

Indexek

a	alapjel
a,b,c	fázismennyiségek
b	billenő
d,q	hosszirányú, keresztirányú
e	egyen, eredő
f,F	fékező, fogyasztó
fe	vas
g, G	gerjesztőköri, generátoros
G	generátor
h	tartós terhelhetőségi határ, hajtó
i	indukált, indítási
H	hálózati
k	külső. középérték
m, M	maximális, mechanikai, motoros
max	maximális
min	minimális
n, N	negatív, névleges, normalizált
o	üresjárási
p	pozitív, pólus
r	rotor, forgórész
rz	rövidrezárt
s	állórész, szórás, surlódás
T	turbina
1	alapharmonikus, állórész, szinkron
2	forgórész
'	tranziens
“	szubtranziens
*	redukált

5. SZÉLERŐGÉPEK SZABÁLYOZÁSA ÉS VÉDELME

5.1. Szélerőgépek rugalmassága

A szélesebb- és szélirányváltozások dinamizmusa hatással van a szélerőgép-üzemre. A szélesebb-változásokból adódó fordulatszám ill. nyomatékingadozás lényeges lehet a kapcsolt munkagép üzemelésére, a szélirányváltozások pedig megkövetelik, hogy gondoskodjunk olyan szerkezetről, amely a rotort folyamatosan a szélirányba állítja, így biztosítva a lehető legnagyobb teljesítmény elérését.

A szélirányváltozás csak a vízszintes tengelyelrendezésű szélerőgépeknél okoz gondot, a függőleges tengelyűeknél az üzemeltetés szempontjából a szélirány közböns.

Energetikai szempontból nyilvánvalóan csak a szél makrostruktúrája a lényeges. Azt vizsgáljuk, hogy hogyan viselkednek a szélerőgépek a hirtelen bekövetkező szélesebb- és szélirányváltozásra, ha azok jelentősek.

5.1.1. Fordulatszám-rugalmasság

A fordulatszám-rugalmasság fogalma alatt azt értjük, hogy a szélerőgép milyen gyorsan és módon reagál a szélesebb-változásokra. Ez elsősorban a fordulatszám egyenletessége szempontjából fontos és a rotor tehetetlenségével, valamint a kapcsolt tehetetlen tömegekkel, továbbá a hajtott munkagép $M = f(n)$ nyomaték-függvényével kapcsolatos.

A téma kifejtése meglehetősen komplikált, ezért a lehető legegyszerűbb esetet vizsgálunk. Lassújárású rotort vizsgálunk, amely egy $M \approx$ konstans nyomatékigényű munkagépet (pl. térfogatkiszorítás elvén működő szivattyút) hajt. Először azt tanulmányozzuk, hogy hogyan viselkedik a szélerőgép, ha álló helyzetben hirtelen széllelés éri.

A szél sebessége nagyon kicsi idő alatt $v = 0$ -ról v_1 -re növekszik. A rotoron ébredő nyomaték M_0 . Ha a rotor tengelyét M nyomaték terheli, az álló szélerőgép indítónyomatéka

$$M_i = M_0 - M.$$

Feltéve, hogy $M_0 > M$, az indítónyomaték hatására a rotor forogni kezd, a kezdeti szöggyorsulás:

$$\varepsilon_0 = \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \frac{M_i}{\Theta_r}, s^{-2} \quad (5.1.)$$

ahol Θ_r a rotor és a kapcsolt tömegek forgástengelyre számított tehetetlenségi nyomatéka, $kg \cdot m^2$.

A rotor szögsebessége $-dt$ idő múlva $-d\omega = \varepsilon_0 dt$ -re nő, azaz:

$$d\omega = \frac{M_i}{\Theta_k} \cdot dt = \frac{C \cdot v_1^2 \pm M}{\Theta_k} dt \quad (5.2)$$

Itt a C konstans $C = \rho \cdot K \cdot tg\alpha$.

Az ω szögsebesség $v' = \frac{R \cdot d\omega}{tg\alpha}$ szélsősebesség melletti üresjárat fordulatszámna felel meg. Így a rotor gyorsítónyomatéka dt idő múlva:

$$M' = M_i \pm dM = C(v_1 \pm v')^2 \pm M$$

A v_1 szélsősebességhez tartozó üresjárat szögsebesség:

$$\omega_1 = \frac{v_1 \cdot tg\alpha}{R}, \quad \text{amellyel a nyomatékfüggvény egyszerűbb alakra hozható:}$$

$$M' = M_0 \left(1 \pm 2 \frac{\varepsilon_0}{\omega_1} t + \frac{\varepsilon_0^2}{\omega_1^2} \cdot t^2 \right) \pm M, \quad N \cdot m \quad (5.3)$$

Az $M' = 0$ esetén az egyenletet t -re megoldva a gyorsítás időtartama adódik:

$$t_{gy} = \frac{\omega_1}{\varepsilon_0} \left(1 \pm \sqrt{\frac{M}{M_0}} \right) \quad (5.4)$$

Ez a szélérőgép dinamikus egyenlete, amely leírja a szélérőgép mozgás (forgó viszonyait bármely paraméter megváltozása esetére.

A széldiagramok szerint a hirtelen szélsősebesség-növekedéseket (széllökések szélsősebesség-csökkenések követik, általában hosszabb időintervallumban számítható gyakorisággal.

Az üzemelő szélérőgép esetében a széllökés nem alapvető forrása veszteségnek, mivel a rotor nyomatéka – így teljesítménye is – növekszik.

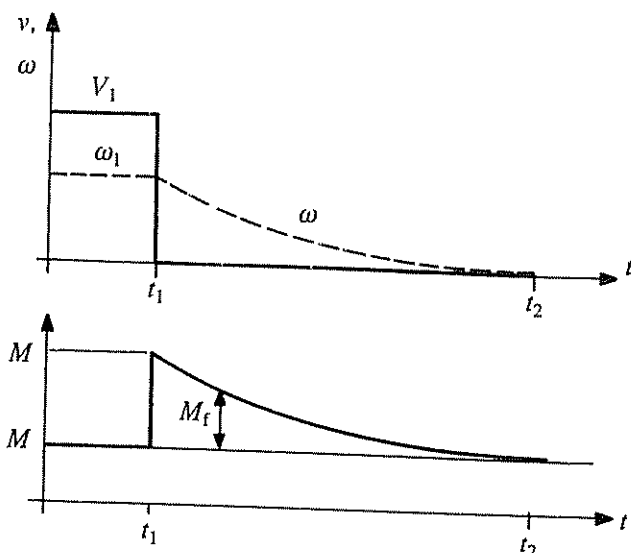
Szélérőgép depresszióban

Ha azonban a szélsősebesség hirtelen lecsökken, a rotor ventilátor-üzemmódba kerül: a saját és a kapcsolt tömegek mozgási energiája rovására fenntartani igyekezik korábbi légáramot (5.1. ábra).

A v_1 sebességű légáram fenntartásához szükséges teljesítményigény:

$$P = \pm \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_1^3$$

(A negatív előjellel a rotor teljesítmény-leadását vesszük figyelembe.)



5.1. ábra. Szélérőgép depresszióban

A légáram fenntartásához szükséges teljesítményt a ventilátorüzem kezdetének pillanatában a rotor ω_1 szögsebesség mellett M_f nyomatékkal biztosítja:

$\frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v_1^3 = M_f \cdot \omega_1$, ahonnan a rotort fékező ventilációs nyomaték:

$$M_f = \frac{1}{2\omega_1} \cdot A \cdot \rho \cdot v_1^3, \quad V \cdot m \quad (5.5.)$$

A teljes fékezőnyomaték a terhelő munkagép nyomatékát is magában foglalja, így a rotor kezdeti szöggyorsulása:

$$\varepsilon_1 = \pm \frac{M_f + M}{\Theta_r}$$

Az előzőekben tárgyaltakhoz hasonlóan egy kis dt idő múlva a rotor szögsebessége $d\omega = \varepsilon_1 \cdot dt$ -vel csökken. Emiatt azonban a rotoron átáramló levegő sebessége is csökken:

$$v' = \frac{R(\omega_1 \pm d\omega)}{\operatorname{tg} \alpha},$$

így a teljesítményegyenlet az alábbi:

$$\frac{\rho}{2} A \cdot v'^3 = (M_f + M \pm dM_f) \cdot (\omega_1 \pm d\omega) \quad (5.6.)$$

Ebből a rotorra ható ventilációs fékezőnyomaték időfüggvénye helyettesítéssel:

$$M'_f = \frac{A \cdot \rho \cdot R^3}{2 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha} \left(\omega_1^2 \pm 2\omega_1 \varepsilon_1 \cdot t + \varepsilon_1^2 t^2 \right) \pm M \quad (5.7.)$$

A rotor megáll, ha $M_f' = 0$. Az egyenletet megoldva a gyorsítási időhöz hasonló összefüggést kapunk a lassulás idejére is:

$$t_1 = t_2 \pm t_1 = \frac{\omega_1}{\varepsilon_1} \left(1 \pm \sqrt{\frac{M}{M_f}} \right), s \quad (5)$$

Általában a szélérőgép rugalmasabban reagál a szélesebbeség növekedésre, mint a csökkenésre. Az utóbbi veszteségforrás, mert a lassulási idő alatt a szélérőgép vitorlaként energiát veszít. Ha a szélesebbeség-változás dinamikus, a veszteség jelentős lehet és megmagyarázza a szélérőgépek teljesítménytényezőjének csökkenését. A veszteség a szélérőgép tehetetlen tömegének (Θ_r) csökkentésével mérséklődik.

A szélérőgépek rugalmassága (fordulatszám, ill. frekvencia változása) más szélességek, és más depresszió esetén:

$$f_1 = \frac{1}{t_1} < f_{gy} = \frac{1}{t_{gy}} \quad (6)$$

5.1.2. A széliránykövetés rugalmassága

Vízszintes tengelyelrendezésű szélérőgépek érzékenyek a szélirányváltozásra. Könnyű belátni, hogy ha a szél iránya nem merőleges a rotor síkjára, a hasznos keresztmetszet csökken, azaz a rotoron kevesebb levegő áramlik keresztül, így a teljesítmény csökken. Emellett az áramlási viszonyok is megváltoznak a szélirány körül ill. lapátok között, ami további teljesítményvesztés forrása. Éppen ezért a vízszintes tengelyű szélérőgépeken gondoskodni kell arról, hogy a rotor síkja képes legyen követni a szélirányváltozásokat. A szélérőgépeknek azt a képességét, hogy valamilyen mértékkel és pontossággal képesek követni a szélirányváltozásokat, a széliránykövetés rugalmasságának nevezzük.

A széliránykövetés technikailag számos módon biztosítható, azonban általában a követelmény, hogy automatikus (szélvezérelt) legyen. Megint a legegyszerűbb megoldást választva vizsgáljuk meg a széliránykövetésből adódó energetikai paramétereket ill. összefüggéseket.

Kiteljesítményű szélérőgépeken (a rotorkialakítástól függetlenül) az 5.2. ábrán szerinti, függőleges síkú farvitorlát alkalmazunk a széliránykövetésre. Az eljárás egyszerű: ha a szél iránya megváltozik, a lapátfelületen ébredő erő a leggyorsabban a legellenállású helyzetbe fordítja a vitorlát – ezzel a rotorkeresztmetszet merőleges lesz. Ehhez természetesen az szükséges, hogy a szélérőgép tartó felépítménye (rotor, hajtómű, farvitorla) egy függőleges tengely körül szabadon fordítható legyen.

A felépítmény elfordításakor a farvitorlán irányt változtató szél impulzusnyomatékának elsősorban a forgó tömegek precessziós nyomatékát kell legyőznie. (Álló szélérőgép esetén a precessziós nyomaték híján csak a súrlódási nyomaték hat, amelynek nagysága a felépítmény és a tartó közötti csapágyazástól függ. A szélérőgép széliránykövetése ezért mindig gyorsabb és pontosabb, mint a tartó elfordítása – de ennek energetikai haszna nincsen.) Az elfordításakor le kell győznie a széliránykövetés is. Az említett három nyomaték aránya döntően a mindenkori üzemhez

függ: amíg a sűrűdési és a tehetetlenségi nyomaték a viszonylag lassú elfordulás miatt gyakorlatilag állandónak vehető, addig a precessziós nyomaték a rotor (és kapcsolt tömegek) fordulatszámának (azaz a szélességnek és a terhelésnek) a függvénye.

A széliránykövetés rugalmasságának gyakorlati megfogalmazása az, hogy mekkora legyen a farvitorla felülete (vagy: a rotorkeresztmetszet/farvitorla felület arány) és forgástengelyre számított nyomatéka ahhoz, hogy a felépítmény a szélirányt meghatározott pontossággal, megbízhatóan kövesse.

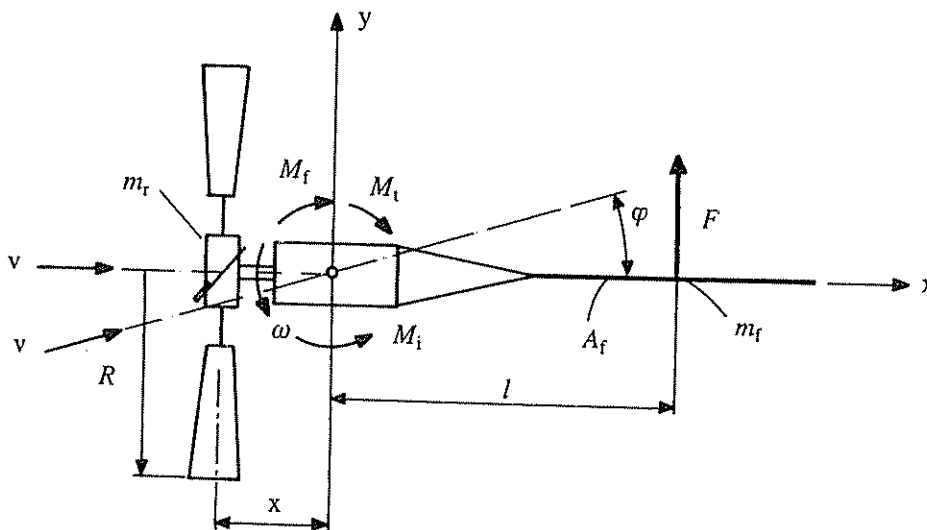
Induljunk ki az 5.2. ábra szerinti alaphelyzetből. Legyen Θ_r továbbra is a rotor és kapcsolt tömegek tehetetlenségi nyomatéka a rotortengelyre, a függőleges tengely sűrűdési nyomatékát pedig hanyagoljuk el. Így az elforduló felépítmény tehetlenségi nyomatéka a forgáspontra a 5.2. ábra jelölései szerint:

$$\Theta_m = m_r \cdot x^2 + m_f \cdot l^2, \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (5.10.)$$

ahol m_r a rotor, m_f a farvitorla tömege.

Kezdetben a szélirány merőleges a rotor síkjára, sebessége v . A terheetlen rotor szögsebessége:

$$\omega = \frac{v \cdot \text{tg} \alpha}{R}$$



5.2. ábra. Vázlat a széliránykövetés vizsgálatához

Tételezzük fel, hogy a szélirány hirtelen j szöggel megváltozik, miközben sebessége változatlanul v . Ha eltekintünk a szélirányváltozás miatt bekövetkező fordulatszám-csökkenéstől – ezt megtehetjük, ha j nem túl nagy-, úgy vehetjük, hogy a széliránykövetés állandó rotorszögsebesség mellett következik be.

A szélirány-változás miatt a farvitorlára $F = m \cdot v_y = A_f \cdot \rho \cdot v^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi$ impulzuserő hat, amelynek nyomatéka a forgástengelyre (0 pontra):

$$M_i = F \cdot l = A_f \cdot \rho \cdot v^2 \cdot l \cdot \sin \varphi \cos \varphi, \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.11.)$$

E nyomatéknak kell legyőznie a rotor (forgó tömegek) precessziós nyomaték (M_p). Az elfordulás feltétele tehát:

$$M_i \geq M_p + M_t, \text{ ahol}$$

$$M_p = \Theta_r \cdot \omega \cdot \omega_f \cdot N \cdot m, \quad (5.1)$$

$$M_t = \Theta_m \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} \cdot N \cdot m, \quad (5.1)$$

ahol ω_f az elfordulás közepes szögsebessége, $\frac{d^2 \varphi}{dt^2}$ az elfordulás szöggyorsulása.

Ha megvizsgáljuk M_p és M_t viszonyát, könnyen beláthatjuk, hogy üzer szélérőgépnél M_p nagyságrendekkel nagyobb, mint M_t . Ez abból adódik, hogy a ρ szögsebessége (ω) normális üzemviszonyok között jóval nagyobb, mint az elfordítás vánt szögsebességértéke (ω_f). Mivel pedig $\omega \gg \omega_c$, nyilvánvaló, hogy $\omega \cdot \omega_f \gg \frac{d\omega}{dt}$.

Így tehát nem követünk el nagy hibát, ha M_t -vel első közelítésben nem számolunk. Ezzel az egyszerűsítéssel tehát az elfordulás határesetete:

$$A_f \cdot \rho \cdot v^2 \cdot l \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi = \Theta_r \cdot \omega \cdot \omega_f$$

ahonnan a farvitorla felülete:

$$A_f = \frac{2 \cdot \Theta_r \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \omega_f}{\rho \cdot v \cdot l \cdot R \cdot \sin 2\varphi}, m^2. \quad (5)$$

Az egyenletben két tényező igényel megfontolást. Az elfordulás szögsebessége (ω_f) tapasztalati úton határozhatjuk meg. Tekintettel a szélirányváltozások gyakoriságára és mértékére, ω_f -et nem célszerű nagyra választani. A viszonylag lassú (ω_f nagyságrendileg 10^{-2} – 10^{-1} rad/s) elfordulási szögsebesség ugyan késlelteti a szélirányváltozások észlelését, de megkíméli a felépítményt a dinamikus mozgásoktól.

A $\sin 2\varphi$ tényezővel lényegében a szélirány-beállítás pontosságát határozzuk meg a megválasztásánál is kompromisszumot kell keresni: 10 – 15° -os eltérés az állás szélirányától még nem okoz jelentős teljesítményvesztést.

Az (5.14.) egyenlet szerint a farvitorla felület a nyomatékkar (l) növelésével csökkenthető. Azonban nagy távolságra „kinyújtott” vitorla merevítési, kiegyensúlyozási problémákat okoz, így l -nek is korlátai vannak.

Ha a szélérőgép normális üzemét tekintjük, azaz a rotor tengelye nyomatéktól mentes, az állandó forgásirány miatt sajátos asszimmetria alakul ki a széliránykövetés során.

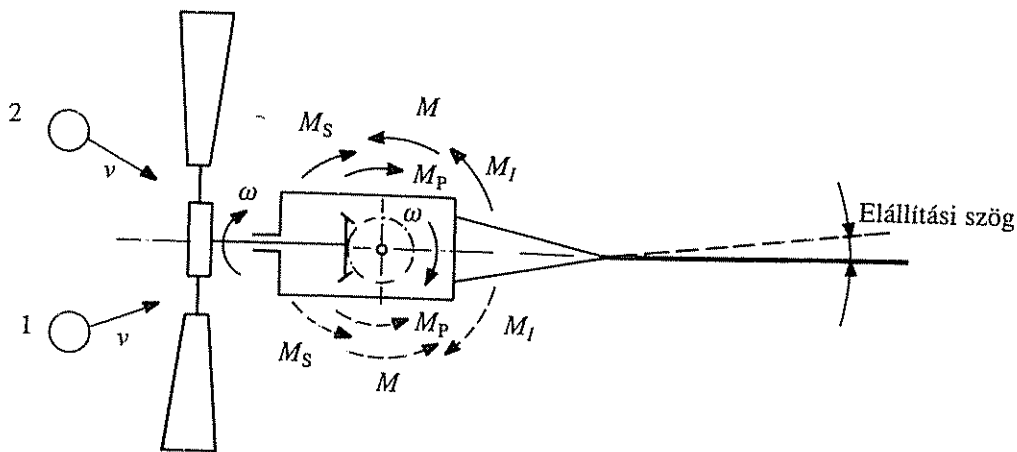
Az 5.3. ábra szemlélteti a nyomatékviszonyokat a szélirányváltozás két esetében. Az 5.3. ábra szemlélteti a nyomatékviszonyokat a szélirányváltozás két esetében. Az 5.3. ábra szemlélteti a nyomatékviszonyokat a szélirányváltozás két esetében.

$$M_p + M_s - M - M_i = 0.$$

Ha a szélirány szintén j szöggel az ellentétes irányba (2) változik:

$$M_p + M_s + M - M_i = 0,$$

ahol M a rotor tengelyét terhelő nyomaték.



