу мощности
- ❖ распространение крыльчатых ветроагрегатов объясняется величиной скорости их вращения. Они могут непосредственно соединяться с генератором электрического тока без мультипликатора
- ❖ скорость вращения крыльчатых ветродвигателей обратно пропорциональна количеству крыльев, поэтому агрегаты с количеством лопастей больше трех практически не используются

# Недостатки крыльчатых

- наибольшая эффективность, которая достигается при действии потока воздуха перпендикулярно к плоскости вращения лопастей-крыльев, **требуется устройство автоматического поворота оси вращения**
- для получения большой мощности – требуется большой диаметр, а следовательно высота установки увеличивается, сложность монтажа возрастает
- большая парусность – большие напряжения в основании



**При взаимодействии потока с лопастью возникают:**

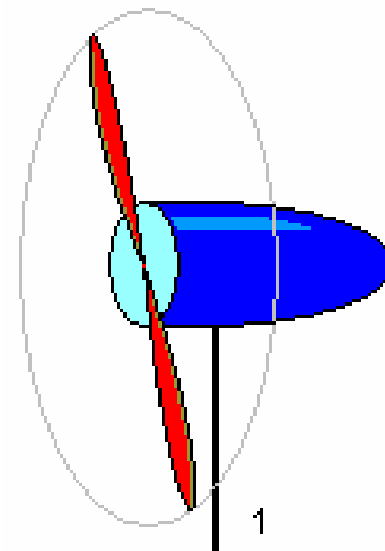
- 1) сила сопротивления, параллельная вектору относительной скорости набегающего потока;**
- 2) подъемная сила, перпендикулярная силе сопротивления;**
- 3) завихрение обтекающего лопасти потока;**
- 4) турбулизация потока, т.е. хаотические возмущения его скорости по величине и направлению;**
- 5) препятствие для набегающего потока.**

# Ветроколесо с горизонтальной осью

Основной вращающей силой у колес этого типа является подъемная сила.

Относительно ветра ветроколесо в рабочем положении может располагаться перед опорной башней или за ней.

- ♣ При передней расположении ветроколесо должно иметь аэродинамический стабилизатор.
- ♣ При заднем расположении башня частично затеняет ветроколесо и турбулизует набегающий на него поток. При работе колеса в таких условиях возникают циклические нагрузки, повышенный шум и флуктуация выходных параметров ветроустановки. Поэтому в ВЭУ мощностью более 50 кВт для этой цели используются электрические серводвигатели.



# Ветроколесо с горизонтальной осью

В ветроэлектростанциях обычно используются двух- и трехлопастные ветроколеса, последние отличаются очень плавным ходом.

Электростанция и редуктор, соединяющий его с ветроколесом, расположены обычно на вершине опорной башни в поворотной головке. В принципе их удобнее размещать внизу, но возникающие при этом сложности с передачей крутящего момента обесценивают преимущества такого размещения.

# Ветроэлектрогенераторы с вертикальной осью

Вследствие своей геометрии при любом направлении ветра находятся в рабочем положении.

Редуктор с генераторами установлены внизу башни.

Недостатки:

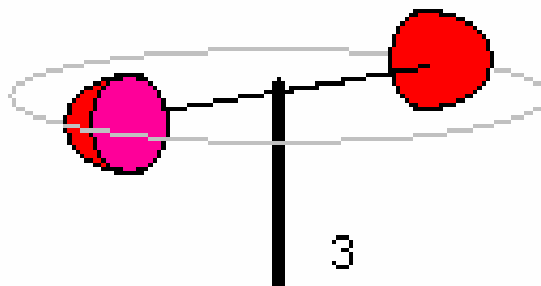
гораздо большая подверженность их усталостным разрушениям из-за более часто возникающих в них автоколебательных процессов и пульсация крутящего момента, приводящая к нежелательным пульсациям выходных параметров генератора.

Наиболее распространенные типы вертикально-осевых установок следующие.



## 1. Чашечный ротор (анемометр).

Ветроколесо этого типа вращается силой сопротивления. Форма чашеобразной лопасти обеспечивает практически линейную зависимость частоты вращения колеса от скорости ветра.



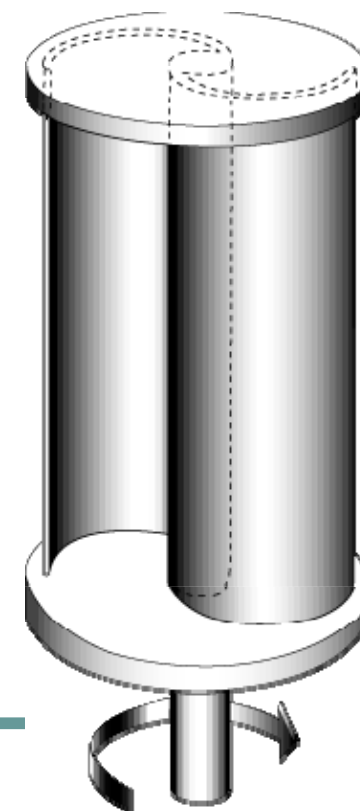
## ***2. Ротор Савониуса.***

Это колесо также вращается силой сопротивления.

Его лопасти выполнены из тонких изогнутых листов прямоугольной формы, т.е. отличаются простотой и дешевизной.

