## 5.4. Кинетичка енергија на ветрот

Ако
$\rho$ е густината на воздухот (kg/m^3),
u – брзината на ветрот (m/s)
E - густина на енергијата (J/m^3)

тогаш густината на енергијата E изразена во J/m^3 (енергија (J) по единица волумен (m^3)) на одредена воздушна маса во движење изнесува:

$$E = \frac{1}{2}\rho u^2.$$

1 џул = 1 J = единица за енергија = N*m = kg*m^2/s^2
N = њутн, m = метар, s = секунда, kg = килограм
1 ват = 1 W = единица за моќност = J/s = kg*m^2/s^3

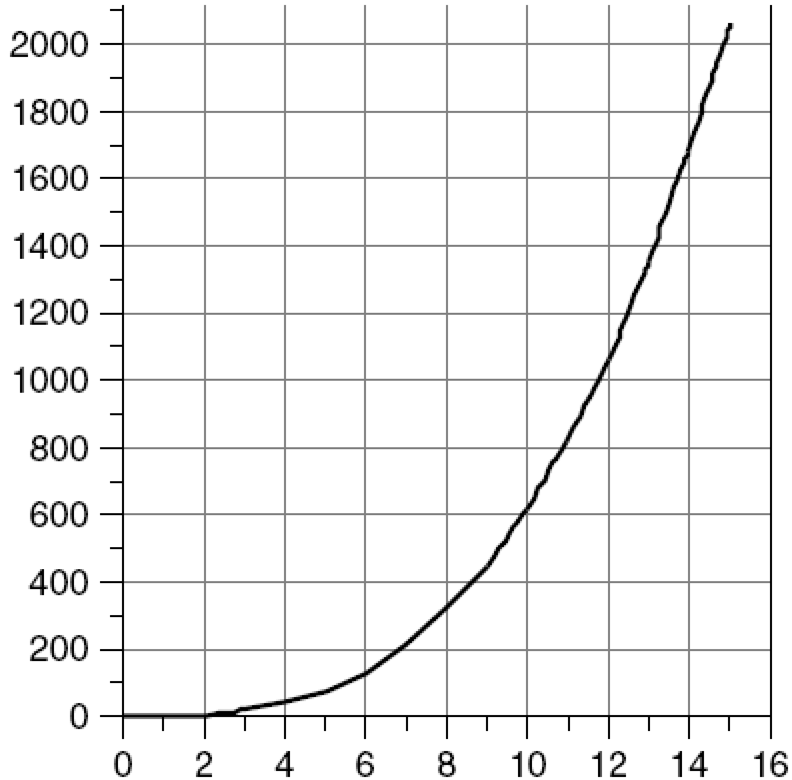
Ако
А – површина на пресекот низ кој струи воздухот (m^2),
тогаш волуменот на воздухот (во m^3) што струи во секоја секунда низ пресекот А изнесува

A u (во m^3/s)

каде
u – брзината на ветрот (m/s).
Оттука моќноста P (во W=J/s) на волуменот на воздух што струи во секоја секунда низ напречен пресек со површина А е дадена со равенка (5.2):

$$P = \frac{1}{2} A \rho u^3 .$$

Моќноста P (во W=J/s) на ветрот е пропорционална на површината А на напречниот пресек низ која струи воздухот, густината на воздухот $\rho$, и од третиот степен на брзината на струење на воздухот u.