5.3. ábra. A széliránykövetés nyomatékviszonyai terhelt rotornál

A terhelőnyomaték miatt tehát a szélérőgép széliránykövetése nem független az irányváltozástól: ha a szélirány a rotor forgási irányába változik, akkor az elfordítás nyomatékigénye kisebb, mint ellenkező irányú változás esetén. Hogy a széliránykövetés mégis szimmetrikus legyen, a farvitorla síkját kismértékben ($3-5^\circ$) célszerű elfordítani a tengelyvonalától.

A nagyteljesítményű szélérőgépeken a széliránykövetésnek ez az egyszerű módja használhatatlan. Az egyik járható út a rotortengelyre merőlegesen elhelyezett beforgató segédrotor(ok) alkalmazása. A másik az elektronikus vezérlésű széliránykövetés, amelyről a szélérőműveknél részletesebben lesz szó.

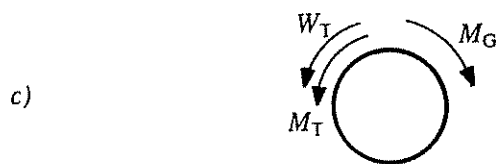
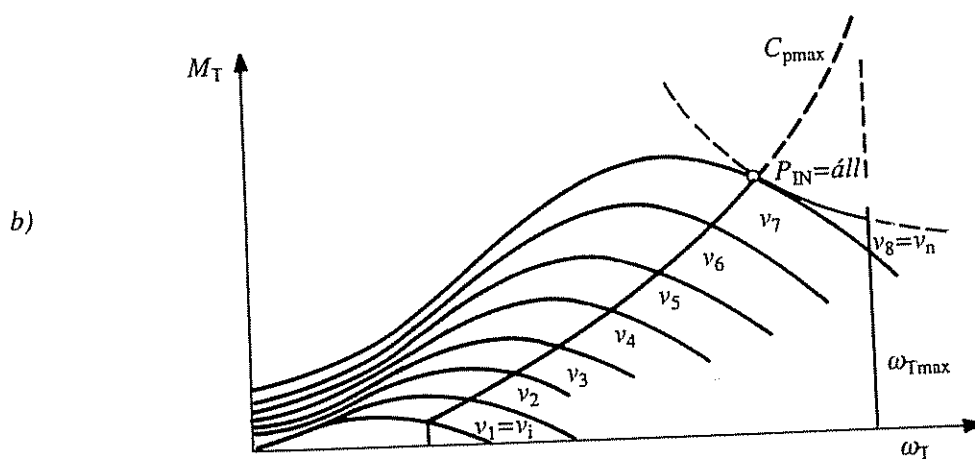
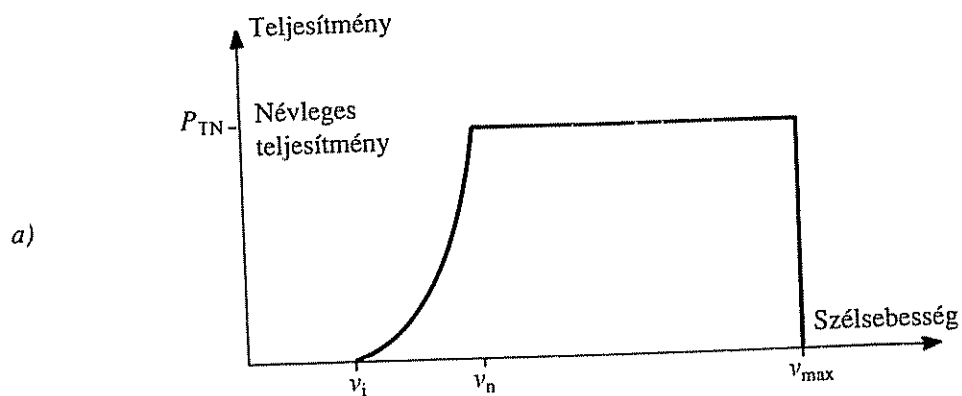
5.2. Alapvető szabályozási feladatok villamosenergia-termelés esetén

A szélérőművek egyedülállóak abból a szempontból, hogy a bemenő energia (vagy teljesítmény) hirtelen és nagymértékben megváltozhat előre nem látható módon. Ezt a változást elsősorban a megváltozott sebességű és irányú széllekek jellemzik.

A szélturbinával kapcsolatban legalább három alapvető szabályozásra lehet igény.

- Teljesítményszabályozás, amely az előzőleg elmondott okok ellenére egyensúlyban tartja a kimenő és bejövő teljesítményeket.
- Sebességkorlátozás, amely megakadályozza a forgó részek károsodását.
- Sebességszabályozás, amely az adott rendszerben a szélenergia maximális hasznosítását célozza meg.

Az 5.4. ábrán a sebességteljesítmény síkon, ill. a szögsebesség-nyomaték síkon ábrázoltuk a három üzemmódot, azzal a megszorítással, hogy a teljesítményszabályozás állandó névleges teljesítményre szabályozást jelent ezúttal (ami feltételezi a v_n -nél nagyobb szélesebességet, és a villamos hálózat megfelelő fogadókészségét). Az ábrán v_i -vel jelöltük az indulási vagy bekapcsolási sebességet, v_n a szél névleges sebessége, v_{max} pedig a maximális megengedett szélesebesség. Megjegyezzük, hogy a turbina M_T nyomatékának és ω_T szögsebességének pozitív irányát az 5.4. ábra szerint vesszük fel, a generátoros üzemben dolgozó villamos gép M_G nyomatékának po-



5.4. ábra. Üzem mód-szabályozások: a) a szélturbinák tipikus teljesítménysebesség diagramja a három alapvető szabályozási tartományban; b) a három alapvető szabályozási mód tartományainak elhelyezkedése a nyomaték-szögsebesség síkon; c) az 5.2. fejezetben alkalmazott pozitív irányok (M_T , w_T , M_G)

zítív irányát pedig ezzel ellentétesnek tekintjük (5.4.c. ábra). A szél erőművek P_T - ω_T és M_T - ω_T jelleggörbéinek tárgyalásakor leggyakrabban a vízszintes tengelyen ábrázolják a szögsebességet.

Sokszor a fenti három szabályozási cél a megvalósításokban nem különíthető el élesen, (hiszen a szélsebesség itt egyben teljesítményt is jelent). Kis szélturbinák esetén a következő lehetőségek közül választhatunk:

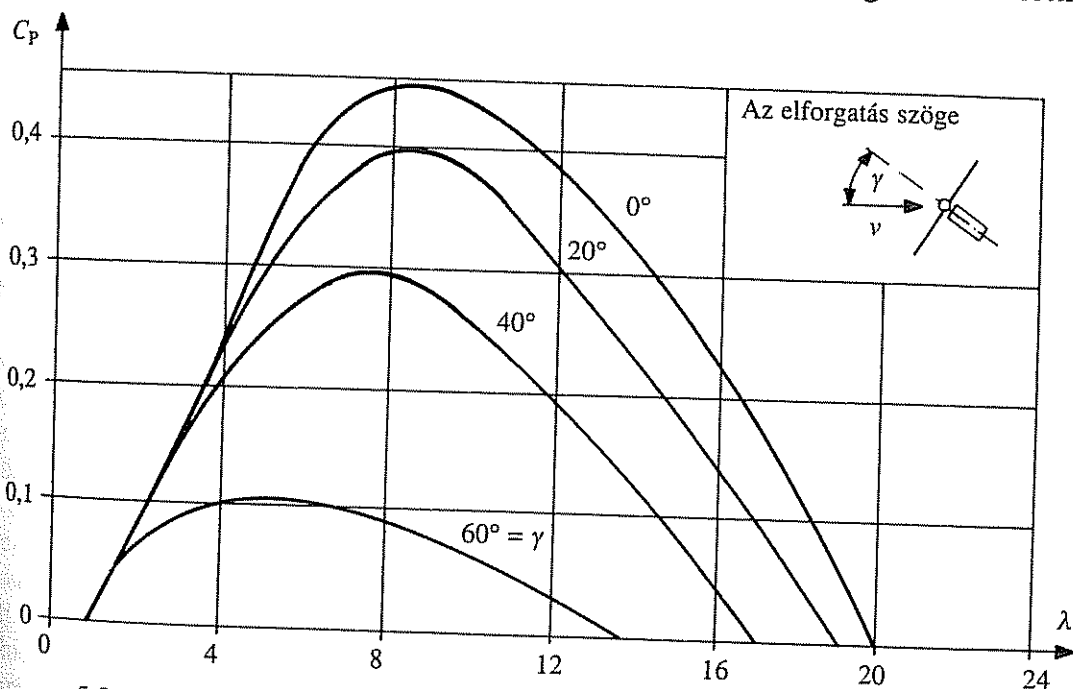
- a generátorház és szélkerék függőleges tengely körüli elforgatása,
- a generátorház és szélkerék vízszintes tengely körüli elbillentése,
- szabályozás nélküli kivétel,

- a lapátszög változtatása a lapát hossz tengelye körüli elforgatásával (esetleg csak a lapát egy, a csúcshoz közeli részének elforgatásával),
 - a szárny profiljának speciális kialakítása, amely egy adott relatív szélesség felett a szélkerék sebesség és teljesítmény veszteséssel jár (az angol és német szakirodalom ezt „stall-control”-nak nevezi).
- Nagy szélturbinák ($P_n > 600 \text{ W}$) esetén csak az utóbbi két megoldást alkalmazzák.

5.2.1. A szélturbina elforgatása vagy elbillentése

A szélenergia hasznosítható hányada csökkenthető, ha a szélkerék forgási tengelyét adott γ szöggel elforgatjuk a szél sebességének irányából. A módszer viszonylag lassú járású turbináknál használatos. Ekkor nem csak a hatásos keresztmetszetet ($A-t$) csökkentjük, hanem megváltoztatjuk a lapátok szélirányához viszonyított helyzetét is. A $C_p(\lambda)$ teljesítmény együttható drasztikus csökkenése az 5.5. ábrán követhető nyomon a γ szög növelésekor. A beavatkozás különösen soklapátos szélkeréknél hatékony. Az 5.5. ábra görbéi mind a turbina elforgatására, mind a döntésére érvényesek. (Döntéskor még általában szükséges lehet az elforgatás is, ha a változó szélirány ellenére a maximális hasznosítást el akarjuk érni).

A függőleges csapágyazású gondola egy, az alapzatához szerelt villamos szervomotor és fogaskerék segítségével forgatható el. Az említett (kis) fogaskerék kapcsolódik a toronyhoz erősített nagyméretű fogas ívhez (gyűrűhöz). Nagy teljesítményeken hidraulikus rendszert is használnak erre a célra. A generátor villamos kivezetései hosszú, laza, csavarodásra is alkalmas kábelekkel oldhatók meg. Ekkor azonban korlátozni kell a gondola egy irányban való elforgatását 1-3 teljes fordulatra. Nagyobb teljesítményeken előnyben részesítik a csúszógyűrűkön, és hozzájuk kapcsolódó keféken történő csatlakozást (vagy a generátor a torony és a gondola közötti tér-



5.5. ábra. A C_p - λ függvény változása a turbina szélirányból való elforgatása esetén

ben foglal helyet, úgy hogy a gondola és a generátor forgástengelye egybeesik, és kúpkerék-áttétel teszi lehetővé, hogy a generátor állórésze nem fordul el.)

Kis teljesítményű szélturbinákhoz a gondola végén elhelyezett segédlapátot alkalmaznak a szélirányba való forgatáshoz. Ez a megoldás természetesen a teljesítmény korlátozására vagy pl. állandó értéken való tartására nem alkalmas.

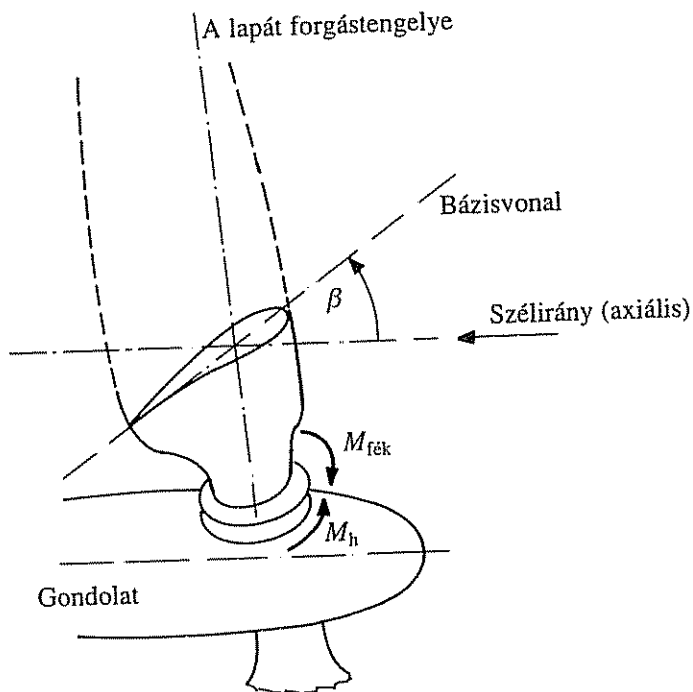
5.2.2. A lapátszög szabályozása

Ez a szabályozási mód jól illeszkedik a viszonylag kis súlyú lapátozáshoz, ahol a nyomatéklökésekből származó igénybevételek alig csökkenthetők változtatható rotor szögsebességgel a kis tehetetlenségi nyomaték miatt.

Korábban láthattuk, hogy a C_p teljesítménytényező, és ezért a turbinából kivehető teljesítmény is erősen befolyásolható a lapátok szélirányhoz viszonyított szöghelyzetének változtatásával. A lapát hossz tengelye körüli elforgatása gyorsan megvalósítható a viszonylag kis tehetetlenségi nyomaték miatt. A geometriai viszonyokat az 5.6. ábra szemlélteti. A lapát hossz tengelye körüli forgómozgására a következő alapegyenlet érvényes:

$$\frac{d\left(\theta \frac{d\beta}{dt}\right)}{dt} + \frac{d(k\beta)}{dt} = M_h \pm M_{f\acute{e}k} \quad (5.15.a)$$

Itt θ a lapát forgástengelyére vonatkoztatott eredő (egyenértékű) tehetetlenségi nyomaték, β a lapátszög $\alpha = 0$ feltételezésével (5.9. ábra), M_h a hajtónyomaték a kívánt irányban, $M_{f\acute{e}k}$ a lapátra ható fékező (torziós) nyomaték, k a csillapítási együttható. Ha az M_h hajtónyomatékot mozgó rúd fejti ki, akkor ez a nyomaték β -függő, azaz a rendszer nemlineáris.



5.6. ábra Pozitív irányok lapátszög-szabályozáskor

A fékező nyomaték négy összetevőből állhat, amelyeket a továbbiakban fogunk részletezni:

$$M_{f\acute{e}k} = M_{pr} + M_{hajl} + M_{ki} + M_E. \quad (5.15.b)$$

A lapát elemi vastagságú keresztmetszeteinek tömeg középpontjai nem esnek rá a lapát forgástengelyére, ami a forrása különböző erőhatásoknak ill. nyomatékoknak. Az M_{pr} ún. propeller-nyomatékot a turbina forgásából származó és a lapátra ható centrifugális erő egyik összetevője fejtí ki. Ha a szélkerék forgási síkjához képest kissé kúpos felületen helyezkednek el a lapátok, úgy a lapátok forgástengelyei nem egy függőleges síkban helyezkednek el. Az említett erőösszetevő ennek az irányeltérésnek a következménye.

A lapátok rugalmas alakváltozásai miatt további, a propeller nyomatékhoz hasonló járulékos nyomatékok is felléphetnek. A lapátok elhajlásából (a szélkerék forgási síkján belül) származik M_{hajl} (pl. gyorsulások alatt), a forgási síkból való kihajlásból származik M_{ki} . Természetesen az elemi vastagságú keresztmetszetekre ható elemi nyomatékok integrálásából adódnak az egy-egy lapátra ható fenti nyomatékok.

A lapátok elemi vastagságú keresztmetszeteire ható dF_E „emelő” erő támadáspontja sem esik rá a lapát forgástengelyére. A kettő között mérhető távolság és a dF_E erő szorzata adja az elemi dM_E nyomatékot, amelynek a teljes lapátra vett integrálja: M_E .

A lapátok csapágysúrlódása függ a rotor helyzetétől, sebességétől, a szél sebességétől és a lapát forgási sebességétől. Domináns része terhelésfüggő, amely így függvénye az érintkező felületek minőségének és rugalmas alakváltozásának. Kezdeti értéke kb. az állandósuló érték kétszeresére becsülhető. Az eredő csapágysúrlódás az egyes csapágyak súrlódási nyomatékainak összege. A csillapító nyomaték $\frac{d(k\beta)}{dt}$

másik része a légsúrlódásból adódik.

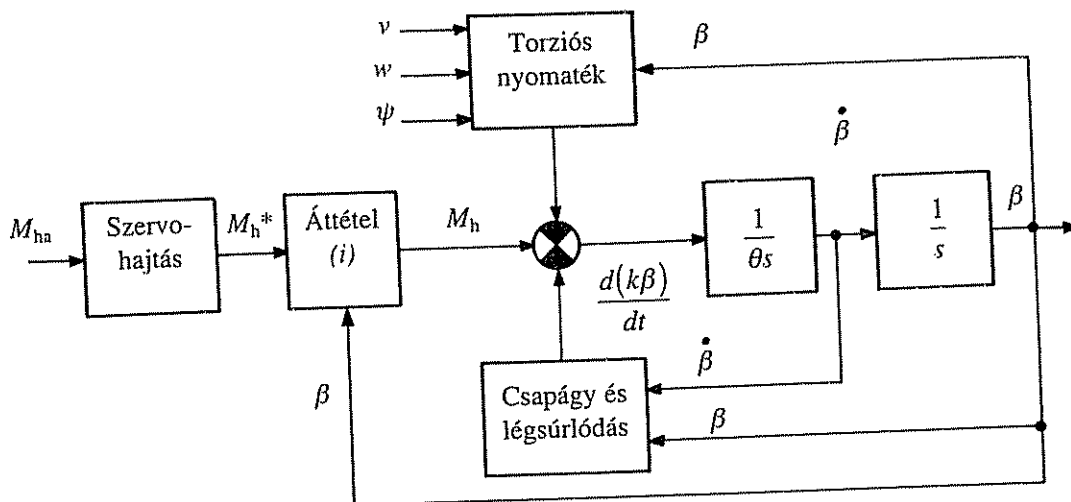
A θ eredő tehetetlenségi nyomatékban a légtömegek gyorsításából származó rész általában elhanyagolható.

AZ 5.7. ábrán egy egyszerűsített modell blokkvázlatát ábrázoltuk, amelyik akár villamos, akár hidraulikus meghajtású is lehet. Az M_{ha} nyomaték alapjelet egy fölérendelt szabályozókörtől kaphatja a lapátszög szabályozás. Az áttétel esetleges nem linearitását a β szögről való visszacsatolás veszi figyelembe működtetőkar esetén. A torziós nyomatékok (keskeny műanyag lapát) függenek a v szélesebbségtől, a w szögsebességtől és a lapát valamint a torony egymással bezárt Ψ szögétől.

A lapátszög állítására szolgáló berendezések elforgathatják az egész lapátot, vagy csupán annak a csúcs közelében levő részét.