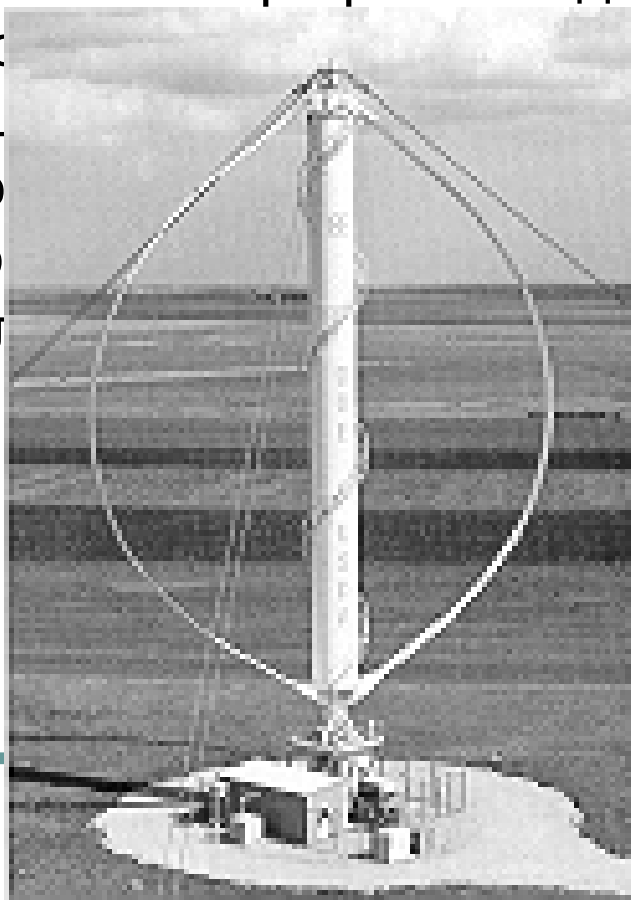
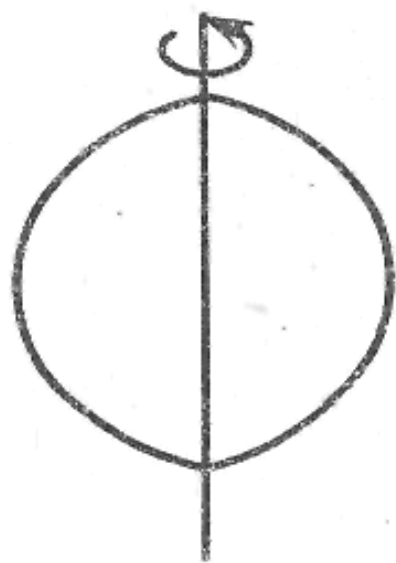
Вращающий момент создается благодаря различному сопротивлению, оказываемому воздушному потоку вогнутой и выгнутой относительно него лопастями ротора.

Из-за большого геометрического заполнения это ветроколесо обладает большим крутящим моментом и используется для перекачки воды.



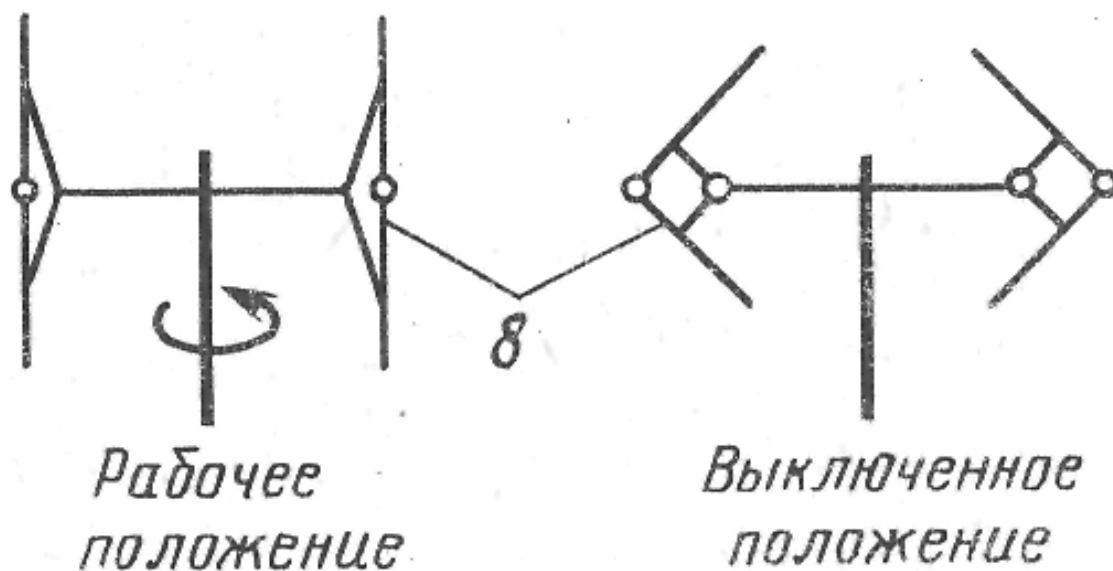
### 3. Ротор Дарье.

Вращающий момент создается подъемной силой, возникающей на двух или на трех тонких изогнутых несущих поверхностях, имеющих аэродинамический профиль. Подъемная сила максимальна в тот момент, когда ветровой поток пересекает набегающую поверхность под углом. Подъемная сила используется в ветрогенераторах.



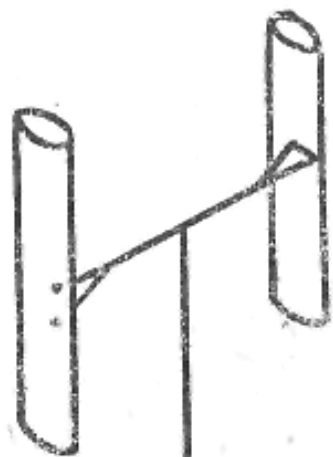
#### 4. Ротор Масгрува.

Лопастей этого ветроколеса в рабочем состоянии расположены вертикально, но имеют возможность вращаться или складываться вокруг горизонтальной оси при отключении. Существуют различные варианты роторов Масгрува, но все они отключаются при сильном ветре.



## ***5. Ротор Эванса.***

Лопастей этого ротора в аварийной ситуации и при управлении поворачиваются вокруг вертикальной оси.



## **Концентраторы.**

Одним из способов повышения мощности ветроэнергоустановки является использование специальных концентраторов (усилителей) воздушного потока.

Для горизонтально-осевых ветроэлектрогенераторов разработаны различные варианты таких концентраторов.

Это могут быть диффузоры или конфузоры (дефлекторы), направляющие на ветроколесо воздушный поток с площади, большей ометаемой площади ротора, и некоторые другие устройства.

Широкого распространения в промышленных установках концентраторы пока не получили.

