

Конструкция винта ветрогенератора.

Ветроэнергетика сегодня это активно развивающаяся отрасль. Но использование энергии ветра связано с определенными трудностями, в частности слабым и не постоянным напором ветра. Рассматриваемая далее конструкция винта позволяет повысить эффективность работы ветрогенератора.

На сегодняшний день существует множество конструкций винтов ветрогенераторов. Данная конструкция является усовершенствованной версией этого множества, и обладает более высокими характеристиками в условиях использования при слабом и непостоянном ветре.

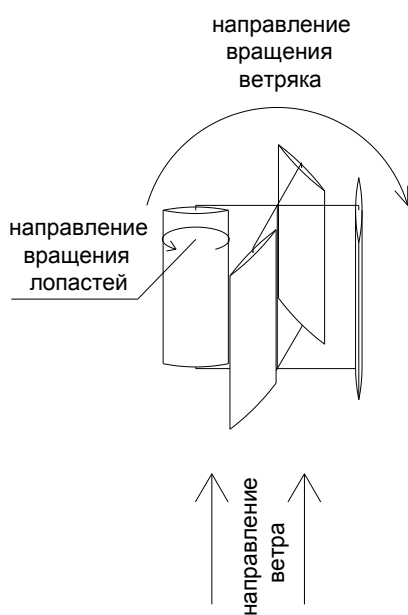


рис 1

Все существующее множество можно условно разделить на два типа. Первый тип использует подъемную силу ветра (ветряк с горизонтальной осью вращения), второй тип использует силу напора потока (ветряк с вертикальной осью вращения). Данная конструкция совмещает в себе обе возможности использования силы ветра.

Давайте подробнее рассмотрим эту конструкцию.

На рисунке 1 показана конструкция ветрогенератора с вертикальной осью вращения. Лопасти вращаются вокруг своей оси в обратную сторону вращения ветряка.

Ветрогенератор необходимо строго ориентировать по направлению ветра.

На рисунке 2 представлена конструкция ветрогенератора вид сверху.

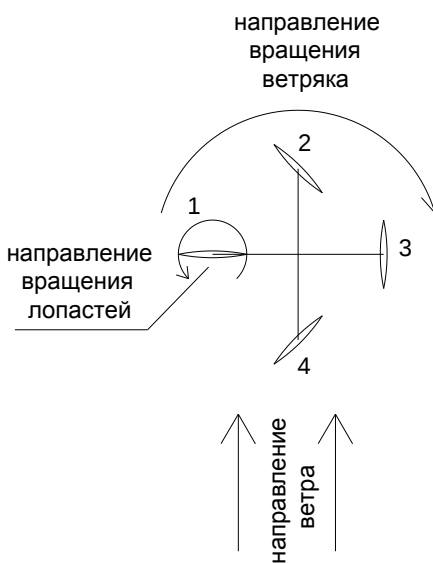


рис 2

При работе ветрогенератора лопасти вращаются вокруг своей оси, в обратную сторону вращения ветряка, таким образом, что за время поворота ветряка на 360 градусов, лопасть повернется на 180 градусов.

Соблюдая такую пропорцию вращения, мы в итоге получим что, лопасть, двигающаяся по направлению движения ветра, перпендикулярна потоку движения ветра. (1)

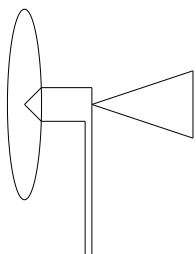
В момент обратного хода, когда лопасть движется против ветра, она повернута к потоку ребром и имеет наименьшее лобовое сопротивление. (3)

В промежуточном состоянии, лопасть расположена под углом к направлению движения ветра и на неё действует подъемная сила, вектор которой совпадает с вектором вращения

ветрогенератора. (2,4)

Для более полного анализа конструкции давайте рассмотрим «классические» модели, высокооборотистый ветряк с горизонтальной осью вращения и низкооборотистый с вертикальной осью вращения.

Ветряк с горизонтальной осью вращения.



Лопасти ветряка с горизонтальной осью вращения не могут двигаться по направлению ветра, таким образом, они не могут получить никакой пользы от силы напора потока.

Вместо этого они используют подъёмную силу.

Вычисление подъёмной силы и силы напора.

