МАТЕРИАЛИ ПО ВЯТЪРНИ СИСТЕМИ И ИЗМЕРВАТЕЛНО ОБОРУДВАНЕ

● ОСНОВНИ ИЗЛОЖЕНИЯ

Вятърът е един от алтернативните енергоизточници, който практически е неизчерпаем като ресурс (безплатен) и не води до климатични проблеми. От древността са известни конструкции на съоръжения, задвижвани от вятър – платноходи, мелници, помпи и др. Характерното за тях е директното използване на ветровата енергия. Движението на въздушните маси в приземните слоеве (вятър), се характеризира с голяма променливост по посока и скорост. Силата на атмосферния въздух в естествената му среда е възобновяемата енергия задвижваща вятърните турбини.

● Енергийният потенциал на вятъра е огромен. Около 1-2% от падащата на Земята слънчева енергия се превръща във вятърна [3]. В същото време растенията абсорбират посредством фотосинтеза и преобразуват в биомаса само 0,02 - 0,03 %. Според оценката в [6] актуалното енергийно потребление може да се задоволи при усвояване на ветровата енергия на височина до 80 м върху 20 % от терените със средногодишна ветрова скорост над 6,9 m/s.

В световен мащаб има постоянен ръст на инсталираната ветрова мощност. За 2007 г. за света тя е 93,8 GW (61 GW за Европа). Независимо от високите темпове на нарастване, участието на ветровата енергия в общото енергопотребление остава ниско, под 0,5% [7]. **Поради случайния характер на вятъра и голямата му дисперсия особеност на ветровите генератори е многократната разлика между средната генерирана мощност и инсталираната номинална мощност.** Отношението между тях се определя като ***използваемост***. **Това се задава често и като брой часове работа с номинална мощност, през които се произвежда същото**

количество енергия, както за всичките 8760 часа на годината. Използваемост от 15-25% е добра и тя важи за страните богати на вятър. За нашата страна, бедна на вятър, този показател е по-малък, с изключение на отделни райони, някои от които труднодостъпни.

▪ Влияние върху околната среда при използване на вятърната енергия

Поскъпването на фосилните горива и глобалното затопляне дава тласък на развитието на ветровата енергия. Вятърът се намира за привлекателен по редица причини. От гледна точка на опазване на околната среда могат да се посочат редица негови **предимства**:

- производството на вятърна енергия не замърсява околната среда, тя е практически неизчерпаема, няма емисии на изгорели газове и така не се влияе негативно на климатичните промени.

- не се произвеждат токсични газове, нито киселинни дъждове. С всеки kWh електроенергия, произведен от вятърна енергия вместо от въглища се спестяват емисиите на: **0,60 kg CO_2 /въглероден диоксид/**, **1,33 g SO_2 /серен диоксид/**, **1,67 g NO_x /азотни окиси/**

- не се произвеждат опасни вторични продукти, няма и отровни замърсители.
- избягват се отрицателните въздействия произтичащи от производството, преработката и транспортирането на фосилни горива.
- не се влияе отрицателно върху водните ресурси, защото не се потребяват и не се замърсяват.

Наред с екопреимуществата, усвояването на вятърната енергия има и някои **отрицателни въздействия** върху околната среда [4].

Първото е влияние върху инфраструктурата на района, защото е необходимо да се изградят пътища (подстъпи) до ветропарковете и линии за

високо напрежение. Колкото по-урбанизиран е даден район, т.е. с налични пътища и високоволтови мрежи, толкова това влияние е по-малко и не се забелязва.

Втори и основен отрицателен ефект е **шумът** от вятърните генератори. Този шум има **двоен произход - механичен и аеродинамичен.**

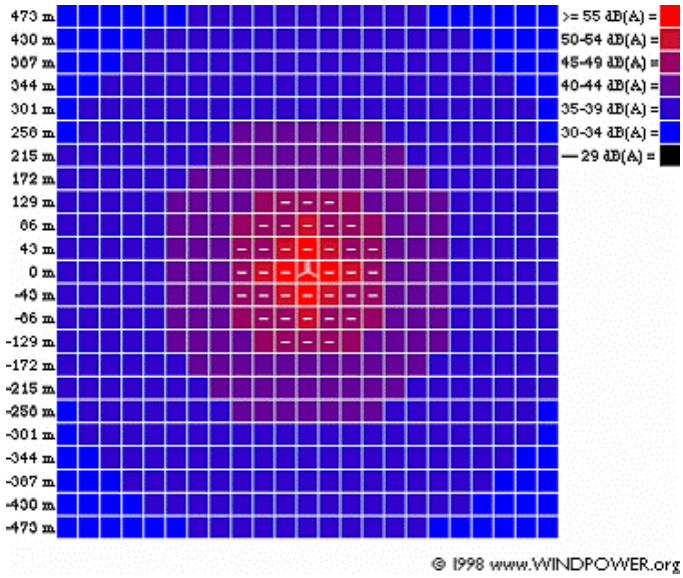
Механичният шум произтича от различните механични и конструктивни елементи на кинематичната верига, предаваща въртящото движение. Чрез редица подобрения по предавателната система и чрез използване на звукоизолация, този шум е значително намален.

Аеродинамичният шум произтича от ветровото обдухване на ветродвигателя и от високата скорост на въртене на перките.

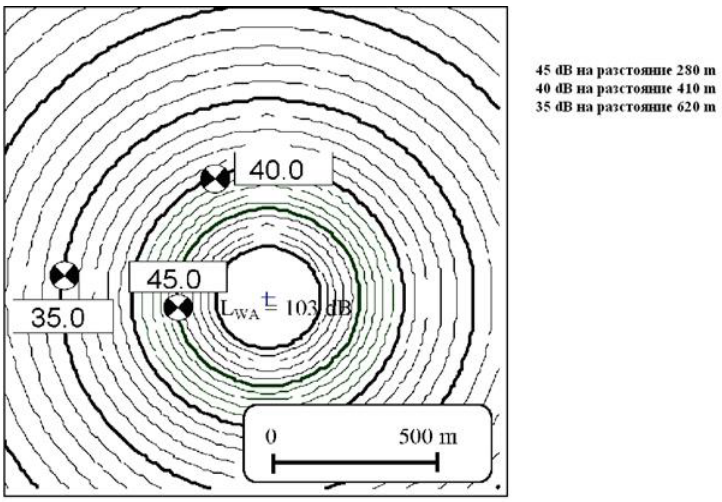
За намаляване на това акустично замърсяване се работи в две посоки - усъвършенства се профила на самите работни лопатки, повърхността им се изглажда и се намаляват оборотите на ветродвигателите, особено при по-големите. Въпреки това **периферните скорости** на движение на лопатките остават сравнително високи. Съвременните мощни ветротурбини (3÷5 MW) се въртят с ниски обороти (10-20min^{-1}), но генерират шум от 100dB и повече [1]. На разстояние 400-500м шумът спада на 30-40dB (фиг.1а, 1б). По-маломощните турбини са по-малко шумни. Разпространението на шума около ветрогенератора не е еднакво (кръгово), а е елиптично. Шумът откъм подветрената страна се възприема като по-слаб и се разпространява на по-късо разстояние [2]. При ветропарковете шумовото поле има по-сложна форма в сравнение с индивидуално работеща турбина. При парковете има възможност още на проектно ниво да се намали шумът при подходящо разположение на турбините.

От гледна точка на **ефективността шумът от вятърните генератори е загуба на енергия. Установено е, че двуроторните ветрогенератори излъчват най-малко шум, когато техните ротори се въртят във взаимопротивоположни посоки. Шумовите им полета частично се**

неутрализират и те генерират по-малко шум от еднороторните при еднакви ветрови условия.



Фиг.1а. Шумово поле на съвременен ветрогенератор [12]



Фиг.1.б Шумово поле на голям ветрогенератор

Друго негативно явление на ветродвигателите е **влиянието им върху птиците.** Направените до момента проучвания показват, че автомобилите, сградите, прозорците и въздушните електропроводи причиняват смъртта на многократно повече птици. Разбира се, този факт не дава основание проблема с птиците да отпадне. Във вятърните паркове се вземат многообразни мерки за опазване на птичата фауна: Поставяне на

кабели под земята, използване на ярки цветове, намаляване скоростта на въртене на ротора, достатъчно голямо разстояние между генераторите. Вече са разработени и съвременни технически средства, които предупреждават птиците, когато се доближат опасно близо до работещите ветродвигатели. Обикновено това са локатори, които следят за движение в радиус около 100м от турбината и при навлизане на птица излъчват високочестотни електромагнитни вълни, които ги плашат. За препоръчване е да се избягва инсталирането на вятърни паркове в близост до резервати за птици или до зоните на тяхната миграция.

На последно място следва да се отбележи и **визуалното въздействие** на вятърните генератори, защото те се монтират на открити, високи и изложени на вятър места, които ги правят твърде забележими. Разбира се, това въздействие е твърде субективно. Проучвания направени в Германия, Дания, Холандия показват, че живеещите в близост до вятърните паркове са настроени по-положително към вятърните паркове, отколкото жителите на силно урбанизираните райони. За по-добро визуално възприемане се практикува боядисване на ветродвигателите в цветове, които спомагат за по-добро вписване в пейзажа.