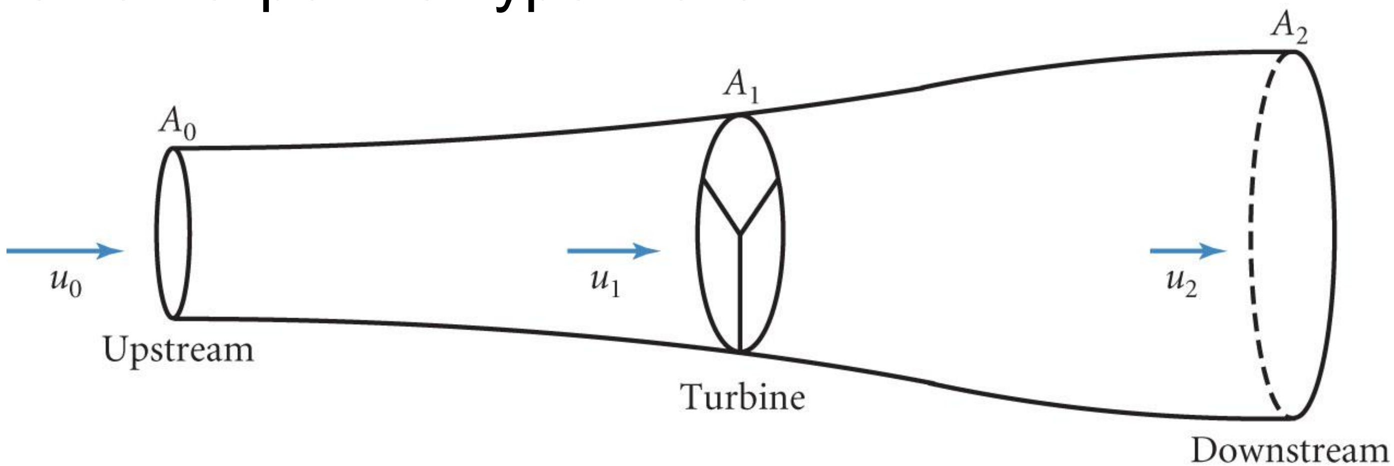

АПСЦИСА - БРЗИНА НА ВЕТЕР ВО m/s

ОРДИНАТА - МОЌНОСТ НА ЕДИНИЦА ПОВРШИНА (W/m^2)

ЗА ДВОЈНО ПОГОЛЕМА БРЗИНА НА ВЕТРОТ, МОЌНОСТА СЕ ЗГОЛЕМУВА ЗА 8 ПАТИ (СЕ ЗГОЛЕМУВА ЗА ФАКТОР 2^3=8)

# 5.5. ВЕТЕРНИ ТУРБИНИ СО ХОРИЗОНТАЛНА ОСКА

Вкупната кинетичка енергија на ветрот не може да се искористи во ветерната турбина, односно ветрот има кинетичка енергија и на излез од турбината со која се одржува протокот на воздухот.
Максимално 59% од кинетичката енергија на ветрот може да се искористи во ветерната турбина (т.н. Бец ограничување).
Брзината на ветрот на влез во турбината е поголема од брзината на излез затоа што дел од кинетичката енергија на ветрот на влез се искористува во турбината.
Струење на ветрот во турбината:



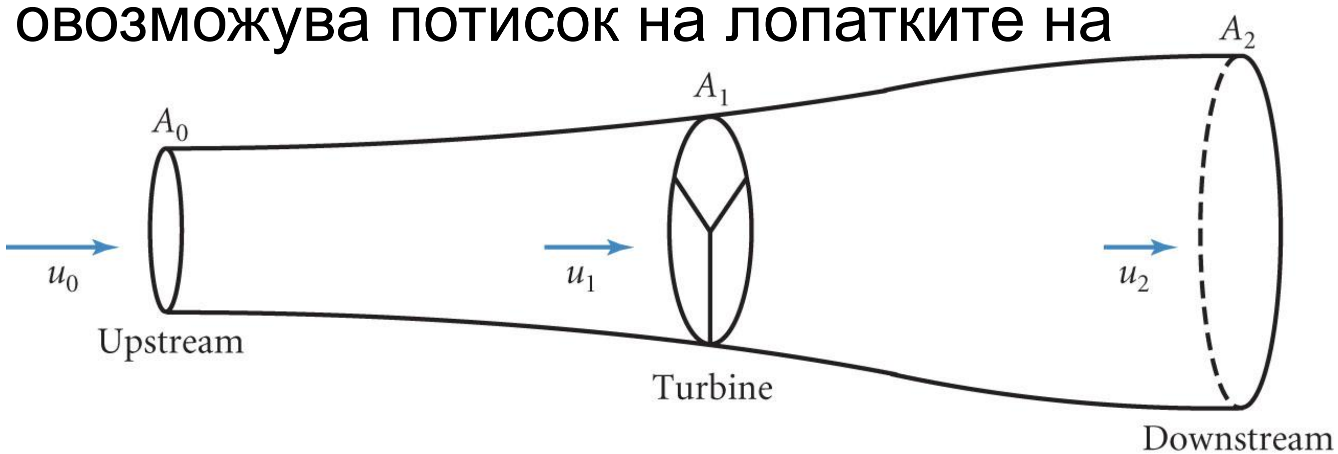
Брзината на ветрот на влез во турбината е $u_{0,}$ површината на напречниот пресек на влез во турбината е $A_{0.}$

