

# ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18\_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

# VODNÍ A VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

## Větrné motory Milan Bělík

# Větrné motory

- odporový princip

- farmářské kolo (15 – 30 %)
- rotor Savonius (10 – 20 %)

- vztlakový princip

- vrtule (45 – 48 %)
- rotor Darrieus (38 – 48 %)
- větrné kolo (20 – 30 %)
- Halladayova turbína (20 – 43 %)
- turbína Eclipse (25 – 45 %)
- větrný mlýn (15 – 30 %)

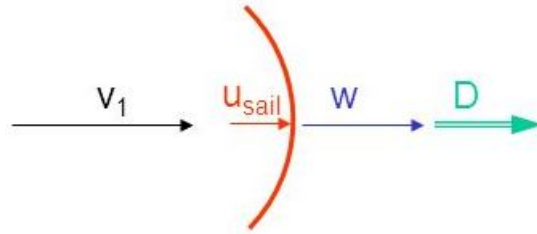


# Odporový princip (drag)

- odporová síla

$$F_D = \frac{1}{2} \rho * c_D * A * w^2 \quad [\text{N}]$$

$$w = v_1 - u$$

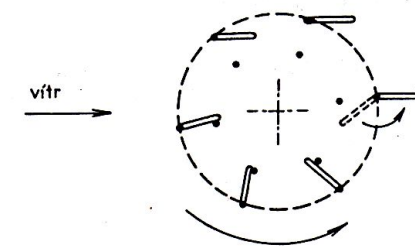
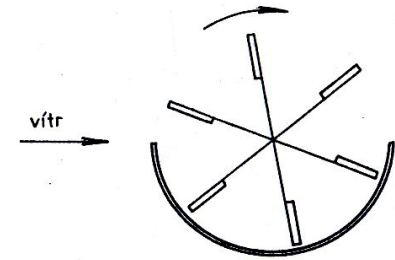
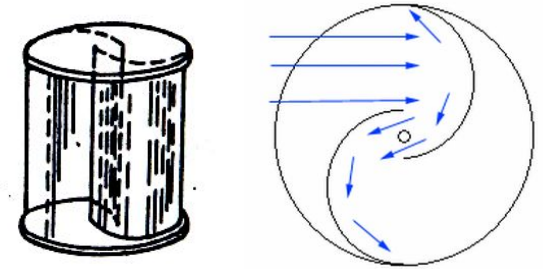


- tvarovaná funkční plocha (Savonius)

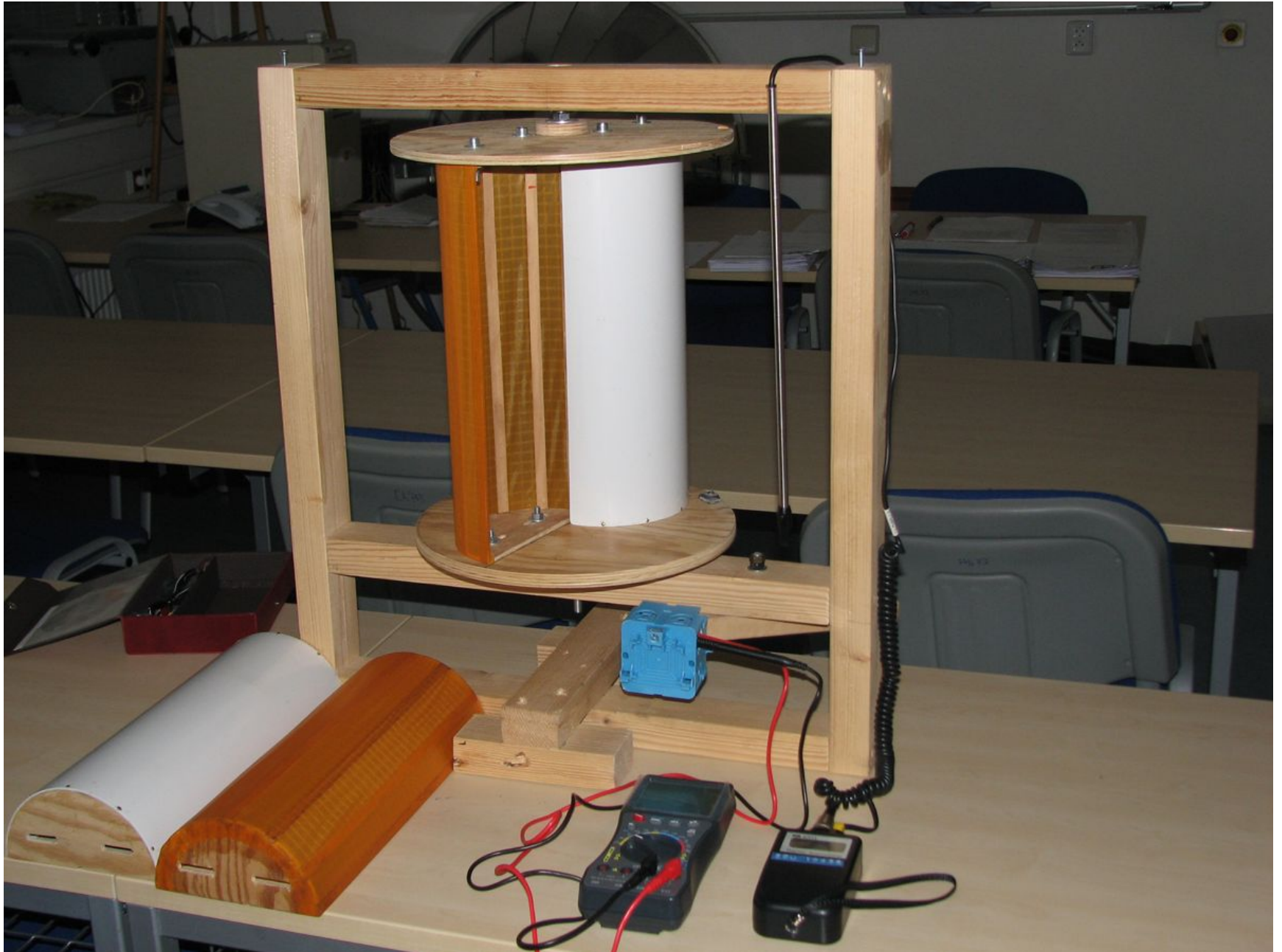
- krycí štít

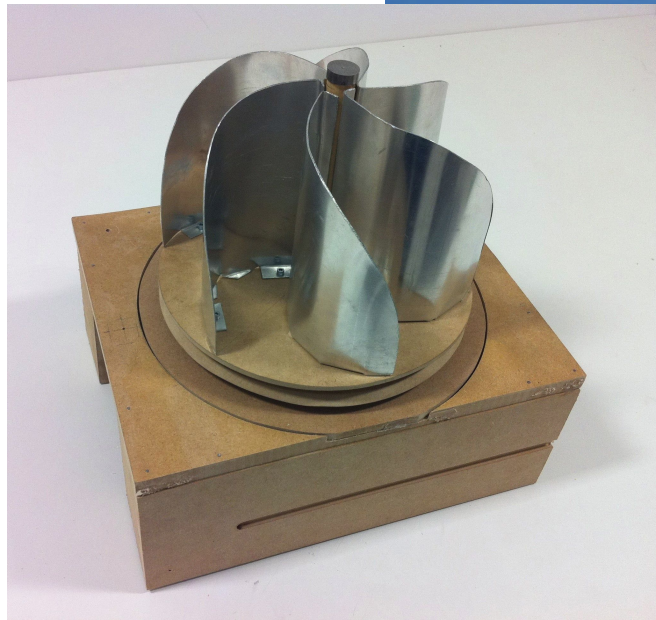
- natáčivé lopatky

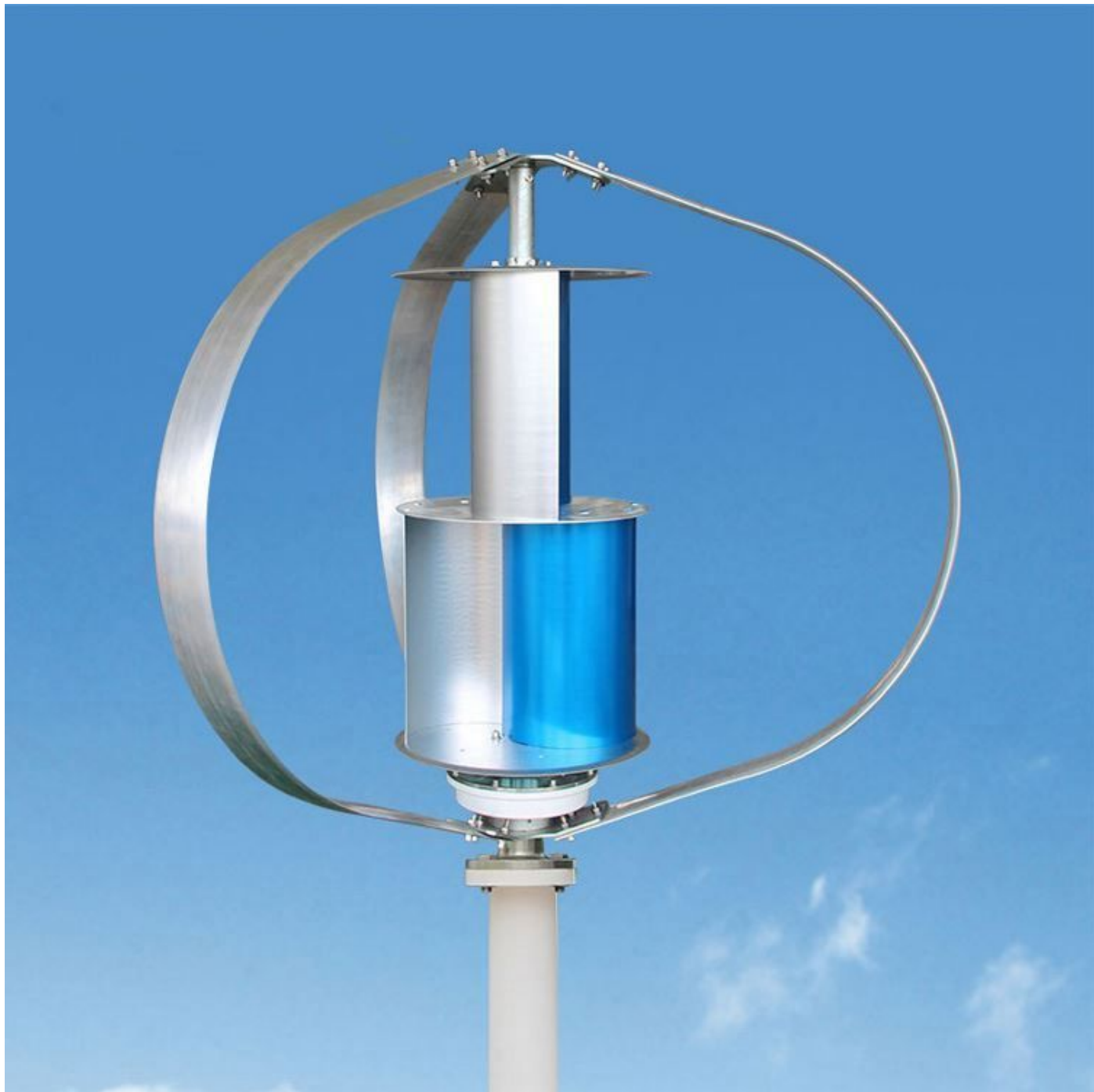
- plachty, draky...