A működtetés többféle lehet. A lapátok szabályozása lehet közös vagy egyedi. Az utóbbi elvileg aerodinamikai kiegyensúlyozatlansághoz vezethet, jelentős többletigénybevételekkel kísérve.

Hidraulikus és villamos hajtás esetén külső energiaforrásra is szükség van, ami megnöveli a költségeket. Ennek ellenére a hidraulikus hajtások széleskörűen elterjedtek a kis és közepes turbináknál. Villamos hajtásokat általában csak 200 kW feletti névleges teljesítményeken alkalmaznak. 10–100 kW teljesítmény tartományban a hidraulikus hajtásokat közvetlenül a generátor tengelyén keresztül működtetik, a pozíció alapjeltől való eltérés alapján nyitják vagy zárják a szelepeket. A visszatérítés rugóval történik, ami energia kimaradás esetén is biztonságos megoldás.



5.7. ábra. A lapátszögállítás egyszerűsített blokkvázlata

A villamos hajtások mindkét irányban szabályozott beállást tesznek lehetővé. Nagy teljesítményeken inverteres táplálású szinkron vagy aszinkron motoros hajtásokat alkalmaznak. A szabályozó berendezéseket általában a gépház végében helyezik el.

A pozíciószabályozást biztosító (szervo) hajtást általában a kvázi állandósult állapotra méretezik, de a szélsőséges dinamikus igénybevételek figyelembevételével. A méretezéshez szükséges adatok: normál sebességű forgatás esetén a legnagyobb fékezőnyomaték, és a maximális visszaforgatási sebesség a legnagyobb torziós nyomaték ellenében.

A hidraulikus hajtások külön energiafelhasználás nélkül is képesek (állandó nyomás mellett) kifejteni a tartónyomatékot egy adott pozícióban. Ezekben a rendszerekben a lapát tömege mellett az összes többi mozgatott tömeg elhanyagolható nagyságú. Villamos hajtások általában csak adott áram és fluxus segítségével képesek kifejteni a szükséges tartónyomatékot.

Ahhoz, hogy a szélturbina által hajtott berendezéseket meg tudjuk óvni a gyorsan változó szélhőkecsékek dinamikus igénybevételeitől, a lapátszöget állító szervóhajtásnak kellően gyorsnak kell lennie. A gyorsaság jellemzésére gyakran használják az állandó gyorsító- és tehetetlenségi nyomatékhoz tartozó indítási időt:

$$t_{ind} = \frac{W_{méret} \theta}{M_h \pm M_{fék} \pm M_{súrl}} \quad (5.16)$$

(Itt $w_{méret}$ a lapát méretezési szögsebessége.) Ha egy hidraulikus hajtás z számú lapátot mozgat, akkor (5.16.)-ba $z\theta$ eredő tehetetlenségi nyomatékot és $z(M_{fék} + M_{súrl})$ terhelőnyomatékot kell helyettesíteni.

Villamos hajtások esetében a lapát forgástengelyére átszámított eredő tehetetlenségi nyomaték:

$$\theta = \theta_m^* + \theta_{áttétel}^* + z\theta_{lapát} \quad (5.17)$$

Inverteres hajtásokkal könnyen megvalósítható, hogy (5.16.) nevezőjében szereplő gyorsító nyomaték állandó legyen.

A pozíciószabályozó normál működésének célja a túlterhelések távoltartása a hajtott berendezéstől (áttételtől, generátortól). A működés szögsebessége általában: $\beta_n^* \approx 0,1 \sim 0,2, \text{ rad / s}$.

Névleges üzemben a szükséges teljesítmény:

$$P_n = \frac{z(M_{f\acute{e}k} + M_{surl})}{\eta_{\acute{a}tt\acute{e}tel}} \beta_n^* \quad (5.18.)$$

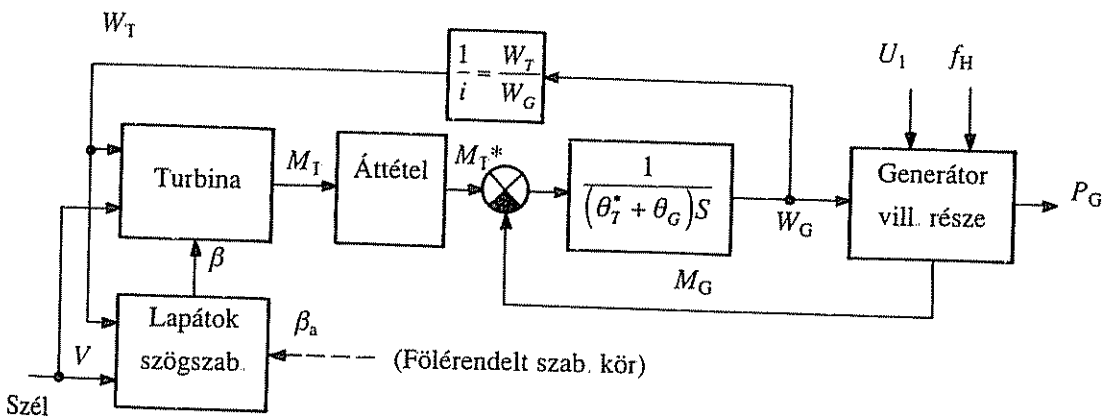
A 100 kW–1 MW nagyságrendben levő turbinákhoz kb. 1–10 kW névleges teljesítményű szervohajtás szükséges.

Szükségüzemben kb. kétszeres szögsebességre ($\beta_{sz}^* \approx 0,2 \sim 0,4, \text{ rad / s}$) van szükség, és ekkor már a dinamikus nyomaték részt is figyelembe kell venni:

$$P_{sz} = \frac{z(M_{f\acute{e}k} + M_{surl})}{\eta_{\acute{a}tt\acute{e}tel}} \beta_{sz}^* + \beta_{sz}^* \theta \beta_{sz}^* \quad (5.19.)$$

A 100 kW–1 MW névleges teljesítményű turbinákhoz így 5–50 kW teljesítményű szervohajtás adódik szükségüzemben.

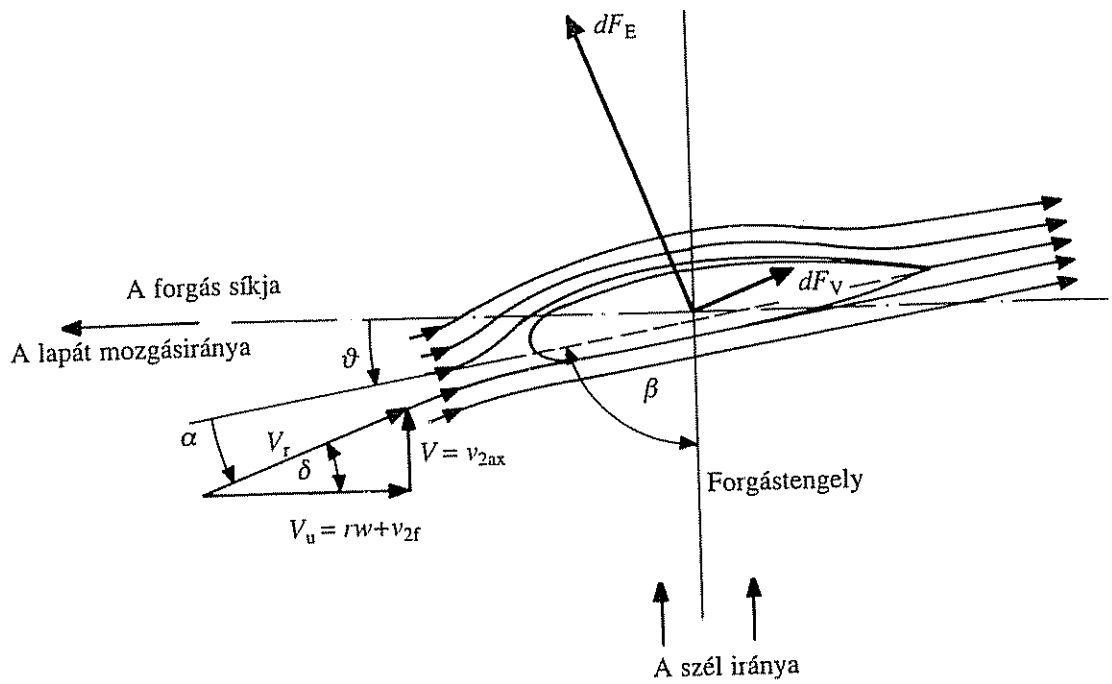
A szélturbina-generátor főhajtás blokkvázlatát az 5.8. ábrán láthatjuk lapátszög-változtatás esetére.



5.8. ábra. A szélturbina-generátor főhajtás blokkvázlata lapátszög-változtatás esetén

5.2.3. Nyomaték- és teljesítménykorlátozás (speciális szárnyprofil)

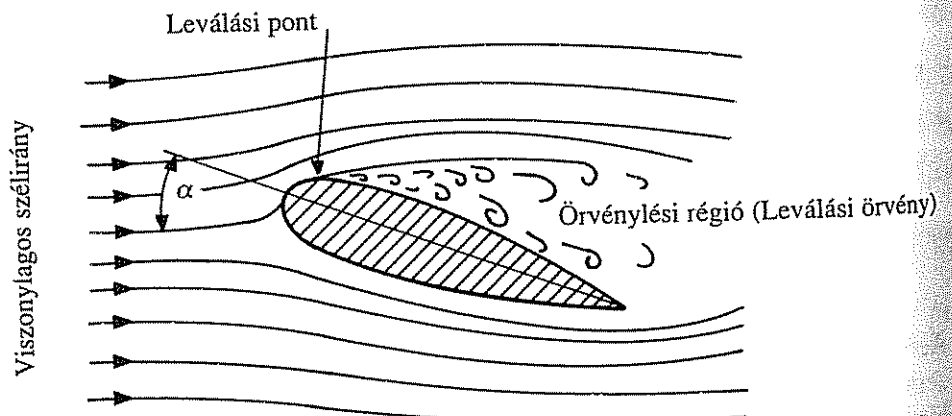
Aerodinamikailag tervezett szárnyprofilok esetén a levegő lamináris áramlásakor az „emelőerő” nagyobb részét a lapát hátoldalán jelentkező szívóhatás okozza. Az emelőerő és visszahúzó erő hányadosa (a siklószám) csak addig ilyen kedvező, amíg az α (támadási) szög kis értékű. A sebességekre felrajzolt háromszögből (5.9. ábra):



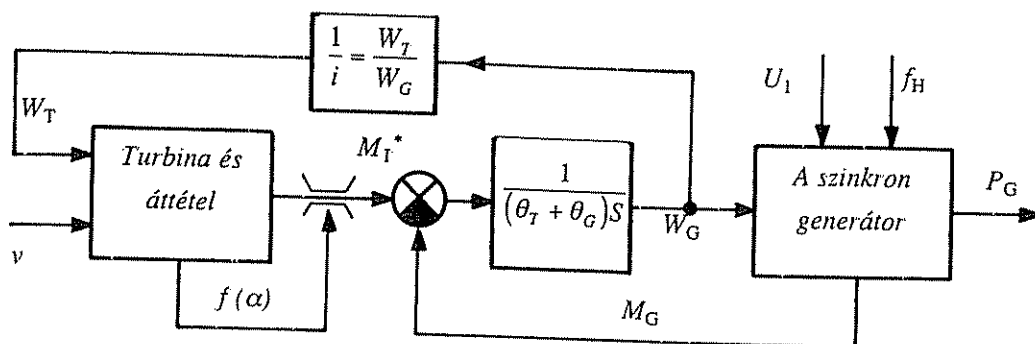
5.9. ábra. A szélturbina lapátjának keresztmetszete körüli légáramlat sebességei, erőhatásai

$$\operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg}(\vartheta + \alpha) = \frac{v_{2ax}}{r\omega + v_{2f}} \quad (5.20.)$$

Állandó ϑ (ill. állandó β) szög esetén a szél sebességének növekedésével nő a δ ill. az α szög, ha a forgórész szögsebessége közelítőleg változatlan marad. Az α (állás) szög egy adott értéke felett a légáramlat hirtelen leválik a lapát hátoldaláról (vagy annak egy részéről) és az 5.10. ábra szerint a hátoldalon örvénylés alakul ki. Ez az emelőerő drámai csökkenéséhez és a visszahúzó erő növekedéséhez vezet (stall control). Repülőgépek esetén – kis magasságokon – ez legtöbbször katasztrófát okoz, míg a madarak földet érésekor ez egy ösztönös szabályozás (α növelésével) a lelassuláshoz. Részterheléseken a szélturbinák lehető legjobb aerodinamikai hatásfokára törekszünk, ezzel szemben egy adott szélesebesség felett – a szárnyprofil tudatos ter-



5.10. ábra. Az α támadási szög adott értéke felett a légáram elválik a lapát hátoldalától (stall control)



5.11 ábra. Nyomatékkorlátozás az emelőerő csökkentésén keresztül

vezésével – a hatások szándékos elrontásával korlátozzuk a leadott nyomaték maximumát. Ehhez a szabályozási módhoz a hálózatra kapcsolt (kissé) túlméretezett szinkron generátor illeszkedik legjobban. Ez ugyanis a szlipen keresztül csak kis-nértékű fordulatszám-változást tesz lehetővé ($\omega r \approx \text{const.}$).

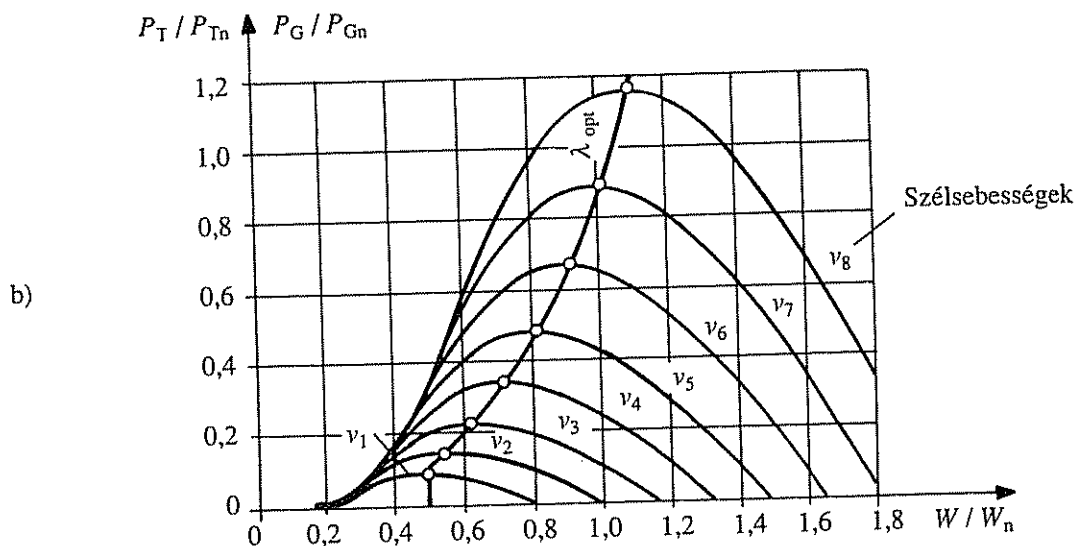
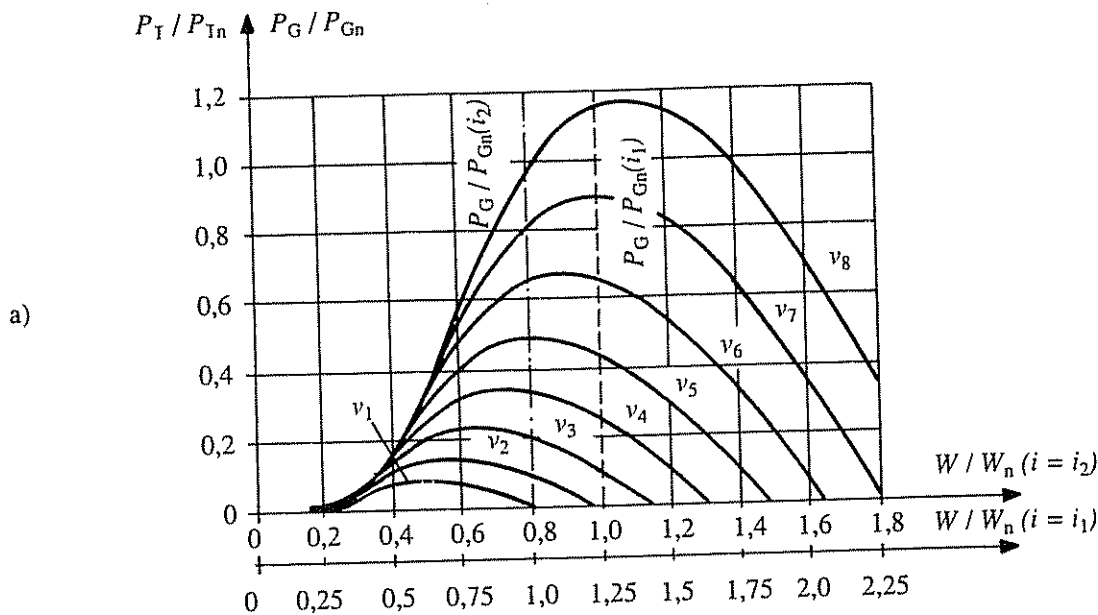
Kis és közepes nagyságú ($D \leq 50$ m) szélturbinák esetén a speciális szárnyprofilal tervezett (sebesség és nyomaték korlátozott) típusok dominálnak. Ezt az egyszerű megvalósíthatóságnak, olcsóságuknak és megbízhatóságuknak köszönhetik. Meg kell azonban jegyezni, hogy az ilyen szabályozás rezgésekkel járhat, különösen nagy teljesítményű turbináknál. A hálózatnak átadott erős teljesítmény-tranziensek miatt ma ezt a szabályozási módot állandó sebességű (szinkron) hajtásoknál nem alkalmazzák.

A speciális szárnyprofilal korlátozott nyomatékú szélturbina egyszerűsített blokk-ábrája az 5.11. ábrán látható.

5.2.4. Szabályozási lehetőségek a fordulatszám változtatásával

Hálózatra kapcsolt generátor esetén a hálózati frekvencia meghatározza a generátor és a turbina fordulatszámát. Adott szélesebbesség és lapátszög esetén nincs mód a teljesítmény igény szerinti, vagy biztonsági okok miatt szükséges szabályozására. Ha azonban megváltoztatható az áttételi viszonyszám, akkor – bár korlátozott módon – lehetőség nyílik a leadott teljesítmény megváltoztatására. A viszonyokat az 5.12.a. ábrán vázoltuk. Az $1/1,25$ arányban megváltoztatott áttételt a vízszintes tengelyen átféle léptékkal vehetjük figyelembe. A generátor viszonylagos névleges szögsebessége mindkét esetben $\omega_G/\omega_{Gn} = 1$. Változatlan szélesebbeséget feltételezve a teljesítmény megváltozása leolvasható a diagramból. Az $i = \omega_G/\omega_T$ értelmezésű áttétel nagyobb értékei (i_1) kisebb szélesebbeségeken a kisebb értékei (i_2) nagyobb szélesebbeségeken eredményezhetnek nagyobb leadott teljesítményt.

Az 5.12.b. ábrán feltételeztük, hogy a szinkron vagy aszinkron generátor frekvenciától függetlenül csatlakozik a hálózatra. Ezért a generátor szögsebessége az f_H hálózati frekvenciától függetlenül állítható be. Normál üzemben célszerű azt az optimális λ társjárési tényezőt választani, amelyhez tartozó $C_p(\lambda)$ érték maximális az éppen érvényes szélesebbesség mellett. Ekkor a rendszer maximálisan hasznosítja az adott pillanatban a szélben rejlő energiát. Ez a szabályozás védelmi célokat is elláthat, vagy az igényeknek megfelelő kisebb teljesítményt is továbbíthat. Ugyanis a generátor tengelyére a leadott teljesítmény erősen csökkenthető, ha a λ_{opt} -tól eltérő sebességarányokat állítunk be.