# Основы теории расчета ветроэнергетических установок

## **1. Работа поверхности при действии на нее силы ветра**

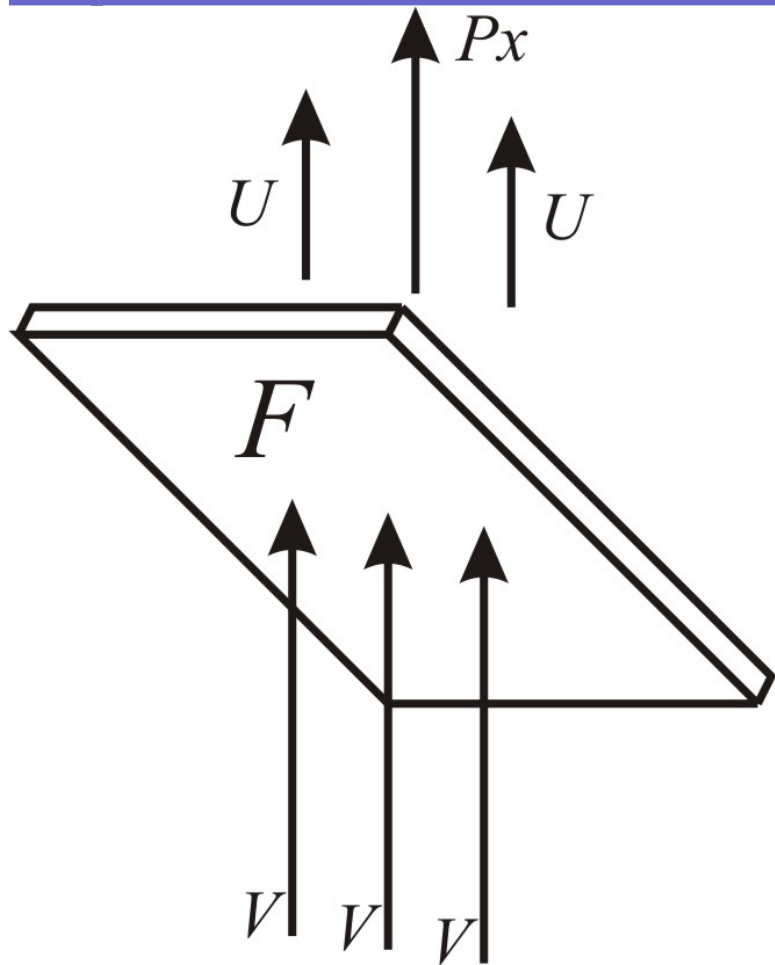
Поток ветра с поперечным сечением  $F$  обладает кинетической энергией, определяемой выражением:

$$\frac{m \cdot V^2}{2}.$$

Масса воздуха, протекающая через поперечное сечение  $F$  со скоростью  $V$ , равна:

$$m = \rho \cdot F \cdot V.$$

$$\frac{m \cdot V^2}{2} = \frac{\rho \cdot F \cdot V^3}{2}.$$



Допустим, мы имеем поверхность  $F$ , поставленную перпендикулярно к направлению ветра

Воздушный поток вследствие торможения его поверхностью получит подпор и будет обтекать её и производить давление силой  $P_x$

Вследствие действия этой силы поверхность будет перемещаться в направлении потока с некоторой скоростью  $U$

Работа при этом будет равна произведению силы на скорость  $U$ , с которой перемещается поверхность  $F$ , то есть  $T = P_x \cdot U$ ,



$P_x$  – сила сопротивления, которая равна

$$P_x = C_x \cdot F \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (V - U)^2,$$

где

$C_x$  – аэродинамический коэффициент лобового сопротивления;

$F$  – поверхность миделевого сечения тела, т.е. проекции площади тела на плоскость, перпендикулярную направлению воздушного потока

Тогда

$$T = C_x \cdot F \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (V - U)^2 \cdot U.$$

Определим отношение работы, развиваемой движущейся поверхностью, к энергии ветрового потока, имеющего поперечное сечение, равное этой поверхности, а именно

$$\xi = \frac{C_x \cdot F \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (V - U)^2 \cdot U}{F \cdot \frac{\rho \cdot V^3}{2}} = C_x \cdot (V - U)^2 \cdot \frac{U}{V^3}.$$

После преобразований получим

$$\xi = C_x \cdot \left(1 - \frac{U}{V}\right)^2 \cdot \frac{U}{V}.$$

Величину  $\xi$  называют **коэффициентом использования энергии ветра (КИЭВ)**

Из уравнения мы видим, что КИЭВ зависит от скорости перемещения поверхности в направлении ветра.

При некотором значении скорости  $U$  коэффициент получает максимальное значение.

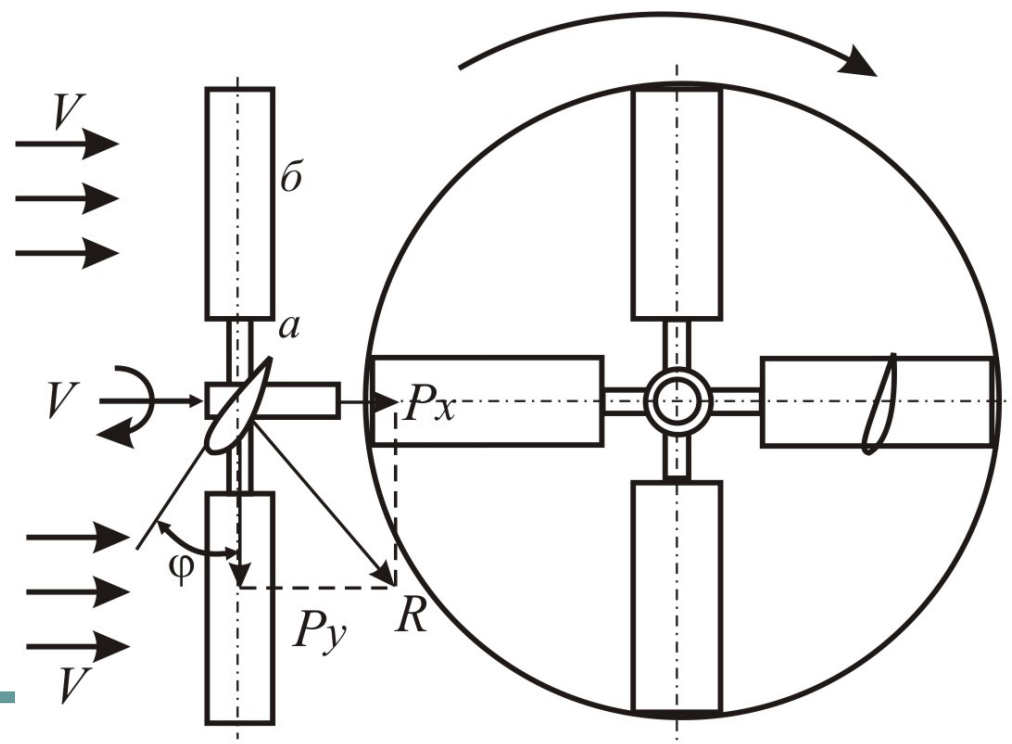
Установлено, чтобы получить максимальный КИЭВ, поверхность должна перемещаться со скоростью  $U = \frac{1}{3} \cdot V$