Подъёмная сила

Сила напора

$$Y = C_y \frac{\rho s}{2} V^2$$

$$X = C_x \frac{\rho s}{2} V^2$$

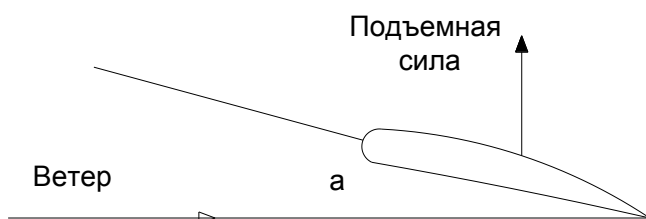
Где:

ρ - плотность воздуха 1,29кг/м³ при 0 по С на уровне моря.

s - площадь лопасти.

v - скорость набегающего потока м/с.

Подъёмная сила и сила лобового сопротивления зависят от коэффициента подъёмной силы C_y коэффициента лобового сопротивления C_x , которые в свою очередь зависят от примененного в лопасти профиля и угла атаки α , под которым поток ударяет в лопасть.



Угол атаки α - это угол между вектором набегающего потока и хордой лопасти.

Мы не можем вычислить коэффициенты подъёмной силы и лобового сопротивления. Они измерены экспериментально в аэродинамической трубе и занесены в атласы профилей.

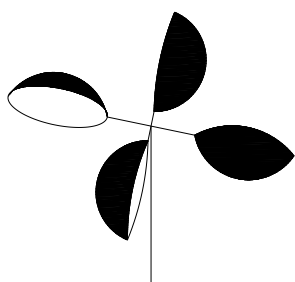
При увеличении угла атаки подъёмная сила тоже увеличивается, пока не достигает точки срыва потока.

Практически все профили имеют наивысшее аэродинамическое качество при угле атаки 5 градусов.

В теории совершенный ротор ветротурбины должен иметь бесконечное количество, бесконечно узких лопастей. На практике большое распространение получили ветряки с тремя лопастями. Они имеют высокую скорость вращения, равную скорости потока ветра, следовательно высокий КИЭВ (коэффициент использования энергии ветра). Увеличение количества лопастей ведет к снижению скорости вращения ветряка и как следствие потеря мощности.

Ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения имеют наивысший КИЭВ при скорости ветра от 8 до 14 метров в секунду. При более высокой скорости ветра Ветрогенератор затормаживают, при низкой отключают нагрузку и дают разогнаться до оптимальной скорости. Ветряки с горизонтальной осью вращения имеют низкий начальный момент, в сравнении с ветряками с вертикальной осью вращения, и при малой скорости ветра не эффективны.

Ветряк с вертикальной осью вращения.



Классическим примером ветряка с вертикальной осью вращения является чашечный анемометр.

Для оценки эффективности данной конструкции давайте рассмотрим силы действующие на лопасти ветряка.

Возьмем неподвижную пластину, установленную перпендикулярно потоку ветра, на нее будет действовать сила

$$F = C_x \frac{\rho s}{2} V^2$$

Где:

F- сила давления воздушного потока

C_x- коэффициент сопротивления воздушного потока

ρ- плотность воздуха

s- площадь поперечного сечения пластины

V- скорость потока воздуха

Коэффициент C_x зависит от формы тела. Понятно, что скорлупка, обращенная отверстием навстречу потоку, имеет большее сопротивление, чем та же скорлупка, обращенная выпуклостью к потоку.

Если пластина неподвижна, то полезная мощность равна нулю. Если пластина движется со скоростью потока, то она не испытывает давления ветра и мощность тоже равна нулю. Для достижения максимального КИЭВ скорость пластины должна быть в три раза меньше скорости потока ветра.

Теория в данном случае неумолима, парусные конструкции имеют КИЭВ в три раза меньше чем пропеллер. Скорость вращения ветряка с вертикальной осью меньше как следствие потеря мощности, так как мощность равна произведению силы на скорость (N=FV).

Давайте вернемся к нашей первоначальной конструкции и более подробно рассмотрим силы действующие на лопасти ветряка (рис 3).

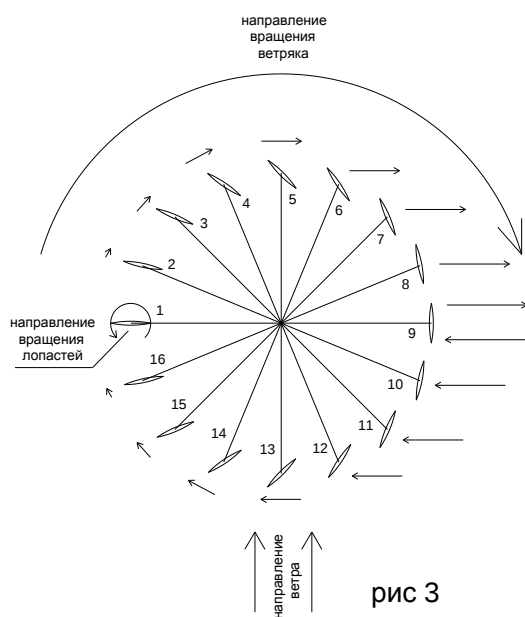
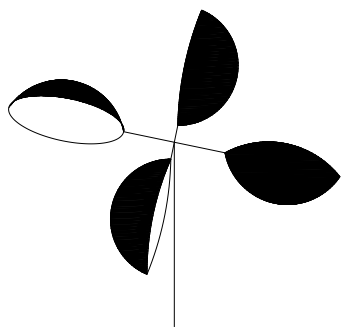