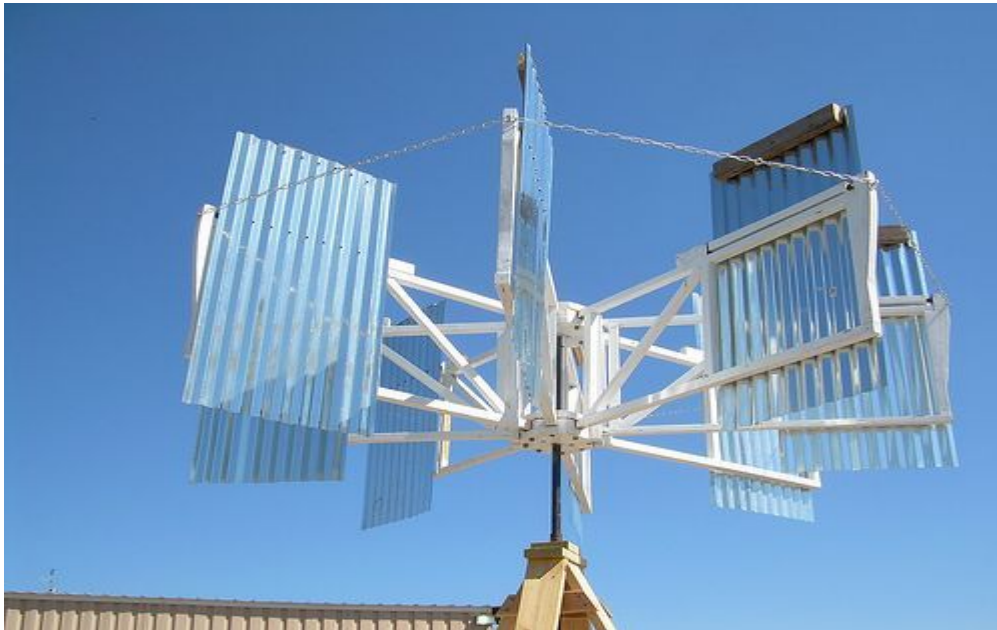


# Rotor Savonius













# Durrichova turbína

2008 – Jiří Durrich

BOLESLAVSKÝ  
**deník.cz**

Předplatné za 1 Kč Přihlášení / registrace

ZMĚNIT  
REGION



ZPRÁVY PODNIKÁNÍ SPORT NÁZORY MAGAZÍN TIPY MIMINKA PRÁCE DOVOLENÁ ŠKOLY deník klub

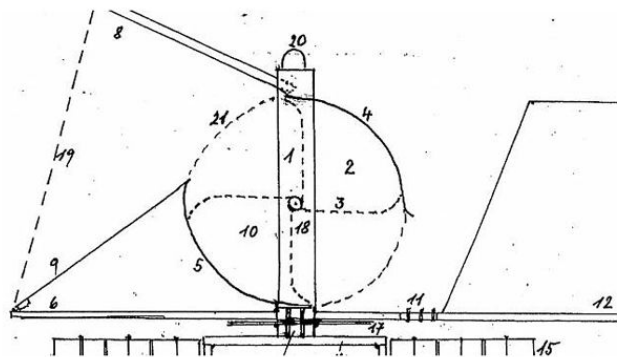
VYBRAT MĚSTO BOLESLAVSKO Z OKOLÍ KRIMI KULTURA LIDÉ ODVEDLE ČESÍ V ČÍSLECH ČESKO A SVĚT

## Vynálezce z Boleslavi vymyslel novou větrnou elektrárnu, kterou chce koupit dokonce i ČEZ!

15.5.2008



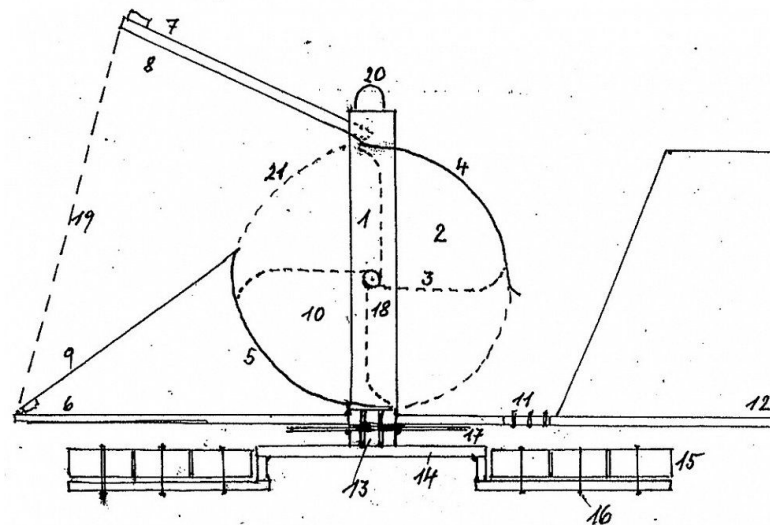
Mladá Boleslav/ Obrovským vrtulím na velkých stožárech ve volné krajině možná brzy odzvoní. Muž z Boleslavi přišel na to, jak vyrábět elektřinu pomocí daleko menších elektráren.



Stlačený vítr je vháněn (na obrázku z levé strany) do menšího pracovního prostoru. Tím vzniká zvětšená síla, přičemž se zvyšuje výkon motoru. | Foto: Deník/Tomáš Ježek

Na mnoha místech České republiky se k nebi tyčí obrovské stožáry větrných elektráren. Odpůrci tohoto zdroje energie proti tomu bojují. A teď se možná dočkají toho, že vítr bude dál vyrábět elektřinu, ale nebude to muset být už jen díky velkým větrným elektrárnám. To všechno díky mladoboleslavskému vynálezci Jiřímu Dürichovi!

Princip je podle vynálezce velice jednoduchý. „Česká hlava vymyslí všechno,“ říká s úsměvem Dürich. V současné době větrné elektrárny fungují na principu obrovských vrtulí, které otáčí vítr. Ale jde to i jinak!



Větrná elektrárna, kterou vymyslel Jiří Dürich, funguje na principu velkého záchytného a malého pracovního prostoru. Jednoduše by se dalo říct, že jde o jakýsi velký trychtýř, kterým je vítr vháněn dovnitř. „Navržený přeplňovaný větrný motor pracuje na základě maximálně možného zvětšení záchytného prostoru a síly větru před vlastním motorem, jeho stlačením do menšího pracovního prostoru a využitím této značně zvětšené síly a tlaku větru pro zvýšení výkonu motoru,“ vysvětluje Dürich.

Takto navržená elektrárna má tedy čtyřnásobně velký záchytný a jen čtvrtinový prostor. Současné větrné elektrárny přitom pracují na zcela opačném principu.

Rozměry nově navržené větrné elektrárny jsou mnohokrát menší než u stožárových. „Celý systém je otočný a není problém ho umístit například na panelový dům,“ dokládá další z výhod boleslavský vynálezce. Díky malým rozměrům není potřeba stavebních úprav. Navíc vyžaduje jen minimální údržbu. Návržnost vložených investicí je přibližně za tři roky.

Výkonnost elektrárny je do 5 kW. Zařízení ale není problém sestavit do velkých ploch, čímž by se získaná energie jen zvýšila.

Energie z jedné větrné elektrárny je dostatečná k provozu nejčastějších elektrických přístrojů v domácnosti, jakými jsou televize či počítač.

Svůj vynález, který není problém používat například u domů na horách, kde jsou pro větrné elektrárny naprosto ideální podmínky, si Jiří Dürich už nechal patentovat. Nabídl ho také společnosti ČEZ. „Už jsem dostal vyjádření od generálního ředitele obnovitelných zdrojů. Chce, aby to někdo odzkoušel a následně se vše vyhodnotilo. A pak, by to koupili,“ dodává boleslavský vynálezce.

# Vztlakový princip (lift)

- vztlaková síla na profilu

$$F_L = \frac{1}{2} \rho * c_L * A * w^2 \quad [N]$$

$$w = \sqrt{v_1^2 + u^2}$$

- J. Smeaton (1724-1792)

- $c_L = 0,28 (c_p)$

- smeaton coefficient

- dynamický tlak

- výpočty vztlaku

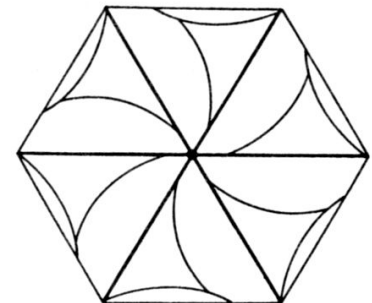
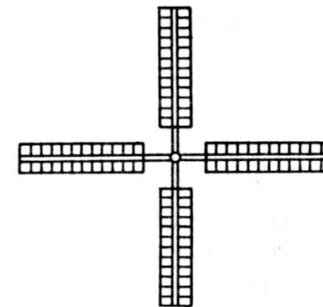
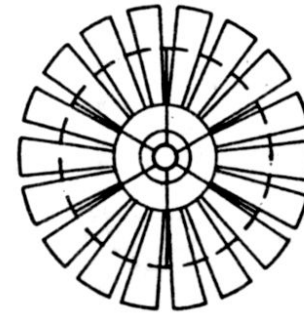
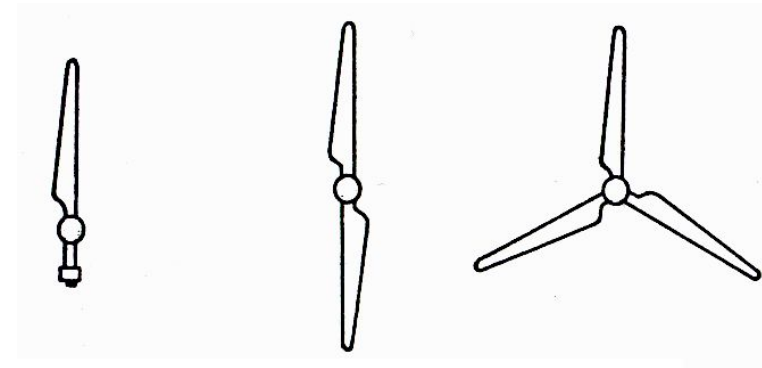
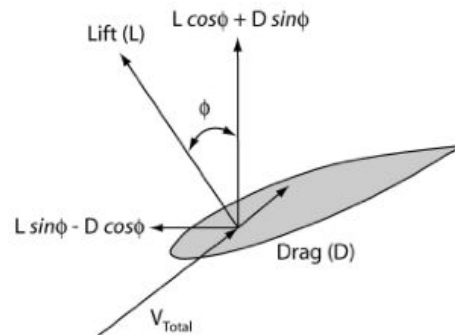
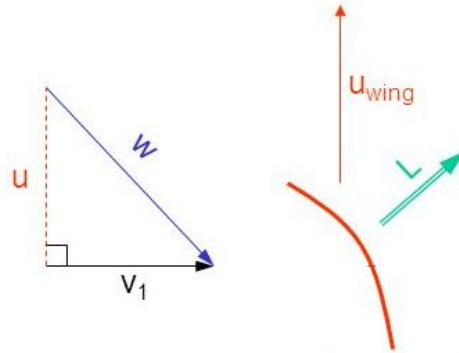
- vrtule