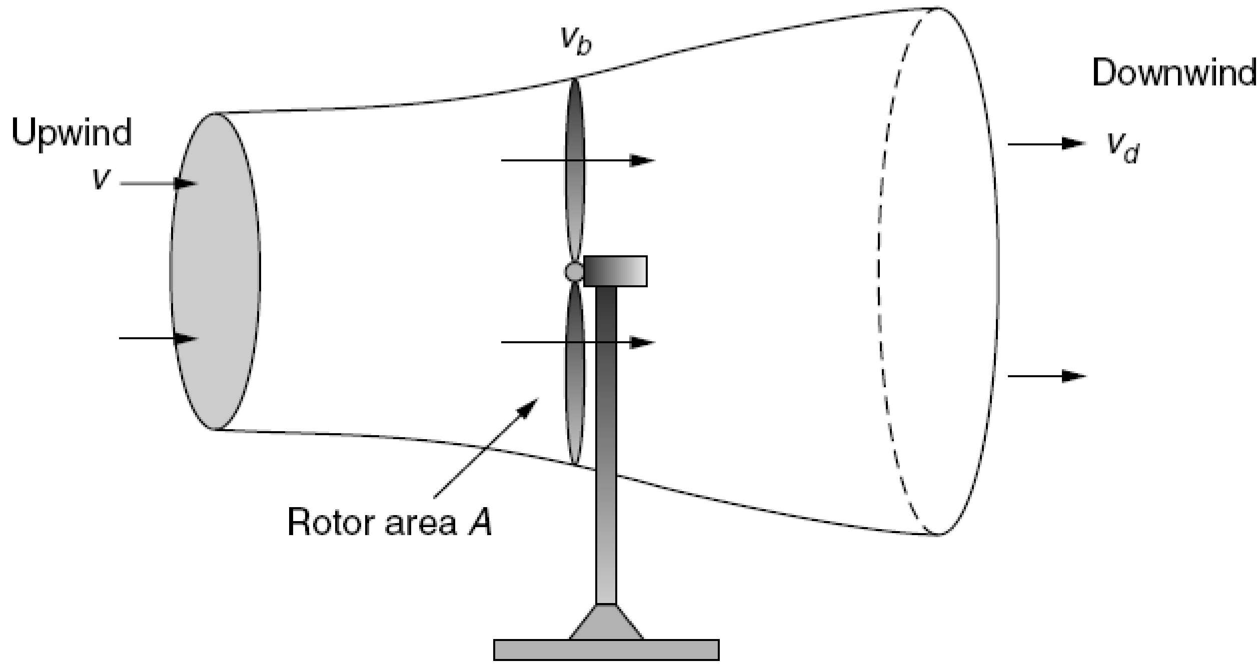
Брзината на ветрот на попречниот пресек на кој се поставени лопатките е $u_1 < u_0$, површината на напречниот пресек на кој се поставени лопатките е $A_1 > A_{0.}$

Брзината на ветрот на излез од турбината е $u_2 < u_1$, површината на напречниот пресек на излез од турбината е $A_2 > A_{1.}$

Намалувањето на брзината на ветрот од влезот до излезот од турбината (т.е. намалувањето на брзината на излезот од турбината во однос на брзината на влезот во турбината) доведува до пад на притисок во турбината (според теоремата на Бернули), и овозможува потисок на лопатките на турбината.