рис 3

Считаем что ветряк крутится со скоростью движения ветра или близкой к этому. Лопасть в положении 1 (рис.3) расположена перпендикулярно потоку ветра и движется со скоростью ветра, она не выполняет ни какой работы, ее КПД равен нулю. В положении 2-3 лопасть, двигаясь по направлению движения ветра начинает смещаться перпендикулярно потоку ветра и с учетом скорости вращения

ветряка и скорости ветра набегающий поток попадает в ребро лопасти обтекая ее и создает подъемную силу вектор которой направлен по направлению вращения ветряка. Показана стрелочками, размерами стрелок условно показал увеличение подъемной силы ветра. В положении 4 лопасть не значительно смещается по направлению ветра основное ее движение перпендикулярно потоку и с учетом скорости вращения ветряка и скорости ветра набегающий поток попадает в ребро лопасти обтекая ее и создает подъемную силу вектор которой направлен по направлению вращения ветряка. В положении 5 лопасть движется перпендикулярно потоку так как это происходит в ветряках с горизонтальной осью вращения и на нее действуют такие же силы как и на них. В положении 6-7-8 лопасть движется не только перпендикулярно потоку но и начинает движение на встречу ему. Поэтому подъемная сила ветра растет но вектор ее теперь постепенно отклоняется в сторону от направления вращения ветряка. Показано стрелочками. В положении 9 лопасть повернута к потоку ветра ребром и движется навстречу ему с такой же скоростью. Поэтому подъемная сила в 2 раза больше но направлена перпендикулярна направлению движения ветряка. Перейдя через условный ноль подъемная сила меняет свое направление на противоположное сохранив величину. В положении 10-11-12 лопасть постепенно замедляет движение навстречу потоку и увеличивает движение перпендикулярно ему. Поэтому вектор подъемной силы уменьшается но зато направление вектора постепенно выравнивается и начинает совпадать с направлением вращения ветряка. Я хочу отметить положение лопасти остается оптимальным для набегающего потока который обтекает ее и срыва потока не происходит. В положении 13 лопасть движется перпендикулярно потоку так как это происходит в ветряках с горизонтальной осью вращения и на нее действуют такие же силы как и на классический ветряк с горизонтальной осью вращения. В положении 14-15-16 лопасть постепенно замедляет свое движение перпендикулярно потоку ветра и увеличивает движение по направлению ветра. Подъемная сила ветра постепенно уменьшается. Вектор подъемной силы теперь совпадает с направлением вращения ветряка. Так как скорость вращения ветряка равна или близка скорости движения ветра мы не можем получить ни какой пользы от силы напора потока. Но в статическом положении, когда ветряк остановлен, возможность конструкции использовать силу напора потока является огромным плюсом. Это дает конструкции высокий

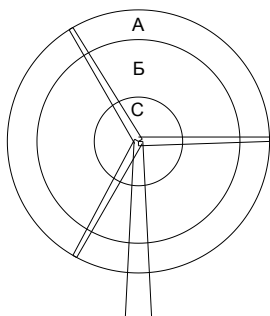
стартовый порог при малой скорости ветра. Позволяет растолкать конструкцию до момента пока лопасть сориентируется относительно набегающего потока и зацепится за подъемную силу ветра.



Для сравнения рассмотрим чашечный анемометр. Воздушный поток давит на левую и правую сторону анемометра одинаково за счет того что с одной стороны чашечка повернута к потоку выпуклой стороной а с другой вогнутой создается разница в давлении на левую и правую сторону. Конструкция поворачивается. Эта разница составляет 5-10% . В моей конструкции (рис.3) лопасть в положении 1 повернута

плоскостью к потоку а в положении 9 ребром. При таком расположении лопастей разница давления на левую и правую половину будет гораздо больше чем у чашечного анемометра. Отсюда вывод стартовый порог конструкции (рис.3) выше стартового порога традиционных ветряков с вертикальной осью вращения ну и конечно с горизонтальной тоже.