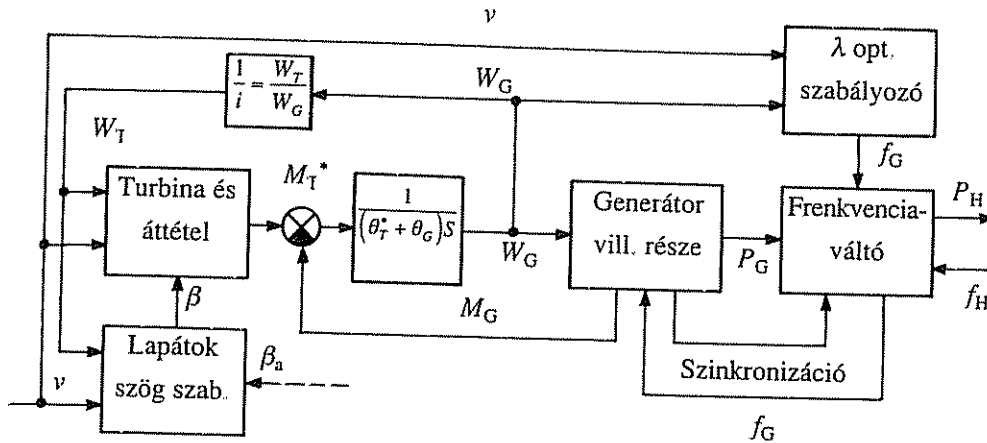


5.12. ábra. Szabályozási lehetőségek a turbina szögsebességének változtatásával:
 a) az áttétel változtatása; b) frekvenciaváltó segítségével

A frekvenciaváltó gyors szabályozhatósága lehetővé teszi, hogy a hálózatba jutó energia „minősége” is javuljon a szélsősebesség gyors változása ellenére. A gyorsuló vagy lassuló forgómozgást végző szélturbina és generátor tehetetlenségi nyomatéka lendítőkerék-ként (energiatárolóként vagy szűrőként) viselkedik, és a teljesítménylökéseket megsűrűve továbbítja a hálózat felé. Kisebb szélsősebességeken csökkenthető a generátor szögsebessége, ami részben a zaj, részben a mechanikai igénybevételek csökkentését eredményezi.

Az aszinkron generátor állórész tekercselésének pólusátkapcsolásával – diszkrét munkapontokban – az 5.12. a. ábrához hasonló viszonyokat nyerhetünk. Leggyakrabban az 1:2 arányú pólusszám változtatást lehetővé tevő Dahlander tekercselést alkalmazják, amellyel pl. a $w/w_n = 1$ és $w/w_n = 0,5$ viszonylagos szögsebességeket lehet megvalósítani.

Az 5.13. ábrán frekvenciaváltóval megvalósított fordulatszám szabályozás blokkvázlatát láthatjuk. A szabályozás a generátor f_G frekvenciáján keresztül valamennyi szélsősebesség esetén ($v_{\text{ind}} \leq v \leq v_{\text{max}}$) beállítja az 5.12.b. ábrán vázolt λ_{opt} jelleggörbéhez tartozó szögsebességeket. Az elmondott előnyökön túlmenően ez a szabályozás általában feleslegessé teszi a bonyolult és költséges lapátszög szabályozást. Mégis nagyteljesítményű szélgenerátorok esetében elképzelhető, hogy a nagy üzembiztonságra való törekvés okán mindkét szabályozási módot megvalósítják, és így meghibásodás esetén ezek egymás tartalékát képezik. A két szabályozókör egyidejű működése is indokolt lehet az energia legjobb hasznosítása érdekében, különösen kis szélsebességeken, és induláskor.



5.13. ábra Fordulatszám-szabályozás frekvenciaváltó segítségével

5.2.5. Követelmények és szabályozási lehetőségek szigetüzemben

Szigetüzemben pillanatról pillanatra illeszteni kell a megtermelt energiát a fogyasztók véletlenszerűen változó igényeihez. A hatásos teljesítmények tranziensekre is érvényes egyensúlya:

$$P_T = P_G + w_G (\theta_T^* + \theta_G) \frac{dw_G}{dt} \quad (5.21.a)$$

(5.21.a.)-ban a jobb oldal második tagja a forgó tömegek kinetikus energiájának megváltozása (deriváltja). Vagyis a rövid időre szükséges energiatárolást a kinetikus energia növekedése vagy csökkenése útján valósítja meg a rendszer.

Átmenetileg megváltozhat a generátor w_G szögsebessége ill. f_G frekvenciája, ha akár a fogyasztók, akár a turbina teljesítménye változik. Az igényes fogyasztók joggal várják el a szélerőműtől, hogy mind a frekvenciát, mind a feszültséget állandó (névleges) értéken tartsa. Ezért a szabályozásnak meg kell változtatnia a generátor teljesítményét, úgy hogy állandósult állapotban:

$$P_G = P_T \quad (5.21.b)$$

legyen.

A meddő teljesítményeknek szintén egyensúlyban kell lenniük:

$$Q_G = \Sigma Q_F = Q_H. \quad (5.22.)$$

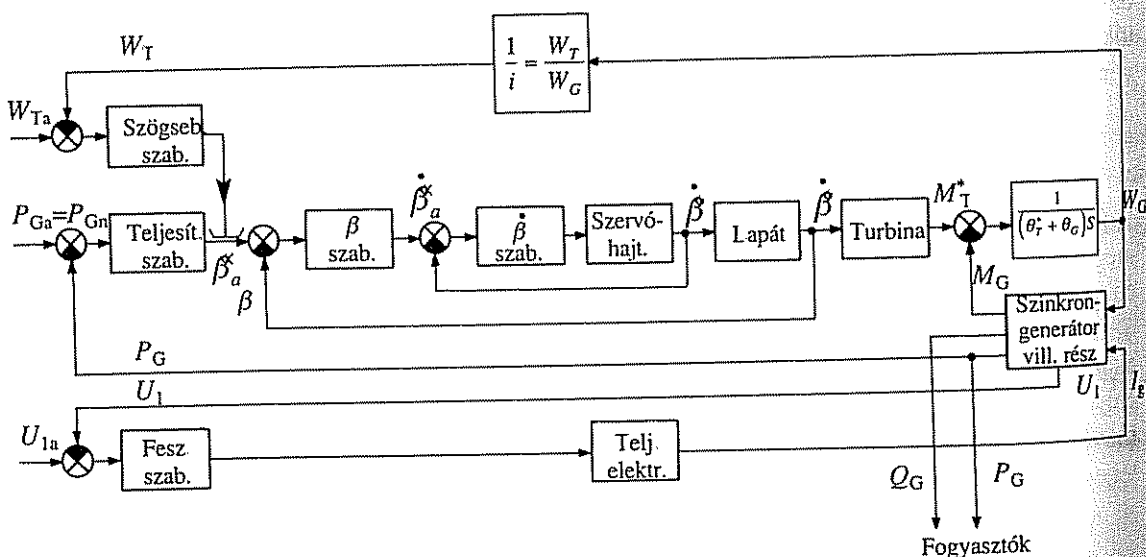
Fontos kérdés, hogy ez az egyensúly milyen feszültségértéknél jöhet létre. Ezt a második szabályozási feladatot általában egy második, feszültségszabályozó hurok valósítja meg.

A fenti célra különösen jól megfelel a feszültségszabályozott (rendszerint túlgerjesztett) szinkron generátor. Aszinkron generátor esetében – az elmondottak miatt – szabályozott meddő energiaforrásra is szükség van, hogy a feszültséget állandó értéken tudjuk tartani.

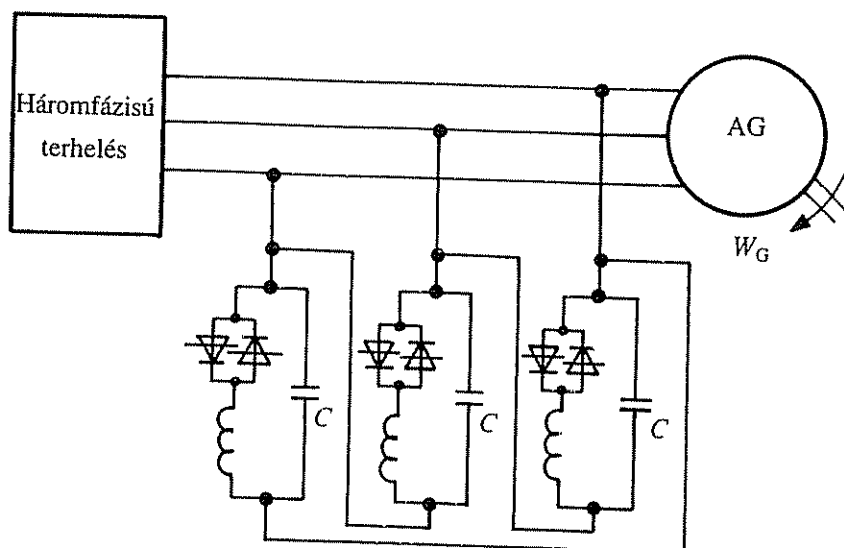
Először tételezzük fel, hogy a szélből a turbina által kinyerhető teljesítmény **meghaladja** az ellátott fogyasztók együttes pillanatnyi igényét. Ekkor a frekvenciát a turbina fordulatszám szabályozójával a feszültséget pedig a generátor gerjesztésével lehet a kívánt értékre beállítani. Szinkron generátor esetén a feszültség és a frekvencia egymástól kölcsönösen függő változók, amelyeket célszerű két – többé-kevésbé függetlenített – szabályozókörrrel beállítani.

Lapátszög-szabályozás esetén a gépcsoport szögsebessége közel állandó értéken tartható az 5.2.2. pontban leírt β szöget szabályozó szervóhajtással. A fő szabályozási hurok a generátor kimenő teljesítményére épül (5.14. ábra). A teljesítmény szabályozó kimenő jelét korlátozza a fordulatszám szabályozó, amelyik a feltételezett esetben ($P_{Ga} > P_G = P_F$) a $w = w_a$ értéken tartja a szögsebességet. (Ha a fogyasztók pillanatnyi teljesítményigénye meghaladná a szélből kinyerhető maximális teljesítményt ($P_{Ga} < P_G$), akkor a főhajtás lassulna és $w_T < w_{Ta}$ állna be). A lapátszög szabályozás alárendelt $\dot{\beta}$ sebesség szabályozással rendelkezik, amely így megfelelő stabilitást kölcsönöz az egész körnek. A $P_{Ga} > P_G$ tartományon belül tehát a fő szabályozási hurok tartja a névleges frekvenciát ($w_T = w_{Ta}$ segítségével), és ugyanakkor minden pillanatban a fogyasztók által az adott feszültségen igényelt hatásos teljesítményt biztosítja az $M_T^* = M_G$ nyomatékegyensúly segítségével.

Aszinkron generátorok esetében a feszültség szabályozó kondenzátor telepek ki- és bekapcsolásával tartja a fogyasztók feszültségét egy toleranciasávon belül. A gya-



5.14. ábra. Szigetüzemben működő szélörmű szabályozása lapátszögállítás segítségével



5.15. ábra. Folyamatos feszültség- (meddő teljesítmény) szabályozás állandó kapacitás esetén

korlatban 2~12 lépcsőben szokásos megvalósítani az átkapcsolást. Használni lehet az 5.15. ábrán vázolt folyamatos szabályozást is.

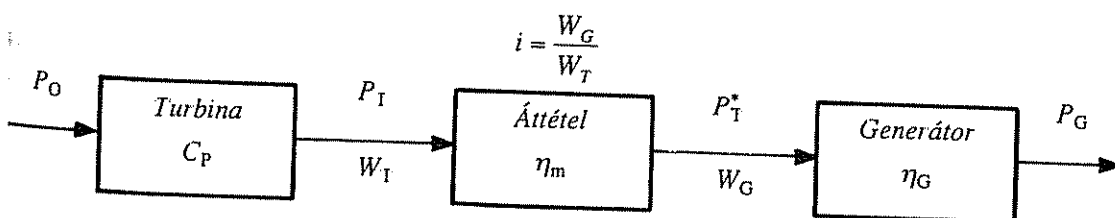
Ha a **fogyasztók pillanatnyi teljesítménye meghaladja** a szélből kivehető maximális teljesítményt, akkor a működés a következő intézkedések valamelyikével tartatható fenn:

- a fogyasztók egy részének kikapcsolása (a prioritás figyelembevételével),
- járulékos energiaforrás bekapcsolása (pl. hibrid üzemű dízelegység).

5.2.6. Az áttétel és a generátor hatásfoka

A közcélú hálózatra kapcsolt szélerőművek többsége jelentős viszonyszámú áttételt is tartalmaz a szélturbina és a generátor között (5.16. ábra). 50 Hz-es hálózati frekvencia esetén a $2p = 4$ pólusú generátornak $n = 1500/\text{min}$ fordulatszámmal kell forognia, míg a szélturbina fordulatszáma a névleges teljesítménytől (ill. a szélkerék átmérőjétől) függően kb. 15~40/min. Ez $i = 30\text{--}100$ közötti áttételi viszonyszámot tételez fel.

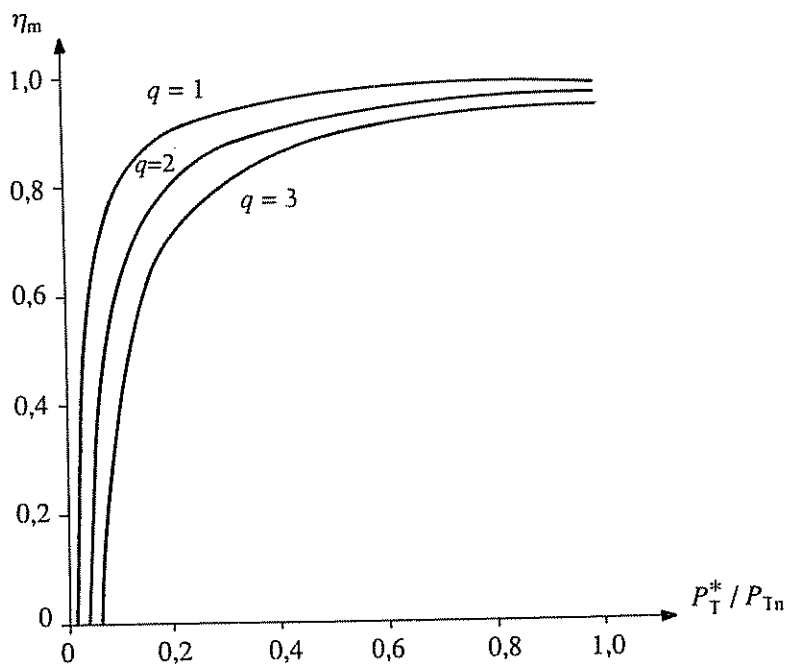
Fogaskerék áttétel esetén egy fokozatban kb. 1:6 viszonyszám valósítható meg. Ezért szélerőművekben általában 2~3 fokozatú áttétel szükséges. Az áttételek veszteségei elsődlegesen olajban forgó fogaskerek és csapágyak viszkózus súrlódásának tudhatók be, amelyek kevésbé függenek az átvitt nyomatéktól. Ésszerű feltételez-



5.16. ábra. A szélerőművek többsége jelentős viszonyszámú áttételt tartalmaz a szélturbina és a generátor között

ni, hogy az áttétel vesztesége az alacsonysebességű (turbina) tengely névleges mechanikai teljesítményének adott százaléka. Bár az aktuális érték függvénye az áttétel minőségének és állapotának, közelítőleg feltételezhető, hogy fokozatonként a névleges teljesítmény 2%-a megy veszendőbe. Ezért egy q fokozatú áttétel eredő hatásfoka tetszőleges P_T^* terhelés átvitelkor:

$$\eta_m = \frac{P_T^*}{P_T} = \frac{P_T \pm 0,02 \cdot q P_{Tn}}{P_T} \quad (5.23.)$$



5.17. ábra. Az áttétel tipikus hatásfoka egy, két és három fokozat esetén.

Az 5.17. ábrán látható, hogy a háromfokozatú áttétel hatásfoka részterhelésen már meglehetősen rossz. Méretezéskor célszerű arra törekedni, hogy az áttétel munkapontja minden esetben az ún. könyökpont felett legyen.

Hálózatra közvetlenül kapcsolódó generátorok esetén beszélhetünk állandó (V_0) és terheléstől függő (V_L) veszteségekről. Az első kategóriába tartozik a hiszterézis és örvényáramú vasvesztés, amelyek a hálózati feszültség és frekvencia függvényei, továbbá a súrlódási és ventilációs veszteségek, amelyek csak a fordulatszámától függenek. Közcélú hálózat esetén $U_H \approx \text{áll.}$, $f_H \approx \text{áll.}$, $n_1 \approx \text{áll.}$ lévén az elnevezés indokolt. Terhelésfüggő veszteség a tekercsvesztés, amelyik a hálózati áram négyzetével, ill. a terhelő nyomaték négyzetével arányos. A szinkron és az aszinkron generátorok hatásfokára jellemző, hogy a nagyobb gépek hatásfoka jobb, és hogy részterhelésen valamennyi gép hatásfoka fokozatosan csökken. Általában:

$$\eta_G = \frac{P_G}{P_G + V_0 + V_L(P_G)} \quad (5.24.)$$

Az egész rendszer eredő hatásfoka:

$$\eta_e = C_p \eta_m \eta_G \quad (5.25.)$$

és a generátor által leadott (hasznos) villamos teljesítmény:

$$P_G = P_0 C_p \eta_m \eta_G \quad (5.26.)$$

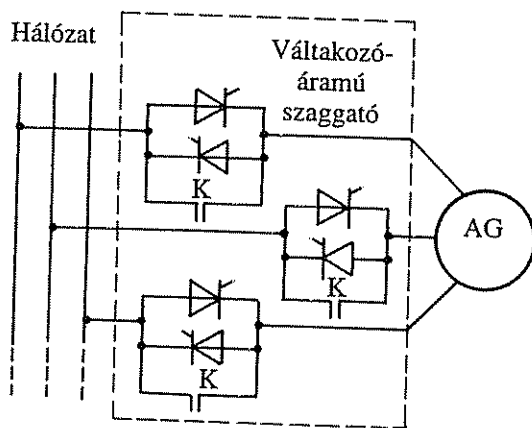
5.3. Szélgenerátorok szabályozása és védelme

5.3.1. Közvetlen hálózatra kapcsolódó generátorok védelmi és szabályozási lehetőségei

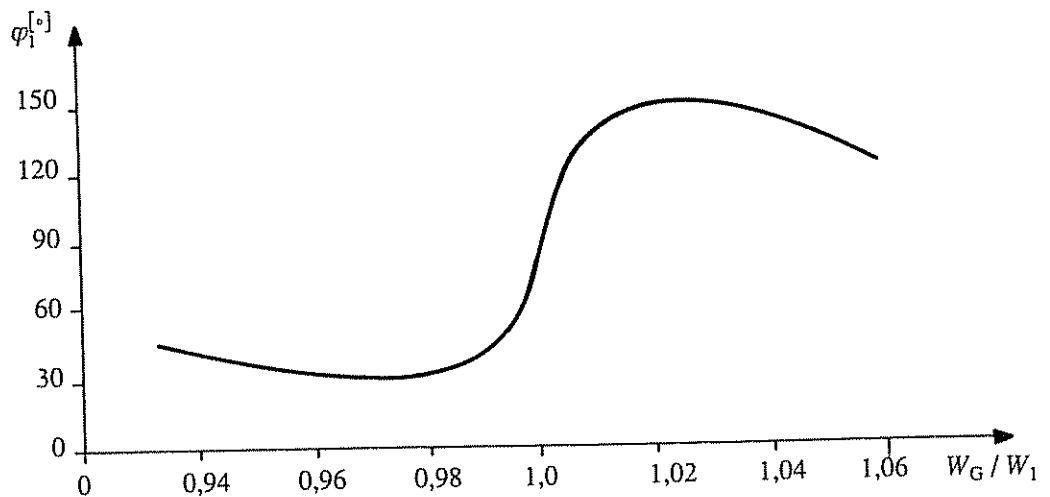
Sajnos az **aszinkron generátorok** hálózatra kapcsolása, vagy visszakapcsolása általában jelentős áram- és nyomatéklökésekkel jár. A túláram oka részben az elektromágneses tranziens (a fluxus jelentős változása), részben pedig a kapcsolási pillanatban fennálló szögsebesség eltérés (az állandósuló állapot szögsebességéhez képest). Az áramcsúcs a névleges áram 12-szeresét is elérheti, ha az aszinkron gép kis impedanciájú és a hálózat kellően merev. A gyakori indítás és a szinkron fordulatszám alatti üzemi felesleges energiaveszteséget jelent.