- větrné kolo

- lopatkový mlýn

- plachtový mlýn

- rotor Darrieus



# Větrný mlýn







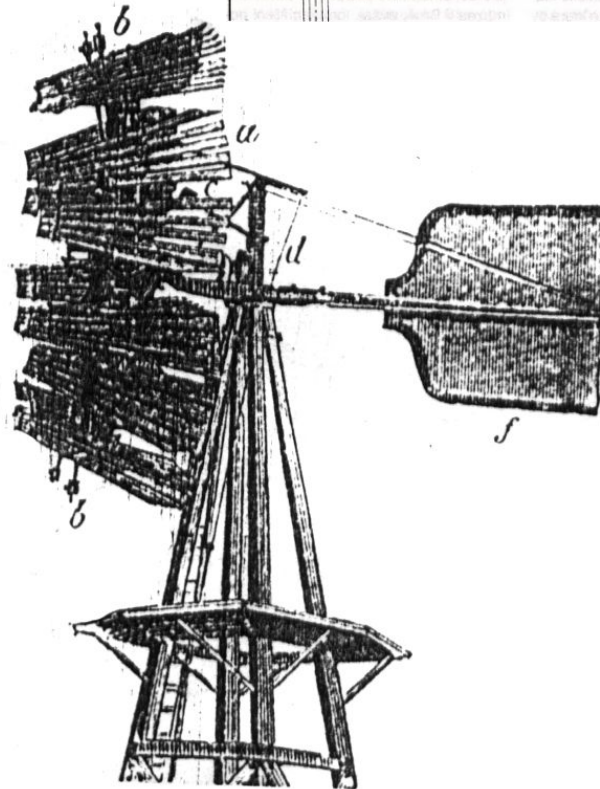
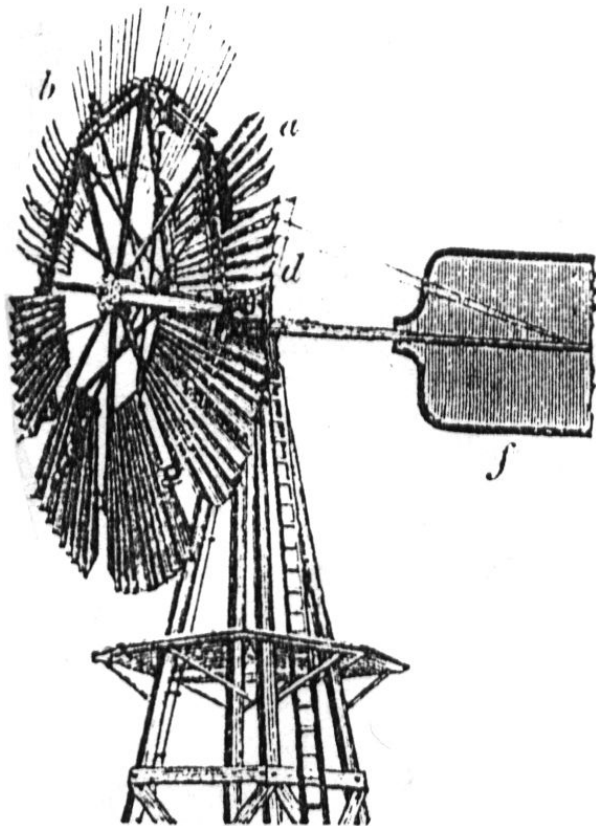
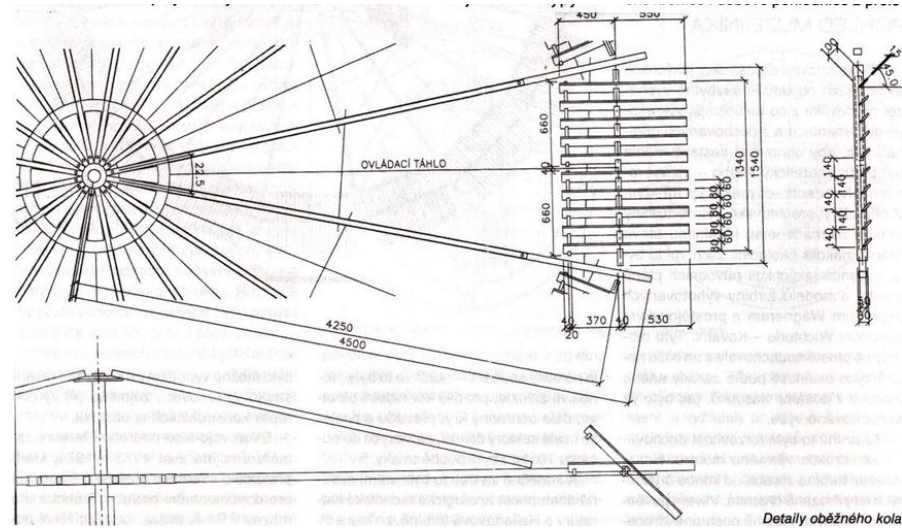


# Halladayova turbína

1854 – Daniel Halladay (Vermont)

stavitelné žaluzie

původně čerpání vody



# Mlýn Ruprechtov

1873 – větrné lopaty

Wágner, Čtvrtníček, Gottwald

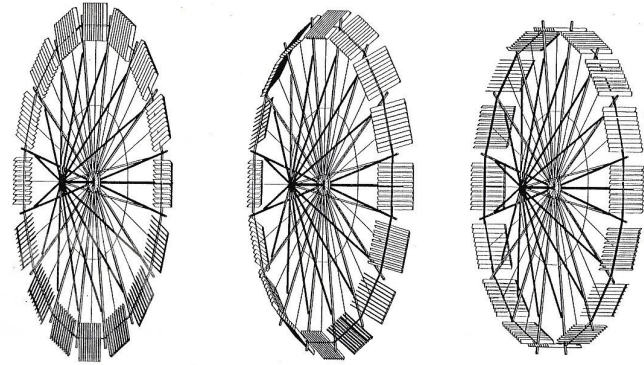
1884 – Halladayova turbína

Wágner

1995 - renovace



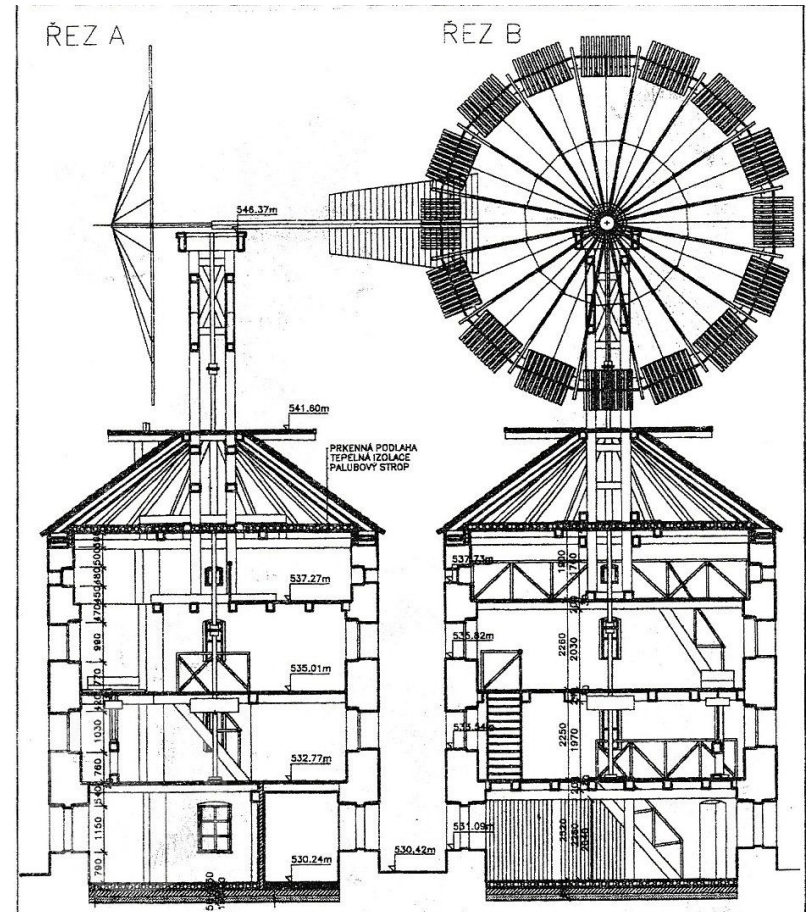
HALLADAYOVA TURBÍNA RUPRECHTOV



PLNÝ VÝKON

1/2 VÝKON

VÝPNUTO

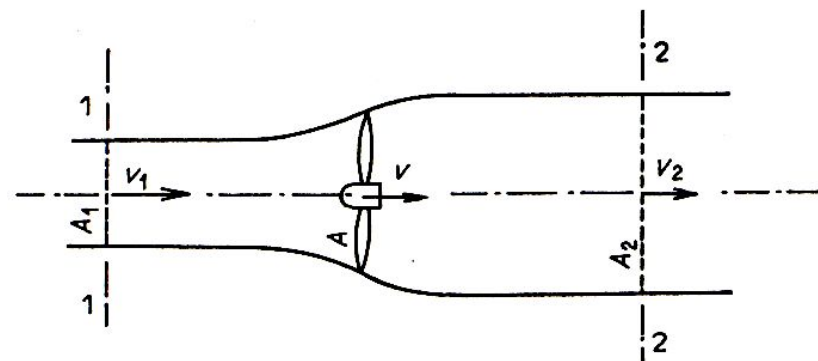


# Farmářské kolo



# n-listá vrtule





$$v_1 A_1 = v A = v_2 A_2$$

$$F_a = \rho A v (v_1 - v_2)$$

$$P = F_a v = \rho A v^2 (v_1 - v_2)$$

$$P = \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \rho A v (v_1^2 - v_2^2)$$