У конструкции есть недостатки в частности по фронту и тылу ветряк наиболее полно использует подъемную силу ветра но по флангам подъемная сила ветра или стремится к нулю или вектор подъемной силы ветра отклоняется от направления вращения ветряка.



Для сравнения рассмотрим классический ветряк с горизонтальной осью вращения. Давайте условно разделим обметаемую поверхность на три области А Б С в области А лопасть движется быстрее скорости ветра и не какой работы не выполняет а только создает низкочастотный неприятный шум. В области Б лопасть движется со скоростью ветра и производит максимальную работу. В области С лопасть движется гораздо медленнее скорости ветра в следствии чего производит

меньше работы. В силу особенности конструкции имеет большой размер и вес в основании лопасти что приводит к излишней парусности и инертности ветряка. Из рассмотренного выше видно что лопасть ветряка с горизонтальной осью вращения работает фрагментарно. В моей конструкции лопасти работают всей своей поверхностью и если вспомнить теорию гораздо ближе к идеалу. Идеальный ветряк имеет бесконечно длинные и бесконечно тонкие лопасти.

Таким образом, мы видим что данная конструкция совмещает в себе возможности обеих ветряков, с горизонтальной и вертикальной осью вращения, и использует как силу напора потока так и подъемную силу ветра. Эта возможность совмещения дает конструкции преимущества, в сравнении с ветряком с горизонтальной осью вращения, конструкция более чувствительна к слабым ветрам, в сравнении с ветряком с вертикальной осью вращения, конструкция имеет более высокий КИЭВ (коэффициент использования энергии ветра).

Характеристики винта ветрогенератора зависят от формы лопастей. Чем лопасть шире, тем более чувствительней становится конструкция к слабому потоку ветра. Но такая лопасть требует большей энергии на вращение вокруг своей оси, усиление механизма вращения, и имеет более низкие аэродинамические показатели. Узкая лопасть имеет лучшую аэродинамику, позволяет упростить механизм вращения вокруг своей оси, требует меньшей энергии на вращение. Узкие лопасти более эффективно используют подъемную силу ветра, что в совокупности, с выше

сказанным, приводит к большей скорости вращения ветрогенератора и как следствие к увеличению мощности. Итак вывод: ветряк с широкими лопастями имеет высокий стартовый момент но требует усиление конструкции и имеет низкие показатели при сильном потоке ветра. Ветряк с узкими лопастями эффективен при сильном ветре но при слабом имеет низкий начальный момент. Вычислить «золотую» середину формы лопастей невозможно, необходимо провести практические испытания.

Для оценки эффективности ветрогенератора необходимо рассмотреть условия эксплуатации данной конструкции. Давайте проанализируем тенденции развития современной ветроэнергетики. Для установки ветрогенераторов выбираются места с постоянным сильным ветром. Промышленные установки для получения электроэнергии это несколько ветрогенераторов, с горизонтальной осью вращения, которые объединены в одну сеть. Ветрогенераторы с горизонтальной осью вращения эффективны при скорости ветра от 8 до 14 метров в секунду. При более высокой скорости ветра Ветрогенератор затормаживают, при низкой отключают нагрузку и дают разогнаться до оптимальной скорости. Постоянный ветер необходимое условие, так как запастись электроэнергией в аккумуляторах очень дорого. В стоимости ветрогенератора около 50% затрат составляет стоимость инвертора, 25% стоимость аккумуляторов, необходимо так же учитывать стоимость коммуникаций для доставки электроэнергии потребителю. Сегодня электроэнергия полученная от ветроэлектростанций дороже электроэнергии полученной традиционными способами. Ветроэлектростанции оправдывают себя в удаленных и труднодоступных местах.

Существует так же и другое направление в развитии ветроэнергетики. Более выгодно запастись энергией в производимом продукте. В поднятую, в водонапорную башню, воду для орошения и других хозяйственных нужд, подогрева воды, отопления жилья и тд. Это отменяет необходимость иметь постоянный напор ветра и допускает определенную цикличность. В свою очередь эта возможность выдвигает новые требования к ветрогенератору. Ветрогенератор должен иметь высокий стартовый момент, устойчиво работать при малом и нестабильном ветре, иметь

небольшую стоимость. Данная конструкция отвечает этим требованиям. Перспективы её использования это небольшие ветрогенераторы применяемые для перекачки и подогрева воды, отопления жилья и тд. в условиях небольшого и непостоянного ветра.

Давайте вернемся к рассмотрению нашей конструкции. На первый взгляд кажется что конструкция ветряка довольно сложная, требует строгой ориентации по направлению ветра, выдвигает требования вращения лопастей с заданной пропорцией, это не так. Рассмотрим один из вариантов реализации конструкции с заданными параметрами.