- **Вятърът като метеорологично явление**

Вятърът представлява движение на въздушните маси. Той има скорост и направление. Същият се образува от неравномерното нагряване на земното повърхност. Там, **където въздухът се нагрява, той се издига като по-топъл и образува област с ниско атмосферно налягане** на известна височина над земната повърхност. **Започва въздушна циркулация на маси от област с по-високо атмосферно налягане към област с по-ниско и колкото разликата в налягането е по-висока, толкова по-силен е вятъра.** Този процес продължава до изравняване на атмосферното налягане

и е непрекъснат и циклично се повтаря. Като правило скоростта на вятъра се увеличава във височина като се изменя и неговата посока.

Поради въртенето на Земята (поради което възникват **Кориолисови сили**) и охлаждането на атмосферата от екватора към полюсите, глобалните ветрови посоки между 30° и 60° северна ширина, където е и нашата страна, се усилват в посока от северозапад към югоизток. Това се вижда добре на двете ветропосочни карти, съставени по данни „Атлас на България" от 1973г., съставен от Географски институт към БАН и Института по геодезия и картография (фиг.2а и 2б)



***Фиг. 2а Зимна** атмосферна циркулация на въздуха в България*

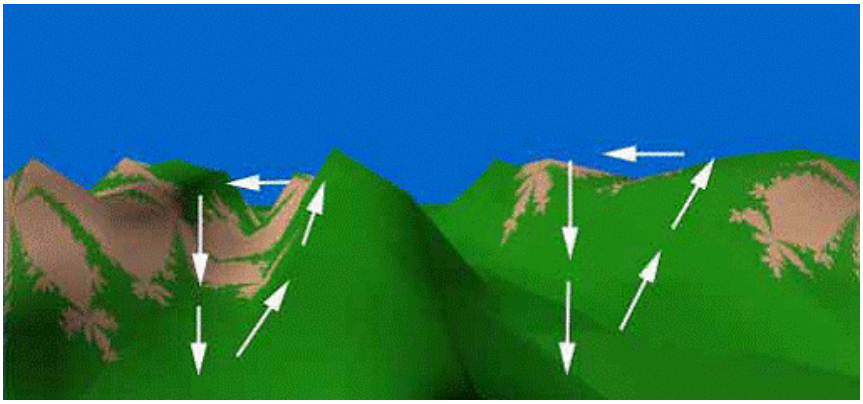


***Фиг. 2б Лятна** атмосферна циркулация на въздуха в България*

Областите около Екватора се нагряват най-много, защото Слънчевата радиация е най-силна. Там въздухът се затопля повече издига се около 10 км над морското равнище. След това се разпръсква към Северния и Южния полюс. Ако Земята не се въртеше, към Северния полюс въздухът щеше да се охлади и да тръгне на юг в по-ниските и приземни части. Благодарение на въртенето вятърът се изкривява по посока за нашата страна северозападно. Тази глобална характеристика на климата определя глобалните ветрове. Те обуславят постоянни и устойчиви въздушни течения, които зависят от сезоните.

Локалните ветрове се обуславят от местния климат и зависят от наличието на планини, морета и др. Посоката на локалните ветрове се различава от глобалните и тя се дава най-добре в т.н. роза на ветровете за дадено място.

На фиг.3. е даден пример за образуване на вятърни течения около южни склонове на планина. При загряване на планинския склон въздухът се загрява и тръгва нагоре към билото на планината.



Фиг.3. Планински склон с ветрове

Подобни течения се образуват и около морските брегове. Друг важен фактор за загуба на кинетична енергия на вятъра е триенето на ниските въздушни слоеве с приземната повърхност. Това поражда и намаляване скоростта на вятъра в приземните слоеве.

▪ Данните за температурата, атмосферното налягане и влажността на въздуха имат съществено влияние върху точната оценка на вятърната енергия. Нормалните колебания на температурата и налягането могат да предизвикат вариации до 10% в очакваните стойности за производителност на генераторите. Така например, разлика от 10°C в температурата ще генерира разлика от около 4% в плътността на въздуха, и следователно, в реализираните мощности.

Високо над морското равнище (върховете на планините) атмосферното налягане намалява от олекотяването на въздуха поради неговото разреждане. В следствие на това плътността на атмосферата в горните слоеве намалява, което е причина за намаляване като цяло на плътността на ветровата мощност.

● **Основните външни параметри на вятърните генератори** са средна скорост и плътност на енергийния поток, особеностите на релефа и инфраструктурата на терена;

При измерване характеристиките на вятъра се използват мачти, върху които се монтира съответната калибрирана и международно сертифицирана електронна апаратура. Дистанционната връзка за събиране и обработка на данните използва сертифициран софтуер за анализ и оценка на ветровия потенциал.

● **Плътност на енергийния поток**

За определяне на ветровия потенциал се дефинира понятието плътност на енергийния поток, изчислена във W/m^2. Плътността дава разполагаемата мощност P на вятъра, пресичащ единица повърхност m^2.

Кинетичната енергия на вятъра е пропорционална на плътността на въздуха **ρ** (kg/m^3), т. е. масата му за единица обем (колкото по-тежък е въздухът, толкова повече енергия генерира турбината при постоянна скорост на въздушния поток).

При нормално атмосферно налягане и при температура от 15ºC, въздухът тежи около 1,225kg за кубичен метър 1m^3.

▪ Влияние на атмосферното налягане, температурата и влажността върху параметрите на вятърната енергия.

● Принцип на преобразуване на кинетичната енергия на вятъра в механична и електрическа енергия, при който се използват неговите характеристики.

▪ Енергиен потенциал на вятъра.

- Класическият израз за изчисляване на кинетичната енергия:

$$\mathbf{E = (½).m.V^2} \qquad (1)$$

където,

скоростта на вятъра **V**, m/s

масата на въздуха $\mathbf{m = \rho.\nu}$, kg

където,

плътността на въздуха при дадена температура ρ, kg/m^3;

обемът на въздуха ν, m^3;

Специфичната мощност на вятърния поток може да се определи от следното равенство:

$$\mathbf{P = 1/2.\ \rho.V^3}\ ,W/m^2 \qquad (2)$$

Специфичната мощност на вятърния поток, определена с (2) зависи само от плътността и скоростта на въздушния поток и е възприето да се нарича плътност на вятърната мощност или ***енергийна плътност на вятъра***.

Трябва да се подчертае, че **плътността на въздуха ρ** зависи в голяма степен от **атмосферното налягане и температура**. Затова за по-голяма прецизност се внасят **коефициенти за корекция на налягането и температурата (C_{pr} и $C_т$)**, за да се оцени отклонението на плътността на въздуха от стандартната стойност (1,225 kg/m^3), мерена при стандартно атмосферно налягане при морското равнище (101325Pa) и температура **(288,15K = 15°C).** Корекционните фактори се определят от изразите:

$$C_{pr} = \frac{Pa}{101325}; \qquad C_T = \frac{288{,}15}{Ta}$$

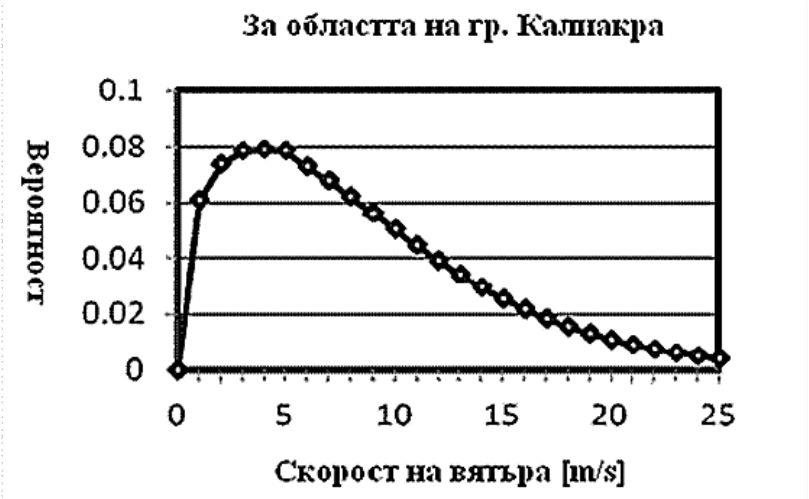
Където p_a е атмосферното налягане на разгледаното място, Ра

T_a - температура на въздуха на разглеждането място, К

Тогава за реалната стойност на плътността се получава израза:

$$\rho = 1{,}225.C_{pr}.C_T, \text{ kg/m}^3 \qquad (3)$$

Познаването на **средните стойности на скоростта** на вятъра за даден регион не е достатъчно, за да се оцени очакваната енергия, която може да се добие. Необходимо е да се знае и вероятностното разпределение на скоростта на вятъра, който е основен инструмент за оценка на енергийния потенциал на вятъра за даден район, т.е да се знае за какъв период от годината каква скорост на вятъра може да се очаква. Едно такова разпределение е дадено на фиг.3.