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)$$

$$P = \frac{\Delta E_k}{t} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

$$\eta_i = \frac{P_{virtu}}{P_{vtru}}$$

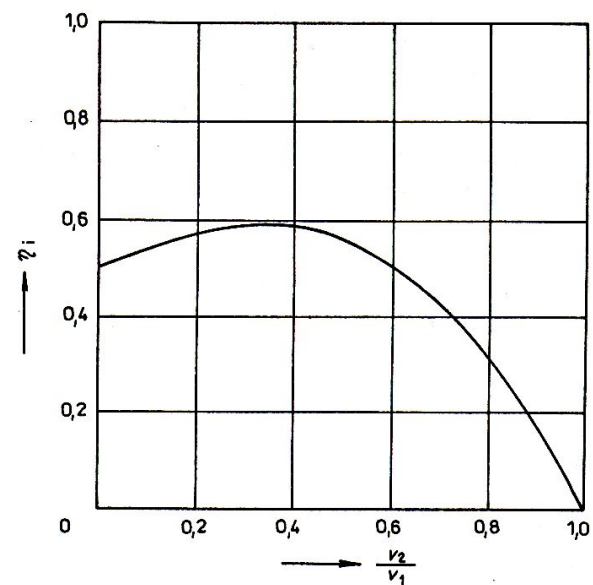
$$\eta_i = \frac{(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{2v_1^3}$$

$$v_2/v_1 = 1/3 \quad \eta_i = \frac{16}{27} = 0,592 \ 6$$

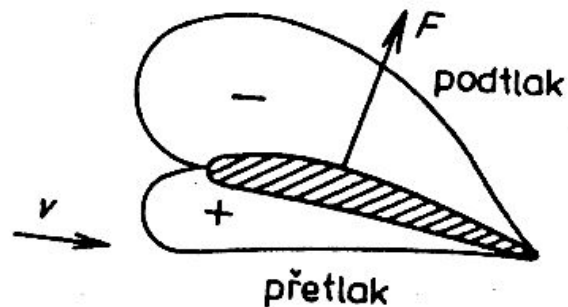
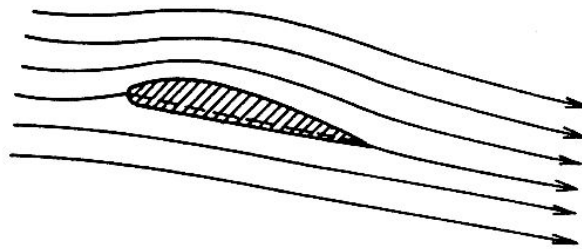
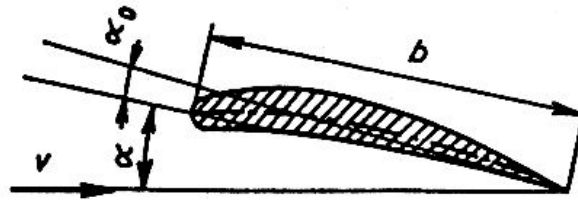
$$u = v/3 \quad \eta_{i, max} = 1/3$$

$$v_2/v_1 = 0,414 \quad \eta_i = 0,687$$

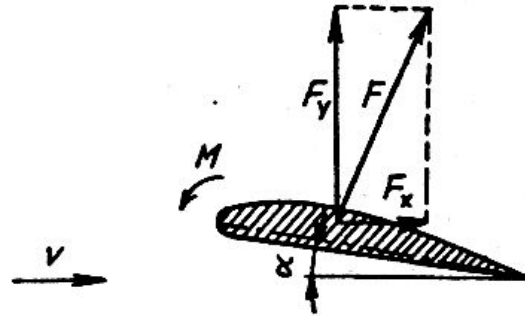
$$\eta_i = 0,63$$



# Rotující křídlo - aerodynamiku profilu



# Síly působící na aerodynamický profil



$$F_y = \frac{1}{2} \rho c_y A v^2 \quad F_x = \frac{1}{2} \rho c_x A v^2$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$M = \frac{1}{2} \rho c_M A b v^2$$

$\rho$  - hustota vzduchu

$v$  - rychlost nenarušeného proudu

$A$  - plocha křídla, která je součinem jeho délky a délky tětiny profilu  $b$

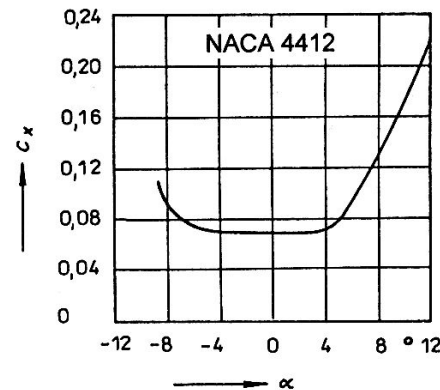
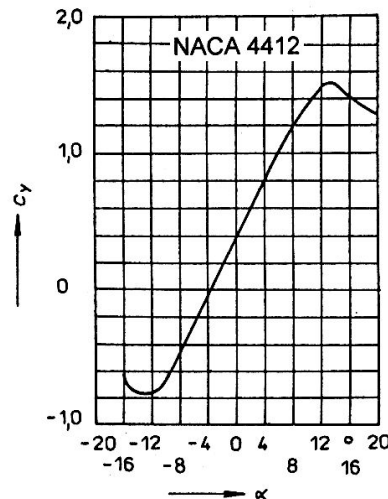
$c_y$  - aerodynamický součinitel vzlaku

$c_x$  - aerodynamický součinitel odporu

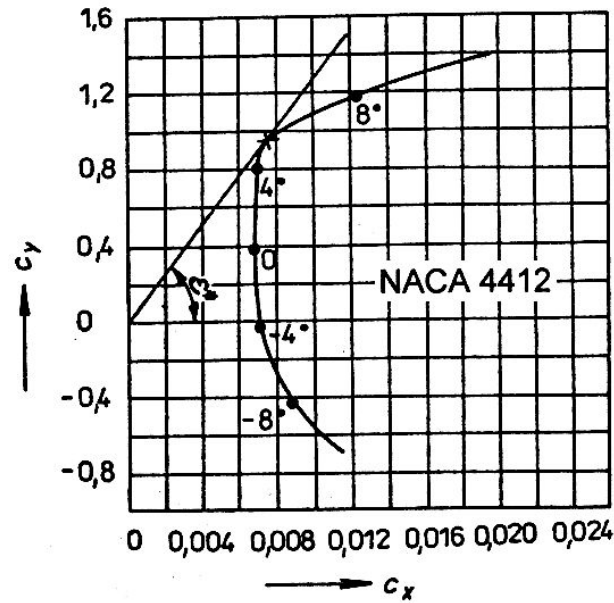
$c_M$  - momentový součinitel

$b$  - délka tětiny profilu

$c_{M0,25}$  - momentový součinitel k bodu ležícímu ve čtvrtině  $b$



# Optimální hodnoty nastavení profilu



$c_y/c_x$  - jemnost profilu ( $\cotg \beta$ )

NACA 4412     $c_y = 0,95$   
                   $c_x = 0,0073$   
                   $c_y/c_x = 130$

# Aerodynamická podobnost podmínek

$$Re = \frac{vl}{\nu}$$

$v$  - rychlost obtékání profilu ( $\text{m.s}^{-1}$ )

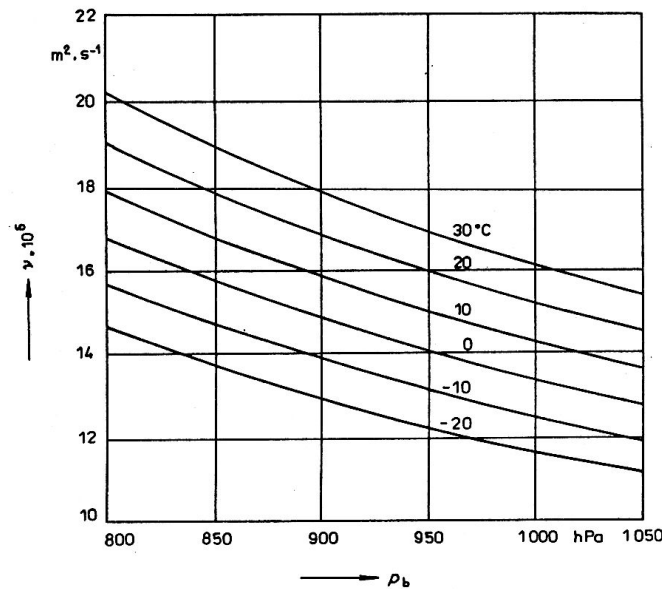
$l$  - charakteristická délka, u profilů to bývá délka tělivity ( $\text{m}$ )

$\nu$  - kinematická viskozita proudící tekutiny ( $\text{m}^2.\text{s}$ )

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$\mu$  - dynamická viskozita proudící tekutiny ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ )

$$\mu = 1,503.10^6 \cdot \frac{T^{1,5}}{T+123,6}$$

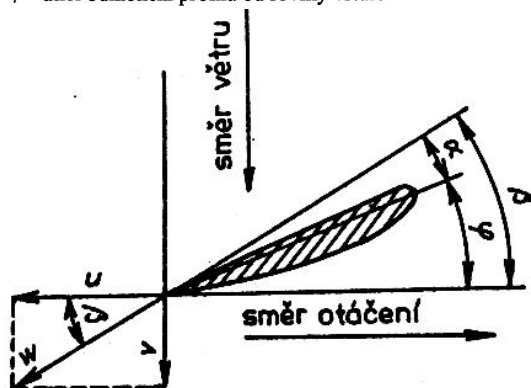


$$\nu = 15.10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$$

# Element vrtulového listu dr

$\alpha$  úhel náběhu

$\varphi$  úhel odklonění profilu od roviny vrtule



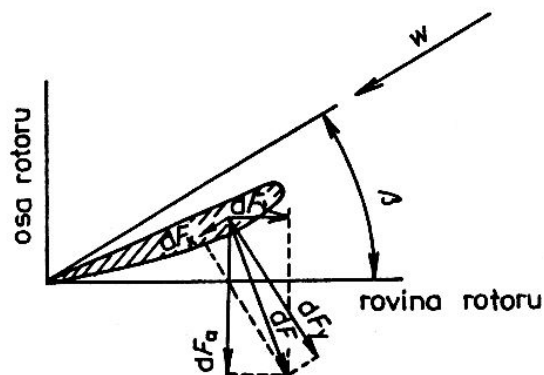
$$u = \frac{\pi n}{30} r$$

$n$  - otáčky vrtule  
 $r$  - poloměr (poloha elementu dr)

$$w = \sqrt{v^2 + u^2}$$

$v$  rychlost vzduchového proudu  
 $u$  obvodová rychlost  
 $w$  relativní rychlost proudu vzduchu přitékajícího k prvku vrtule

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{v}{u}$$



$$dF = \sqrt{dF_x^2 + dF_y^2} = \sqrt{dF_a^2 + dF_t^2}$$

$$dM = dF_t r$$

$$u = v \operatorname{ctg} \beta$$

$$w^2 = v^2 (1 + \operatorname{ctg}^2 \beta)$$

$$\operatorname{ctg} \beta = \frac{u}{v} = \lambda$$

pro  $r = R$

# Silové účinky vrtule

- axiální síla – ohybová síla na stožár

$$dF_a = \frac{\rho}{2} v^2 dA (1 + \cotg^2 \beta) (c_y \cos \beta + c_x \sin \beta)$$

- tangencialní síla – moment otáčející vrtulí

$$dF_t = \frac{\rho}{2} v^2 dA (1 + \cotg^2 \beta) (c_y \sin \beta + c_x \cos \beta)$$

$$dM = \frac{\rho}{2} v^2 r dA (1 + \cotg^2 \beta) (c_y \sin \beta + c_x \cos \beta)$$

$$dP = dM \omega = \frac{\rho}{2} v^3 dA \cotg \beta (1 + \cotg^2 \beta) (c_y \sin \beta - c_x \cos \beta)$$