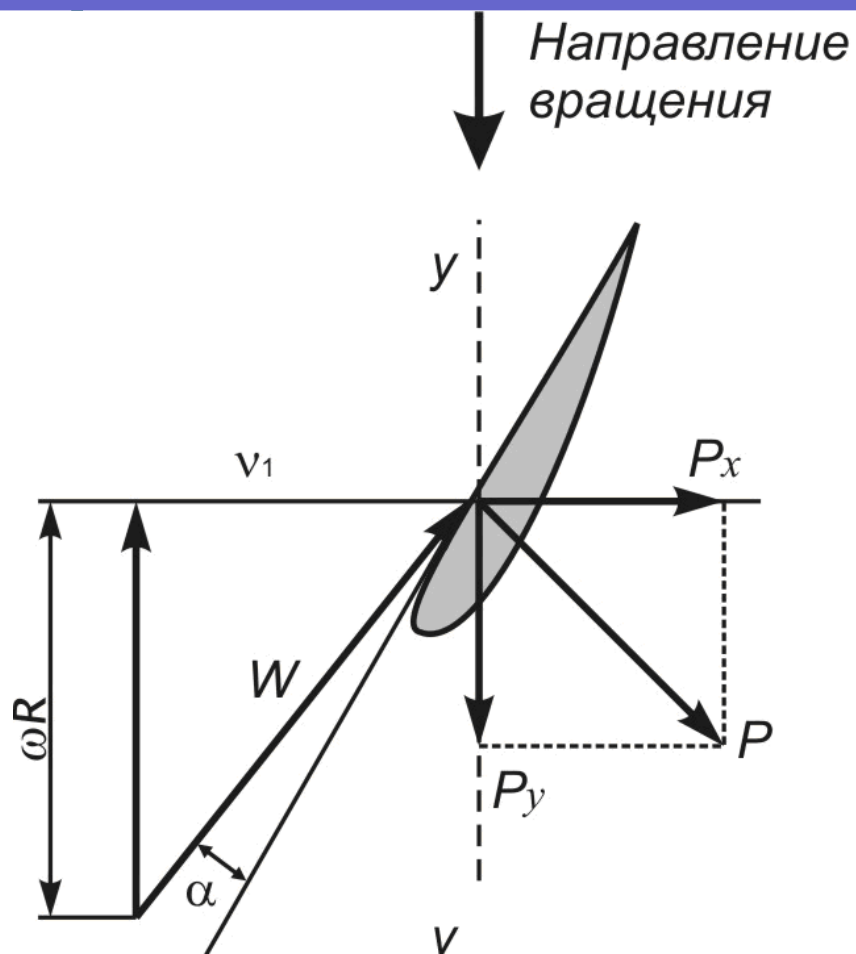
Максимальный коэффициент использования энергии ветра при работе поверхности силой сопротивления не может быть больше

$$\xi = 0,192$$

## 2. Работа ветрового колеса крыльчатого ветродвигателя

Крыльчатые ветроколеса работают за счёт косого удара при движении лопастей перпендикулярно к направлению скорости ветра в противоположность к прямому удару, рассмотренному в предыдущем случае. Устройство такого колеса показано на рис





Воздушный поток набегаает с относительной скоростью  $W$  под углом  $\alpha$ , который называют **углом атаки**, и действует с силой  $P$ .

Углы  $\varphi$  и  $\alpha$  в значительной мере определяют эффективность крыльев.

Силу  $P$  раскладывают на силы  $P_x$  и  $P_y$ .

Силы  $P_x$  производят давление в направлении ветра, которое называется лобовым давлением.

Силы  $P_y$  действуют в плоскости  $y - y$  вращения ветроколеса и создают крутящий момент.

Максимальные силы, приводящие колесо во вращение, получаются при некотором значении угла атаки  $\alpha$ .

Ввиду того что окружная скоростью длине крыла не одинакова, а возрастает по мере удаления его элементов от оси вращения ветроколеса, относительная скорость  $W$  также возрастает.

Вместе с этим убывает угол атаки  $\alpha$ . Следовательно, не все элементы крыла будут иметь максимальную подъёмную силу.

Если уменьшать угол  $\varphi$  каждого элемента лопасти по мере удаления его от оси вращения так, чтобы наивыгоднейший угол атаки  $\alpha$  примерно сохранялся постоянным, то мы получим **условие**, при котором приблизительно все элементы лопасти будут работать со своей максимальной подъёмной силой.

Лопасть с переменным углом заклинения получает форму **винтовой поверхности**.

**У хорошо выполненных моделей КИЭВ достигает 46%.**

# Теория идеального ветряка

Идеальным ветряком называют ветроколесо, у которого:

- Ось вращения параллельна скорости ветра
- Бесконечно большое число лопастей очень малой ширины
- Профильное сопротивление крыльев равно нулю, и циркуляция вдоль лопасти постоянна
- Потерянная скорость воздушного потока на ветроколесе постоянна по всей ометаемой поверхности ветряка
- Угловая скорость стремится к бесконечности

# Историческая справка

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

Наиболее полно, с точки зрения практического применения, теория идеального ветряка изложена проф. Г.Х. Сабининым, согласно которой **коэффициент использования энергия ветра идеальным ветряком равен 0,687.**



Из классической теории идеального ветряка вытекают следующие основные положения:

❖ Максимальный коэффициент использования энергии ветра идеального ветроколеса равен:  $\xi_i = 0,593.$

❖ Потеря скорости в плоскости ветроколеса равна одной трети скорости ветра:  $v_1 = \frac{1}{3} \cdot V.$

❖ Полная потеря скорости ветра за ветроколесом в два раза больше потери скорости в плоскости ветроколеса:  $v_2 = \frac{2}{3} \cdot V.$

Таким образом, скорость ветра за ветроколесом в три раза меньше скорости ветра перед ветроколесом

# Теория реального ветряка

Эта теория учитывает конечное число лопастей, их влияние друг на друга и на воздушный поток и еще ряд факторов.

Коэффициент использования энергии ветра

$$\xi = \frac{T}{\pi \cdot R^2 \cdot \frac{\rho \cdot V^3}{2}} = 4 \cdot e \cdot \frac{1-e}{1+e} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \cdot \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right) \right].$$

Мощность реального ветряка

$$T = 4 \cdot e \cdot \frac{1-e}{1+e} \cdot \left[ \left( 1 - \frac{r_0^2}{R^2} \right) - 2\mu \cdot \left( \frac{Z_u}{3} + \frac{1 - \frac{r_0}{R}}{Z_u} - \frac{1 - \frac{r_0^2}{R^2}}{2} \right) \right] \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \frac{\rho \cdot V^3}{2}.$$

# Потери ветряных двигателей

Потери ветряных двигателей разделяются на четыре группы.