Фиг.3. Вероятностно разпределение на скоростта на вятъра

Стандартно измерване скоростта на вятъра се изпълнява на височина 10 м над терена. Тя обикновено нараства с увеличаване на височината. Съвременните ветродвигатели се разполагат на височина 50÷150 м. Тогава

преизчислението на скоростта на вятъра за тези височини може да стане с помощта на следното уравнение [1, 3]:

$$V = V_o \left(\frac{h}{ho}\right)^{\alpha}, \text{ m/s} \qquad (4)$$

където **V_o - скорост на вятъра на височина h_o, m/s**

h_o - стандартна височина, **h_o = 10 m**

h - височина на разглежданото място, m

α - емпиричен коефициент, зависещ от постилащата повърхност и е в границите **0,1** / за гладка повърхност - морска, езерна/ - **0,4** /за градска среда с високи постройки/

Извличането на цялата кинетична енергия на вятъра не е възможно поради реалните загуби във вятърната система. Граничната **теоретична** извлекаемост $\mathbf{C_p^T}$ при съвършено гладки повърхности на перките и безвискозен флуид се дава с границата на Betz:

C_p^T = 16/27 = 59,3% [11].

Технически достижимо приближение до тази граница се приема 0,8, (80%) с което реалната гранична извлекаемост/**коефициент на полезно действие**/ е

C_p = 0,8.59,3 = 47,4%.

С развитието на технологиите, материалите и знанията за аеродинамичните процеси, реалната извлекаемост се увеличава и през последните години е достигнала от 22% до 38%.

▪ Дебитът на движещ се обем от въздух **Q = F.V** с плътност **ρ** се определя от обдухваната площ **F** и скоростта **V**

● **Мощността на вятърния поток се дава с израза.**

$$\mathbf{P = 1/2.\ \rho.F.V^3} \qquad (5)$$

-**ρ** е плътността на въздуха (kg/m^3)

-**V** е моментната скорост на вятъра (m/s)

-**F** е сечение (m^2)

Ако площта, перпендикулярна на въздушният поток е **F** с дебит **Q = F.V,** преминаващ за една секунда, се получава мощността на ветровия поток:

$$\mathbf{1/2.\ m.V^2 = 1/2.\ \rho.F.V^3} \quad (6)$$

$$\mathbf{m = \rho.F.V = \rho.Q} \quad (7)$$

Следователно енергията се изменя пропорционално на куба на скоростта. Само част от тази енергия може да бъде превърната в полезна работа, тъй като част от ветровият поток може да се постави перпендикулярно на атакуваната повърхност.

Енергията на ветровия поток, атакуващ повърхността е:

$$\mathbf{E_o = 1/2.\ F.\rho.V^3} \quad (8)$$

● Коефициентът на използване на ветровата енергия ξ - отношението на извършената работа **A** от движещата се повърхнина **F** и енергията на ветровия поток $\mathbf{E_o}$ има максимални стойности до **0,192.**

● Изследване и оценка на вятъра

Изследването и оценката на вятъра е трудно начинание, защото вятърът е своенравен и променлив и дори и след едногодишно мерене по приетите досегашни стандарти, може да се получи голяма грешка - около 70% и повече. Обикновено под скорост на вятъра се разбира паралелни вектори, успоредни на терена, а посоката им може да се мени по всички географски направления. Но в действителност ветровият вектор не е хоризонтален, а при съвременните технологии, обосновани на познатото от векове вятърно колело, точно хоризонталната компонента на вятъра е енергозначима. Скоростта на вятъра има компоненти и по другите две оси на тримерното Декартово пространство, които възпрепятстват работата на ветротурбините [2]. За да се анализират енергийните качество на вятъра се прави ветроизмерване по трите посоки на пространството. Това е така нареченото диференциално 3D измерване. За да се реализира това

измерване се прави ветроодит [2]. Това се прави, като на височината предвидена за монтаж на вала на вятърното колело се издига мачта с ветромери, с които по стандартна методика се измерва скоростта на вятъра в продължение най-малко на една година /за пресечени терени може и две години/. Така се набавя достатъчно информация, която е статистически значима и може да бъде използвана за по-нататъшни оценки. Оценяват се енергозначимите стойности на вятъра по сила и направление, които могат да се трансформират от реалните вятърни турбини в полезна енергия (електрическа). Оценяват се вредите от нехоризонталните компоненти на вятъра и от амплитудните флуктуации на вятъра (т.н. турбуленция) по всички направления. Тези оценки представляват ветроенергийния одит. Именно той е база за избор на най-подходящи алтернативи за преобразуване на установения ветропотенциал в друг вид полезна енергия. Намира се такъв ветрогенератор, чиято електрическа ефективност е най-висока при съответните енергозначими показатели на одитираните места. Ветроенергийният одит има решаващо значение за всяка ветроенергийна инвестиция, тъй като мощността на вятъра и на всяка турбина зависят от третата степен на скоростта на вятъра. Добитата енергия не зависи само от мощността на монтираната турбина, а най-вече от ветровия потенциал на разглежданото място

▪ Потенциал на вятърната енергия в Европа и България

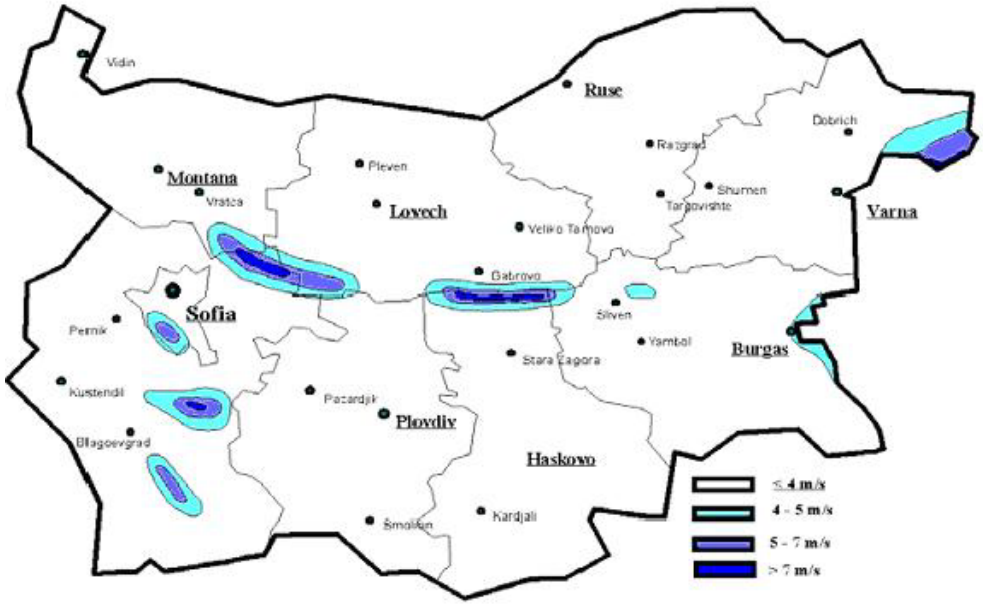
Европа разполага с висок потенциал на вятърна енергия. Според вятърния атлас на Европа, който отразява ситуацията в края на 80-те години на миналия век, по-голямата част от страните на Европейския съюз **и особено тези разположени в близост до Атлантическия океан, разполагат с достатъчно ветрови ресурси. Например райони като Навара (Испания) покриват около 50% от енергийните си нужди с вятърна енергия.** Европейските предприятия са световни лидери в производството на вятърни турбини и технология. Те заемат около 85% от

световния пазар в сектора. Още през 2005г. 15 страни членки на ЕС регистрират над 40000 MW инсталирана ветрова мощност. В доклад на EWEA (Европейска Асоциация за Вятърна енергия) се предвижда ветровата енергия да покрие 12 % от световните нужди за електроенергия към 2020 г.

Като най-развити страни във ветроенергийния сектор в Европа, а и в света са Германия, Испания и Дания. Същите, заедно с Китай и САЩ, са не само световни лидери в производството на вятърна енергия, но и са начело в класацията за технологии и съоръжения за добив на ветроенергия.

В [8] се привеждат данни за усреднената ветрова мощност за единична повърхност за територията на някои страни, което дава представа за наличния потенциал на ветрова енергия. За Дания, Англия и Гърция тези данни са, както следва: 290,7 kW/ km^2, 261,2 kW/ km^2 , 75,2 kW/ km^2, а за България е в границите 19,8 ÷ 30,6 kW/ km^2. този показател, макар и не толкова информативен очертава, че страната ни е бедна на ветрови ресурс за по-мащабна ветрова енергетика. Целият наличен потенциал съгласно високата оценка е 3 GW. При една добра извлекаемост $C_p = 33\%$, пределната възможна електрическа мощност, като се покрие цялата територия с ветропаркове, е 1000 MW [3].

В България съществуват 119 метеорологични станции, които регистрират скоростта и посоката на вятъра. На базата на налични данни за период от 30 години е съставена карта на ветровия потенциал (фиг.8.4) [14] на ниво 10 м.



Фиг.4. Ветрови потенциал и максимална скорост на вятъра в България.