.






Слика 5.5. Искористување на кинетичката енергија на ветрот во ветерна турбина

Во ветерната турбина се врши конверзија на кинетичката енергија на ветрот во механичка енергија на вртливо движење на роторот (вратилото) на кој се поставени лопатките. Ветрот минувајќи низ турбината со брзина $u_1$, дел од својата енергија и ја предава на ветерната турбина, така што, после турбината излегува со намалена брзина $u_2$ и намален притисок.

Јасно е дека целата енергија на ветрот не може да се пренесе на турбината, бидејќи тоа би значело дека брзината на ветрот после турбината треба да биде нула, т.е дека не постои проток на воздушна маса низ лопатките.

Исто така, ако брзините на ветрот пред и после тубината се исти, тогаш никаква енергија не се предава на ветерната турбина.

Овие две крајности сугерираат дека постои некое оптимално намалување на брзината на ветрот кое продуцира максимална моќност на ветерната турбина. Германскиот физичар Алберт Бец (Albert Betz) во 1919 год. ги формулирал релациите кои се однесуваат на максималната теоретски искористлива моќност на ветрот.

Максималната моќност се постигнува кога:

(а) брзината на ветрот на излез од турбината е третина од брзината на ветрот на влез во турбината,

$$u_2 = 1/3\ u_0$$

(б) брзината на ветрот во попречниот пресек на турбината на кој се поставени лопатките е еднаква со две третини од брзината на ветрот на влез во турбината

$$u_1 = 2/3\ u_0$$

Ако важат условите (а) и (б), тогаш максималната моќност изнесува, (р-ка 5.3)):

$$P = \frac{1}{2}\rho A_1 (16/27) u_0^3.$$

Моќноста $P_W$ на ветрот што поминува со брзина $u_0$ низ напречниот пресек со површина $A_1$ на кој се поставени лопатките, според р-ка (5.2), изнесува:

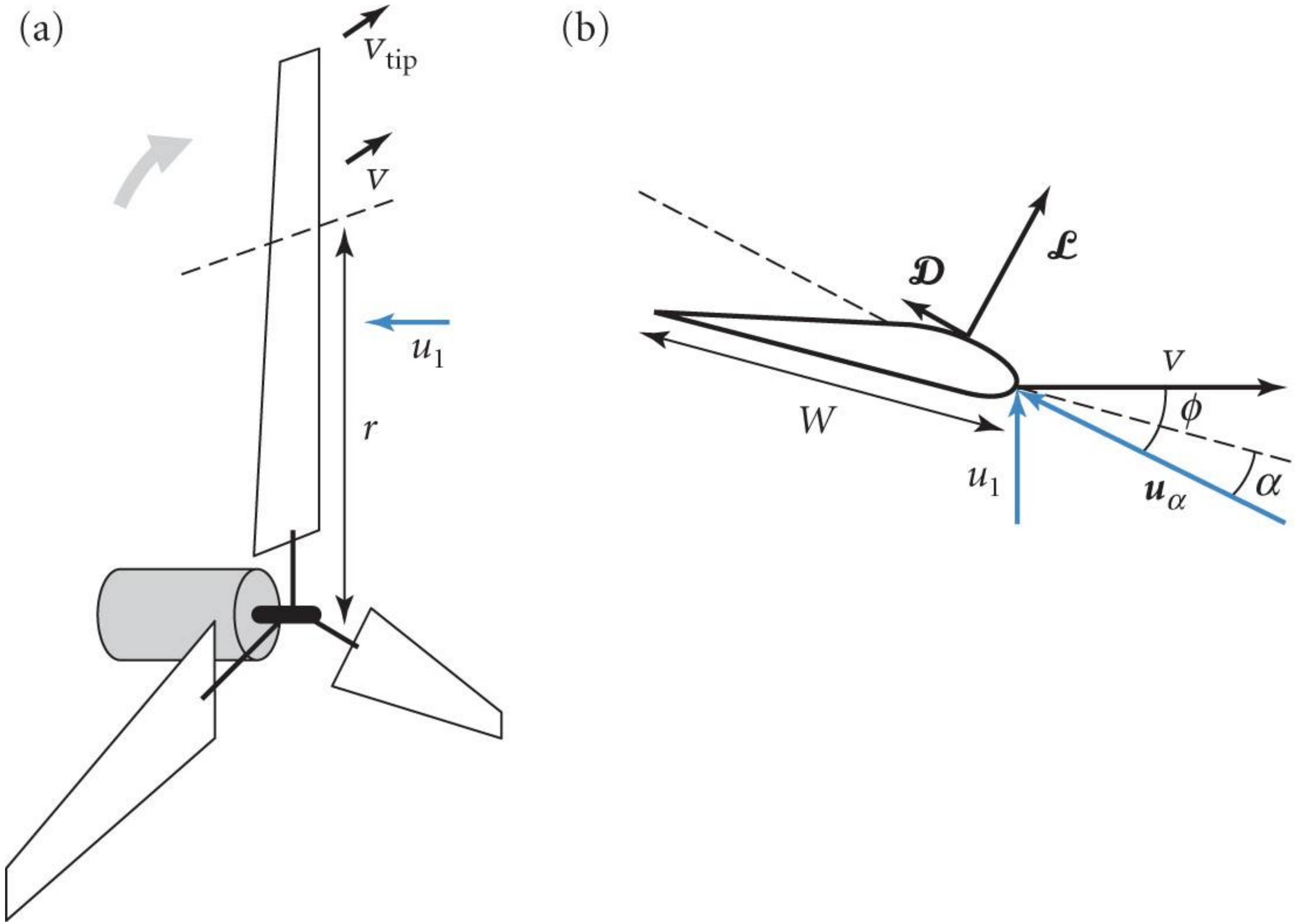
$$P_W = \frac{1}{2}\rho A_1 u_0^3.$$

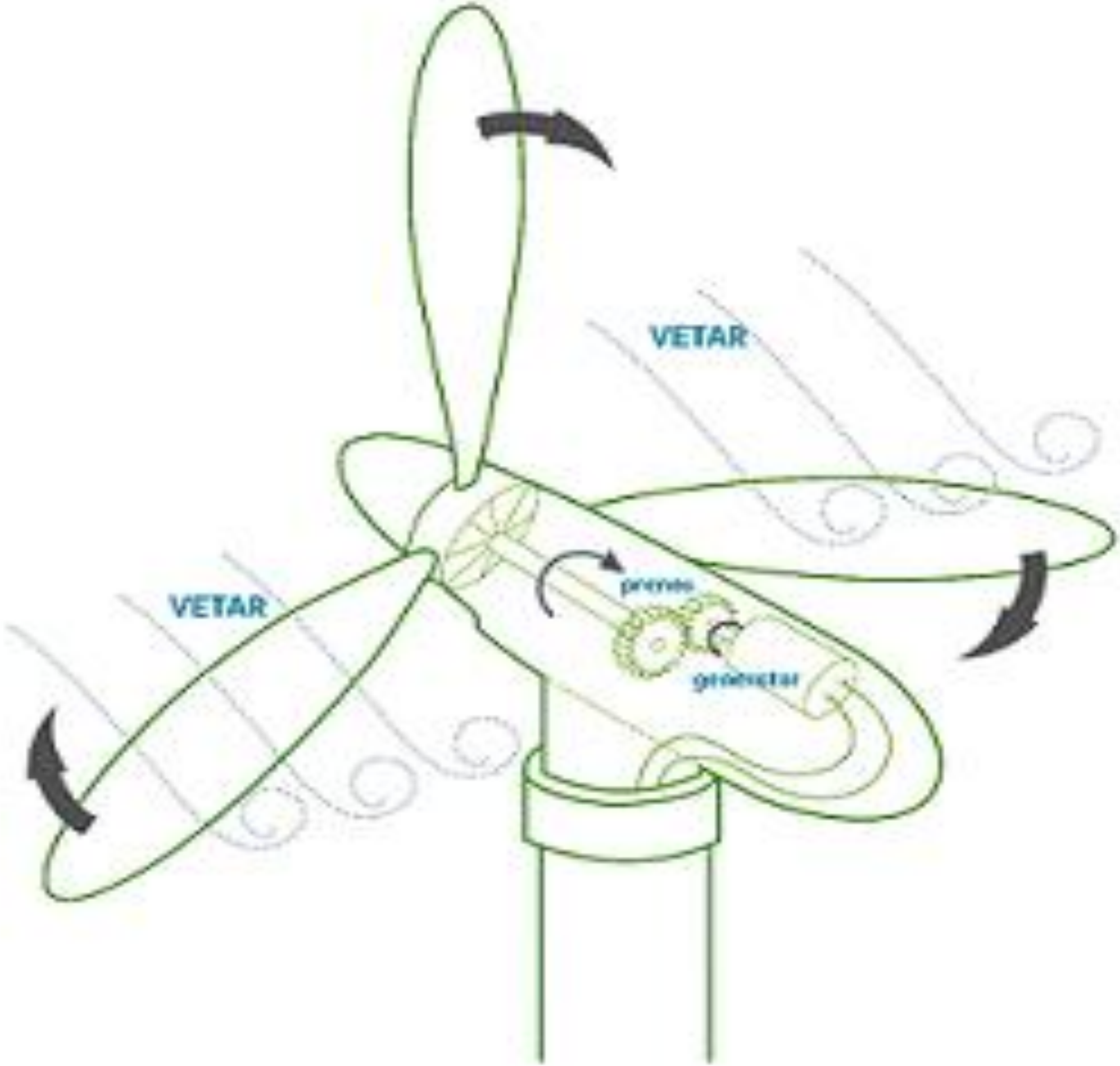
Со споредба на р-ките (5.2) и (5.3) може да се заклучи дека делот од моќноста на ветрот што се искористува во турбината (и се претвора во механичка енергија на вртливо движење на роторот (вратилото) на кое се поставени лопатките), и е наречена коефициент на моќност $C_P = P/P_W$