1. Концевые потери, происходящие за счёт образования вихрей, сходящих с концов лопастей. Эти потери определяются на основании теории индуктивного сопротивления.
2. Профильные потери, которые вызываются трением струй воздуха о поверхность крыла и зависят только от профиля лопастей.
3. Потери на кручение струи за ветряком равны живой силе тангенциальных скоростей уходящей струи.
4. Потери, происходящие вследствие неполного использования всей ометаемой площади.

Полезную мощность, развиваемую ветряком, получим, вычтя все потери из мощности идеального ветряка:

$$T = T_i \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{R} \right)^2 - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_m \right].$$

Коэффициент использования энергии ветра реального ветряка:

$$\xi = \xi_i \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{R} \right)^2 - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_m \right].$$

# Различные режимы работы ветроколеса

Ветроколесо в отличие от гидротурбины обтекается практически безграничным потоком воздуха, поэтому здесь нет возможности отвести прошедший через ветроколесо воздух за пределы набегающего потока, и это определенным образом ограничивает эффективность ветроустановок.

Наиболее существенное ограничение связано с тем, что «отработанный» воздушный поток должен обладать определенной скоростью, чтобы покинуть окрестность ветроколеса, не создавая помех набегающему потоку.

Эффективность преобразования ветроколесом энергии ветрового потока будет оптимальной, если:

- лопасти расположены так тесно, или ветроколесо вращается так быстро, что каждая лопасть движется в потоке, турбулизированном расположенными впереди лопастями
- лопасти расположены так редко или ветроколесо вращается так медленно, что значительная часть воздушного потока будет проходить через поперечное сечение ветроколеса, практически не взаимодействуя с его лопастями.

Отсюда следует, что ***для достижения максимальной эффективности частота вращения ветроколеса заданной геометрии должна как-то соответствовать скорости ветра.***

Эффективность работы ветроколеса зависит от соотношения двух характерных времен:

- времени, за которое лопасть перемещается на расстояние, отделяющее ее от соседней лопасти  $\tau_b$
- времени, за которое создаваемая лопастью область сильного возмущения переместится на расстояние, равное ее характерной длине  $\tau_w$

Характерное время  $\tau_b$  для  $n$  - лопастного ветроколеса, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$ , равно:

$$\tau_b \approx \frac{2 \cdot \pi}{n \cdot \omega}$$

Время  $\tau_w$  зависит от размера и формы лопастей и изменяется обратно пропорционально скорости ветра.

Характерное время существования в плоскости ветроколеса создаваемого лопастью возмущения примерно равно:

$$\tau_w \approx \frac{d}{u_0}$$



Здесь

$u_0$  - скорость набегающего потока воздуха

$d$  - характерная длина возмущенной лопастью области

Эффективность использования ветроколесом энергии ветра максимальна, когда на конце лопастей выполняется условие:

$$\tau_w = \tau_b$$

Для  $n$  - лопастного ветроколеса  
оптимальная быстроходность:

$$Z_0 \approx \frac{4 \cdot \pi}{n}$$

Быстроходность ветроколеса является самым важным для их характеристики параметром, зависящим от трех основных переменных:

- радиуса ометаемой ветроколесом окружности,
- его угловой скорости вращения
- скорости ветра.

Как безразмерная величина она является основным параметром подобия при исследовании и конструировании ветроэлектрогенераторов.

# Характерные особенности ветрогенераторов

При проектировании ветроэлектрических установок надо учитывать следующие их **особенности**:

- ❖ Для обеспечения максимальной эффективности работы ветроколеса следует изменять частоту его вращения при изменении скорости ветра, сохраняя постоянным коэффициент быстроходности, в то же время для максимально эффективной работы электрогенератора необходима практически постоянная частота вращения
- ❖ Механические системы управления частотой вращения ветроколеса достаточно сложны и дороги. Гораздо эффективнее и дешевле управлять частотой его вращения, изменяя электрическую нагрузку электрогенератора

# Характерные особенности ветрогенераторов

❖ Оптимальная частота вращения ветроколеса тем меньше, чем больше его радиус, поэтому только очень малые ветроколеса (радиусом не более 2 м) удастся соединить с генератором напрямую.

При больших размерах ветроколеса приходится использовать повышающие редукторы, удорожающие ветроустановку и ее обслуживание. Альтернативой редукторам могут стать новые типы многополюсных генераторов, работающих при меньших частотах вращения

# Характерные особенности ветрогенераторов

❖ В конструкции ветроэлектрической установки предусматривается возможность отключения генератора от ветроколеса и вращения его от химического или механического аккумулятора энергии, поэтому систему управления генератором не связывают с работой ветроколеса.

При отсутствии такой связи даже при «мягком» соединении генератора с ветроколесом необходимы специальные демпфирующие устройства, для того чтобы исключить механические удары, перегрузки и броски напряжений на выходе генератора.

# Классы ветроэнергетических систем

Класс	Мощность ВЭУ	Степень автономности ВЭУ	Способы управления
А	$P > P_G$	Автономная	а) шагом ветроколеса; б) нагрузкой
В	$P \approx P_G$	Ветродизельная	а) отдельная работа ВЭУ и дизель-генератора; б) совместная работа ВЭУ и дизель-генератора
С	$P < P_G$	Подключенная к мощной энергосистеме	а) параметрами генератора постоянного тока; б) преобразованием постоянного тока в переменный; в) изменением коэффициента скольжения

## **Класс А: мощность ветроэлектростанции в энергосистеме является определяющей.**

В основном к этому классу относятся отдельно стоящие одногенераторные ветроустановки, не подключенные к какой-либо энергосистеме. Мощность таких ветроустановок, предназначенных для использования в отдаленных районах в целях освещения, электропитания маяков, средств связи и т.п., не превышает 5 кВт.

## **Класс В: мощность ветроэлектростанции – одного порядка с мощностью других генераторов системы.**

Такая ситуация характерна для небольших энергосистем в отдаленных районах. Чаще всего «другим генератором» является дизельный электростанция. В этом случае использование аэрогенератора позволяет экономить дизельное топливо. Дизельный генератор может включаться только в безветрие и может работать параллельно с ветрогенератором при слабом ветре.