A VESTAS-cég egyik szabályozó-vezérlő berendezése – csökkentendő a felesleges bekapcsolások számát – előre pontosan meghatározza a kapcsolás időpontját az aktuális szögsebesség, a szöggyorsulás és a tehetetlen tömegek ismeretében. A modern szélturbinák azonban nagy M_T/θ_T viszonyzámmal rendelkeznek, és gyorsulásuk a generátor tengelyén elérheti az 1000 fordulat/s² értéket is. Ezért pl. a kontaktor 25 ms-os késése miatt a tényleges bekapcsolás a szinkron fordulatszám helyett kb. a névleges generátoros fordulatszámon történik meg, ami jelentős nyomaték tranzienseket okoz és így megrövidíti a mechanikai rész élettartamát.

A szabvány megengedi a hálózati frekvencia $\pm 0,5$ Hz-es eltérését a névleges értéktől, ez a szinkron fordulatszám 1%-os eltérését eredményezi. Ha ezt az eltérést nem vesszük figyelembe az idők kiszámítása során, akkor ugyancsak jelentős tranziens áramokkal és nyomatékokkal számolhatunk.



5.18. ábra. Tirisztoros váltakozó áramú szaggató, áthidaló mágneskapcsolóval



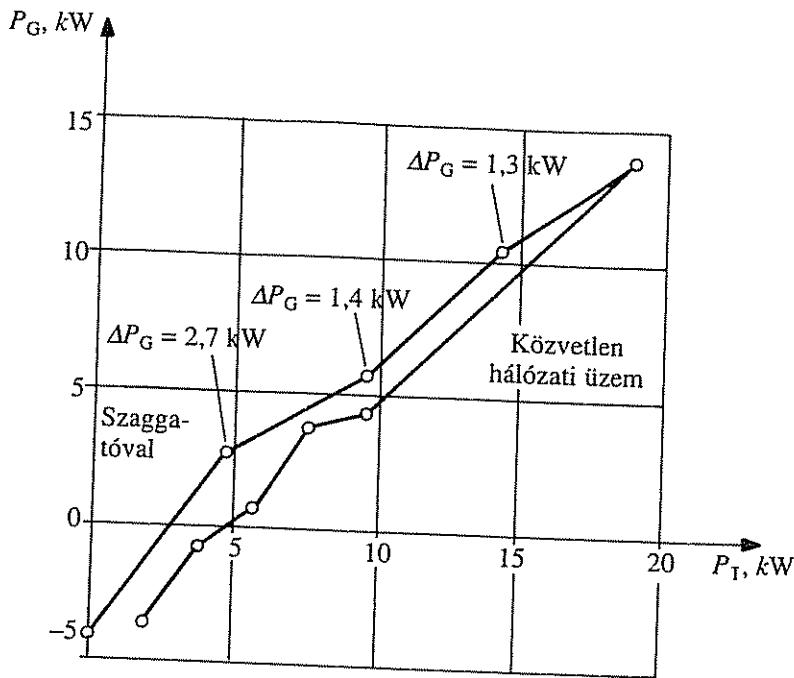
5.19. ábra. Az aszinkron gép alapharmonikus áramának fázisszöge gyorsan és jelentősen változik a szinkron szögsebesség (W_1) közelében

Szabályozott üzemben tirisztoros váltakozó áramú szaggató kapcsolással (5.18. ábra) jelentősen csökkenthetők az említett tranzien্স csúcsok. A klasszikus megoldás a tirisztorok gyújtáskésleltetési szögét előre meghatározott sebességgel csökkenti nagyról kis értékűre, ami által a generátor feszültségét zérusról 100%-ra növelik fel a szinkron fordulatszám közelében. A teljes feszültség elérése után 0,2~1 s-mal egy mágneskapcsolóval áthidalják az ellenpárhuzamos tirisztor párokat. A viszonylag hosszú folyamat miatt a gyújtásszög változtatást jóval a szinkron fordulatszám alatt el kell kezdeni, ha a gépcsoport gyorsulása nagy értékű.

Az aszinkron gép alapharmonikus áram fázisszögének változása nagyon jelentős a szinkron fordulatszám közelében (5.19. ábra). Motoros üzemben csak $\varphi_1 = 90^\circ$ -nál kisebb, generátoros üzemben csak $\varphi_1 = 90^\circ$ -nál nagyobb fázisszögek fordulnak elő ($90^\circ \leq \varphi_1 < 150^\circ$). Ha a gyújtáskésleltetési szöget egy célszerű állandó értékre (pl. $\alpha \approx 125\sim 130^\circ$ -ra) állítják be, akkor egy-egy tirisztor vezetési ideje motoros üzemben kis értékről indul (mert $\alpha \gg \varphi_1$), és a fordulatszám növekedésével generátoros üzemben 180° -hoz (a periódusidő feléhez) tart, mert a teljes feszültségű jelleggörbén általában a hajtónyomatékhoz tartozó munkapontban: $\alpha \leq \varphi_1$. Ez a gépre jutó feszültség fokozatos növekedését jelenti növekvő fordulatszámon. Az állandó α gyújtáskésleltetési szöggel működő váltakozó áramú szaggató kapcsolat feleslegessé teszi a fordulatszám és a hálózati frekvencia (pontos) mérését, mert a szükséges változások a fázisszög változásával automatikusan végbemennek. A leírt vezérlésnek további kedvező hatásai is vannak.

A váltakozó áramú szaggató $\alpha \approx 125\sim 130^\circ$ állandó vezérlése esetén motoros üzemben csak egészen kis százalékos vezetési idők lépnek fel, és kicsi a gépre jutó feszültség, vagyis a motoros nyomaték és a veszteségek jelentéktelenek. Szinkron fordulatszám alatt ez az üzem automatikusan áll elő.

A terheléssel növekvő feszültség lehetővé teszi az aszinkron gép minimális veszteségű (vagy maximális hatásfokú) üzemének megközelítését. Ez az „energiatakarékos” üzem azért is fontos, mert a szélgenerátorok minden esetben túlméretezettek, az üzemidő legnagyobb részében részterheléssel üzemelnek. Az elérhető teljesítménynövelésre az 5.20. ábra mutat be egy példát egy 300 kW-os, 460 V-os BBC gyártmányú aszinkron generátor két lehetséges vezérlésén keresztül. 5 kW tengely-telje-



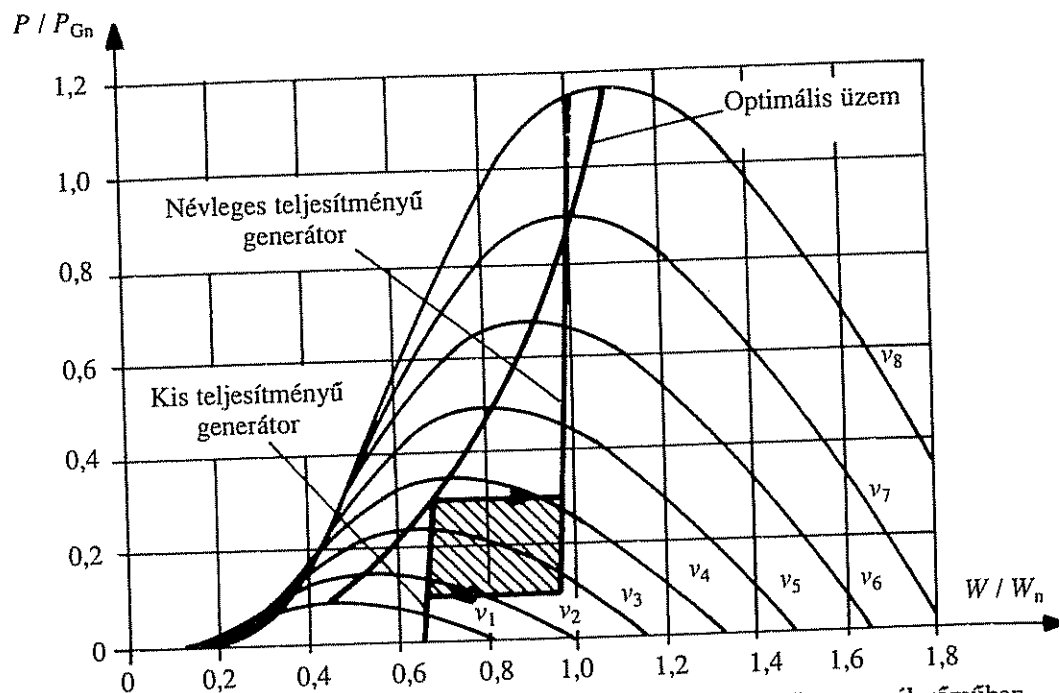
5.20. ábra. 300 kW-os BBC aszinkron generátor teljesítmény megtakarítása váltakozó áramú szaggató alkalmazásával

sítményig a közvetlen (kontaktoros) kapcsolás nem képes villamos teljesítményt leadni, amíg tirisztoros szabályozással a generátor ekkor már 2,7 kW villamos teljesítményt továbbít a hálózat felé. Az alacsony szélességeken elért javulás sokszor feleslegessé teszi a pólusátkapcsolásos megoldás alacsonyabb sebességű fokozatát. A névleges teljesítményre vonatkoztatva – éves átlagban – kb. 1%-os teljesítménynövekedés várható a tirisztoros szaggató alkalmazásától.

Már említettük, hogy pólusátkapcsolással (közvetlen hálózati csatlakozás esetén is) változtatható a turbina – aszinkron generátor gépcsoport fordulatszámja. Ha 1:2 arányú Dahlander átkapcsolást alkalmazunk, akkor az optimális C_p -k jobb megközelítése miatt, éves szinten 5–10%-kal több energiát nyerhetünk a közepes szélességtől függően. 5.21. ábrán bemutatott 2:3 arányú fordulatszám változtatás esetén – további néhány százalék többlet érhető el a megtermelt energiában. A javulás elsősorban az alacsony szélességek jobb kihasználásában jelentkezik. Megakadályozandó a túl gyakori oda-vissza kapcsolást a határ-szélességen, hiszterézis hurokkal bíró átkapcsolást valósítanak meg a szélességtől függően (kb. a névleges teljesítmény 20%-nál). A kisebb sebességű (nagyobb pólusszámú) fokozat lehetővé teszi a motoros felfutást (indítást) olyan szélturbináknál is, amelyek nem rendelkeznek apátszög állítással.

Szélerőművekben a közvetlenül hálózatra kapcsolódó **szinkron generátorok** száma viszonylag csekély, és főleg a MW-os nagyságrendű, szigetüzemben működő erőművekben fordul elő. Ennek a korlátozásnak az oka elsősorban a rendkívül jelentős üzemeltetési problémákban keresendő.

A generátorok gerjesztőtekercsének táplálása történhet csúszógyűrűkön és keféken keresztül, ami kisebb T_g időállandóval valósítható meg, és történhet ún. efenélküli gerjesztőgéppel nagyobb időbeli késleltetés árán.



5.21. ábra. Pólusátkapcsolásos aszinkron generátor lehetséges üzeme szélerőműben

Hálózatra közvetlenül kapcsolódó szinkron generátorok esetében a legsúlyosabb problémák a rendszer merevségében, lengési hajlamában és stabilitási kérdéseiben keresendők. Tipikus példaként az Egyesült Államokban gyártott és működő MOD-2 típusú szélerőmű néhány részletét mutatjuk be. Az erőmű fő adatai:

$$D = 91,5 \text{ m}, P_{Gn} = 2,5 \text{ MW}, U_{Gn} = 4,16 \text{ kV}, n_T = 17,55/\text{min}, n_1 = 1800/\text{min},$$

$$h = 61 \text{ m}, v_1 = 5,8 \text{ m/s}, v_n = 12,5 \text{ m/s}, v_{\max} = 20 \text{ m/s}.$$

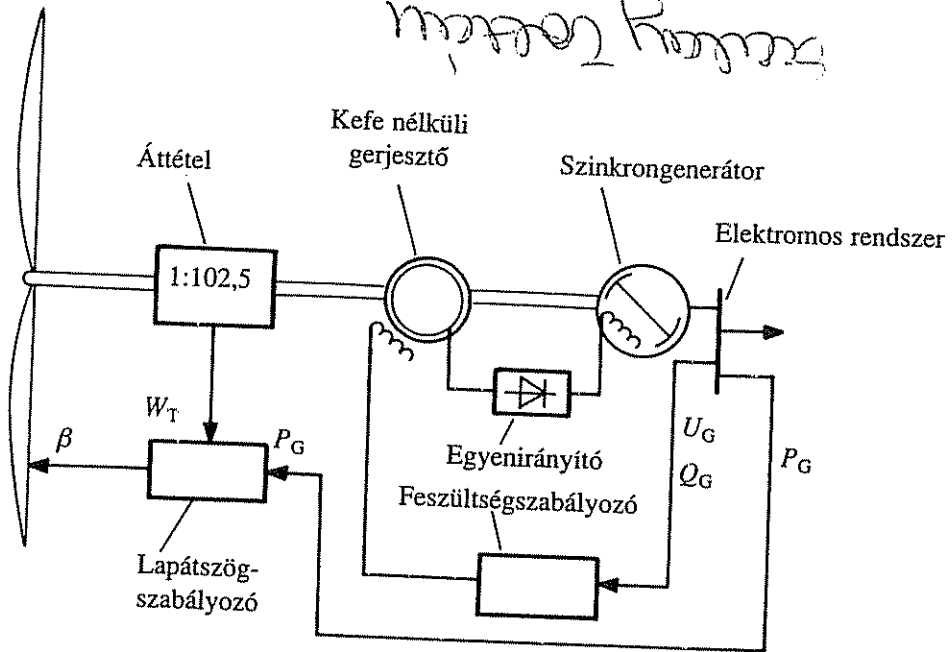
A nagy tehetetlenségi nyomatékkal rendelkező szélturbina kb. 1:100-as áttételen keresztül kapcsolódik a generátorhoz.

A merev rendszer kellemetlensége különösen hirtelen szélrohamok esetén mutatkozik meg, amikor is a nyomatéklökések gyengítetlenül továbbterjednek a mechanikai rendszeren a generátorig, és annak terhelési szöglengésén keresztül teljesítmény (és áram) lökések formájában átadódnak a hálózatnak. Ez részben a mechanikai rendszer gyorsabb kifáradását okozza, részben rontja a hasznos teljesítmény/vesztesség arányt mind a generátorban, mind a hálózaton. E hatások csökkentése érdekében az alacsonysebességű (turbina) tengelyt hosszúra és rugalmasra alakítják ki (ún. tollszár-tengelyre).

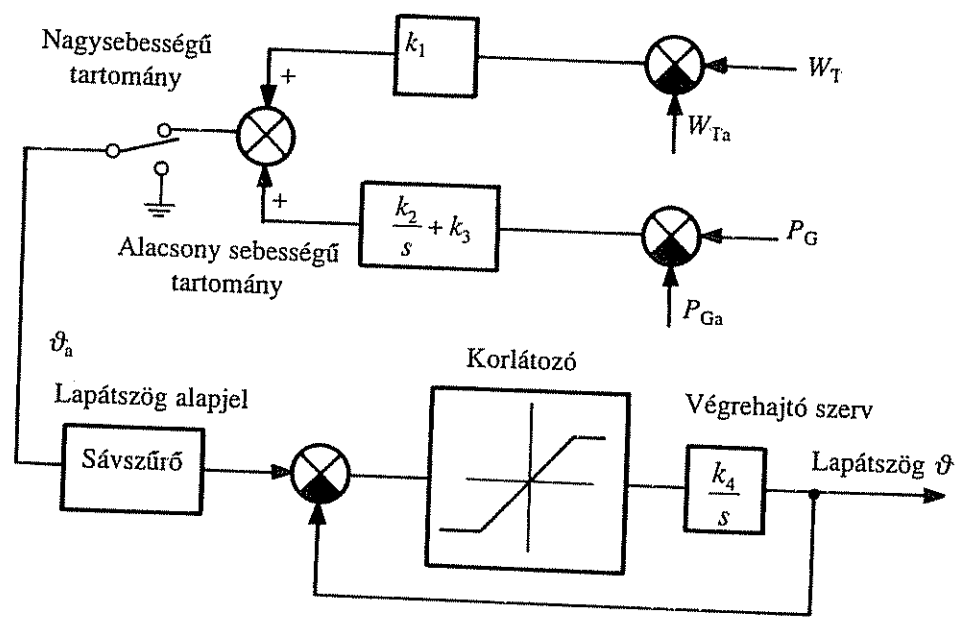
A villamos rész blokkvázlata az 5.22. ábrán látható. A generátor kimenetéről a gerjesztőtekercsre menő visszacsatolás működhet feszültség- vagy teljesítményteljesítő szabályozóként.

A $v_1 \leq v \leq v_n$ „kisebességű” tartományban a rendszer állandó $\vartheta \approx 0$ szöget tart, és a turbina leadott teljesítménye az aktuális szélesebességnek és $C_p(\lambda)$ -nak megfelelően változik. A $v_n \leq v \leq v_{\max}$ „nagysebességű” tartományban a lapátszög szabályozás alapvetően az állandó (névleges) teljesítményre való szabályozást valósítja meg. A lapátszög szabályozás részletei az 5.23. ábrán tanulmányozhatók. A nagysebességű tartományban a lapátszög szabályozó alapjele a teljesítmény hibajel arányos és integrált értékeinek és a szélkerék forgási sebesség hibajelének (arányos) összegéből áll. A ϑ

Képelemzés
 Lapát- és kerékgyártás
 Képelemzés



5.22. ábra. A villamos rész és szabályzás blokkvázlata



5.23. ábra. A lapátszög-szabályzás megvalósításának részletei

alapelben levő sávszűrő a kétszeres forgási sebességnek ($2\omega_T$) megfelelő lüktetéseket szűri ki, amelyeket a szélesebbesség magasság szerinti változása, a torony árnyékoló hatása és a gondola elforgatása gerjeszthet. A $\vartheta_a - \vartheta$ hibajel a lapátszög állítás sebesség alapjelét határozza meg. A sebesség alapjel korlátozása a hidraulikus állító-rendszer véges maximális sebességét veszi tekintetbe (ez az adott esetben 10 fok/s).