Различни източници предлагат различно ветрово райониране на България. [9, 10, 2, 14] Предвид неголемите различия във ветровия потенциал на територията ни е възприето разделението на **три района**. Като разделителна линия служи линията Русе - В.Търново - Елхово и Дунавското крайбрежие.

▪ **Оформят се следните райони сегмента:**

Първият район (Зона А) - (на запад от разделителната линия) включва обширните равнинни части на страната (Дунавската равнина, Тракийската низина, Софийското поле, долините на р. Струма и р. Места и Предбалкана), където средната многогодишна скорост на вятъра е малка, под 2 m/s. Скоростта е по-висока през зимата (февруари -март) и най-ниска през есента (септември - октомври).

Вторият район (Зона Б) обхваща части от страната, разположени на изток от разделителната линия, а също така и откритите нископланински части до височина 1000 м. Средногодишната скорост на вятъра е от 2-4 m/s. По-високи са скоростите през зимата (февруари - март) и по-ниски - август,

септември. В районите на вдадените в морето части от сушата средната скорост на вятъра превишава 4 m/s.

Третият район (Зона В) обединява откритите планински места с височина над 1000 м. Той се отличава с високи средни скорости на вятъра, значително над 4 m/s. Максимумът на скоростта е през февруари, а минимумът през август.

Трябва да се отбележи, че намаляването плътността на въздуха във височина изисква средната скорост на вятъра да се увеличи с около 3 % на 1000 м за генериране на същата енергийна плътност. В табл.1 и фиг.5. са дадени стойностите на енергийната плътност на вятъра по райони.



Фиг.5. Енергийна плътност на вятъра за територията на България, W/m²

Забелязва се, че източният район (зона Б) е по-благодатен на вятърна енергия, както и планинските била. Интересен е и факта, че на височина 50 м над повърхността на земята, енергийната плътност на вятъра е два пъти по-голяма, отколкото на височина 10 м.

Като цяло ветроенергийният потенциал на България не е голям. Оценките са, че около 1400 км² площ има средногодишна скорост на вятъра над 6,5 m/s, която сега се счита за праг за икономическа целесъобразност на проект за вятърна енергия.

Таблица 1

Среден ветроенергиен поток (W/m²) в някои региони на страната:

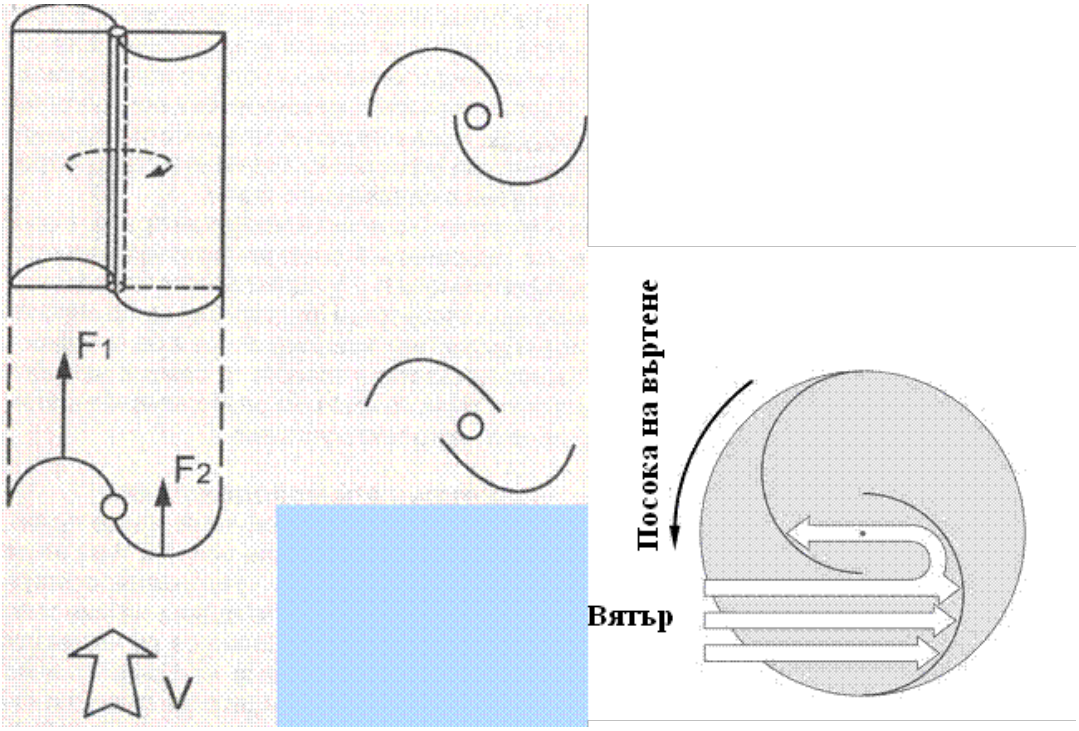
Метеорологична станция	Надморска височина /m/	Височина над повърхността /m/			
		10	25	50	100
Зона А					
Плевен	163	66	96	124	157
Габрово	392	80	117	151	190
Пловдив	160	107	156	201	255
Петрич	227	60	88	113	143
София	564	182	265	342	432
Зона Б					
Ново село	45	232	338	436	551
Варна	3	270	393	507	641
Несебър	29	335	487	628	794
Созопол	10	384	557	719	909
Сливен	275	498	724	934	1181
Зона В					
Калиакра	71	1505	2186	2821	3566
Персенк	1750	872	1267	1635	2067
Мургаш	1687	3385	4918	6346	8022
Ботев	2376	2631	3823	4934	6236
Мусала	2925	1813	2634	3399	4297

- **вятърни турбини**

От векове основната технология за усвояване на вятърната енергия е изградена на познатото вятърно колело, т.е. вятърната турбина. Към края на 60-те години на миналия век е направена официална класификация на вятърните турбини - вертикалноосеви и хоризонталноосеви.

▪ Вертикалноосевите вятърни турбини се делят основно на три вида - Савониус, Дариус и циклотурбина [2]

Типичен представител на **Савониус турбина** е показан на фиг.6.



а - действащи сили б - разновидност на турбина тип Савониус

Фиг.6. Турбина тип Савониус

Савониус е финландски инженер, които е конструирал своята турбина в началото на 20 век. Подобни турбини е имало и преди н.е.. Тази турбина работи (върти се) благодарение на разликата в челното съпротивление (F_1 - F_2) на изпъкналата й част и вдлъбнатата й част. Такива турбини се правят лесно, но когато роторите им са високи, те са изложени на различни напори на вятъра по вертикала, заради различните му скорости по височина. Това може да се преодолее като диаметрите на роторите се намаляват във височина или като се правят няколко ротора един над друг с намаляващ диаметър по височина. Така се изравняват въртящите моменти на отделните ротори и вала на турбината се върти по-равномерно и без допълнителни усуквания.

Френският инженер Дариус е изобретил и патентовал (1931г.) вертикалноосева турбина на Фиг.7., която прилича на миксер.

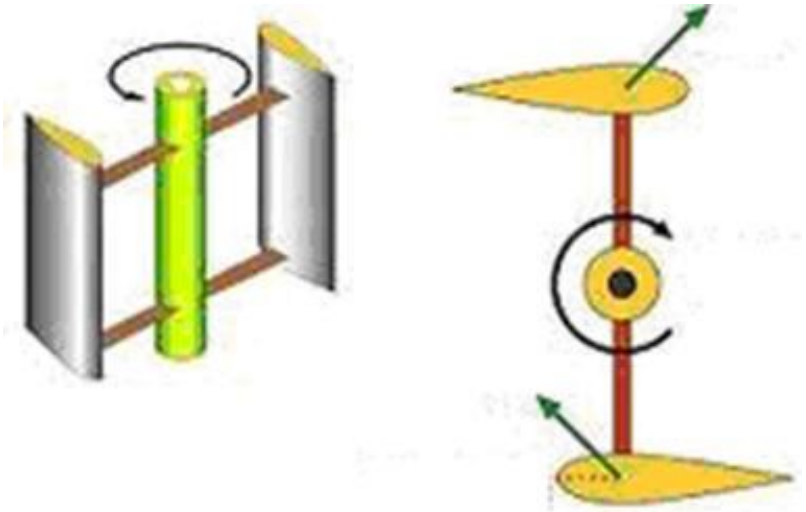


Фиг.7. Дариус тип вертикално осеви турбини

Неговият ротор има две гъвкави въртящи се лопати около вертикален вал. Всяка лопата има аеродинамичен профил. Такъв профил създава аеродинамична сила, когато въздухът го обтича, т.е. профилът на лопатите наподобява профила на самолетни крила. Така Дариус турбините се въртят за сметка на аеродинамичната сила, която създава вятъра върху работните лопати, а не за сметка на разликата (F_1 - F_2) на съпротивленията на двете части на ротора на Савониус. Тази принципна разлика прави ротора на Дариус два пъти по-ефективен от ротора на Савониус.