## **Класс С: ветроэлектростанция подключена к энергосистеме, значительно более мощной, чем его собственная мощность.**

Это наиболее распространенный случай работы ветроэлектростанции любой мощности в районах, где имеются коммунальные или другие энергосистемы большой мощности. При этом энергия ВЭУ используется непосредственно, а ее излишки попадают в энергосистему. При слабом ветре и в безветрие потребители снабжаются электроэнергией от энергосистемы.

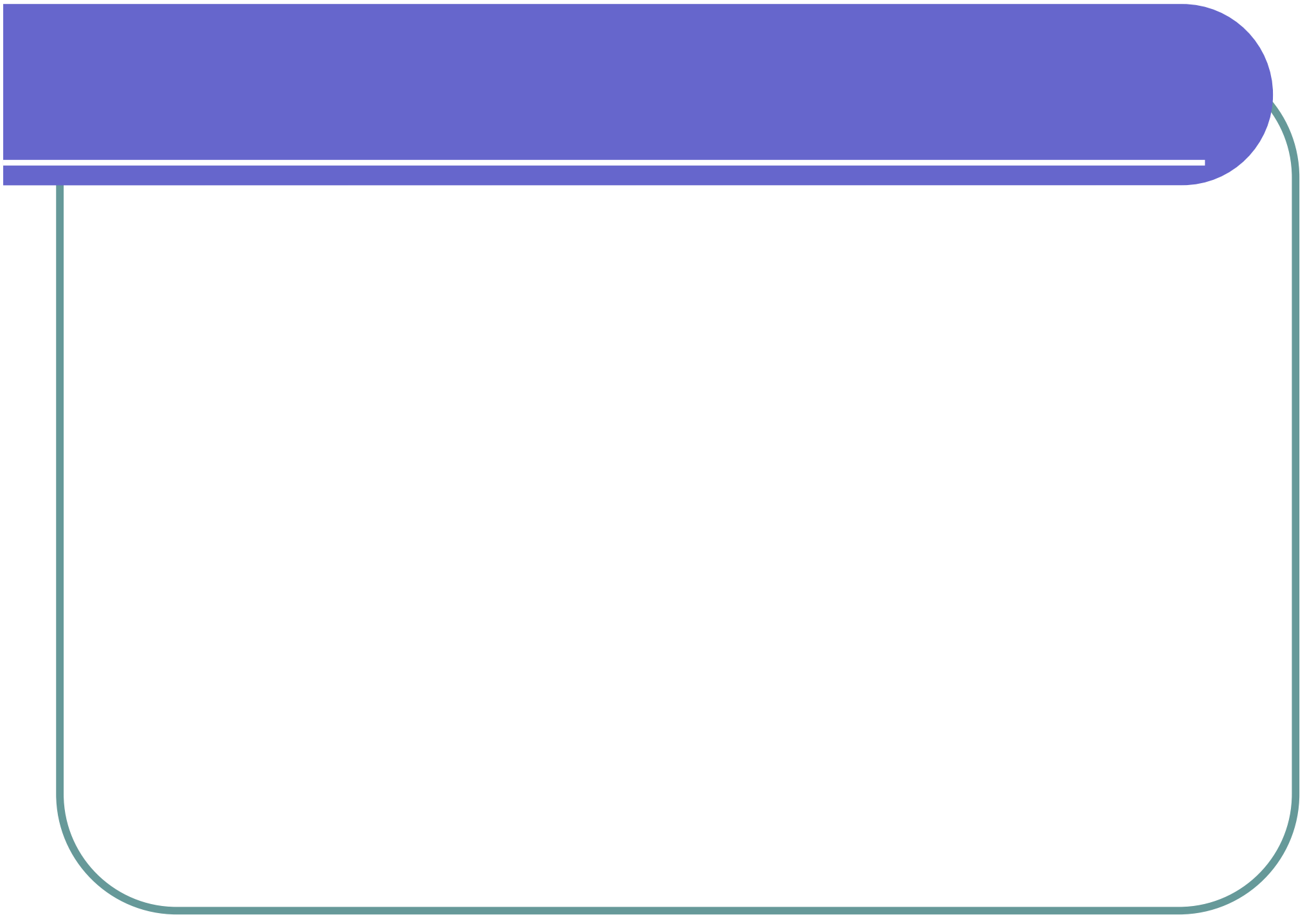
# Производство механической работы

- Морской транспорт
- Мельницы
- Водяные насосы
- Производство тепла