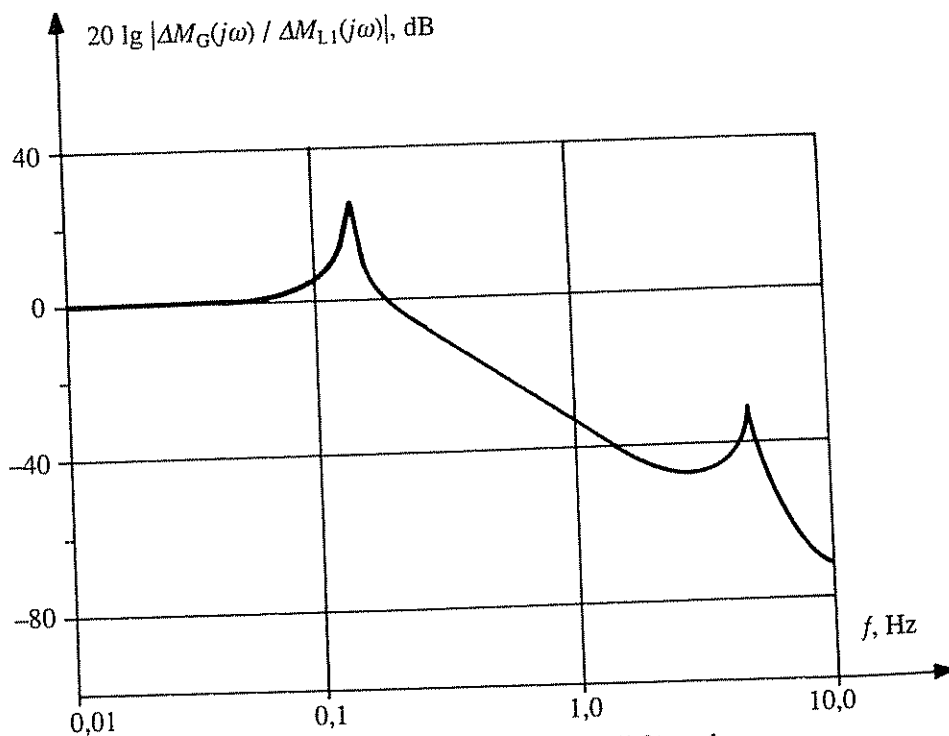
A modellkísérletekben, a **kissebességi tartományban** a teljesítményingadozások a névleges teljesítmény nagyságrendjébe (1-2 MW) estek, és frekvenciájuk 0,14 Hz volt. Ezek a lengések megjelentek a lapát-kerékagy, kerékagy-generátor

között átvitt nyomatékban, és a generátor β terhelési szögében is. Az 5.24. ábrán a lapát-generátor közötti nyomaték átviteli függvény Bode-diagramját ábrázoltuk. Két rezonancia-frekvencia mutatkozik, amelyek közül a kisebb frekvenciájú (0,14 Hz) kb. 25 dB-es erősítésű, és az alacsony sebességű tengely önrezgésszámának felel meg. A rendszer egyéb részeinek csillapítása miatt a második rezonancia frekvencián (kb. 5 Hz) már nem keletkeznek nagy amplitúdójú lengések. (Ez az önrezgésszám a generátornak a kerékagyhoz és a hálózathoz viszonyított önrezgésének felel meg.)

A teljesítményszabályozónak köszönhetően a kisfrekvenciás lengés csak kis amplitúddal van jelen a **nagysebességű szakaszon** mért mennyiségekben.

A lengések jelentősen csökkenthetők a kissebességű tartományban is, ha itt is szögsebességfüggő lapátszög-szabályozást alkalmaznak. Komoly javulás a tollszár-tengely belső csillapításának növelésével érhető el.

Névleges terhelés esetén a MOD-2-ben alkalmazott tollszár tengely két vége közötti elcsavarodási szög kb. $3,6^\circ$. A terhelés elvesztése (hálózat kimaradása, megszakító leoldása) elindítja a tengely „visszacavarodását”. A kb. 100:1 áttétel miatt a teljes visszacsavarodás a nagysebességű tengelyen 360° -nak felel meg. Mivel a generátor négypólusú ($2p = 4$), villamos fokokban ez 720° . A teljes leállítás, újraszinkronozás és visszakapcsolás minimum 10–20 percet vesz igénybe, ami megengedhetetlenül hosszú. A modellkísérletek alapján javasolható a generátor visszakapcsolása a tranziens első néhány másodperce alatt akkor, amikor a generátor szögsebessége elég közel van a szinkron szögsebességhez. A hosszú rugalmas tengely megvédi a rendszert a nagy nyomatéklökéstől. Másik lehetőség a lapátszög állításával csökkenteni a szögsebességet a szinkron szögsebesség közelébe, és újraszinkronozni a rendszert a teljes újraindítás helyett.



5.24. ábra. A rendszer nyomatékátviteli függvénye

5.3.2. Szabályozás impulzusvezérelt rotoellenállással

Az aszinkron gépek növelt forgórész ellenállásának előnyös és hátrányos következményeit az 4.7.1. fejezetben már érintettük. A generátor lüktető nyomatéka a rotor ellenállás növelésével csökkenthető. A csökkenés mértéke analitikusan is kifejezhető pl. állandósult állapot körüli nyomaték lengésekre. A forgómozgás alapegyenletéből:

$$\Delta w_g = \int_{w_{G \min}}^{w_{G \max}} dw_G = w_{G \max} \pm w_{G \min} = \int_{t_A}^{t_B} \frac{M_T^*(t) \pm M_G(t)}{\theta_T^* + \theta_G} dt \quad (5.27.)$$

Láthatóan Δw_G annál kisebb minél nagyobb a gépcsoport tehetetlenségi nyomatéka. A szögsebesség ill. a szlip megváltozása miatt változik a generátor nyomatéka is. Ha nincs olyan szabályozás, amelyik hat a gép nyomatékára és a változások lassúak a villamos időállandókhoz képest, akkor ez a változás közelítően számítható az üzemi szakaszon a Kloss-képlet lineáris közelítésével:

$$\frac{\partial M_G}{\partial s} \approx \frac{2M_{bG}}{s_{bG}}, \quad (5.28.)$$

illetve véges változásokra:

$$\Delta M_G \approx \frac{2M_{bG}}{s_{bG}} \Delta s = \pm \frac{2M_{bG}}{s_{bG}} \frac{\Delta w_G}{W_1} = \frac{2M_{bG} L'_r}{R_r} \Delta w_G. \quad (5.29.)$$

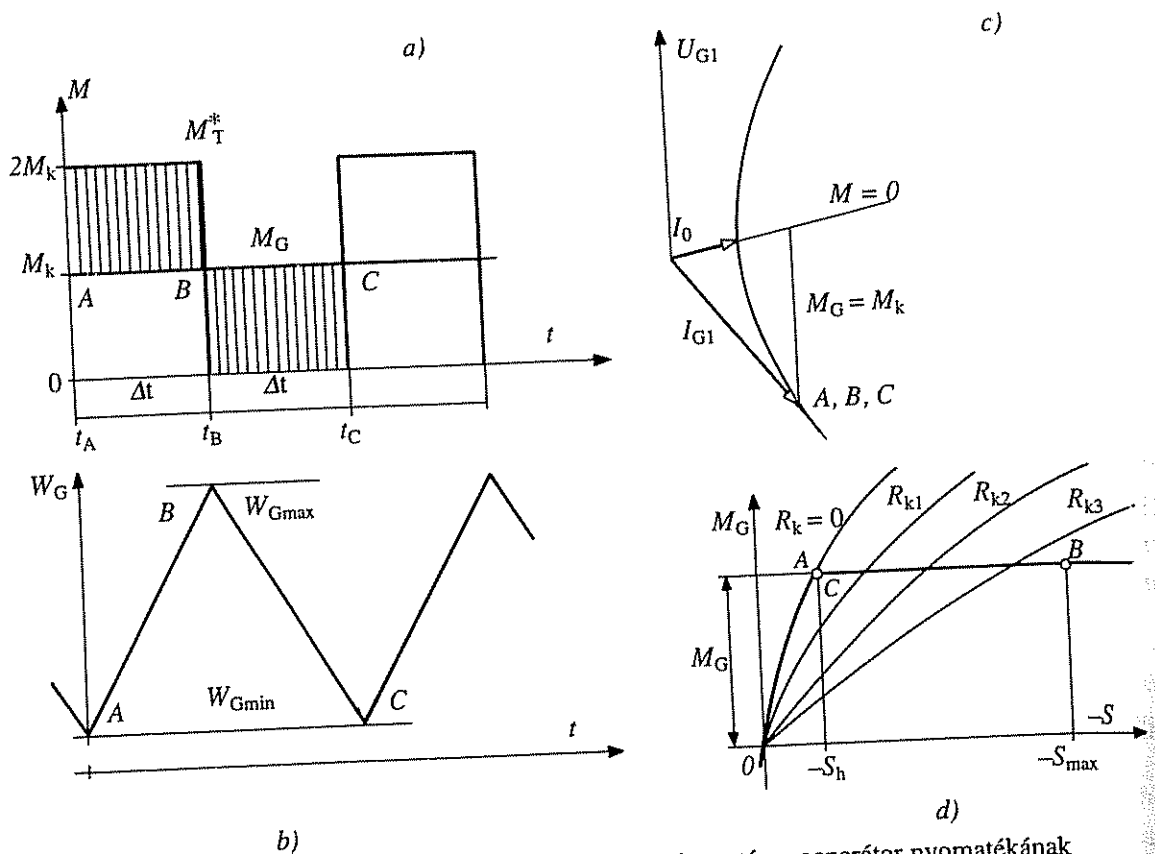
(5.29)-ben az utolsó átalakítás az $s_{bG} = \frac{R_r}{W_1 L'_r}$ helyettesítés volt. Látható, hogy ΔM_G

fordított arányban változik R_r -rel és a kimenő teljesítmény is kevésbé fog lüktetni adott Δw_E esetén. Sajnos a forgórész körüli $P_r = sP_1$ teljesítmény ekkor nem nyerhető vissza, és így R_r növelése jelentős többletvesztést okoz.

Az elmondottak miatt olyan szabályozásra van szükség, amely megengedi a szlip és a fordulatszám rugalmas változását nyomatéklökések alkalmával, ugyanakkor állandósult állapotban – különösen kis terhelésen – viszonylag alacsony értéken tartja a veszteségi teljesítményt. A fenti igényeket kielégítő szabályozás elvi működése csúszógyűrűs gépre és pl. periodikusan változó terhelésre az 5.25. ábrán látható. A forgórész ellenállást időkézés nélkül úgy kell szabályozni, hogy állandósult állapotban az aszinkron generátor munkapontja a kördiagrammon helyben maradjon ($M_G = M_K$). Ilyen szabályozás felépíthető az állórészáram, a forgórészáram vagy a nyomaték állandóságára.

Az 5.25. ábrán levő szabályozási elv ideális megvalósítása esetén nem hat a (5.29) szerinti „visszacsatolás” mert a generátor nyomatéka nem változik a szögsebesség ingadozás hatására. Ekkor (5.27.)-ben $M_G = M_K =$ állandó helyettesítendő, és az integrandusz számlálója a t_A és t_B határok közötti „D” jelű vonalkázott területet jelenti. (5.27) alapján a Dw_G szögsebesség ingadozás kifejezhető a szlippel:

$$\Delta w_G = W_1 S_h \left(1 \pm \frac{S_{\max}}{S_h} \right). \quad (5.30.)$$



5.25. ábra. Ideális forgórész ellenállás szabályozás esetén a generátor nyomatékának és szögsebességének időfüggvénye (a. és b. ábrák), a generátor áramvektorának munkapontja a kördiagramon (c. ábra) és nyomaték-szlip függvénye (d. ábra)

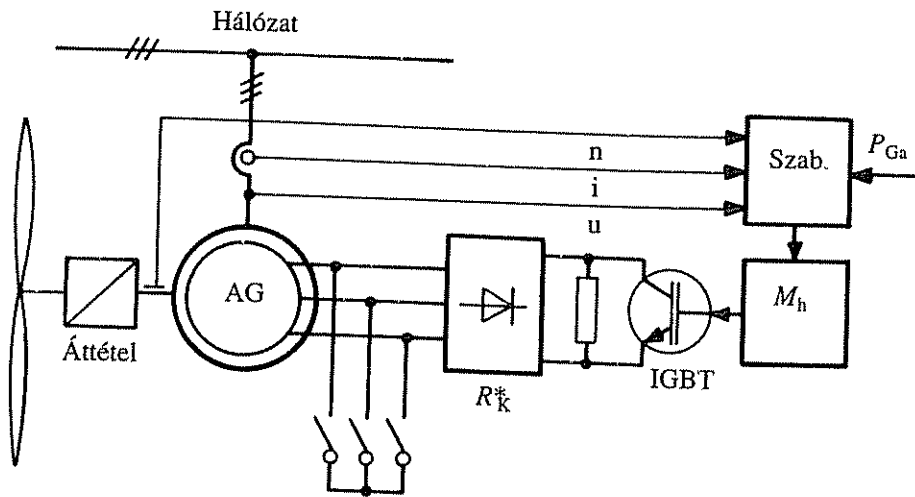
Az aszinkron gépek elméletéből ismeretes, hogy azonos nyomaték esetén a szlipek és a forgórészkeri ellenállások arányosak egymással:

$$\frac{S_{\max}}{S_h} = \frac{R_r + R_{k\max}}{R_r} \quad (5.31)$$

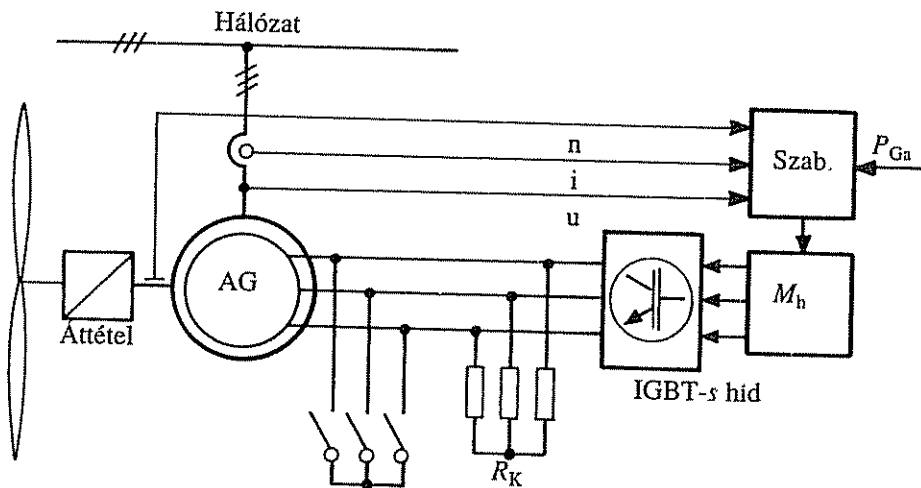
A minimálisan szükséges külső ellenállás adott Δw_G és „D” terület esetén:

$$R_{k\max} = \frac{\pm \Delta w_G}{W_1 S_h} R_r = \frac{\pm R_r D}{W_1 S_h (\theta_r^* + \theta_G)} \quad (5.32)$$

Ma természetesen félvezetős megoldásokat használnak erre a célra. Az 5.26. ábrán levő kapcsolásban a forgórész feszültséget egy háromfázisú diódás hídval egyenirányítják, és az egyenáramú kimenetén levő R_k^* ellenállás százalékos bekapcsolási idejét $(t_b / (t_b + t_k) - t)$ változtatják pl. egy tranzisztor (IGBT) vezérlésével az M_h jelű meghajtó körön keresztül. Ennek a kapcsolásnak a hátránya, hogy a rotorkörben összetevők is, amelyek adott munkapontokban jelentős kisfrekvenciás rezgéseket okozhatnak. A kapcsolat további hátránya, hogy a diódás híd kommutációs meddő igényét is az aszinkron generátoron keresztül kell fedezni, ami rontja a hálózati teljesítménytényezőt ($\cos \varphi_h - t$).



5.26. ábra A csúszógóyűrűs aszinkron generátor forgórész-ellenállásának impulzusvezérlése egy oltható elemmel (IGBT-vel)

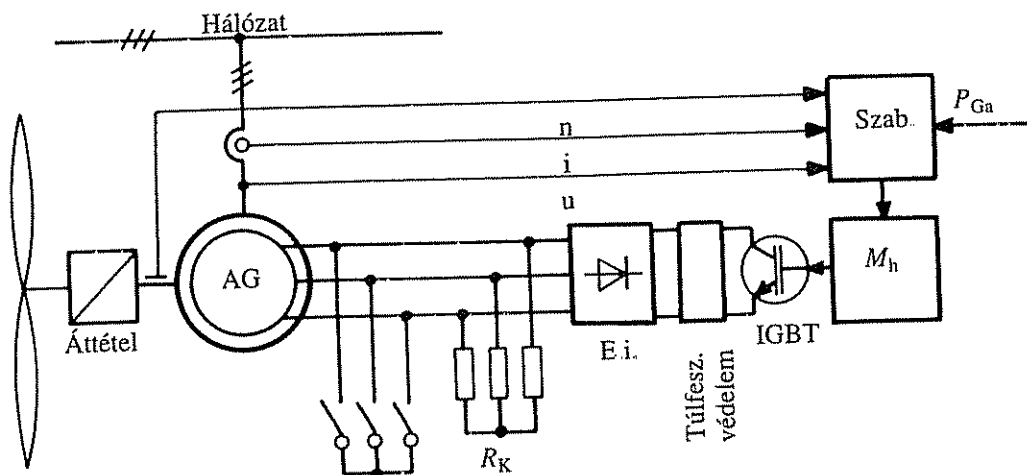


5.27. ábra. Háromfázisú ellenállás impulzusvezérlése háromfázisú IGBT-s híddal

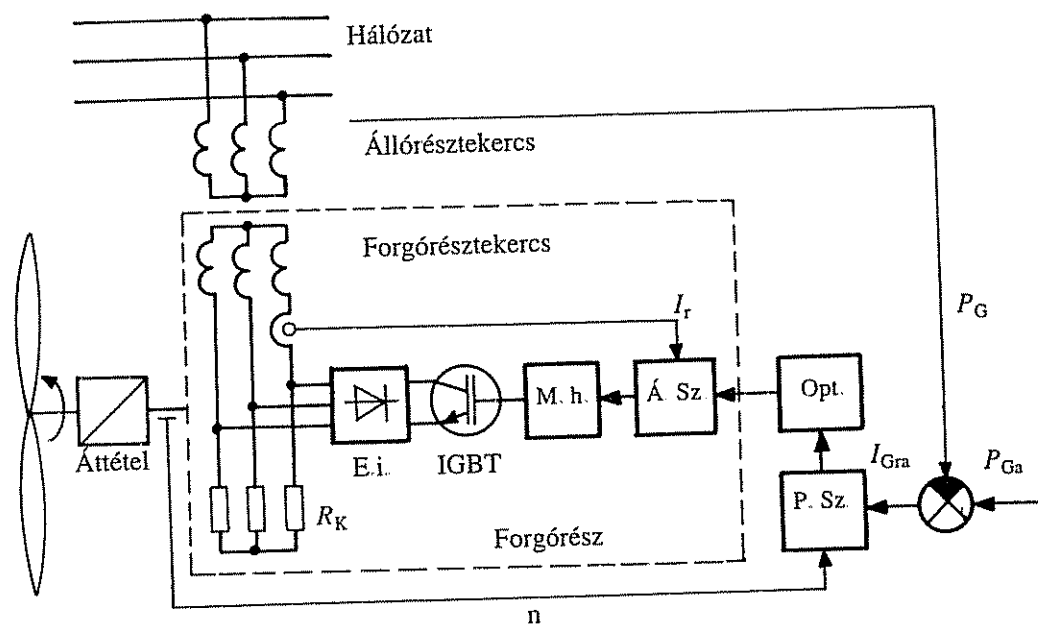
Az 5.27. ábrán bemutatott kapcsolás szimmetrikus háromfázisú ellenállással (R_K) és impulzus vezérelt háromfázisú IGBT-s híddal megakadályozza az alacsony rendszámú harmonikusok megjelenését. (Ekkor ugyanis a forgórész áramokban csak a kapcsolási frekvencia és többszörösei jelennek meg.) Sajnos ez a megoldás költséges ahhoz mérten, hogy ún. „vesztéges” szabályozás. Az olcsóbb tirisztoros hídkapcsolás nem teszi lehetővé a nagyfrekvenciás impulzusvezérlést.

A két említett kapcsolásban alárendelt áramszabályozást tételeztünk fel, amelyhez a főrendelt teljesítmény szabályozás szükséges P_{Ga} alapjelét pl. egy külső számítógépes vezérlés szolgáltatja, tárolós késleltetésen keresztül (vagyis P_{Ga} csak a lassúbb változásokat követi). A teljesítmény visszacsatoló jelet adott esetben az állórész áram és feszültség segítségével állítják elő.

Az 5.28. ábrán az előző két megoldás kombinációja látható. A háromfázisú R_K ellenállás a három fázis pillanatnyi terhelésének szimmetriáját, az egy darab IGBT a kapcsolás



5.28. ábra. Háromfázisú ellenállás impulzusvezérlése egy IGBT-vel, diódás hídon keresztül



5.29. ábra. A forgórészkezi ellenállás-változtatás kefe nélküli megoldása

olcsóságát és impulzusvezérlését biztosítja. A diódás híd közbeékelődése az ellenállások és az IGBT közé szükségessé teszi a vezérelt elem külön túlfeszültség védelmét.