# Výkonové poměry na rotoru

- výkon předávaný rotoru větrem

$$P = F_a v$$

- užitečný výkon na hřídeli rotoru

$$P_u = M\omega$$

- aerodynamická účinnost rotoru

$$\frac{P_u}{P} = \eta_a$$

- platí pro konkrétní provedení a velikost (nelze jednoduše zobecnit)
- praktický výpočet se neprovádí pro dr ale  $\Delta r$  (spočetný počet)

$$\Delta F_a \quad \Delta M \quad \Delta P$$

- konečný součet pro všechny lopatky

# Zobecnění pro přepočet na jiné rozměry

- součinitel axiální síly

$$C_{Fa} = \frac{2F_a}{\rho A v^2} \quad A = \pi R^2$$

- momentový součinitel

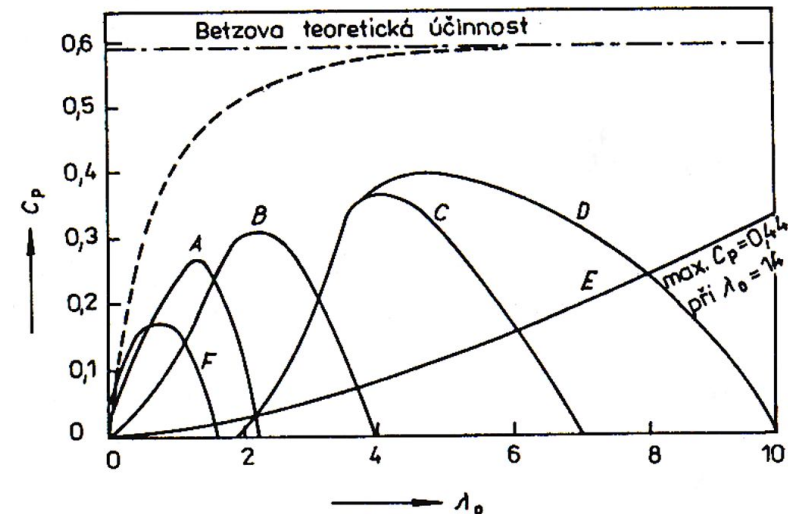
$$C_M = \frac{2M}{\rho A v^2 R} \quad A = \pi R^2$$

- výkonový součinitel

$$C_P = \frac{2P}{\rho A v^3} \quad A = \pi R^2$$

- rychlostní poměr (rychl oběžnost)

$$\lambda_0 = \frac{u_R}{v} = \frac{2\pi R n}{60v}$$



A - pomaloběžný mnoholopatkový rotor, B - čtyřlopatkový tradiční holandský větrný mlýn, C - rotor Darrieus se svislou osou, D - větrný motor s vodorovnou osou s dvoulistou vrtulí, E - větrný motor Hütter 100 kW s rychloběžnou dvoulistou vrtulí, F - rotor Savonius; ---- vypočtený průběh  $C_p$  pro nekonečný počet lopatek a nulový profilový odpor; ----- maximální teoretická účinnost Betzova

# Základy výpočtu větrného motoru

- jmenovitý výkon

$$P_j = \frac{\rho}{2} C_P A v_j^3 \quad (\text{W})$$

$$v_j < 2,5 * v_{\text{prům}}$$

- průměr rotoru

$$D = \sqrt{\frac{8P_j}{C_P \pi \rho v_j^3}} \quad (\text{m})$$

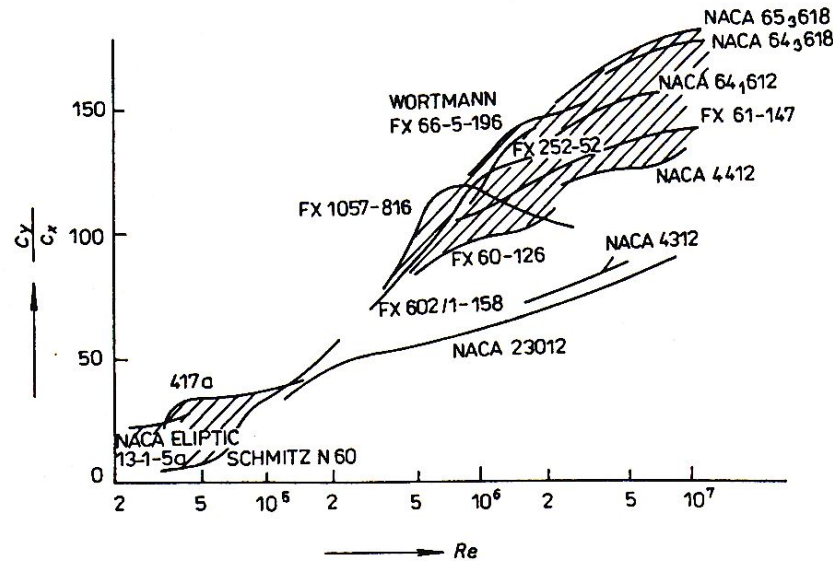
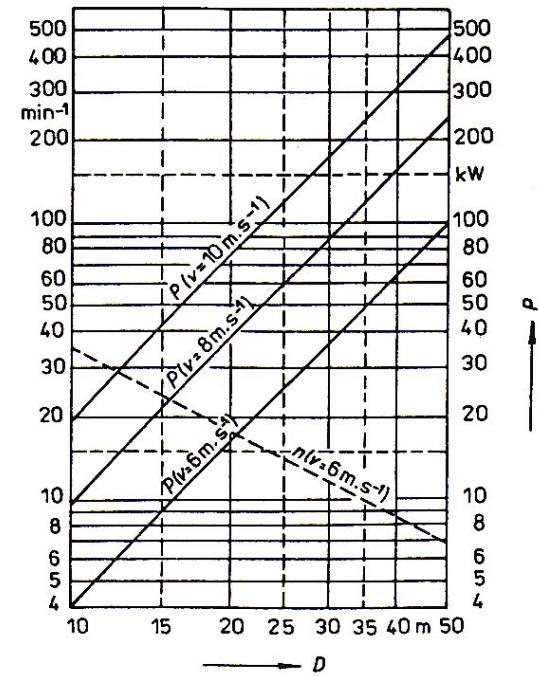
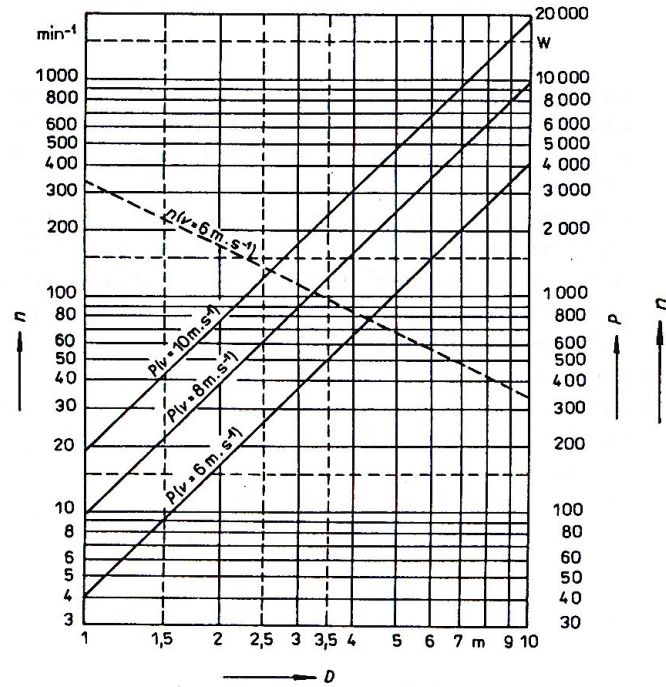
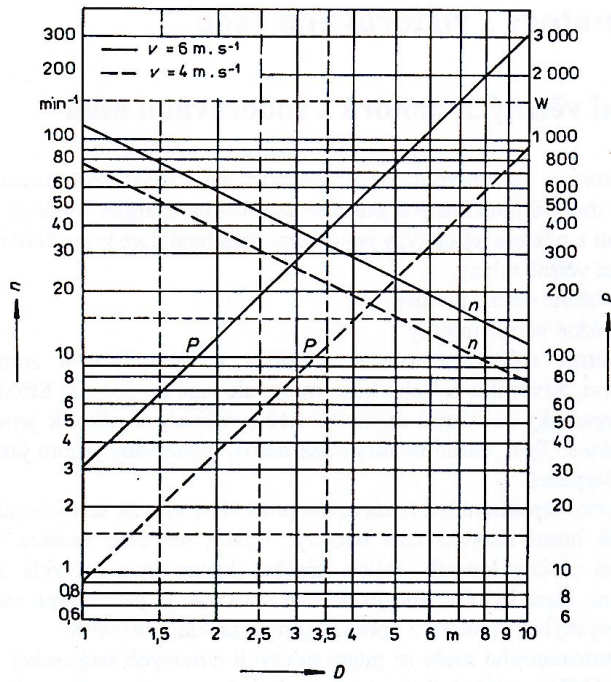
- jmenovité otáčky

$$n_j = \frac{60 \lambda_0 v_j}{\pi D} \quad (\text{min}^{-1})$$

$$n_j = 30 \lambda_0 v_j^2 \sqrt{\frac{C_P \rho v_j}{2 \pi P_j}} \quad (\text{min}^{-1})$$

| Typ                             | $C_{P \text{ opt}}$ | $\lambda_{\text{opt}}$ | $\lambda_{\text{max}}$ |
|---------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| Mnoholopatkový rotor (americký) | 0,35                | 1,1                    | 2,0                    |
| Třílistý rotor                  | 0,18 až 0,39        | 2,5 až 6               |                        |
| Dvoulistý rotor                 | 0,20 až 0,48        | 6 až 10                |                        |
| Savonius, dělený                | 0,23                | 0,85                   | 1,8                    |
| Rotor Darrieus třílistý         | 0,362               | 4,66                   | 6,76                   |
| Rotor Darrieus jednolistý       | 0,236               | 6,1                    | 10,0                   |
| Miskový kříž                    | 0,019 5             | 0,14                   | 0,31                   |

# Volba profilu



# Návrh listu

$$v = \frac{2}{3}v_1$$

$$u_r = \lambda_0 v_1 \frac{r}{R}$$

$$dF_a = \rho dV(v_1 - v_2)$$

$$dF_a = \frac{\rho}{2} v^2 z b dr (1 + \cotg^2 \beta) c_y \cos \beta$$

$z$  - počet vrtulových listů

$b$  - délka tětiny profilu na poloměru  $r$

$\beta$  - úhel, který svírá vektor relativní rychlosti s rovinou vrtule

$$dV = 2\pi r dr \cdot v = 2\pi r dr \frac{v_1 + v_2}{2}$$

$$\rho 2\pi r dr (v_1 - v_2) \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{\rho}{2} \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right)^2 z b dr (1 + \cotg^2 \beta) c_y \cos \beta$$

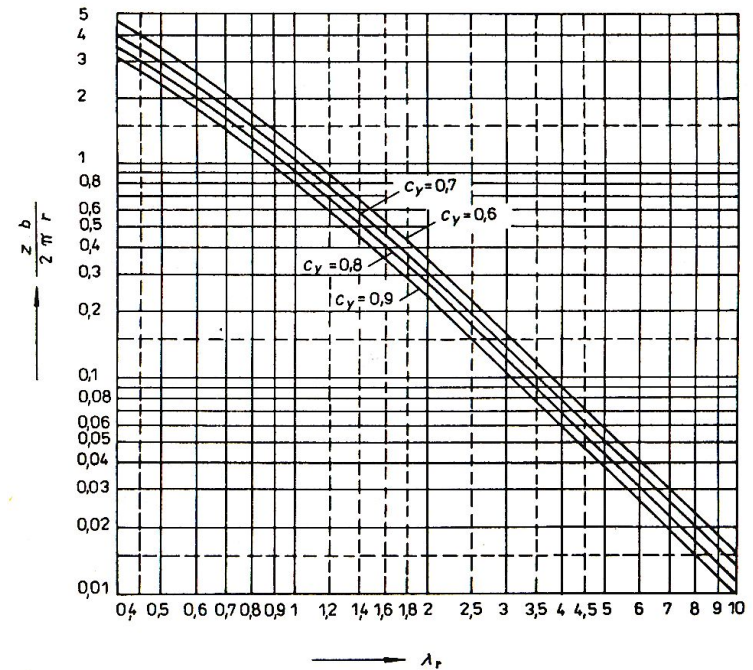
$$\frac{z b}{2\pi r} = \frac{2}{c_y (1 + \cotg^2 \beta) \cos \beta}$$