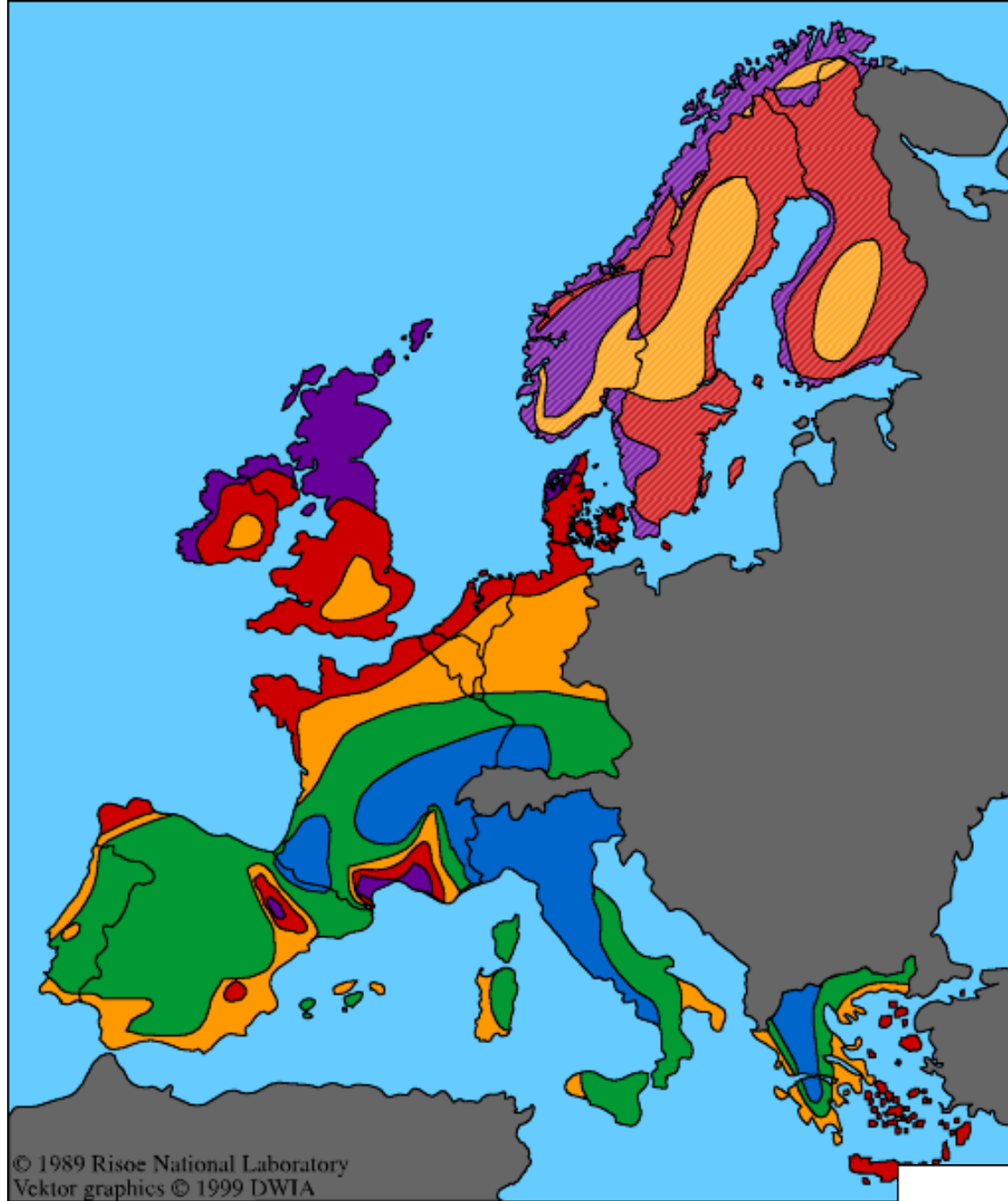
Реально работающие ветроагрегаты обнаружили ряд отрицательных явлений:

- затрудняется прием телепередач
- создают мощные звуковые колебания
- неравномерная работа генератора, следовательно изменяется частота тока
- значительные капитальные вложения (примерно в 5...10 раз больше, чем в АЭС)
- значительная площадь

















© 1989 Risø National Laboratory  
 Vektor graphics © 1999 DWTA

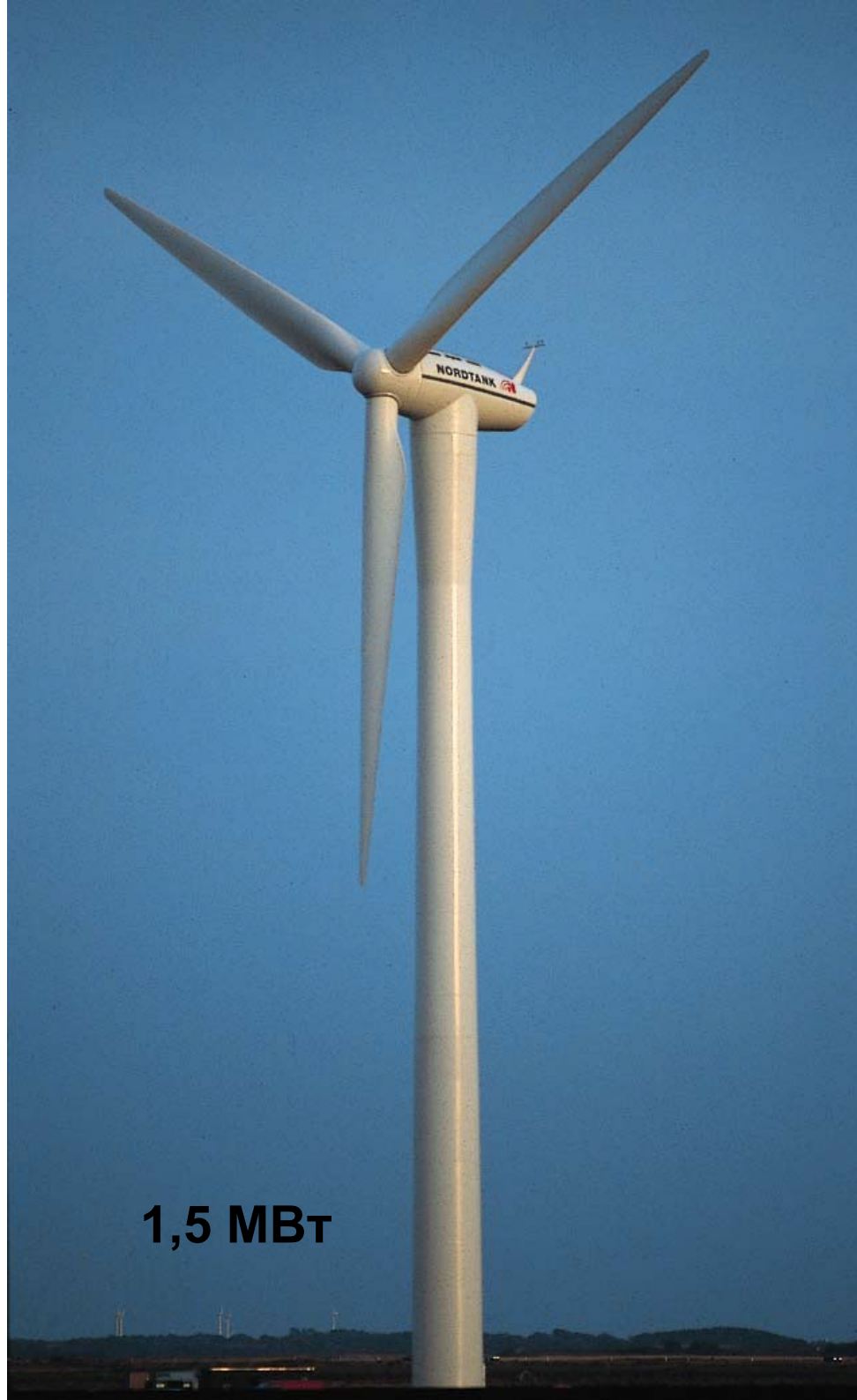
	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
			>7.5							
			5.5-7.5							
			<5.5							