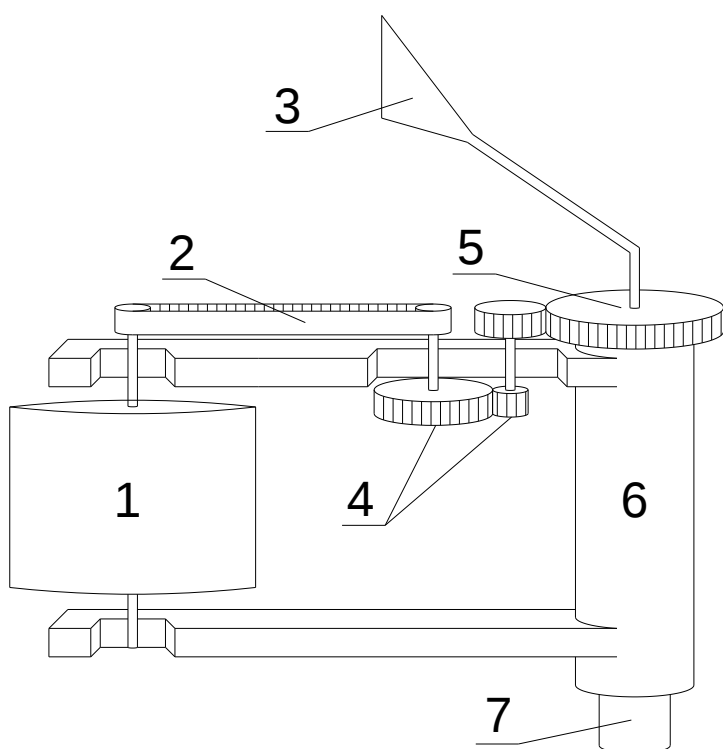


рис 4

На рисунке 4 представлена условная схема одного плеча ветрогенератора.

- 1 Лопасть ветрогенератора.
- 2 Зубчатый ремень (по типу ремня ГРМ) для передачи вращения от редуктора к лопасти.
- 3 Элемент ориентации по ветру (флюгер, хвостовое оперение).
- 4 Редуктор.
- 5 Шестеренка ориентации ветрогенератора по ветру.
- 6 Основание ветрогенератора.
- 7 Мачта на которой закреплен ветрогенератор.

Ветрогенератор закреплен на мачте 7 через подвижное соединение (подшипник) и свободно вращается вокруг своей оси. Необходимое соотношение вращения и направления вращения ветрогенератора и лопастей реализуется с помощью редуктора 4 и передается на лопасть 1 с помощью ремня 2. При работе ветрогенератора лопасти вращаются вокруг своей оси, в обратную сторону вращения ветрогенератора, (ветрогенератор вращается по часовой стрелке, лопасть вращается против часовой стрелки) таким образом, что за время поворота ветрогенератора на 360 градусов, лопасть повернется на 180 градусов. Направление ветрогенератора по отношению к ветру определяется положением лопастей которое в свою очередь зависит от шестеренки ориентации ветрогенератора по ветру 5. Шестеренка 5 закреплена на мачте 7 через подвижное соединение (подшипник) и свободно вращается вокруг своей оси. Положение шестеренки 5 определяется флюгером 3 (хвостовое оперение) который жестко закреплен на шестеренке 5 и поворачивает её вокруг оси в зависимости от направления ветра.