▪ Аеродинамичната сила се появява при обтичане на лопатките от вятъра, които са тип самолетен профил. При обтичането се получава разлика в наляганията от двете страни на всяка работна лопатка (виж фиг.10). Този принцип е обоснован научно от Бернули. Той доказва, че при увеличение на скоростта на флуида налягането му спада, за да се запази (съхрани) енергията на флуида при непрекъснат поток.

▪ Друг разпространен вид вертикалноосеви турбини са **циклотурбините** (фиг.8 и 9)



Фиг.8. Циклотурбина



Фиг.9. Циклотурбини

▪ Вертикалноосевите турбини имат две основни предимства сравнени с хоризонталноосевите. Първото е, че не се налага да се ориентират по посока на вятъра. Те са способни на ротационни движения независимо от посоката на вятъра. Това опростява кострукцията и управлението на тези ветроагрегати. Друго важно предимство е, че са с 15÷45% по-евтини от хоризонталноосовите при сравними енергийни показатели [2].

▪ **Вертикалноосевите турбини съдържат в себе си и някои недостатъци:**

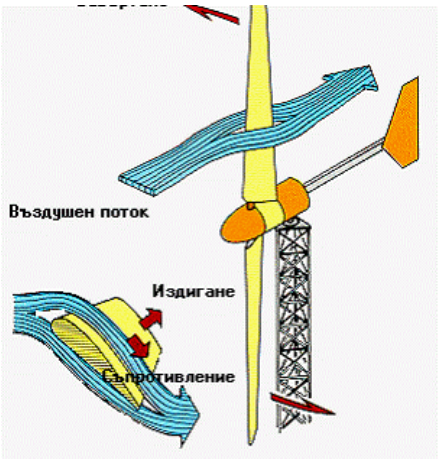
- при по-големи скорости на въртене се пораждат големи центробежни сили, които натоварват лопатите.

- друг недостатък е високото шумово ниво в резултат на големи завихряния около лопатите при високи скорости на въртене.

- при движението около вертикалната си ос лопатките са изложени на неравномерни усуквания, когато пресичат посоката на скоростта на вятъра и започват движение по инерция. Това води до умора на материала и по-бързото му разрушаване.

При еднакви размери на вертикалноосевите турбини тип Дариус за предпочитане са с три работни лопатки вместо две, защото се въртят по-бавно, а имат същата мощност, благодарение на увеличение въртящ момент.

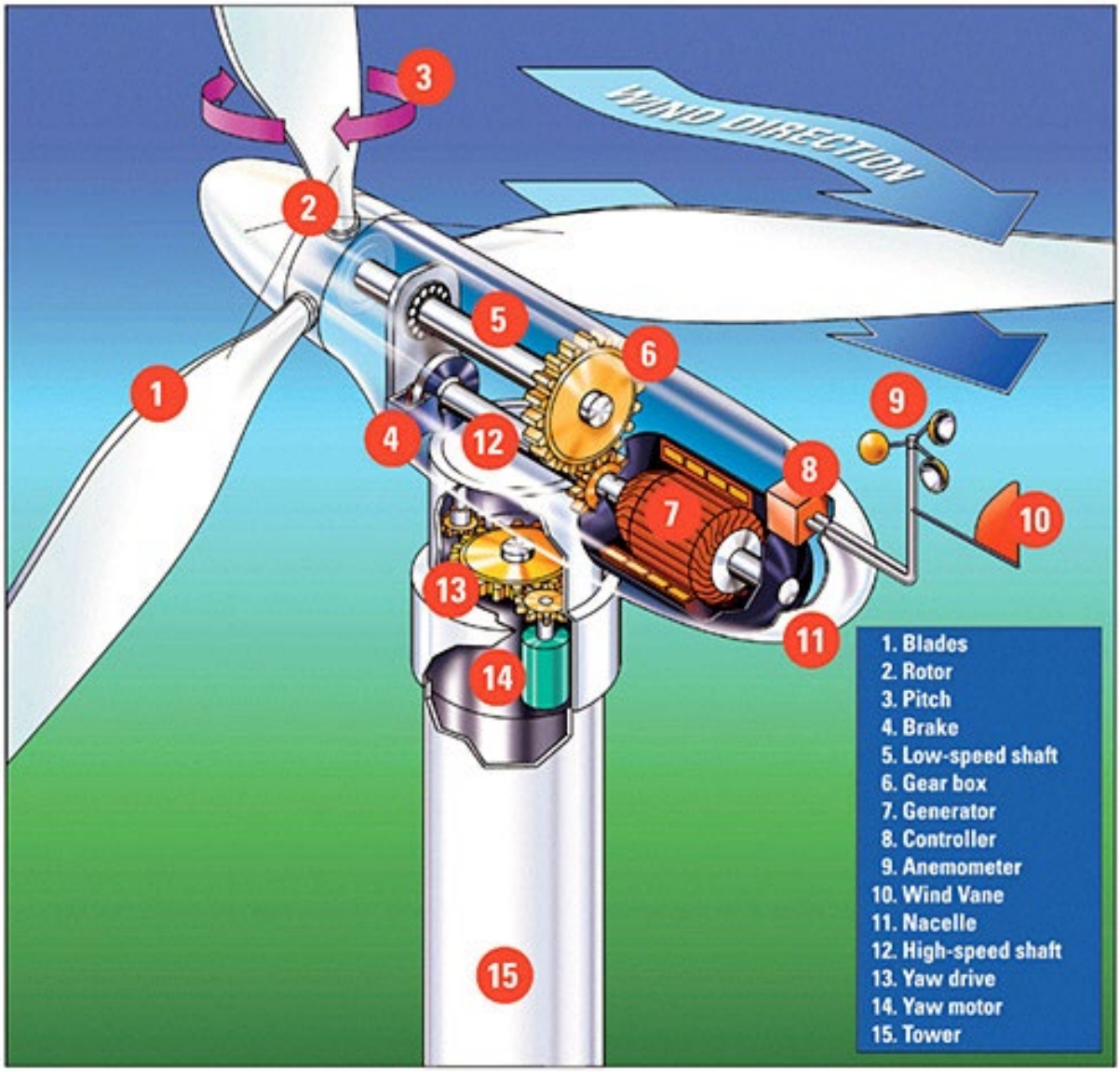
▪ **Хоризонталноосевите пропелерни турбини** са намерили по-голямо приложение поради редица достойнства. Тяхната работа се обосновава на аеродинамичните и съпротивителни сили, които се създават при обтичане на крилоподобен (самолетен) профил (фиг.10)



Фиг.10. Процеси на обтичане на лопатка с крилоподобен профил

Както се изясни по-горе поради крилоподобния профил на крилото и разликата на наляганията, които се появяват над и под него при обтичането му от вятъра, аеродинамичната сила, която се появява е 12-14 пъти по-голяма от силата на аеродинамичното съпротивление. Така се появяват двойка (при две перки) или тройка сили (при три перки), които завъртат вала на ротора.

▪ **Основните структурни елементи на вятърните генератори** са дадени на фиг.11. и табл.2, класифицирани в редица източници [1,2, 3].



Фиг.11. Елементи на хоризонталноосова вятърна турбина

Таблица 2

Табл.8.2 Елементи и функция на елементите при хоризонталноосова вятърна турбина	
Елементи на ветрогенератора	Функция на елементите
1. Лопатки (перки)	Улавят вятъра и предават механична енергия към главината на ротора.
2. Главина на ротора	Предава механична енергия от лопатките на ротора.
3. Завъртане на лопатка	Променя се ъгъла на атака на лопатката срещу вятъра.
4. Спирачка	За спиране на съоръжението или за ограничаване на оборотите.
5. Нискоскоростен вал	Свързва ротора към трансмисията.
6. Скоростна кутия	Променя оборотите в трансмисията (увеличава ги).
7. Генератор	Преобразува механичната енергия в електрическа.
8. Контролер	Следи състоянието на турбината, ориентира я, при нужда я спира.
9. Анемометър	Измерва скоростта и посоката на вятъра и подава сигнал до контролера за управление на турбината.
10. Ветропоказател	Показва посоката на вятъра.
11. Корпус (Гондола)	Защитава и съдържа елементите на вятърната турбина.
12. Високоскоростен вал	Задвижва електрическия генератор.
13. Система за ориентирана на ротора	Насочва гондолата и ротора в посока на вятъра, използвайки електрическо задвижване.
14. Ел. мотор	Задвижва системата за ориентиране на ротора (гондолата) срещу вятъра.
15. Кула	Носи гондолата с всички съоръжения и системи в нея.