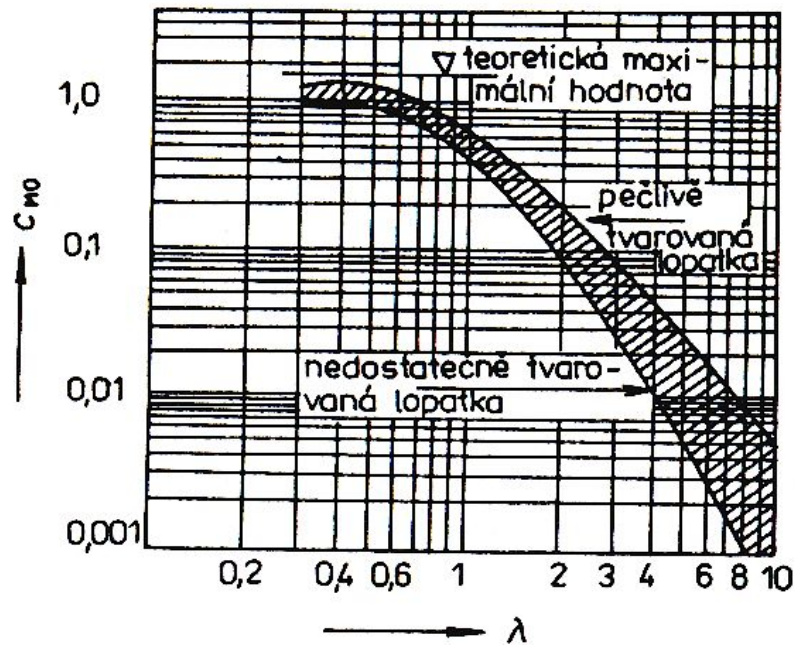
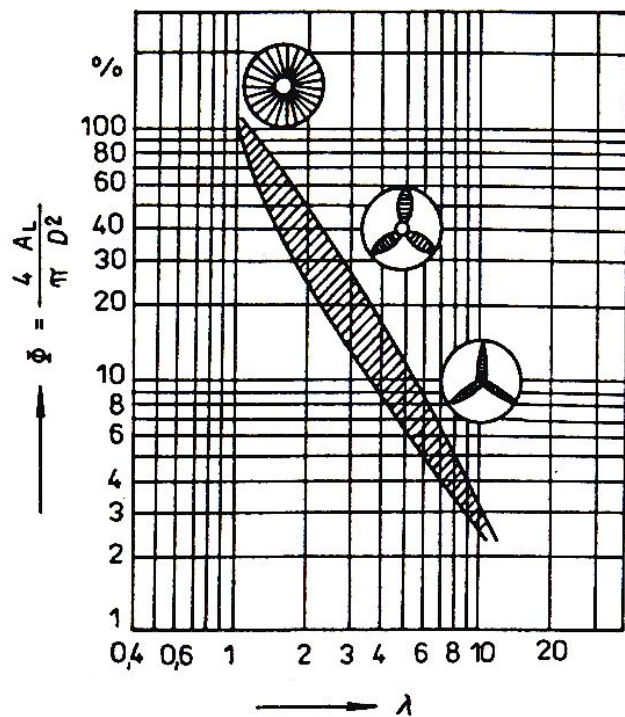
$$\lambda_r = \frac{u_r}{v_1} = \frac{r\omega}{v_1} = \frac{r}{R} \lambda_0$$

$$\cotg \beta = \frac{3}{2} \lambda$$

$$\cos \beta = \sqrt{\frac{9\lambda_r^2}{9\lambda_r^2 + 4}}$$

$$\frac{z b}{2\pi r} = \frac{8\sqrt{4 + 9\lambda_r^2}}{(12\lambda_r + 27\lambda_r^3) c_y}$$

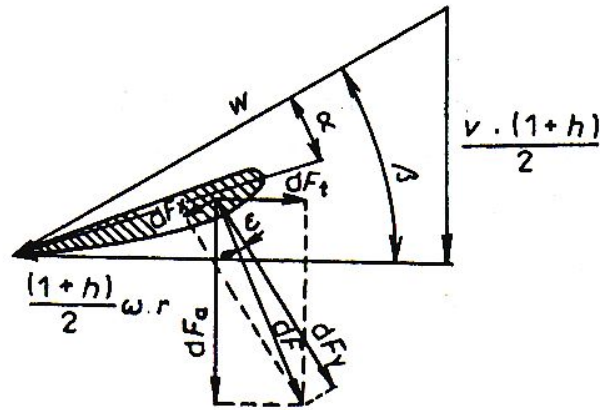




|             |         |         |        |        |        |
|-------------|---------|---------|--------|--------|--------|
| $\lambda_0$ | 1       | 2       | 3      | 4      | 5      |
| $z$         | 8 až 24 | 6 až 12 | 3 až 6 | 2 až 4 | 2 až 3 |

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{dF_x}{dF_y} = \frac{c_x}{c_y}$$

$$\eta_a = \frac{dP_l}{dP_a} = \frac{\omega dM_l}{v dF_a} = \frac{u dF_l}{v dF_u}$$



$$dF_n = dF_y \cos \beta + dF_x \sin \beta = \frac{1}{2} \rho b w^2 dr (c_y \cos \beta + c_x \sin \beta)$$

$$dF_t = dF_y \sin \beta + dF_x \cos \beta = \frac{1}{2} \rho b w^2 dr (c_y \sin \beta + c_x \cos \beta)$$

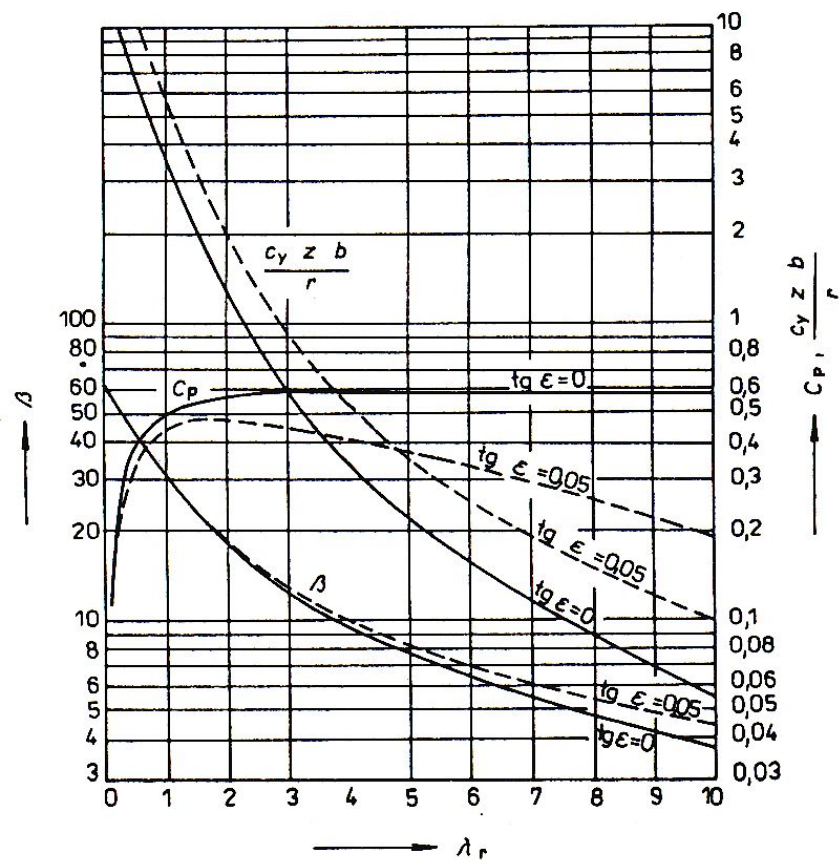
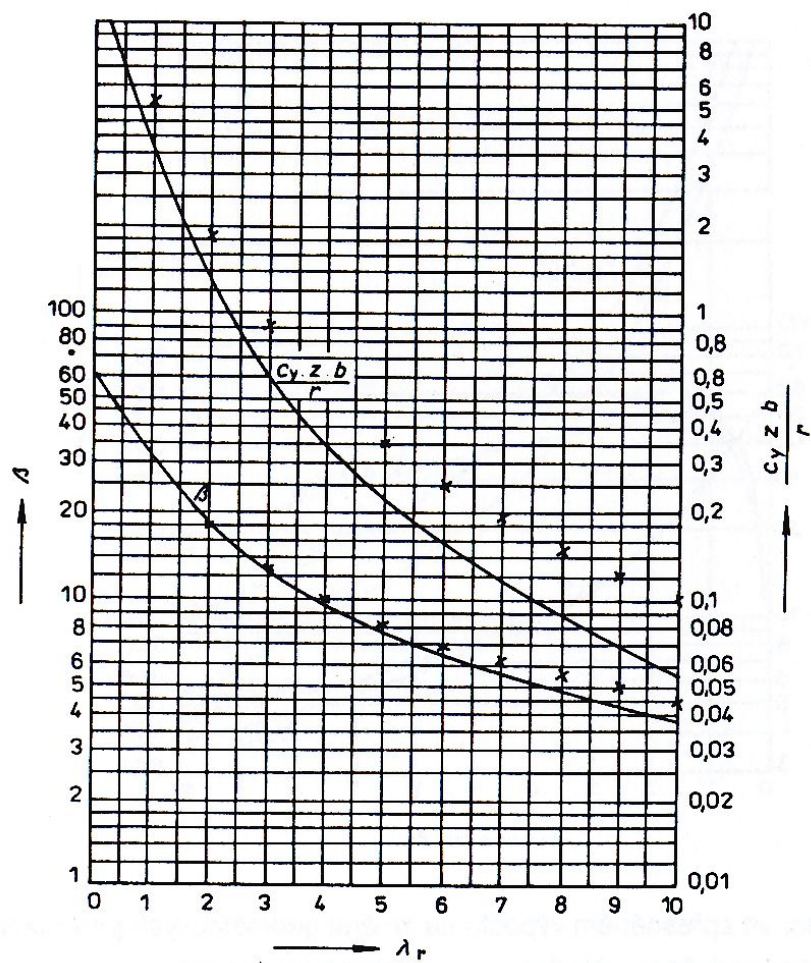
$$\tan \epsilon = c_x / c_y$$