Az eddig említett megoldások mind feltételezték csúszógyűrűs aszinkron gép alkalmazását. Sajnos a nagy éves óraszámokban működő generátorok csúszó súrlódásnak kitett alkatrészei hamar elhasználódnak, ezért felügyeletet és sűrű karbantartást igényelnek. Az elmondottak miatt a gyártóknak a kefenélküli megoldások természetes törekvései. A VESTAS-cég „Opti Slip” szabályozását vázoltuk az 5.29. ábrán. Itt a „külső” ellenállások, a teljesítményelektronika és az áramszabályozás (Á.SZ.) is a forgórészen van elhelyezve. Az áramszabályozó és a szabályozás további, külső részei (P.SZ.) közötti kapcsolatot az „Opt” jelű optikai jelátvitel valósítja meg.

5.3.3. Frekvenciaváltón keresztül hálózatra csatlakozó generátorok

A közvetlenül hálózatra csatlakozó generátorok számos hátrányos tulajdonságát említettük már. A generátor és a hálózat frekvenciájának azonossága ($f_G = f_H$) és állandósága rögzíti a szinkron fordulatszámot, ami változó szélesség esetén erősen leronthatja az aktuális teljesítménytényezőt ($C_p < C_{pmax}$) és a turbinából kinyerhető energiát. A rendszer merevsége miatt – különösen szinkron generátor esetén – a szél-lökések szinte gyengítetlen nyomatóklókések formájában továbbterjednek a mechanikai rendszerben és felesleges igénybevételeket valamint többletveszteséget okoznak.

Frekvenciaváltó közbeiktatásával megszűnik a generátor frekvencia kényszere. Alkalmassal szabályozással a turbina fordulatszáma követheti a szélesség változását, ami lehetővé teszi C_{pmax} megközelítését. Ugyanakkor a nyomatóklókések alkalmával a nagy tehetetlenségi nyomatékú szélturbina lendítőkerékként viselkedik, átmenetileg tárolva az energia lengő részét, csökkentve a tengelyek és az áttétel igénybevételeit.

Ideális esetben a változó sebességű turbinák a következő előnyökkel rendelkeznek a hálózathoz mereven kapcsolt társaikkal szemben:

- több energia nyerhető ki a turbinából adott szélesség eloszlás esetén (jobb C_p),
- kisebbek a mechanikai igénybevételek a teljes rendszerben,
- könnyebb az indítás, és kisebb szélességen is el tud indulni a turbina,
- alacsony sebességeken a rendszer eredő hatásfoka a generátor veszteségeinek csökkentésével is javítható,
- kisebb sebességeken csökken a zajszint,
- szinkron generátor esetén nincs szükség a szinkronozás műveletére, aszinkron generátorok esetén nincs szükség a mágnesező áramot biztosító kondenzátorokra,
- jobb „minőségű” a termelt villamos energia (rövid időszakokra nézve állandóbb a teljesítmény).

Amint már korábban is említettük, változó szögsebesség esetén három tartományban üzemelhet a turbina-generátor gépcsoport (5.30. ábra):

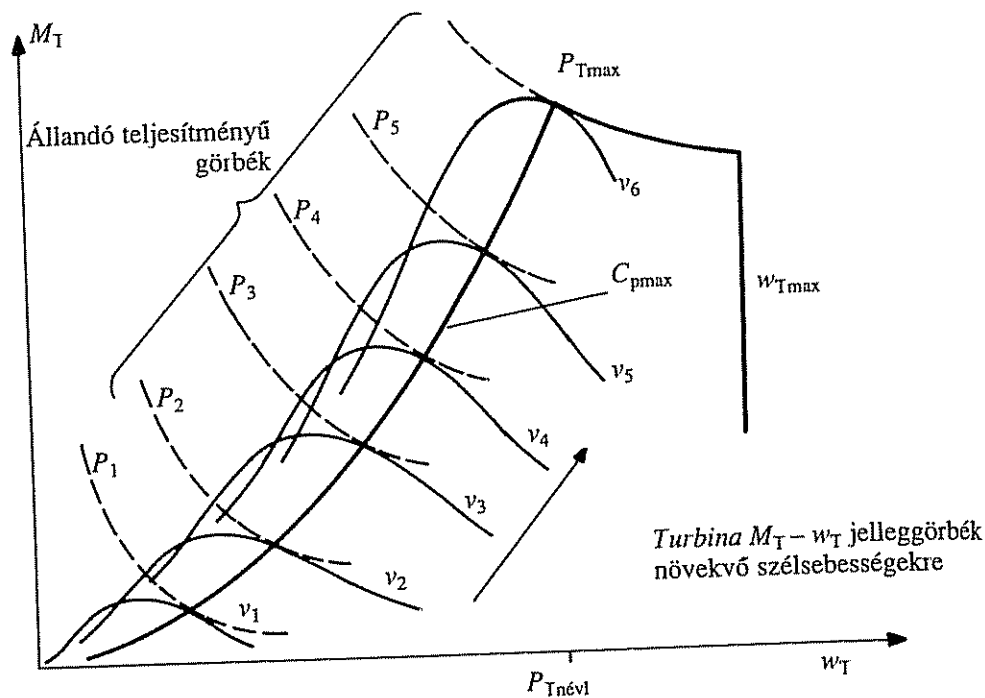
- „normál” üzemmódban C_{pmax} -mal,
- sebesség korlátán ($w_T = w_{Tmax}$),
- teljesítmény korlátán (ezzel elsősorban a teljesítményelektronikát védjük a rövididejű túlterhelésekkel szemben).

Állandó fordulatszámú turbinák esetén – ha nincs lapátszög-szabályozás – akkor az áramirányító határteljesítménye (ill. adott szélesség) felett a generátort le kell állítani.

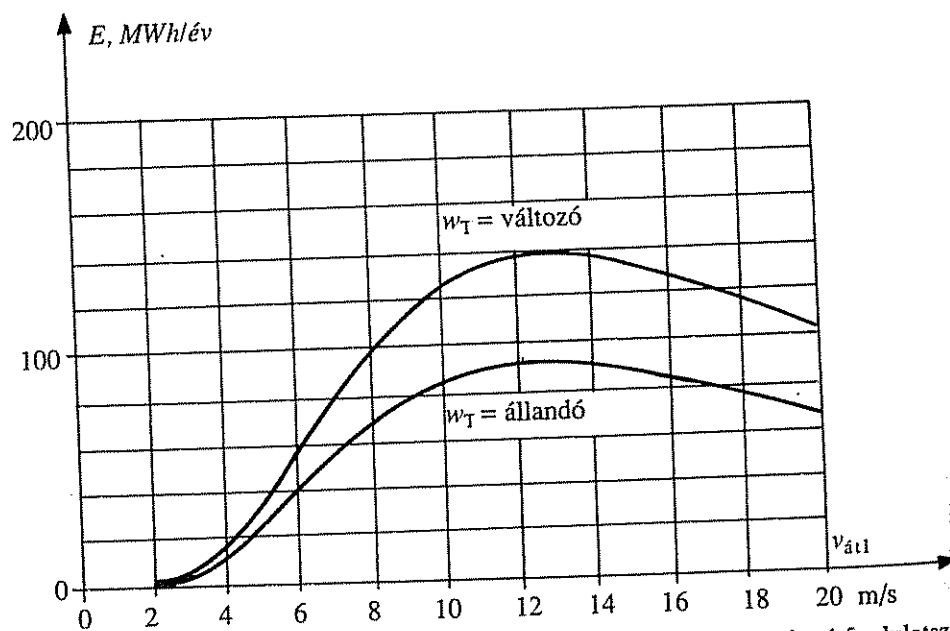
Az 5.31. ábrán egy 30 kW-os szélérőmű éves energiatermelését hasonlítottuk össze állandó és változó fordulatszámú hajtás esetében, az átlagos szélesség függvényében. A szélességekre a Rayleigh-féle eloszlást tételeztük fel, és a változó fordulatszámú turbina esetében a sebességkorlátot azonosnak vettük az állandó sebességű turbina fordulatszámával. A $w_T =$ változó esetben a kinyert energia minden szélességen nagyobb, mint a $w_T =$ állandó esetben.

A továbbiakban a szélérőművek speciális követelményeit kielégítő szabályozásokra helyezük a hangsúlyt. Ezért legrészletesebben a géppoldali áramirányítók frekvenciaszabályozását tárgyaljuk, mert ez teszi lehetővé a legjobb aerodinamikai hatás-

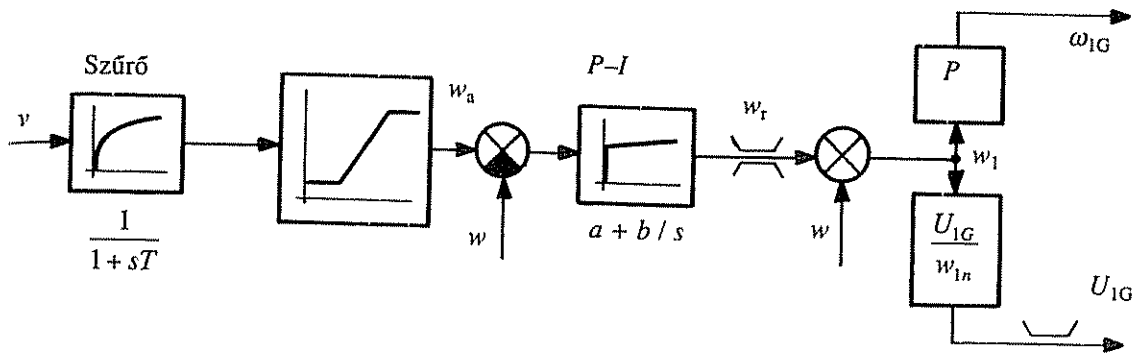
fok (C_{pmax}) elérését. A gépoldali áramirányító feszültség szabályozásával (fluxus szabályozásával) a generátor veszteségei csökkenthetők. A hálózatoldali áramirányítóval általában a meddő teljesítményt (Q_H -t) és $\cos \varphi_H$ -t állítjuk be a kívánt értékre (általában $Q_H = 0$).



5.30. ábra. Állandó lapátszögű turbina három alapvető szabályozási tartománya a nyomaték-szögsebesség síkon



5.31. ábra. Egy 30 kW-os szélörmű éves energiatermelése állandó és változtatható fordulatszámú hajtás esetén az átlagos szélesség függvényében

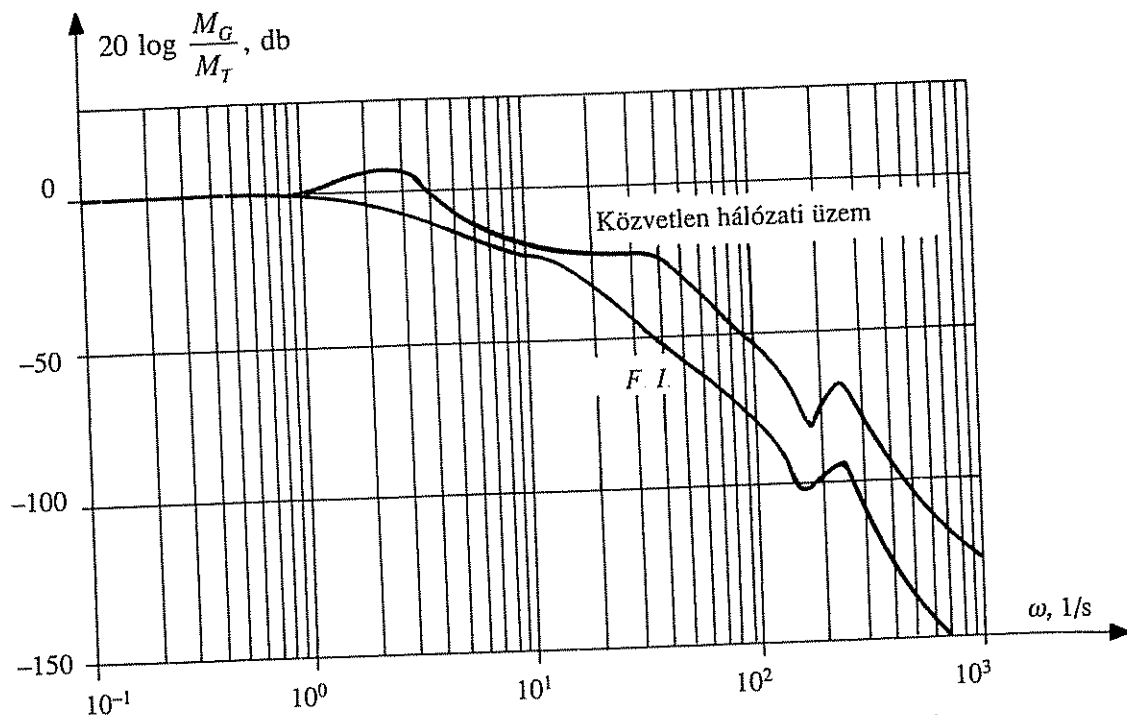


5.32. ábra. ISZM vezérlésű feszültséginverteres kapcsolás gépoldali áramirányítójának legegyszerűbb szabályozási módja

Az 5.32. ábrán az ISZM vezérlésű feszültséginverteres kapcsolás (4.31. ábra) gépoldali áramirányítójának szabályozása látható a legegyszerűbb esetben. A „szűrt” szélesség-jel korlátozóson keresztül szolgáltatja a turbina-generátor gépcsoport szögsebesség alapjelét. A P-I kompenzáló elemeket tartalmazó sebességszabályozó kimenőjele határozza meg (a póluspár számmal való szorzás után) az aszinkron generátor forgórész frekvenciáját. Összegzés után a $(w + w_r)p$ jel adja az aszinkron gép állórész körfrekvenciáját. w_r -et felülről korlátozni kell, hogy az aszinkron gép ne mehessen át motoros üzembe, alulról pedig azért, hogy az áram, ill. a nyomaték ne léphessen túl egy adott határt (pl. $1,2 I_n$ -et). Állandósult állapotban w_r és M_G arányosak egymással, ha a fluxus állandó (ezt biztosítja jó közelítéssel az U_1/f_1 =állandó ill. U_{1G}/w_{1n} =állandó arány).

Az 5.33. ábrán összehasonlítottuk az aerodinamikai nyomaték és a generátor nyomatéka közötti átviteli függvényeket hálózathoz közvetlenül kapcsolódó aszinkron generátor, és a fent leírt feszültséginverteres (F.I.) kapcsolásban működő aszinkron generátor esetére. Az F.I. kapcsolás a teljes frekvenciatartományban jobb csillapítási tényezővel rendelkezik, ami kisebb mechanikai igénybevételeket és jobb „minőségű” villamos energiát jelent. A mérési eredmények szerint az átlagos leadott teljesítmény kb. 20~25%-kal nagyobb F.I. esetén azon a szakaszon, ahol az $C_p \approx C_{pmax}$ szabályozás tartható, míg állandó sebességű tartományban a közvetlen kapcsolás átlagos teljesítménye nagyobb kb. 4%-kal a teljesítményelektronika veszteségeinek elmaradása miatt. Az 5.34. ábrán tirisztoros áraminverterről táplált aszinkron gép „mezőorientált” szabályozását láthatjuk. Ez ma az aszinkron gépek legjobb dinamikájú és legjobban kézben tartható szabályozása. A bonyolultabb részletek mellőzésével ez a módszer forgó síkvektorokként kezeli a gépben kialakuló gerjesztést (áramot) és fluxust, és a fluxushoz rögzített koordináta-rendszerben vektorként szabályozza az áramot. Ez jelentheti az áram két derékszögű összetevőjének (I_d , I_q) vagy amplitúdójának (I_e) és fluxussal bezárt szögének (ϑ) előírását. Az említett vektorok a térbeli maximum irányába mutatnak, amelyek állandósult szinuszos táplálás esetén egyenletes sebességgel körbefordulnak a kerület mentén. (Ismeretes, hogy egy egyenletes körforgó síkvektor vetülete egy adott tengelyre szinuszos időfüggvényt eredményez, míg a különböző tengelyekre vett vetületek felfoghatók a mező szinuszos kerületmenti eloszlásának is.)

A gépoldali (egyenirányító üzemben működő) áramirányító gyújtásvezérlése (GV) az állórész feszültség integráljáról (az állórész fluxusról) történik, amelyik fá-



5.33. ábra. A szélerőmű nyomatkátviteli függvénye közvetlen hálózati üzem, és feszültséginverteres (F.I.) táplálás esetén, a lengési körfrekvencia függvényében

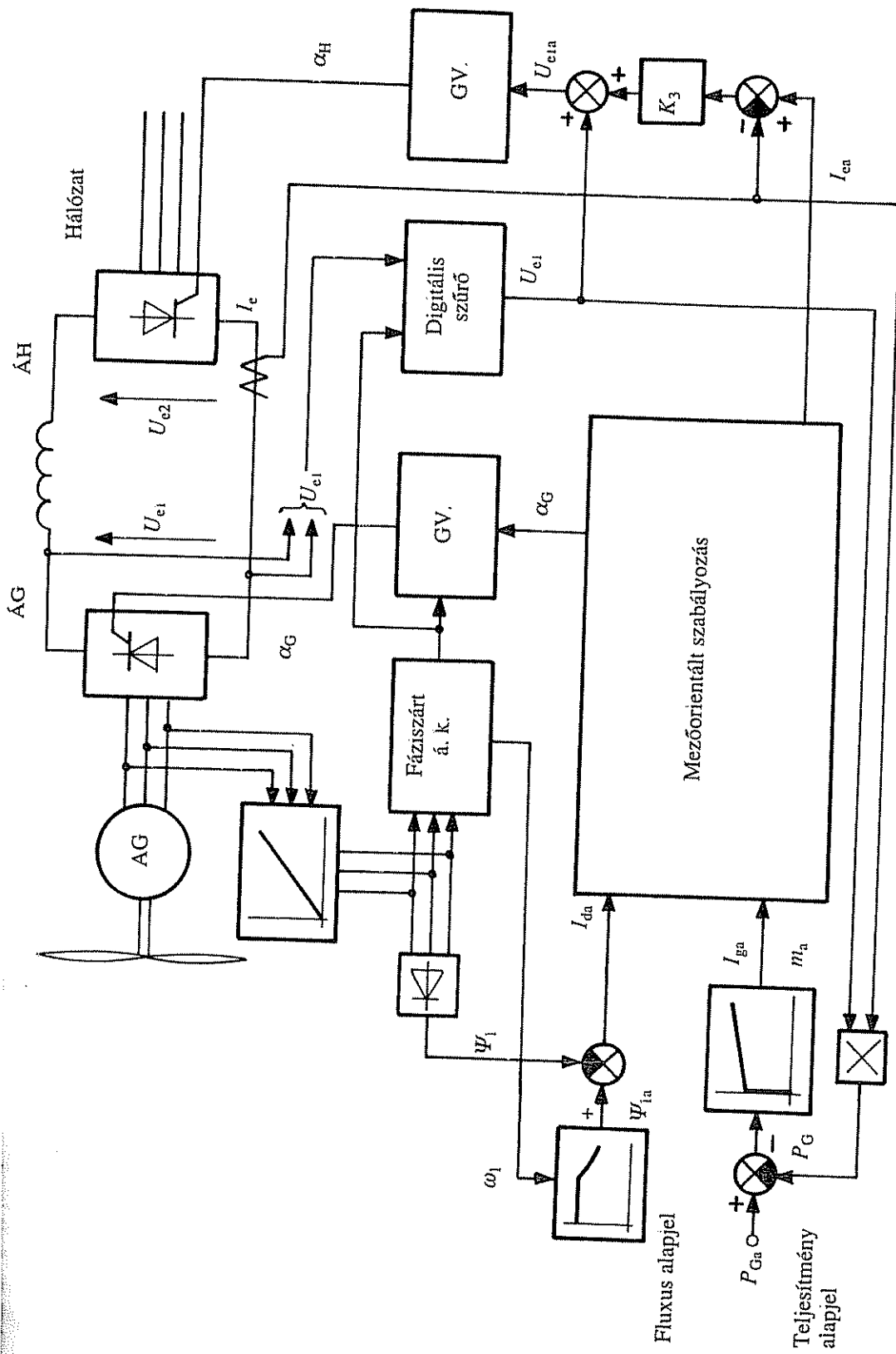
zis-referenciaként szolgál a fáziszárt áramkör számára. (Másképpen ez az integrál egyenirányítás után a fluxus visszacsatolás (ψ_1) célját is szolgálja.) Az integrálás kiküszöböli az állórészfeszültség gyors változásainak és felharmonikusainak zavaró hatását. A teljesítmény alapjelet (P_{Ga} -t) egy fölrendelt szabályozó kör szolgáltatja, míg a visszacsatolt jelet (P_G -t) az $U_{e1}I_e$ szorzattal állítjuk elő. A két jel különbsége – PI típusú szabályozón keresztül – szolgáltatja az I_{qa} ún. nyomatképző áram alapjelet ($m_a \sim I_{qa}$).