За вятърните турбини осев тип, мощността може да се определи чрез:

$$P = \frac{1}{2} . C_p . \rho . S . V^3 \qquad ,kW$$

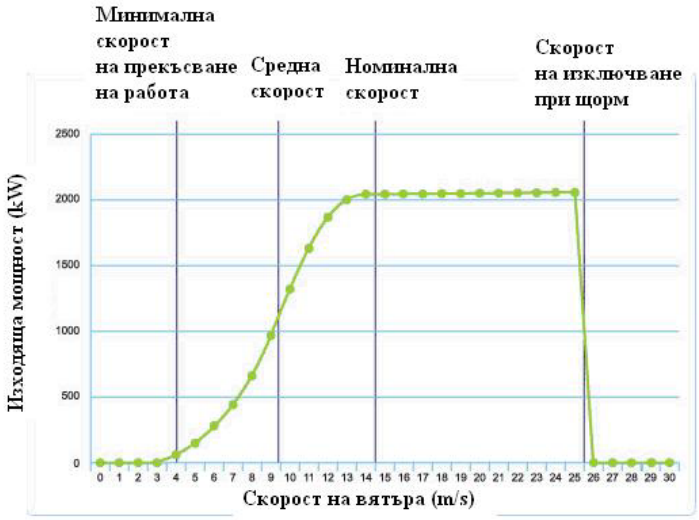
Където C_p е коефициент на реална извлекаемост на разполагаемата кинетична енергия (коефициент на мощността);

ρ - плътност на въздуха, kg/m^3;

S - площ, обмитана от перките (лопатките) на ветротурбината, m^2;

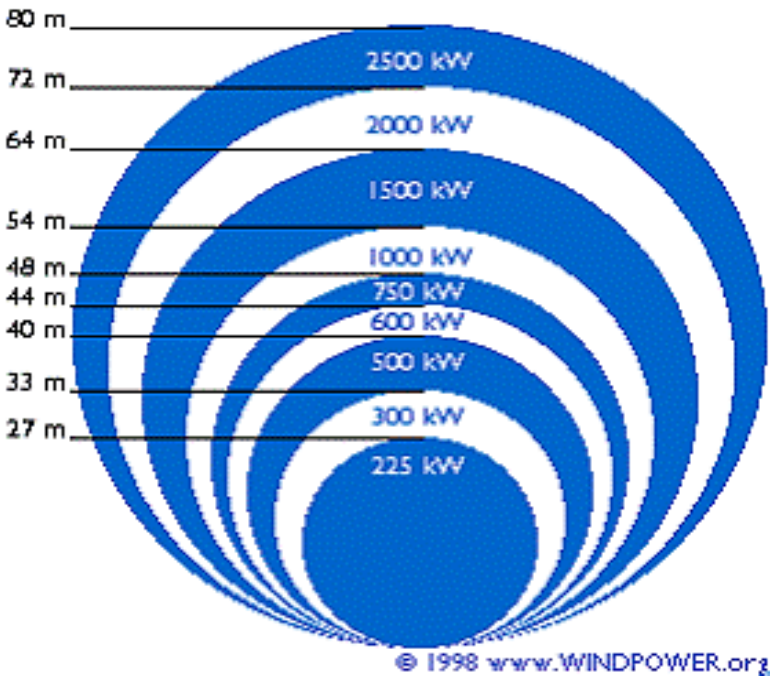
V- скорост на вятъра, m/s;

От уравнението се вижда, че мощността на вала на известна вече турбина зависи най-вече от скоростта на вятъра и коефициента C_p. Тази зависимост се представя от енергийната крива, която има вида даден на фиг.12.



Фиг.12 .Енергйна крива на вятърна турбина

Основното значение за мощността на дадена вятърна турбина има диаметърът на ротора ѝ. Колкото диаметърът е по-голям, толкова по-голяма площ обхваща турбината и толкова по-голямо количество въздух преминава през активната площ на ветрогенератора. Зависимостта на изходната мощност от диаметъра на ветроколелото е дадена на фиг.13.



Фиг.13. Зависимост на изходящата мощност от диаметъра на ветроколелото;

● Всяка вятърна турбина започва да работи при определена минимална скорост на вятъра $\mathbf{V_{min}}$ и прекратява работа при максимална скорост на вятъра $\mathbf{V_{max}}$ от съображения за сигурност. Обикновено граничните стойности са от $\mathbf{V_{min} \approx 3 \div 6\ m/s}$ **до** $\mathbf{V_{max} = 20 - 30\ m/s.}$

Максималната мощност на турбините е предвидено да се реализира **при скорости на вятъра 15 m/s** [5].

Когато се случат по-високи скорости, турбината трябва да губи част от кинетичната енергия на вятъра, **за да се избегнат механични повреди**. Това налага ограничаване мощността на турбината. Към момента за целта се използват два начина**:**

▪ ***Активни ограничители на мощността.*** Това става чрез промяна на ъгъла на атака на лопатките (перките) спрямо посоката на вятъра. Електронната система проверява мощността на турбината и ако тя надвишава определена стойност, лопатките се завъртат около оста си и променят ъгъла на атака така, че да се намали въртящия момент.

▪ ***Пасивни контролери на мощността.*** В този случай лопатките се правят със специална аеродинамична форма, така че при скоростта на вятъра над определена стойност се получава завихряне на въздушния поток. Така се намалява натиска върху лопатките и ограничаване на мощността.

Ветровите характеристики, за които се оразмеряват турбините, механично и електрически, винаги се посочват в интервали [2] за номинални експлоатационни параметри.

Тези интервали и **интервалите за ветрокласовете най-често се дават в седем ветрови диапазона със собствените им ветроскорости и плътности на ветровата енергия.**

Таблица 3 Ветрокласове

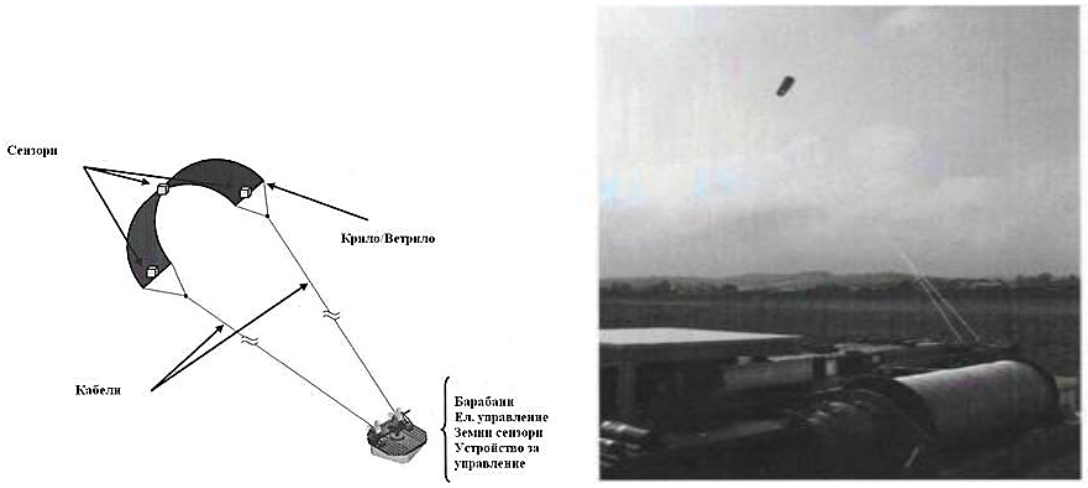
Ветрови клас според плътността на вятърната мощност	h = 10 метра		h = 50 метра	
	Плътност W/m^2	Скорост на вятъра, m/s	Плътност W/m^2	Скорост ка вятъра, m/s
1	0-100	0-4.4	<200	<5.6
2	100-150	4.4-5.1	200-300	5.6-6 4
3	150-200	5.1-5.6	300-400	6.4-7.0
4	200-250	5.6-6.0	400-500	7.0-7.5
5	250-300	6.0-6.4	500-600	7.5-8.0
6	300-400	6.4-7.0	600-800	8.0-8.8
7	Над 400	Над 7.0	> 800	> 8.8

Данните в табл.3. са дадени за типични височини на стълбовете над терена.

Сериозен дял в съвременните конструкции на вятърни турбини заемат кулите, фундаментът за тях, височината, на която трябва да се качи тежкия генератор (примерно 100 тона на 80 метра височина). Това поставя сериозни проблеми пред ветроенергетиката, но и дава тласък на една нова ветроенергийна технология - ***ветрилната технология*** [3,7]. Тази технология не е развита до степен за практическо приложение, но поради атрактивните ѝ потенциални възможности трябва да се отбележи като бъдеща перспектива на развитие за ветровата енергетика.

▪ Пример за **ветрилен генератор** е показан на фиг.14. Извличането на вятърната енергия става чрез **ветрило, летящо крило (kite - англ. (парус)), което позволява добив на енергия от по-големи височини 200-800 m, където ветровата скорост е по-голяма.** Самото ветрило има проста конструкция, ниско тегло, но **изисква сложно управление**. Посредством два кабела ветрилото се свързва с наземно оборудване (генератор), което преобразува движението на ветрилото в електрическа енергия. Кабелите се навиват/ развиват върху отделни барабани, всеки свързан с електрическа машина, която може да работи и в генераторен и в двигателен режим.