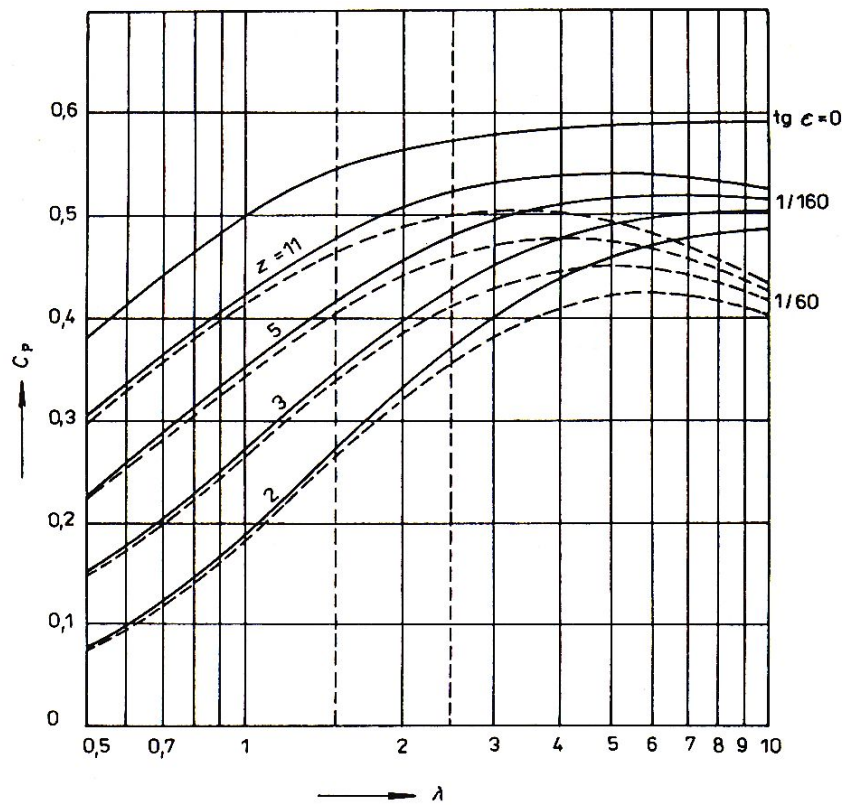
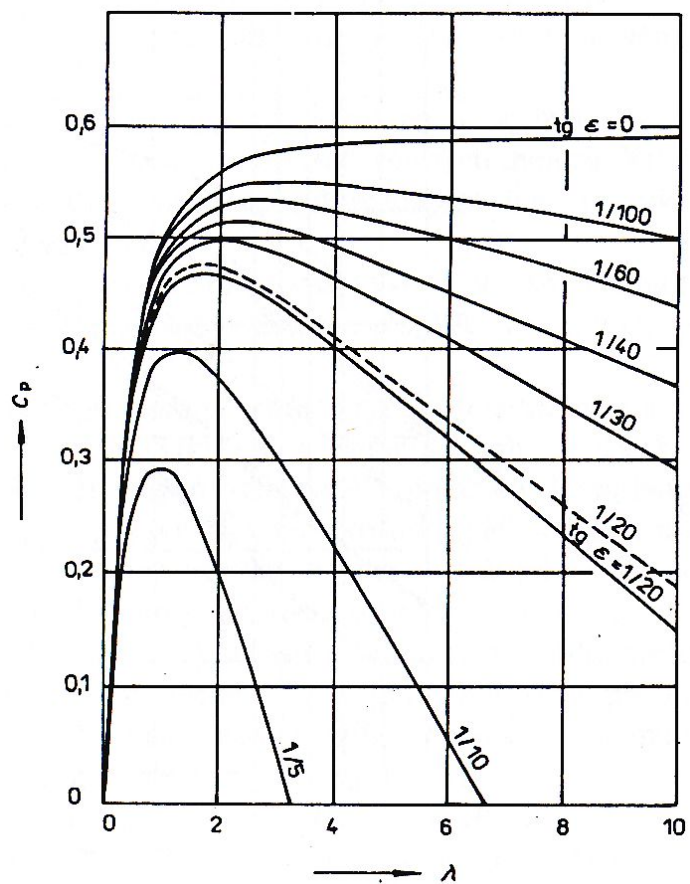
$$dF_n = \frac{1}{2} \rho b w^2 c_y \frac{\cos(\beta - \epsilon)}{\cos \epsilon} dr$$

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho b w^2 c_y \frac{\sin(\beta - \epsilon)}{\cos \epsilon} dr$$

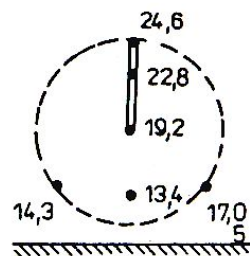
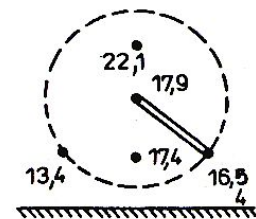
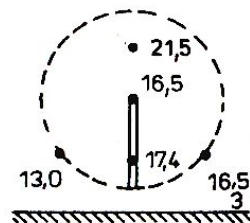
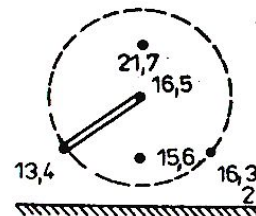
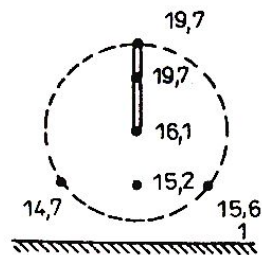
$$dF = z dF_n = \frac{1}{2} \rho z b w^2 c_y \frac{\cos(\beta - \epsilon)}{\cos \epsilon} dr$$

$$dM = r z dF_t = \frac{1}{2} \rho z b r w^2 c_y \frac{\sin(\beta - \epsilon)}{\cos \epsilon} dr$$