2,0 MBT



**2,0 MBT**



**1,5 MBT**

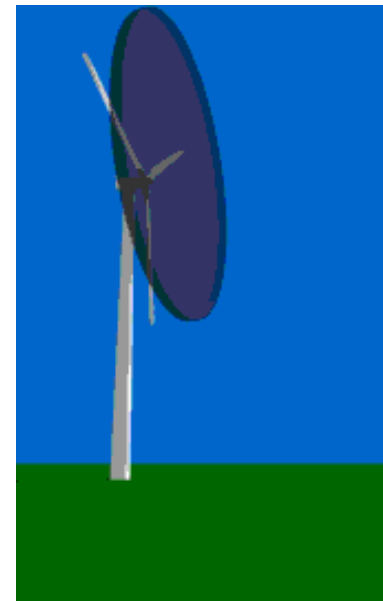
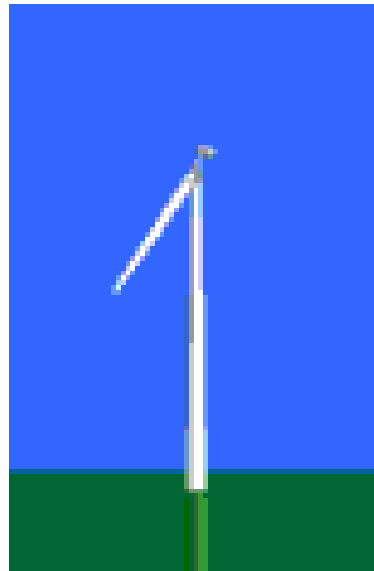
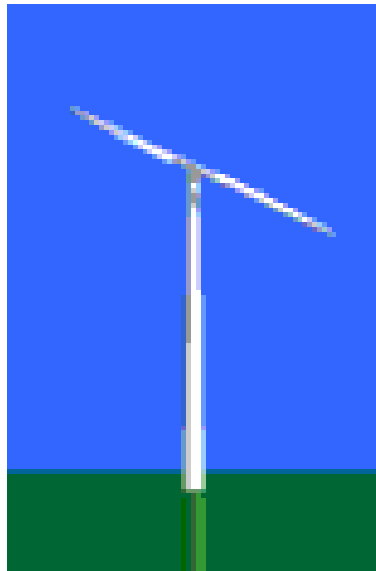
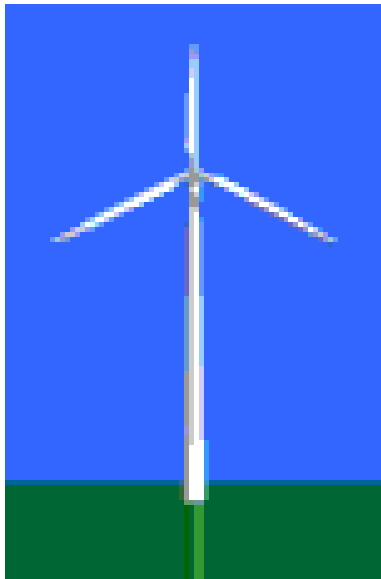
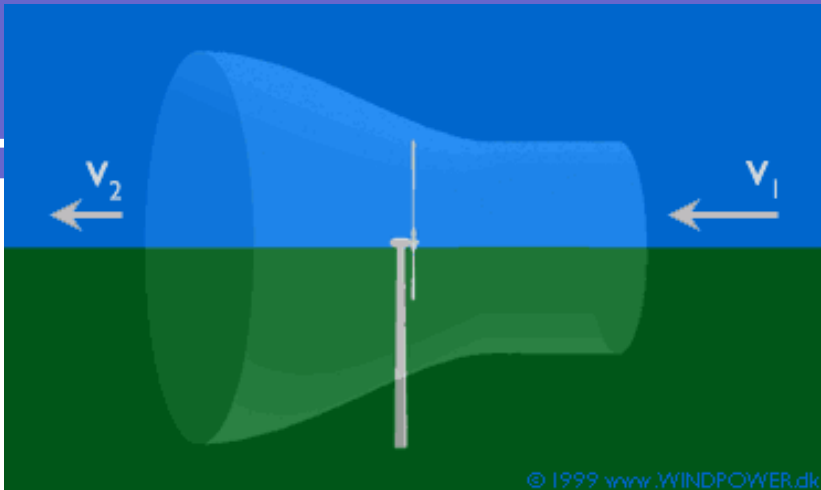


**2,5 MBT**



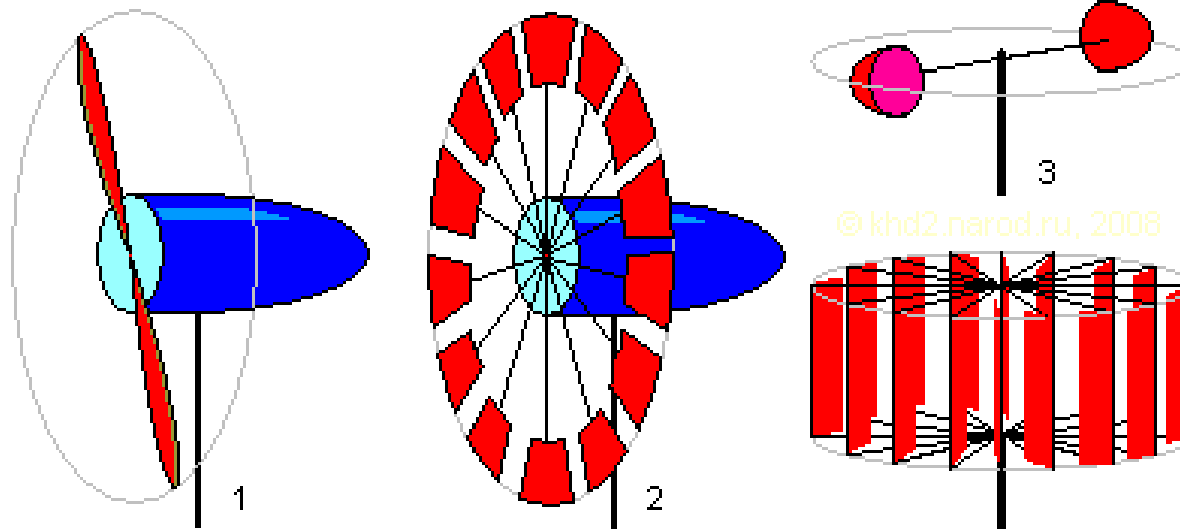








# Второй класс ветродвигателей



**роторные** ветродвигатели системы Савониуса