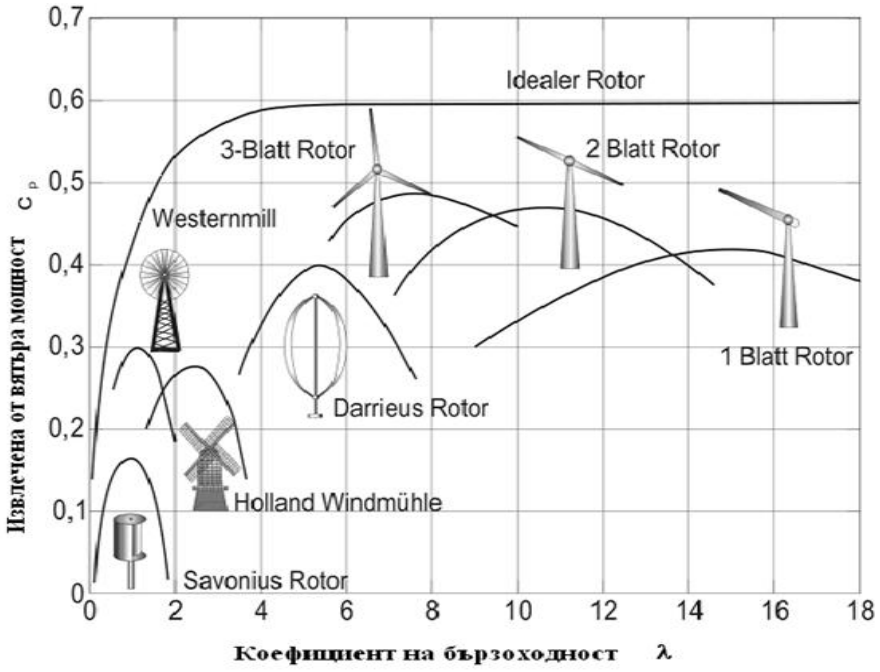
С крило вид парус се задвижват от вятъра платноходи, яхти и сърфове, като това движение притежава най-висок коефициент на полезно действие.



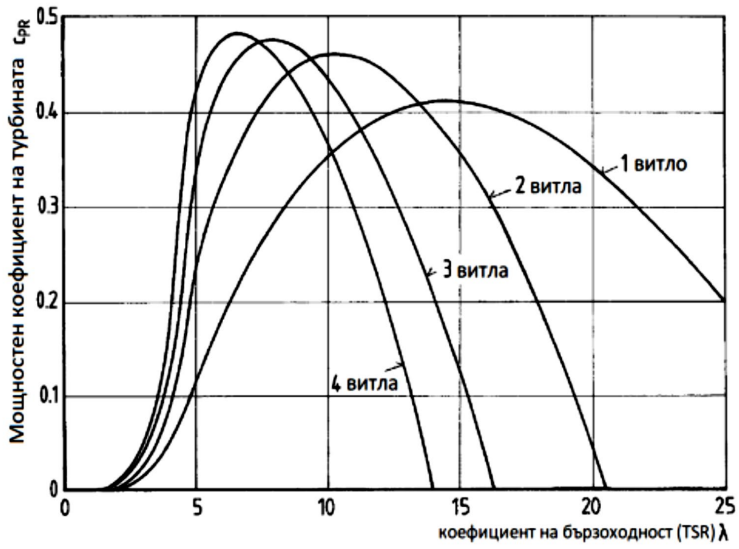
Фиг.14 .Ветрилен генератор

Чрез получаваната информация за скоростта, посоката на вятъра и координатите на ветрилото се управлява ъгъла на атака за получаване на циклично движение, нормално на ветровата скорост.

На фиг. 15 е дадено приложението на различните видове ветродвигатели в зависимост от **коефициента на бързоходност /отношението на периферната скорост на работното колело към скоростта на вятъра/.**



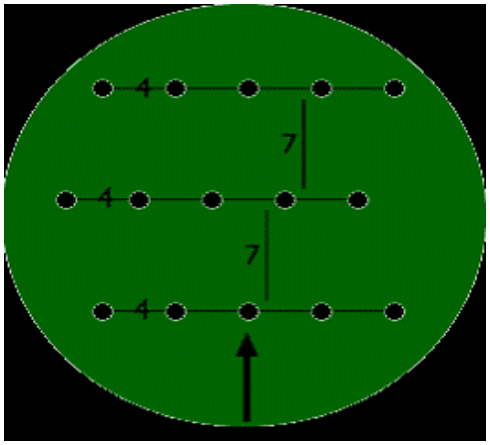
Фиг.15. Зависимост на извлечената мощност /кпд/ от коефициента на бързоходност на ветродвигателя



Фиг.16. Графики показващи мощностния коефициент и TSR

- **Ветроенергийни паркове**

След всяка вятърна турбина скоростта и енергията на вятъра няколкократно намаляват. Това е следствие на отнетата кинетична енергия от въздушната маса. Става ясно, че една турбина ще работи при неблагоприятни енергийни условия, ако е разположена в близост до друга и е след нея по посока на движение на вятъра. По тази причина вятърните турбини в един ветроенергиен парк се разполагат по правило на 5 до 9 роторни диаметъра в посока на преобладаващата посока на вятъра и между 3 и 5 роторни диаметъра в посока перпендикулярна на преобладаващата посока на вятъра (фиг.17).



Фиг.17 Разположение на вятърните турбини във ветроенергиен парк

Аеродинамични сили. Динамични и статични натоварвания при работа на генераторите;

1. Свойства на въздуха - въздушна обвивка покрива Земята и е с височина 300km

- слоя с височина 11 km се нарича **тропосфера**

- слоя над тропосферата се нарича **стратосфера** – ветровете се характеризират с постоянство, няма облаци, мъгли, t= -56,50C

● Стандартни нормални параметри на атмосферния въздух:

- налягане ($p_{норм}$ = 760mm)

- температура ($t_{норм} = 15^0C$)

● Методи за регулиране на мощността

– вятъра е непостоянен източник на енергия

- ако големината на скоростта на вятъра се изменя ***2-3 пъти***, то на енергията ще се измени ***8-27 пъти***

– задвижваните от вятърните турбини електрически машини изискват постоянна мощност и честота на въртене по време на работа си.

- разчетната скорост на вятъра, от която започва регулирането се избира в съответствие със средногодишната скорост на вятъра (**8 m/s** - при средногодишна скорост 5 m/s; **10 m/s** – при 7 m/s и **14 m/s** – над 7 m/s)

– **Номиналната мощност (Рн) е при разчетна скорост на вятъра.**

- регулирането на мощността се изпълнява при изменение положението на гондолота или ъгъла на лопатки на турбината във ветровия поток, така че мощността и оборотите да са приблизително постоянни;

• чрез регулиране положението на лопатките

– с изменение наклона на лопатките по отношение посоката на вятъра (***ъгъл α***) се изменя подемната сила, а от там и въртящия момент

- начини на завъртане:

- **непосредствено, от действието на вятъра**, чрез налягането което се създава на лопатките;

- **чрез центробежни регулатори или тежести, монтирани на лопатките**. При увеличаване на оборотите, тежестите се преместват по дължината на остта на лопатките и задвижват механизми, които завъртат лопатките и намаляват ъгъла на атака. Така се намалява подемната сила и въртящият момент.

- ветрогенераторите, използващи подемната сила на вятъра имат по голямо разнообразие поради развиваната от тях по-голяма скорост, по-добро съотношение между мощност и маса, по-малка цена за единица установена мощност;

- за намаляване на огъващите натоварвания в корена, на лопатките им се предава стесняваща форма към края им;

- максималното изнасяне на лопатките не може да бъде повече от 60m, което позволява изграждането на ветрогенератори с мощност до 7,5MW;

- бързоходните агрегати са предпочитани за производство на електроенергия;

- бавноходните се прилагат за задвижване на работни агрегати (вятърни мелници, помпи и др.);

- първият двулопатъчен вятърен агрегат е построена в САЩ през 1942г. (диаметър на вятърната перка 53m, асинхронен генерагтор с мощност 1250kW и маса на вятърната система от 300t);

- най-мощните вятърни агрегати са с диаметър 91-97m, честота на въртене 13 – 1800m^{-1} и използват синхронни генератори;

- сериозни програми за изграждане на мощни ветрогенератори се реализират в Швеция, Англия Дания, Германия

Тип на агрегата	**Диаметър m**	**Номинална мощност MW**	***Специфична цена Долар/kW***
Maglarp	78	3,0	3500
Gotland	75	2,0	4250
Orkney	60	3,0	3750
Growian	100	3,0	6000
WTS-4	78,5	4,0	1700

- съществуват идеи за конструкции на ветрогенератори, при които няколко вятърни агрегата са разположени на една опора или частично с препокриване на лопатките

- нова идея е вятърен агрегат с кула с управляеми жалюзи, в които се създава вихрово движение с много ниско налягане в средата на вихъра, където се поставя **пропилерно колело**. Такъв вятърен агрегат носи названието „торпедо“.

● **Натоварване на лопатките;**

- въвежда се понятието “**максимална скорост” на вятъра** ($\mathbf{V_{бур}}$) :

до 5,5m/s - 40 m/s;

от 5,5 до 7 m/s - 50 m/s;

над 7 m/s - 60 m/s - при големи скорости, към които вятърната перка не може да се приспособи и може да доведе до претоварване.