Таким образом мы видим что для организации нужного вращения лопастей достаточно

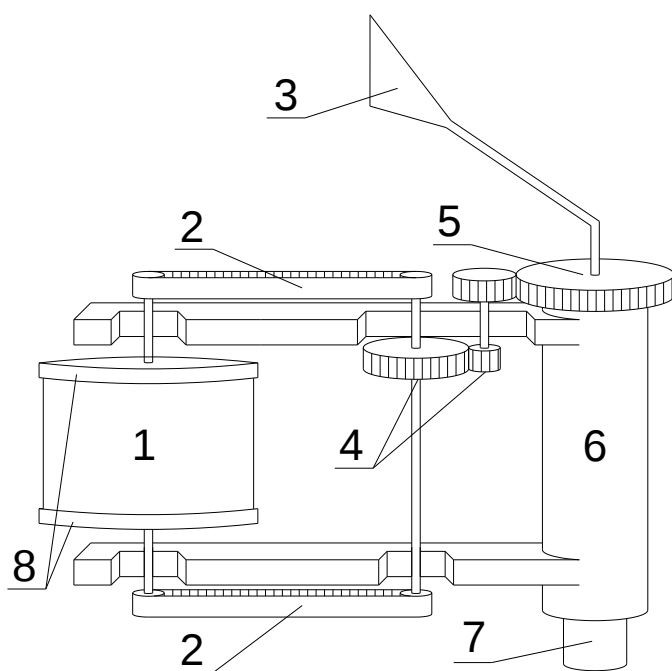


рис 5

несложного механизма редуктора 4 и ремня 2, которые являются довольно простыми деталями и не могут увеличить стоимость ветрогенератора. Для ориентации ветрогенератора по ветру нет необходимости поворачивать всю конструкцию, как ветрогенератор с горизонтальной осью вращения, достаточно повернуть шестеренку 5, с чем легко справится флюгер 3, без дополнительных затрат энергии. Лопасти ветрогенератора могут быть изготовлены из пластика по принципу сотового поликарбоната и учитывать возможность отстегивания при ураганных порывах ветра, что защитит конструкцию от разрушения.

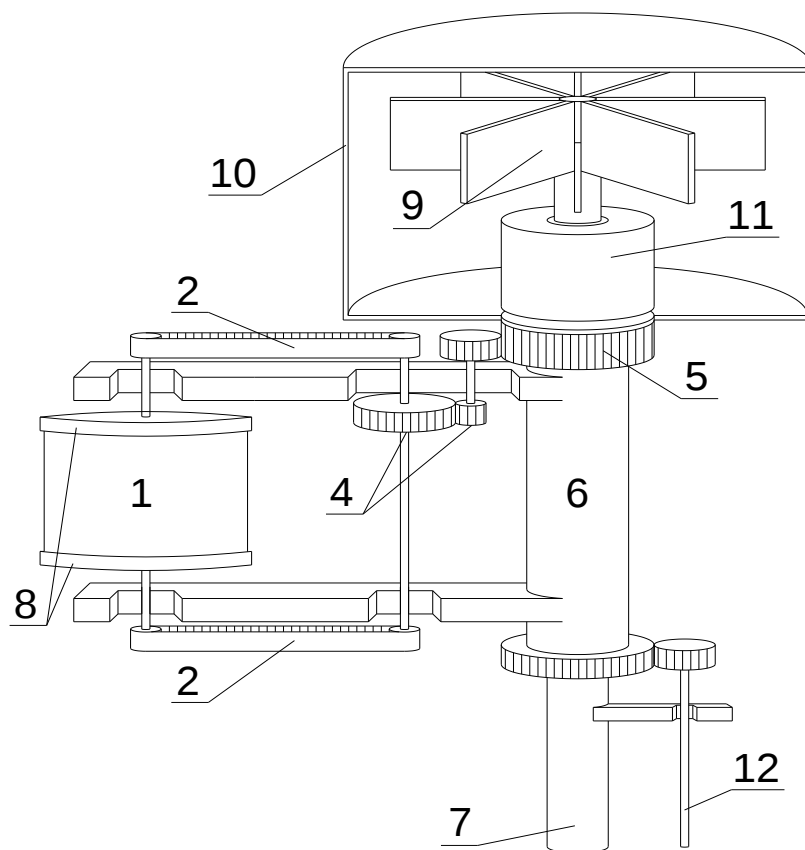


рис 6

Рассмотрим подробнее один из вариантов реализации конструкции с отстегивающимися лопастями. На рисунке 5 изображено плечо с отстегивающейся лопастью. Для более четкого позиционирования лопасти по ветру продублируем механизм поворота лопасти. Теперь лопасть крепится к механизму поворота верхней и нижней своей гранью что увеличивает ее устойчивость и убирает ненужные вибрации. Лопасть изготовлена из пластика и обладает определенной гибкостью. При ураганных порывах ветра лопасть выгибается вдоль своей оси и выскакивает из пазов 8. Что предохраняет конструкцию от

разрушения.

Давайте вернемся к рассмотрению системы ориентирования ветрогенератора по направлению ветра. При небольших размерах ветрогенератора и малом количестве лопастей флюгер легко справляется с задачей ориентации ветрогенератора по направлению ветра, однако при увеличении размеров ветряка и количества лопастей на шестеренку 5 (шестеренка ориентации ветрогенератора по ветру) будет действовать значительный крутящий момент который будет поворачивать шестеренку 5 по ходу вращения ветрогенератора. Флюгер будет противодействовать этой силе и возвращать шестеренку в исходное состояние, оптимальное для правильной ориентации ветрогенератора по направлению ветра. В результате взаимодействия этих противоположно направленных сил будет возникать раскачивания шестеренки 5 которое будет передоваться через редуктор 4, и ремень 2, на лопасть 1, что приведет к ненужной вибрации. Для того чтобы исключить возможность возникновения ненужной нам вибрации необходимо заменить флюгер на другую конструкцию.