$$C_P = P/\left\{\frac{1}{2}\rho u_0^3 A_1\right\} \quad \text{or} \quad P = \frac{1}{2}C_P \rho u_0^3 A_1,$$

изнесува 16/27 = 0,59 (59 %) од моќноста на ветрот што слободно се движи со брзина $u_0$ низ напречен пресек еднаков со пресекот на турбината со површина $A_1$.
Ова ограничување на коефициентот на моќност $C_P$ еднакво на 59 % од моќноста на ветрот се нарекува Бец ограничување или Ланкастер-Бец ограничување.

# 5.6. ПАРАМЕТРИ НА ЛОПАТКАТА НА ВЕТЕРНАТА ТУРБИНА




VETAR
VETAR

$u_1$ – брзина на воздухот во турбината
v - аголна брзина (брзина на вртење) на лопатката на радиус r од оската на вртење, нормална на правецот на протокот на воздухот
$u_\alpha$ – резултантна брзина на струење на воздухот во однос на лопатката
$\phi$ – агол помеѓу v - аголната брзина на лопатката, нормална на правецот на протокот на воздухот, и $u_\alpha$ – резултантна брзина на струење на воздухот во однос на лопатката
$\tan \phi = u_1 / v$
$\alpha$– нападен агол на ветрот врз лопатката
$\mathscr{L}$ - сила на потисок на лопатката
$v_{tip}$ – аголна брзина (брзина на вртење) на врвот на лопатката, нормална на правецот на протокот на воздухот
r – радиус на лопатката на турбината
R – максимален радиус на лопатката
W – ширина на лопатката
$\mathscr{D}$ - сила на отпорот на воздухот