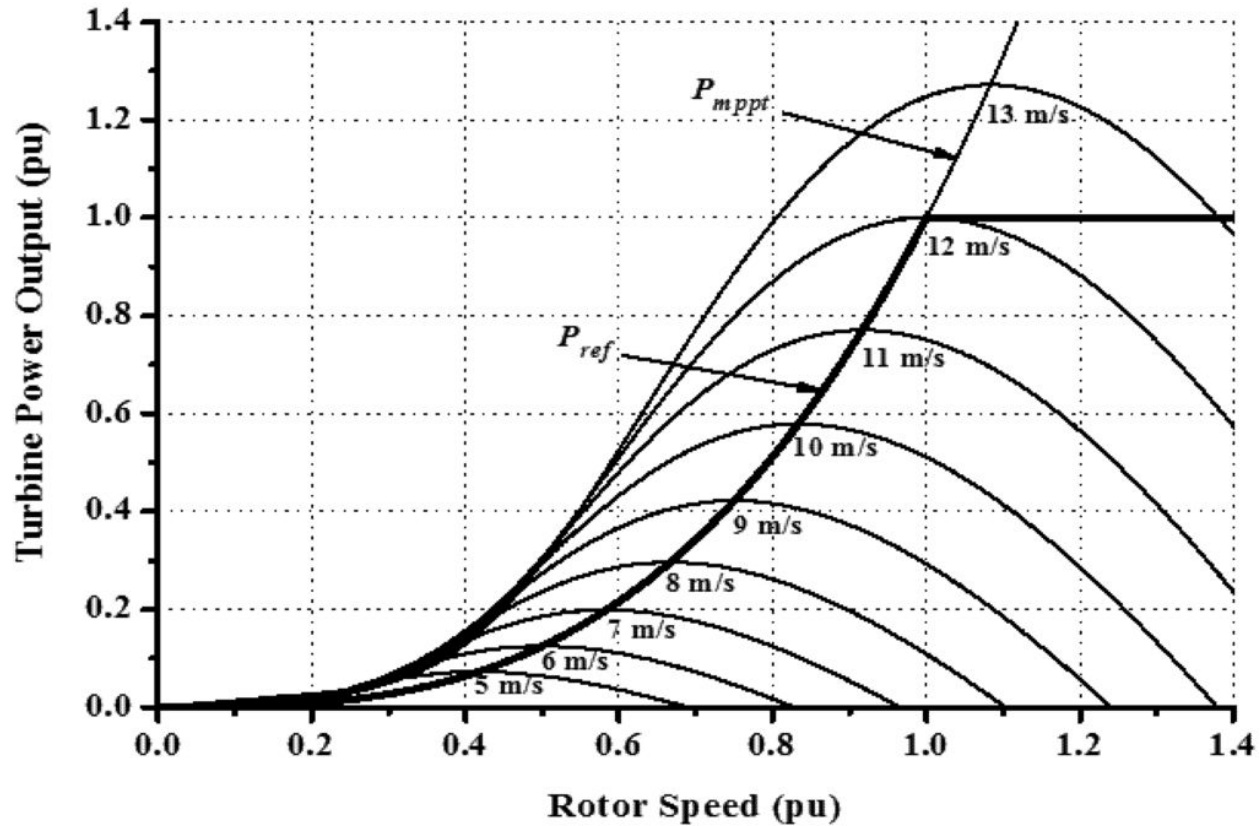


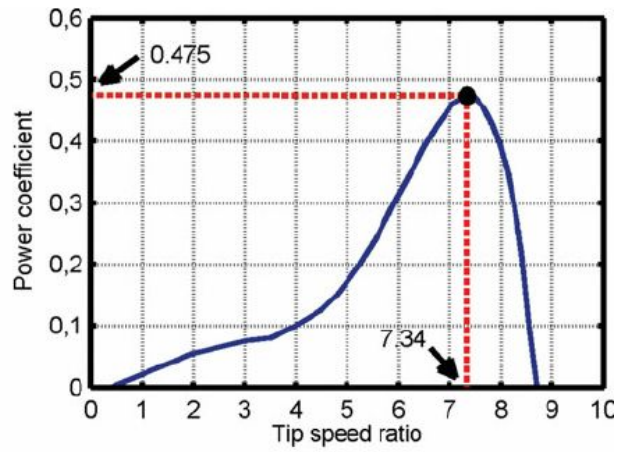




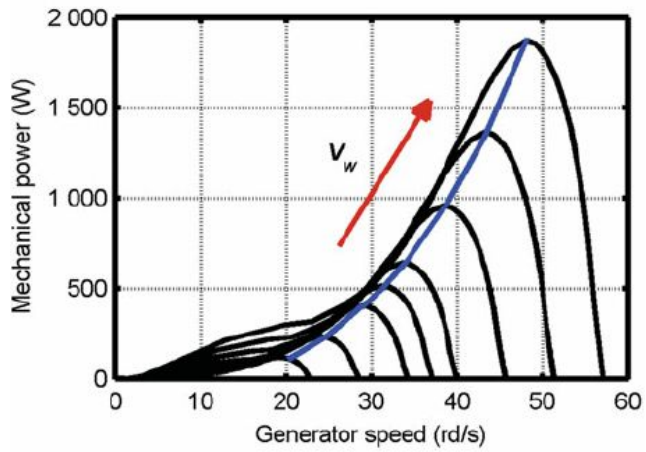
$$t_5 - t_1 = 2 \text{ s}$$

# Výkonová charakteristika

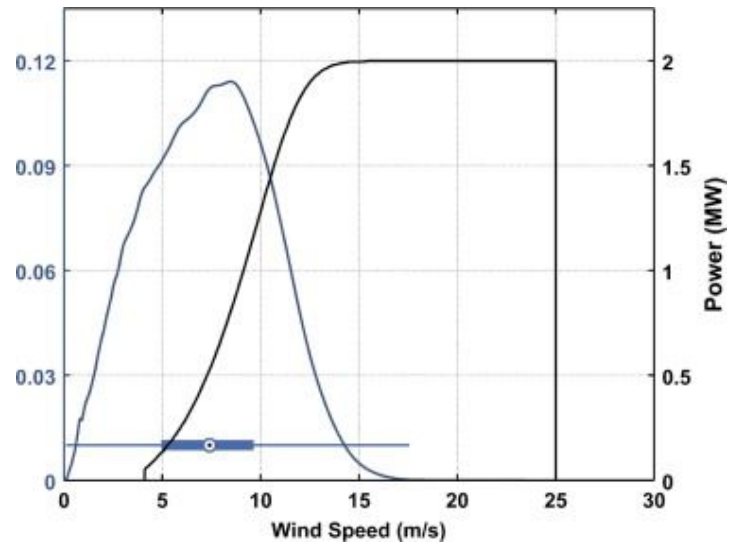


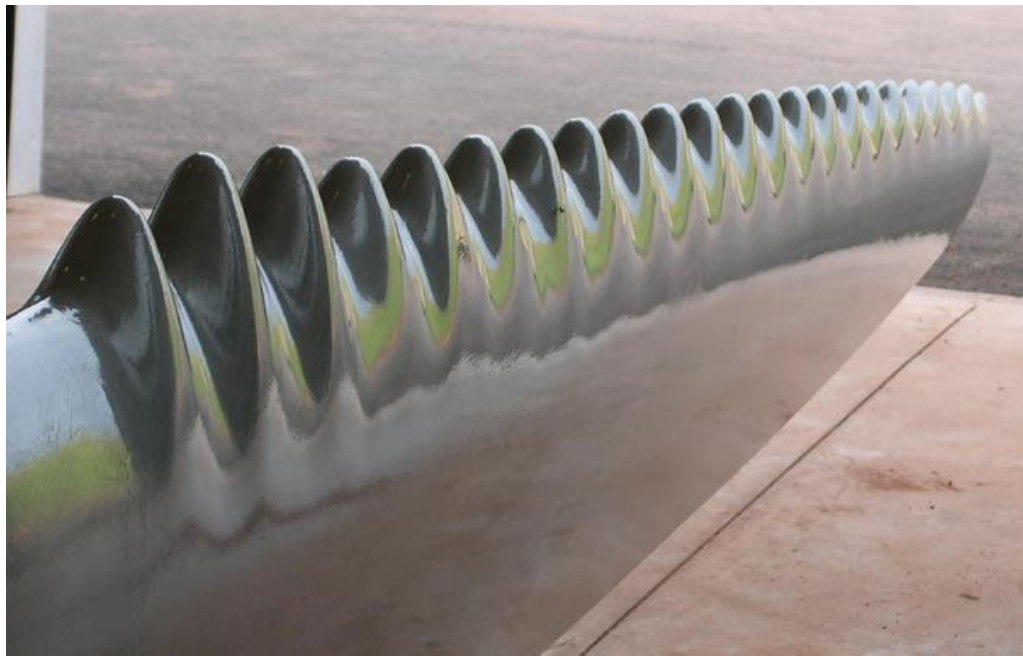


(a)

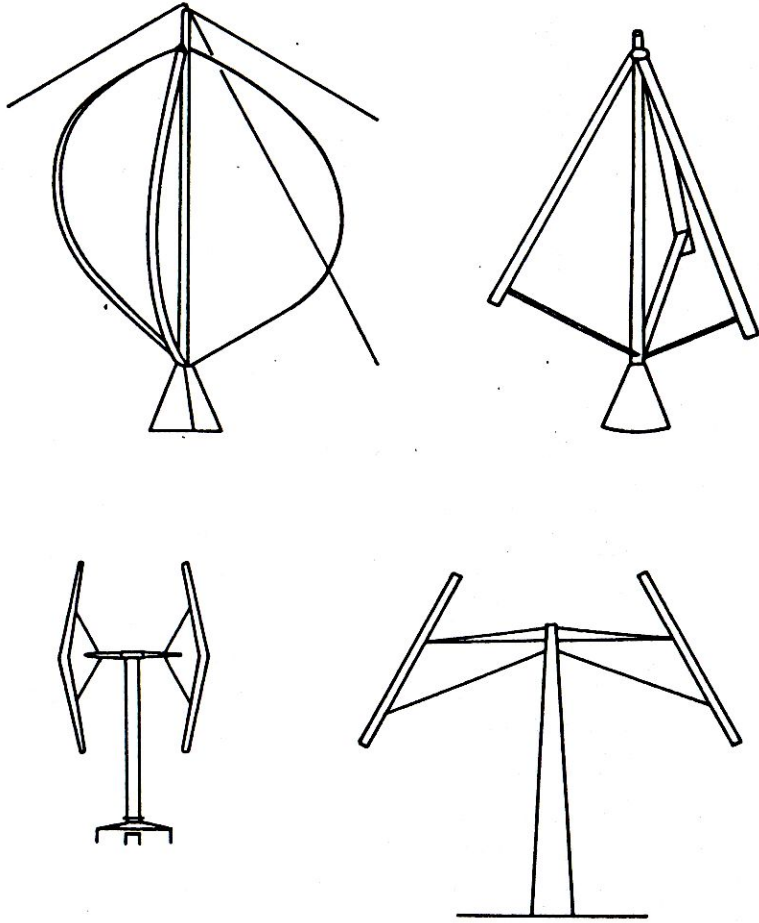


(b)





# Rotor Darrieus



# EOLE VAWT

Cap Chat, QC  
coast of St. Lawrence gulf

project 4,2 MW  
Supposed production 15 GWh/rok  
Axor Ltd.

finished:  
1987 - 4,2 MW



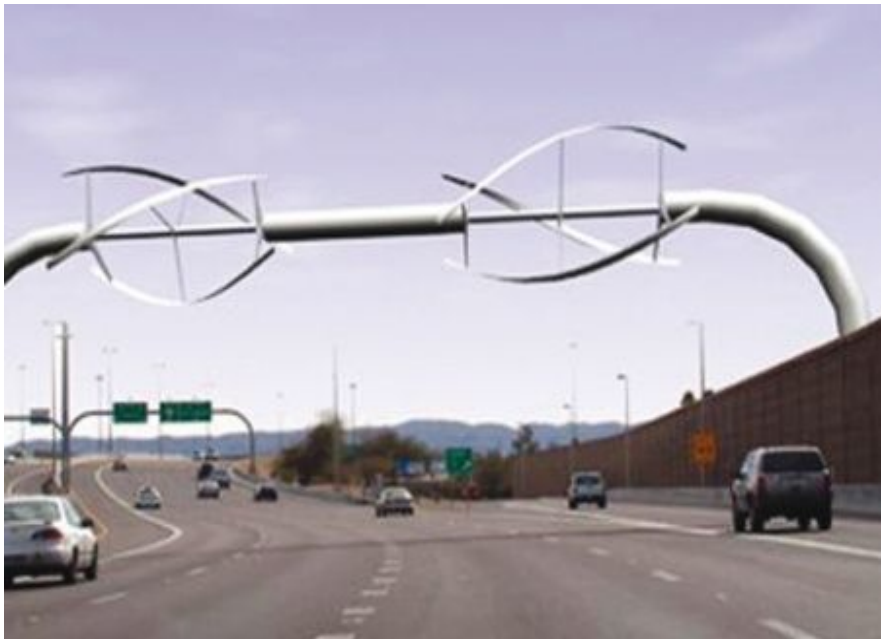
# **EOLE 4,2 MW**

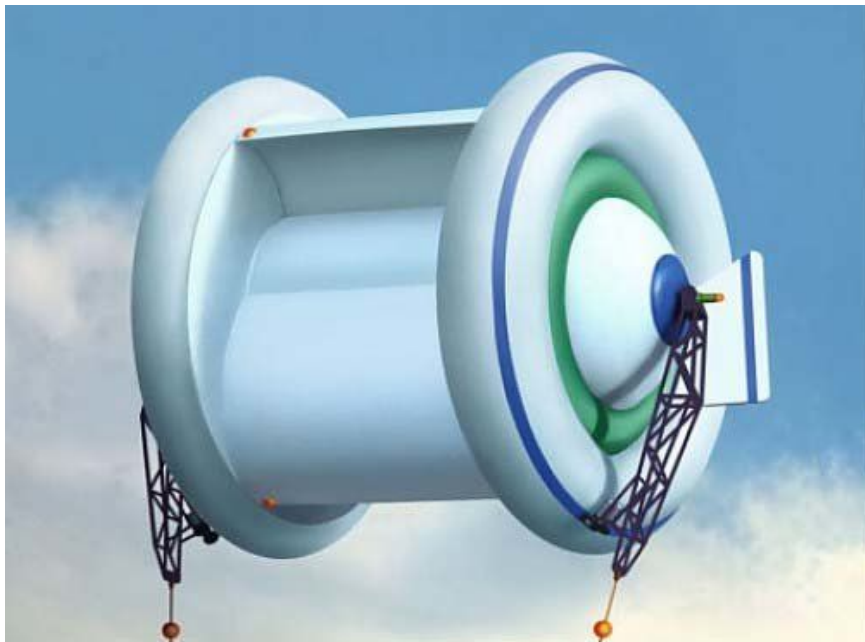
**vertical axis - type Darrieus**  
**auxiliary start**  
**height 110m**  
**diameter 60m**  
**basement 10m**  
**rigging cables**  
**DC generator**  
**DC/AC inverter**

- 1. multi MW**
- 1. without gearbox**
- 1. variable speed**
- 1. with inverter**

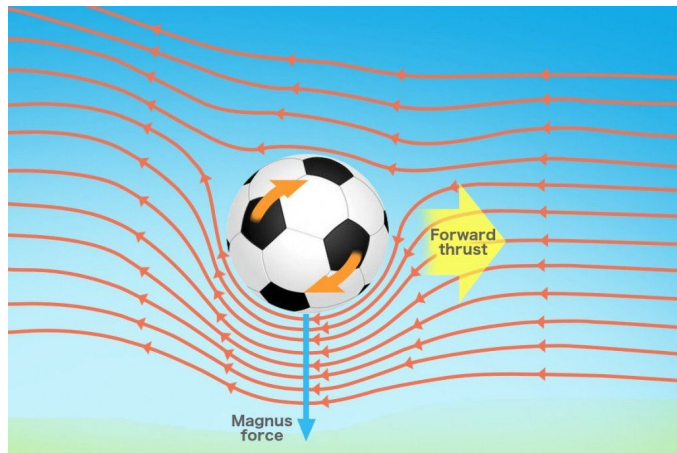
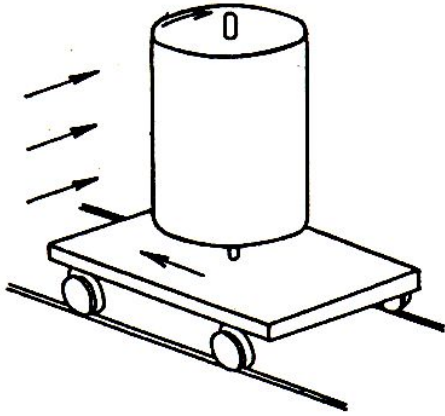








# Magnusův efekt





# Větrný oscilátor