- Коефициентът на **претоварване n** е:

$$\mathbf{n = P_{max} / P_{раб}} \qquad (11)$$

P_{max} - максимално натоварване

$P_{раб}$ - натоварване при разчетна скорост на вятъра

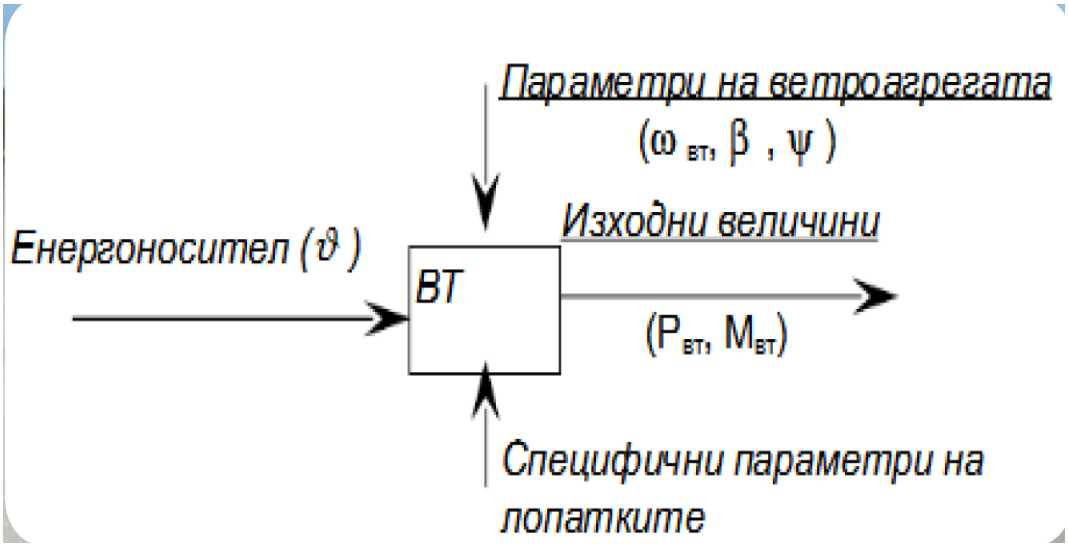
- Максималното **натоварване на една лопатка** е:

$$\mathbf{n = p_{\Sigma} / i} \qquad (12)$$

$\mathbf{p_{\Sigma}}$ – пълно челно налягане на вятърната перка

i - брой на лопатките на вятърната перка

Блокова схема на вятърна турбина ВТ



Фиг.18. Структура на вятърна турбина с входно-изходни параметри

Съкратените означения на фиг.18. са:

β – ъгъл на завъртане на лопатките на ВТ;

ψ – ъгъл на завъртане на сечението (S) на ВТ;

Мвт (ξ) – моментът предаван от ВТ.

Специфичните параметри на лопатките при различни аеродинамични коефициенти.

ИЗМЕРВАТЕЛНО ОБОРУДВАНЕ ЗА ВЕТРОЕНЕРГИЙНИ ПАРКОВЕ

- **Измерване на скоростта на вятъра**

Ключов измервателен параметър е хоризонталната скорост на вятъра. За целта се използват различни видове анемометри, като сред най-предпочитаните модели са чашковите и крилчатите. Основен конструктивен елемент на чашковите анемометри са полусферични чашки (три или четири на брой), въртящи се около вертикална ос. Принципът им на действие се

основава на разликата между съпротивленията на въздуха при обтичане на вдлъбнатата и изпъкналата част на полусферичната чашка.

При крилчатите анемометри ролята на първичен приемник се изпълнява от пропелер. За разлика от чашковия анемометър, който се върти около вертикална ос, перпендикулярна на посоката на вятъра, крилчатият трябва да се постави успоредно на нея.

Приложение намират и ултразвуковите анемометри, познати още като акустични. С тях се определя както скоростта на потока, така и посоката му, на базата на ултразвукови вълни. За тази цел анемометърът е оборудван с две двойки ултразвукови преобразуватели, разположени едни срещу други.

- **Посока на вятъра**

Посоката на вятъра се определя с помощта на ветропоказатели. Измерванията са от съществена важност за оптималното позициониране на ветрогенераторите. Съвременните модели ветропоказатели имат измервателен обхват от 0 до 360°, а при най-добрите от тях точността на измерване е ± 2 градуса. Сред работните характеристики на най-новите модели са устойчивост на вятър до 85 м/сек и широк температурен обхват (-50°C + 80°C), като някои от тях допълнително са подсигурени и с противо обледенителна система. Освен върху измервателната мачта, използвана в пред проектното проучване на вятърните характеристики, ветропоказатели се монтират и върху ветрогенераторите, определяйки позиционирането на роторните лопатки. Въз основа на информацията от ветропоказателя, задвижващата предавка се обръща с помощта на двигателя за ъглово завъртане така, че лопатките да са обърнати срещу вятъра за максимална ефективност на преобразуването на енергията.

- **Анемометри**

- ***анемометрите*** измерват характеристиките на вятъра в мястото на монтиране на ветротурбините и се състоят се от датчик, сензор и предаващо

устройство. Посоката на вятъра се измерва с отместването на аеродинамичното тяло, приравнено с хоризонталната посока на вятъра.

- **витловите анемометри** са проектирани за работа със силни ветрове, както на сушата така и в морска среда.



Витлов анемометър

Четирите въртящи се чувствителни витла са направени от противоударна пластмаса за да издържат на силата на вятъра. Тялото на сензора е направено от алуминий и много здрава пластмаса. Посоката се измерва с отместването на аеродинамичното тяло, приравнено с хоризонталната посока на вятъра. Сензорът е свързан директно към устройство индуциращо изходен сигнал пропорционален на хоризонталния ъгъл на вятъра. Датчикът за посока има обхват на измерване от 0 до 360 градуса при температура в граници от -50 до+60 С

- **чашковите анемометри** са предназначени за измерване на посока и скорост на вятъра, като датчика за измерване на скорост е направен от 3 чашки.



Фиг.19. Чашков анемометър

Чашковият анемометър е предназначен да работи при атмосферни тежки условия, като сензорите са евтини и лесни за монтаж. Сензорът е комбинация от скоростен датчик и датчик за посока. Има обхват на работа от 0 до 99 м/с, а точността на измерване е 3%.

- **ултразвуковият анемометър** е направен с изключително здрава конструкция, няма нужда от калиброване или от скъпа подръжка, като позволява лесно да се получава желаната информация.



Фиг.20. Ултразвуков анемометър

Уредът поддържа интерфейси за връзка с компютър. Прагът на чувствителнст е много нисък 0.01 м/с и не се изискава подръжка или калиброване. Може да измерва посока и скорост на вятъра, а също така и слънчевата радиация.

- **дву-измервателните анемометри** пренебрегват важната вертикална ветрова компонента.



Фиг.21. Дву-измервателни анемометри

Анемометърът прави измерванията си спрямо времето на продължителност на преминаване на ултразвукови акустични сигнали. От скоростта на звука се получава и звуковата температура. Скоростта на вятъра и звуковата температура са коригирани за кръстосани ветрови ефекти

автор: гл. ас д-р маг. инж. Васил Борисов Иванов

Университет „Проф. д-р Асен Златаров” – Бургас, 2023г.

Литература

1. Иванов П. Практическо използване на енергията на вятъра в България за производство на електроенергия,.сп.Енергетика,1-2, 2007, 34-44
2. Иванов П., Влияние на времето и климата върху производството на електроенергия от технологии, използващи слънчева и ветрова енергия в България, сп.Енергетика, 6-7, 2008, 24-31
3. Николов З., Попчев И., Производство на ветрова електроенергия: проблеми и очаквания, Инженерни науки, 2/2010
4. Пейчев К., Д. Динев, Р. Георгиев, Н. Делчев и др. 2006. Възобновяеми енергийни източници в земеделието (Международен проект “PROAERE” по програма “Леонардо да Винчи”)

5. Тонева А., Електричество от вятъра, Наука, кн.4/2008, 34-46
6. Тончев Г., Вятърни електроцентрали, I и II част, 2005
7. Archer L., M. Jacobson. Evalution of global wind power - J. Geophis Res. , Vol 110, 2005, D12110
8. Fagiano L., M. Milanese, D. Piga. High-Altitude Wind Power Generation - IEEE Trans. Energy Conversion, Vol 25, 1/2010
9. Fehlerbach H., Pilotstudie zur Akzeplatz vertikaler Windenergieanlagen, 2009
10. Gerauschemissionen und -emissionen von Windenergieanlagen, Landesumweltamt Nordhein - Westfalen, 2002
11. Jaras L., L. Hoffmann, A. Jaras, G. Obermair. Wind energy, 1981
12. Mukinovic M., R. Aragal, G. Brener. Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen, 2009
13. Thresher R., M. Robinson, P. Veers. To Capture the Wind - IEEE Power&Energy Mag., 2007, №6, Nov/Dec., 34-46
14. www. rea-ruse.com/..2010-03-12-23-32-09
15. https://finansirane.eu/wp-content/uploads/
16. https://edu.uni-sz.bg/book/3.AF_Vyzobnoviyaemi.energiini.iztocnici-RGeorgiev/Tema_8.html