P – моќноста  што се добива во ветерната турбина

$$P = \mathcal{L}(\sin\varphi)u_1 \cot\varphi = \mathcal{L}(\cos\varphi)u_1 = Tu_1, \tag{5.15}$$

v -  аголна брзина на лопатката на радиус r од оската на вртење, нормална на правецот на протокот на воздухот

$$v = \frac{rv_{\text{tip}}}{R} \tag{5.16}$$

λ-  коефициент на брзината на врвот на лопатката

$$\lambda = \frac{v_{\text{tip}}}{u_0}. \tag{5.17}$$

Ако важи ограничувањето на Бец, тогаш

$$\tan\varphi = \frac{u_1}{v} = \frac{2R}{3r\lambda}. \tag{5.18}$$

Ако радиусот  r  се намалува, тогаш  φ  се зголемува.

$$\text{Angle of twist} = \varphi - \alpha = \tan^{-1}(2R/3r\lambda) - \alpha, \tag{5.19}$$

$$\text{Width} \approx 8\pi R(\sin\varphi)/3\lambda n. \tag{5.20}$$

Пример 5.2. Турбина на ветер со 3 лопатки работи со просечна брзина на ветрот од $u_0$ = 8 m/s. Турбината се врти со $n_{rpm}$ = 15 rpm, односно 15 вртежи/минута (rpm = revolution per minute = вртежи/минута).
Максималниот радиус на лопатките (должината на лопатките) е R = 40 m. Пресметај ја ширината на средината и ширината на врвот на лопатките.

Дадено: $u_0$ = 8 m/s,
$n_{rpm}$ = 15 rpm = број на вртежи во минута
R = максимален радиус на лопатките
(должина на лопатките); n = 3 лопатки

Ширината на врвот и на средината на лопатката = ?

Решение:

Времето $\tau$ на едно завртување на врвот на лопатката со максимален радиус на лопатките (должината на лопатките) R = 40 m износува:

$\tau =$ (изминат пат на врвот на лопатката) /
(аголна брзина (брзина на вртење) на врвот на лопатката)

$\tau = 2\pi R / v_{tip}$

$v_{tip}$ = аголна брзина (брзина на вртење) на врвот на лопатката

$2\pi R$ = обем на кругот со радиус R

Бројот на вртежи на врвот на лопатката во една минута $n_{rpm}$ изнесува

$$n_{rpm} = 60 / \tau$$

каде $\tau$ е време на едно завртување на врвот на лопатката.