На рисунке 6 условно изображена конструкция ветрогенератора у которой система ориентирования по ветру состоит из вращающейся крыльчатки 9, поворотного кожуха 10, и понижающего редуктора 11, который передает крутящий момент на шестеренку 5.

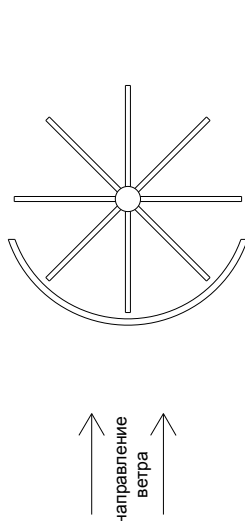


рис 7

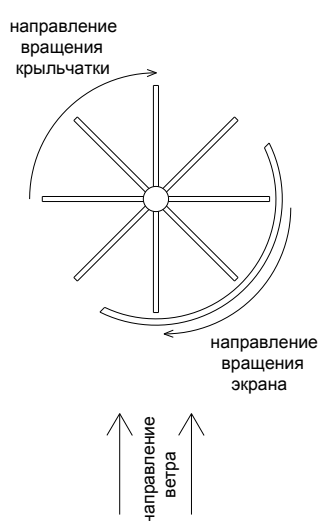


рис 8

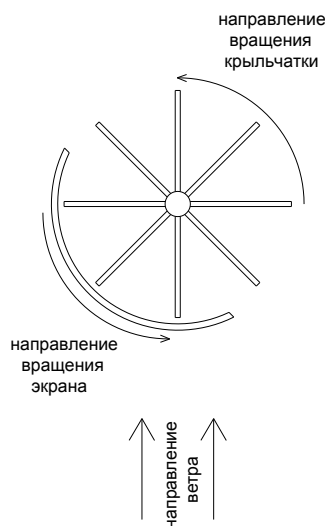


рис 9

Рассмотрим принцип действия этой системы ориентирования. На рисунке 7 схематично изображена крыльчатка и экран который заслоняет крыльчатку от ветра. В таком положении крыльчатка находится в покое. Когда направление ветра меняется рисунок 8 экран уже не закрывает крыльчатку полностью и поток ветра давит на незакрытые экраном лопасти крыльчатки приводя их в движение. Крыльчатка 9 вращается передавая это вращение через понижающий редуктор 11 шестеренке 5 на которой закреплен экран 10. Экран вращается в ту же сторону что и крыльчатка но с заданным редуктором замедлением и закрывает крыльчатку от потока ветра. В следствии чего крыльчатка останавливается. Когда направление ветра меняется в другую сторону рисунок 9 все происходит точно так же только крыльчатка крутится в другую сторону и экран поворачиваясь в сторону поворота крыльчатки закрывает ее. Размер экрана влияет на чувствительность конструкции. Если размер экрана составляет четверть длины окружности конструкция становится более чувствительной к смене направления ветра.

Применение редуктора дает нам возможность более четко фиксировать положение шестеренки 5 и исключает возможное раскачивание и ненужные вибрации. С другой стороны меньшее противодействие на поворот крыльчатки делает конструкцию более чувствительной к малейшему изменению направления ветра. Чем больше понижающий коэффициент редуктора тем большее поворотное усилие удерживает шестеренка 5 и выше чувствительность конструкции к изменению направления ветра. Но большой понижающий коэффициент увеличивает время отработки изменения направления ветра, что не желательно в условиях частого изменения направления ветра.

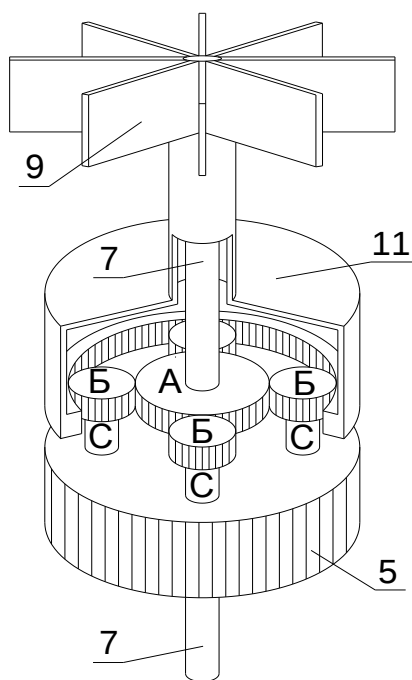


рис 10

Компромисс между жесткостью положения шестеренки 5, размерами крыльчатки 9 и экрана 10, чувствительности конструкции к изменению направления ветра, и временем отработки поворота необходимо установить экспериментально с учетом особенностей эксплуатации в конкретных условиях.