Според тоа брзината на врвот на лопатката $V_{tip}$ изнесува

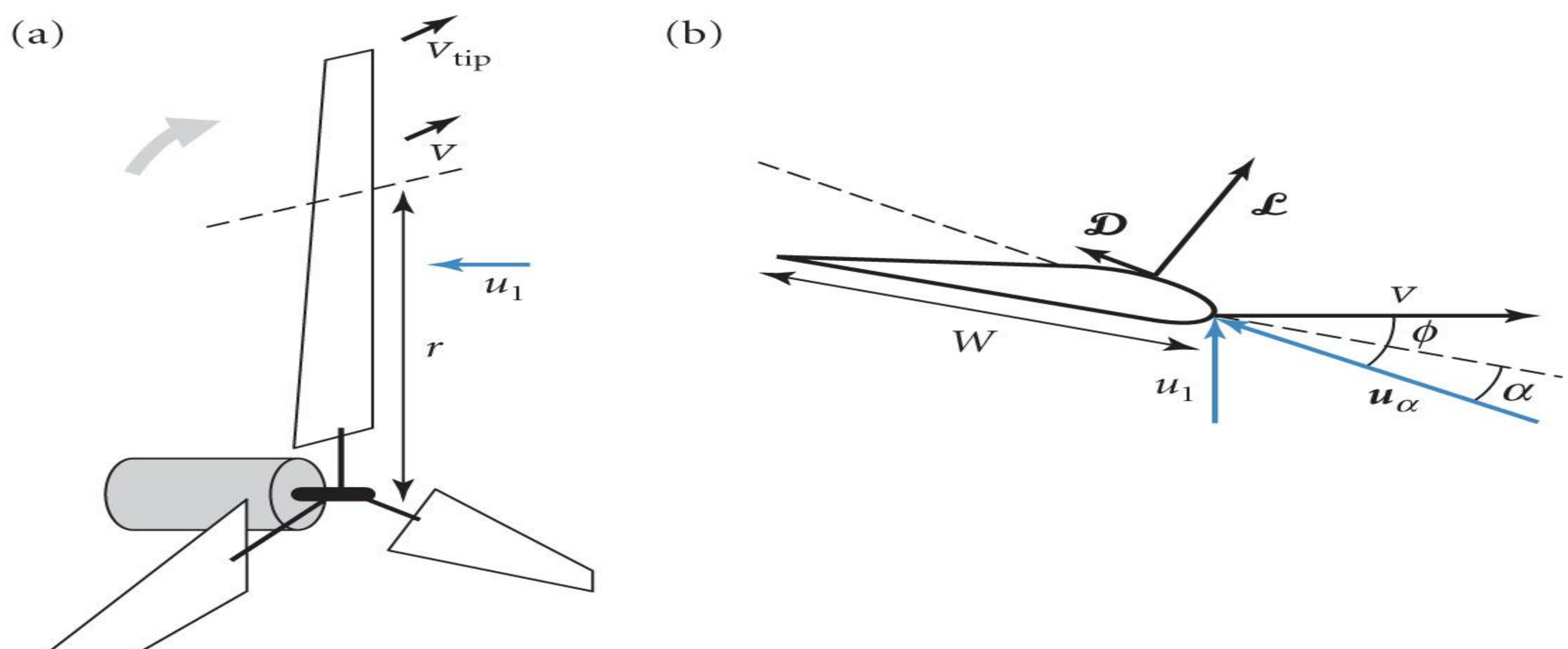
$v_{tip} = 2\pi R / \tau = (2\pi R\, n_{rpm}) / 60 = 2\pi\,(40)\,(15) / 60 = 62{,}8$ m/s λ- коефициент на брзината на врвот на лопатката

$$\lambda = \frac{v_{tip}}{u_0}. \quad (5.17)$$

$\lambda = 62{,}8 / 8 = 7{,}85$

$$\tan\phi = \frac{u_1}{v} = \frac{2R}{3r\lambda}. \quad (5.18)$$

ϕ – агол помеѓу v - аголна брзина на лопатката, нормална на правецот на протокот на воздухот, и $u_\alpha$ – резултантна брзина на струење на воздухот во однос на лопатката.



$$\tan\varphi = \frac{u_1}{v} = \frac{2R}{3r\lambda}. \tag{5.18}$$

На врвот на лопатката r = R, односно

tg $\phi$vrv $= 2 / 3\lambda$, откаде $\phi$vrv $=$ arctg ($2 / 3\lambda$)$=$ arctg($2 / 3*7.85$) $=$

4,85 степени

има грешка во книгата – наместо

$\phi$vrv $=$ arctg ($2 / 3\lambda$) ставено е $\lambda$$=$ arctg ($2 / 3\lambda$)

Ширината W на врвот на лопатката се пресметува според (5.20), каде n = број на лопатки = 3:

$$\text{Width} \approx 8\pi R(\sin\varphi)/3\lambda n. \tag{5.20}$$

W = 8$\pi$*(40)*(sin(4,85)) / 3*(7,85)*(3) = 1,20 m

На средината на лопатките r = R/2, односно

tg $\phi_{sredina} = 2R / 3r\lambda$   откаде

$\phi_{sredina} = \mathrm{arctg}\ (4 / 3\lambda) = \mathrm{arctg}\ (4 / 3*7.85) = 9{,}64$ степени

sin ($\phi$sredina) = sin (9,64) = 0,167

Ширината W на средината на лопатката се пресметува според (5.20), каде   n  =  број на лопатки = 3:

$$\text{Width} \approx 8\pi R(\sin\varphi)/3\lambda n. \tag{5.20}$$

W =  [8$\pi$*(40)*(0,167] /  [3*(7,85)*(3)] =  2,38 m

Ширината на средината на лопатката (=2,38 m) е речиси двојно поголема од ширината на врвот на лопатката (1,20 m).