Рассмотрим конструкцию редуктора подробно. На рисунке 10 изображено: крыльчатка 9, редуктор в разрезе 11 и шестеренка 5 (шестеренка ориентации ветрогенератора по ветру). Крыльчатка 9 жестко закреплена на корпусе редуктора 11 и составляет с ним единое целое. Вся эта конструкция крепится на мачту 7 с помощью подшипника и свободно вращается вокруг мачты. Шестеренка А жестко закреплена на мачте 7 и не вращается относительно мачты. Четыре шестеренки Б крепятся к осям С через подшипники и свободно вращаются на этих осях. Оси С жестко закреплены в шестеренке 5. Шестеренка 5 крепится к мачте 7 через подшипник и свободно вращается вокруг мачты.

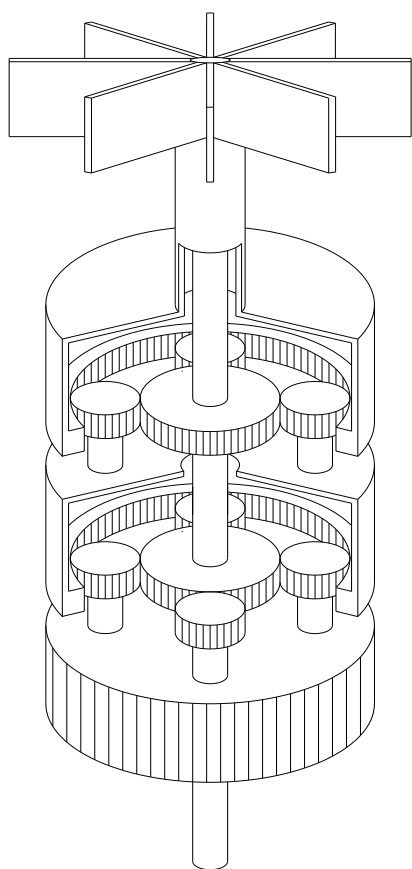


рис 11

Вращающаяся крыльчатка передает крутящий момент на корпус редуктора 11 который в свою очередь вращает шестеренки Б. Шестеренки Б движутся вокруг шестеренки А и передают это движение через оси С шестеренки 5 которая определяет положение лопастей ветрогенератора относительно ветра. Для увеличения понижающего коэффициента редуктора можно использовать несколько сегментов, как показано на рисунке 11.

Для данной конструкции ветрогенератора можно применить электронную систему ориентирования по веру. Для этого необходимо убрать экран и крыльчатку. На место крыльчатки устанавливается электродвигатель, который управляется электронной схемой ориентирования по направлению ветра. Такая схема ориентирования дает возможность дистанционно управлять положением лопастей. При необходимости отворачивать ветрогенератор от ветра тем самым останавливая его для обслуживания, подключения и отключения оборудования и тд.

В отличие от ветрогенераторов с горизонтальной осью вращения, где ведомое оборудование находится высоко над землей данная конструкция ветрогенератора имеет неоспоримое преимущество.

Конструкция ветрогенератора позволяет легко передавать крутящий момент вниз к основанию мачты с помощью вала 12 рисунок 6. Это значительное преимущество, если ведомое оборудование имеет большой вес и габариты и не может быть поднято высоко над землей. Ветрогенератор имеет высокий стартовый порог и большой крутящий момент по сравнению с другими ветрогенераторами что дает возможность прямого подключения оборудования: насосов, компрессоров, генераторов, систем отопления и тд. В отличие от ветрогенераторов с горизонтальной осью вращения данная конструкция будет работать бесшумно, так как не будет вращаться быстрее скорости ветра. Это позволит размещать ветрогенераторы в непосредственной близости от места проживания.

Основная идея этой конструкции получить компактный не дорогой ветряк который способен устойчиво работать при слабых и умеренных ветрах. Такая ветровая нагрузка практически по всей территории России. Это открывает перед конструкцией широкую область применения и огромный рынок сбыта.

Вывод: данная конструкция ветрогенератора имеет высокий стартовый порог, большой крутящий момент, устойчиво работает как при слабом и непостоянном так и при умеренном и сильном ветре, быстро и без затрат энергии ориентируется по направлению ветра. Удобное размещение ведомого оборудования расширяет область применения ветрогенератора, а бесшумная работа позволяет размещать ветрогенераторы в непосредственной близости от места проживания.