Alacsony frekvencián (a névleges szélsébség alatt) a Ψ_1 a állórész fluxus alapjel állandó, nagyobb frekvencián pedig az állórész feszültség korlátozása céljából, w_1 -gyel fordított arányban változik.

A gépdali kényszerkommutációs áramirányító fedezi az aszinkron generátor meddőteljesítmény igényét. A gyújtási pillanatok α_{Ga} és a fáziszárt hurok kimenő-jelének összehasonlításával határozzák meg. Végül soron a generátor áramvektorának fázisszögét (és frekvenciáját) az önvezérlésű gépdali áramirányító szabja meg, míg az áram abszolút értékét I_e -t a hálózatoldali áramirányító. Az U_{e1} előrecsatolt jel (zavarkompensáció), az I_e áramszabályozás helyzetét könnyíti meg.

Mivel a szélsébség mérésére használt anemométer nem pontosan azt a széláramlatot méri, amelyik a szélturbinára hat, ezért a szélturbinát pontosabb szélsébségmérő eszközként lehet felhasználni. Az alapegyenletek felhasználásával nyerhető:

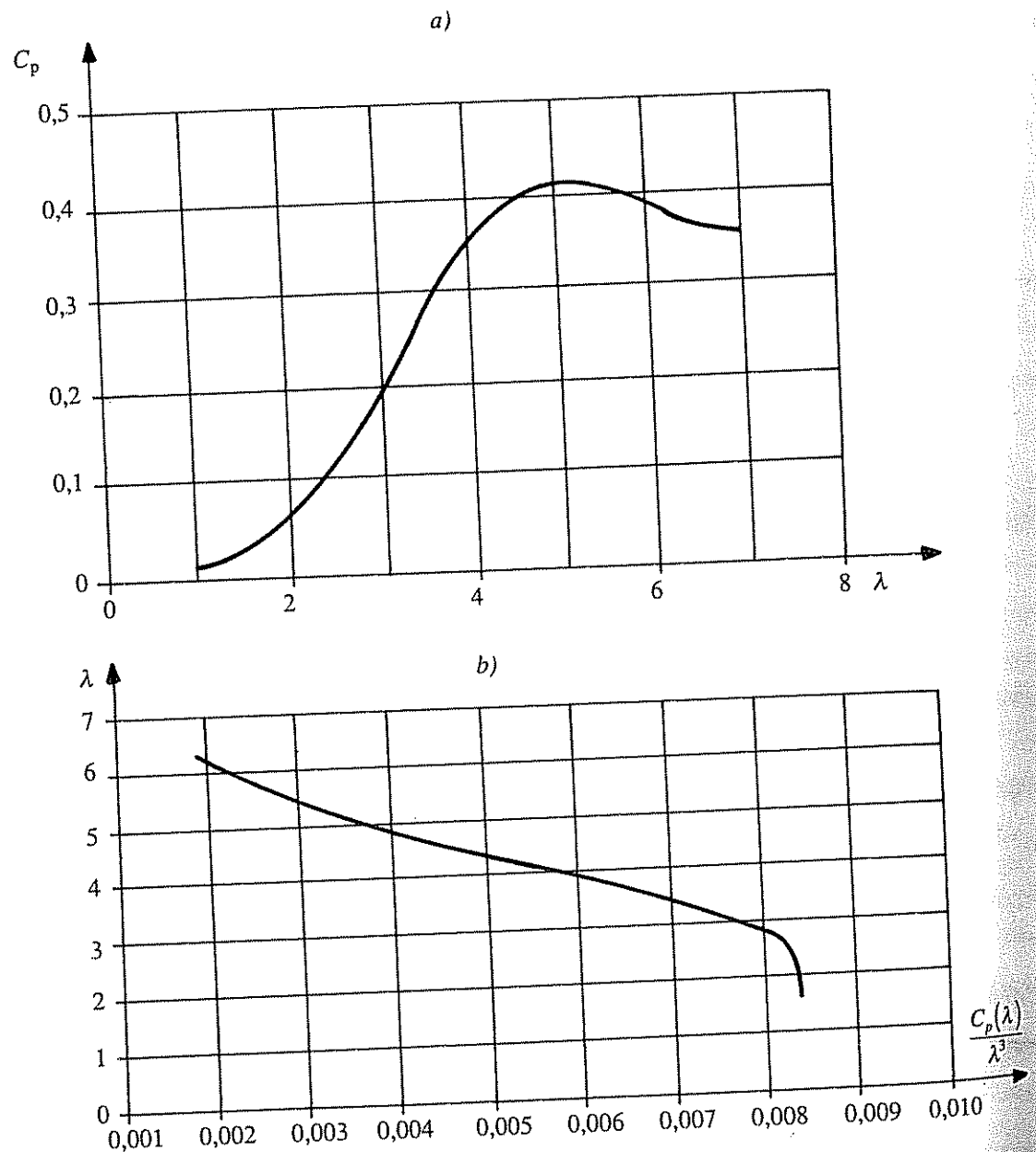
$$\frac{P_T}{\rho \frac{1}{2} A w_T^3 R^3} = \frac{P_G}{\eta_m \eta_G \frac{1}{2} \rho A w_T^3 R^3} = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} \quad (5.33)$$



5.34. ábra. Tirisztoros áraminverterről táplált aszinkron gép mezőorientált szabályozása

Mivel P_G és w_T megbízhatóan mérhető, (5.33.)-ből számítható $C_p(\lambda)/\lambda^3$ (5.35.b. ábra). Ha ezt a tényezőt előzetes számítások vagy mérések alapján meghatároztuk a rendelkezésre álló C_p - λ függvénykapcsolatból (5.35.a. ábra), akkor a munkapont (azaz λ és a $\frac{\partial C_p(\lambda)}{\partial \lambda}$ differenciálhányados számértéke) azonosítható. Célunk az

adott munkaponthoz tartozó ω_{1a} körfrekvencia alapjel meghatározása a frekvenciaváltóhoz. Ehhez kis változásokra linearizáljuk az erősen nemlineáris aerodinamikarendszert.



5.35. ábra. Egy 22 kW-os szél-turbina jelleggörbéi: a) ábra. teljesítménytényező – gyorsjárási tényező
b) λ – $C_p(\lambda)/\lambda^3$ mért, vagy számított jelleggörbe

Állandó szélesség esetén az első szabályozási tartományban:

$$\frac{\partial P_T}{\partial \lambda} = \frac{1}{2} \rho A \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} v^3. \quad (5.34.)$$

Itt λ kis megváltozása:

$$d\lambda = \frac{R}{v} dw_T. \quad (5.35.)$$

Ezt helyettesítve (5.34.)-be, és figyelembe véve az i áttételt valamint a p póluspárok számát:

$$\frac{dP_G}{d\omega_1} = \frac{1}{2} \rho A \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \eta_m \eta_G v^2 R \frac{1}{ip} = K. \quad (5.36.)$$

Amikor $K = 0$, akkor a turbina a C_p - λ görbe csúcspontján, azaz az optimális munkapontban dolgozik. Ha a turbina az optimálisnál nagyobb λ -val (nagyobb w_T -vel) dolgozik akkor K negatív (a C_p - λ görbe eső oldalán van a munkapont).

A fékező (stall) szakaszban – nagy sebességeken – a turbina teljesítményét a következő alakban írjuk fel:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} w_T^3 R^3. \quad (5.37.)$$

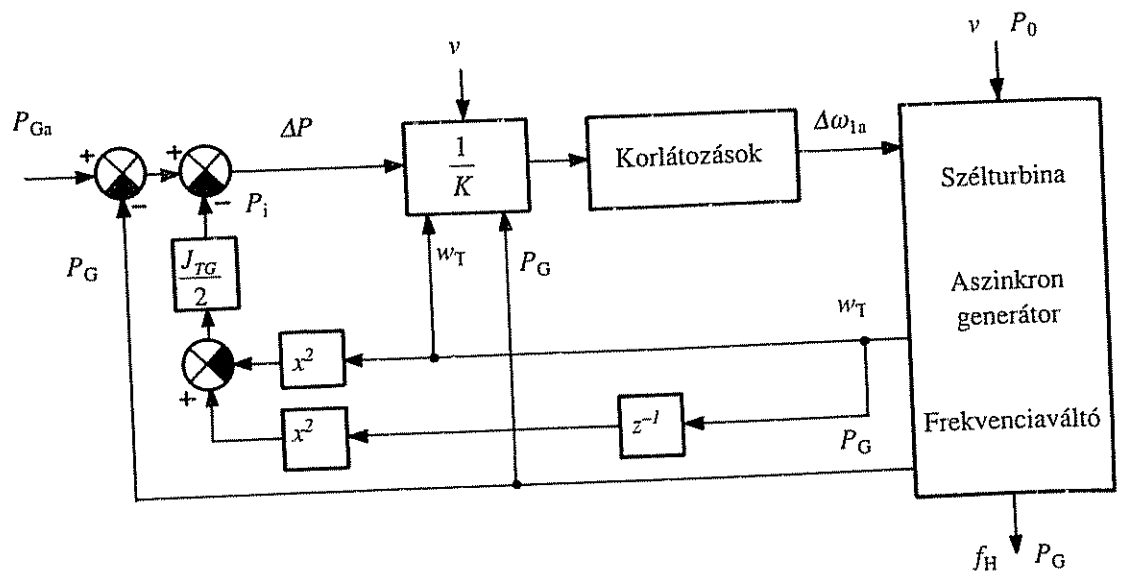
Ebben a szakaszban a konkrét számítások szerint a $C_p(\lambda) / \lambda^3$ tényező alig változik a szélesség ill. a λ változásakor, ezért (ha $\eta_m \eta_G \approx 0,9$ -et veszünk):

$$\frac{dP_G}{d\omega_1} = \frac{3}{2} \rho A 0,9 \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} w_T^2 R^3 \frac{1}{ip} = K. \quad (5.38.)$$

A generátor frekvencia szabályozása az 5.36. ábrán látható, amelynek ideális esetben egy Δt mintavételezési perióduson belül korrigálnia kellene a teljesítményhibát. Ez gyakran lehetetlen feladat a tehetetlen tömegekben tárolt energia miatt. Ezt veszi figyelembe kis változásokra előjelhelyesen az 5.36. ábrán vázolt szabályozás a következő módon:

$$P_i = \frac{dE_{TG}}{dt} \approx \frac{\Delta E_{TG}}{\Delta t} = \frac{\theta_{TG} [w_T^2(t) \pm w_T^2(t \pm \Delta t)]}{2 \Delta t}. \quad (5.39.)$$

(Itt E_{TG} -vel, ill. θ_{TG} -vel a turbina-generátor gépcsoport együttes mozgási energiáját, ill. a turbina tengelyre redukált eredő tehetetlenségi nyomatékát jelöltük). A második ok, ami megakadályozhatja az egy lépésen belüli korrekciót az az, hogy egy erősen nemlineáris rendszert lineáris közelítésekkel próbálunk korrigálni. (A z^{-1} -gyel való szorzás a w_T szögsebesség egy mintavétellel korábbi $w_T(k-1)$ értékét állítja elő a blokkvázlatban.) A $\Delta \omega_{1a}$ körfrekvencia változást általában korlátozni kell ahhoz, hogy a ΔE_{TG} és Δw_T változások ne legyenek túl nagyok. (A C_p - λ görbe csúcán $K \approx 0$ és $1/K \Rightarrow \infty$).



5.36 ábra. A szélturbina frekvenciaváltójának optimális szabályozása a szélesebbesség mérése nélkül

Megállapíthatjuk, hogy a szélesebbességgel változó paraméterű rendszerről van szó. Az egzakt számításához és szabályozáshoz identifikációs algoritmusra van szükség. (Az 5.36. ábrán vázolt szabályozáshoz pl. szükség volt a $C_p(\lambda)/\lambda^3$, ill. a l paraméter megállapítására.) Általános esetben az identifikációs eljárás komplex és költséges hardverre vezet. Egyszerű kivitelezést tesz lehetővé az ún. maximum (optimum) kereső szabályozás, amelynek az utóbbi években a legdivatosabb megoldása fuzzy logikára alapult. Minthogy a szél sebessége (és így λ is) ismeretlen, a szabályozás kis lépésekben változtatja a generátor szögsebességét, és figyeli a P_H teljesítmény változását. Ha pl. ΔP_H pozitív az utolsó pozitív Δw_{Ga} változásra, akkor a keresés ugyanabban az irányban folytatódik. Ha azonban $+\Delta w_{Ga}$ egy $-\Delta P_H$ -t okoz, akkor a lépések irányát meg kell fordítani. Amikor a szabályozás rátalál az optimális pontra, akkor kis lépésekkel oscillál ekörül.

5.3.4. Áttétel nélküli szinkrongenerátorok

Az áttétel nélküli szélerőművek (5.37. ábra) az utóbbi időben terjedtek el. Legnagyobb előnyük, hogy elmarad a mechanikai áttételben keletkező energiavesztés és zaj, továbbá csökken a karbantartási igény. A konstrukciók általában kihasználják, hogy a szélkerék és a generátor forgórésze ugyanazon a tengelyen helyezkedik el, és ennek köszönhetően elegendő a közös tengely végein csapágyazni. A gyakorlatban közvetlen hajtású szélgenerátorként kizárólag szinkron generátorokat alkalmaznak.

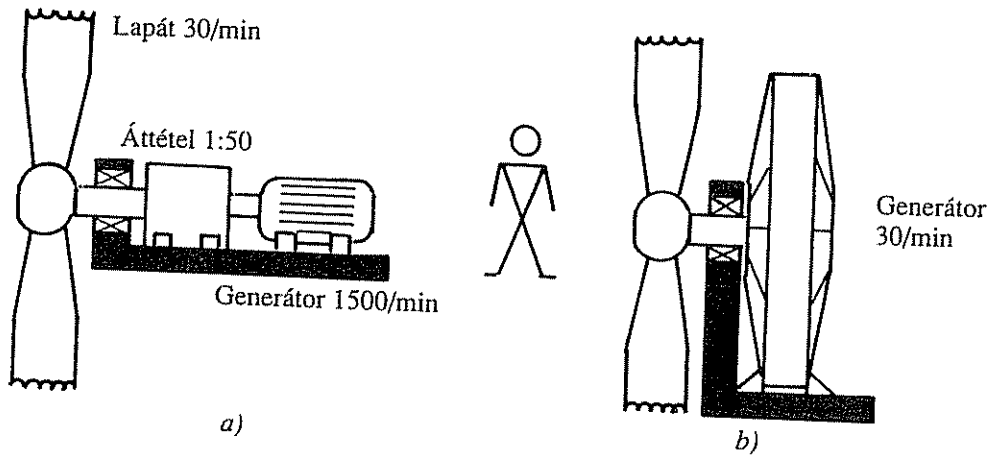
A hálózathoz való csatlakozás szempontjából ezeket a hajtásokat is az előző 5.3.3. fejezetbe kellene sorolni, hiszen a csatlakozás frekvenciaváltón keresztül történik. A szélturbinák névleges fordulatszáma a névleges teljesítménytől függően $n_n=15-60/\text{min}$ tartományban van. Az áttétel nélküli szinkrongenerátoroknak ez egyben az

$$n_n = n_{1n} = 60f_{1n}/p, \text{ 1/min} \quad (5.40.)$$

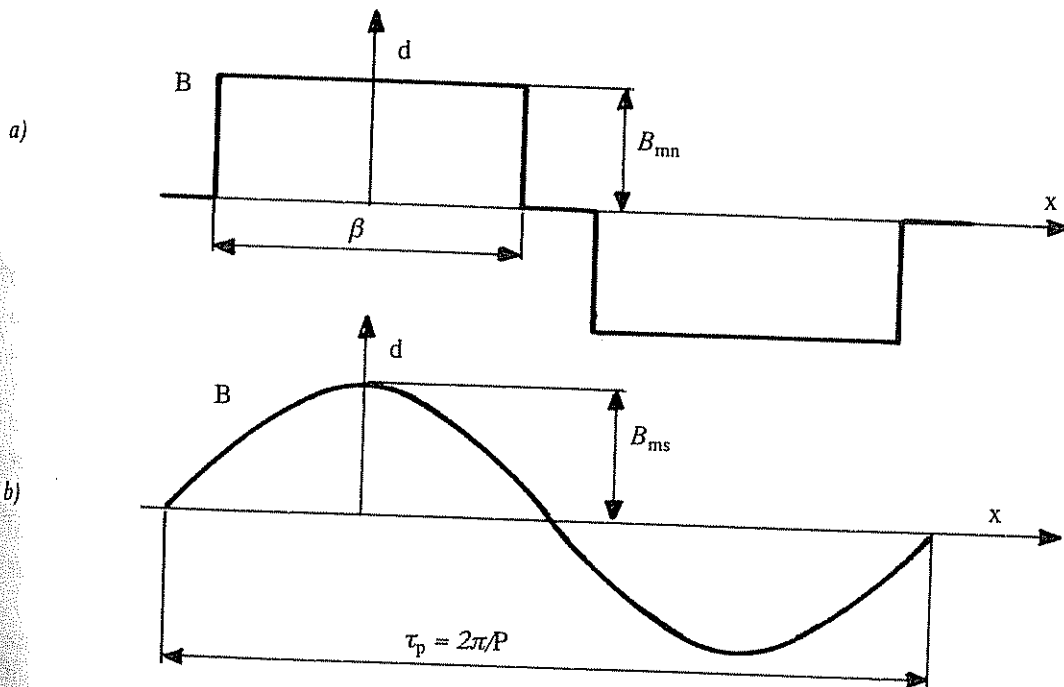
névleges szinkron fordulatszáma. Ha feltételezzük, hogy a névleges fordulatszámon

$f_{1n} = 50\text{Hz}$ a generátor névleges frekvenciája, akkor az $n_n = 60/\text{min}$ fordulatszámú generátornál $p = 50$, az $n_n = 15/\text{min}$ fordulatszámúnál $p = 200$ a póluspárok száma. A közvetlen hajtású szinkron szélgenerátorok névleges frekvenciája a gyakorlatban is $f_{1n} \approx 50\text{Hz}$, annak ellenére, hogy frekvenciaváltós üzemben dolgoznak.

Ennél kisebb névleges frekvencia a méreteket, nagyobb frekvencia a vasvesztéget növelné meg. A vasúti és a közúti szállíthatóság kb. 4 m-re korlátozza a készre szerelhető generátor külső átmérőjét. Emiatt a MW teljesítmény tartományba eső, 5–6 m külső átmérőjű generátorok végszerelését a helyszínen kell elvégezni. A kb. 6 m-nél nagyobb külső átmérőjű generátor alkalmazása problematikus, mert már túl nagy részt takarna a turbinából, és túl nagy mechanikai rezgések lépnének fel. A szinkron generátorok készülhetnek gerjesztett és állandómágneses forgórészsel.



5.37. ábra. 500 kW-os szélérőmű. a) áttételes megoldás, b) áttétel nélküli megoldás



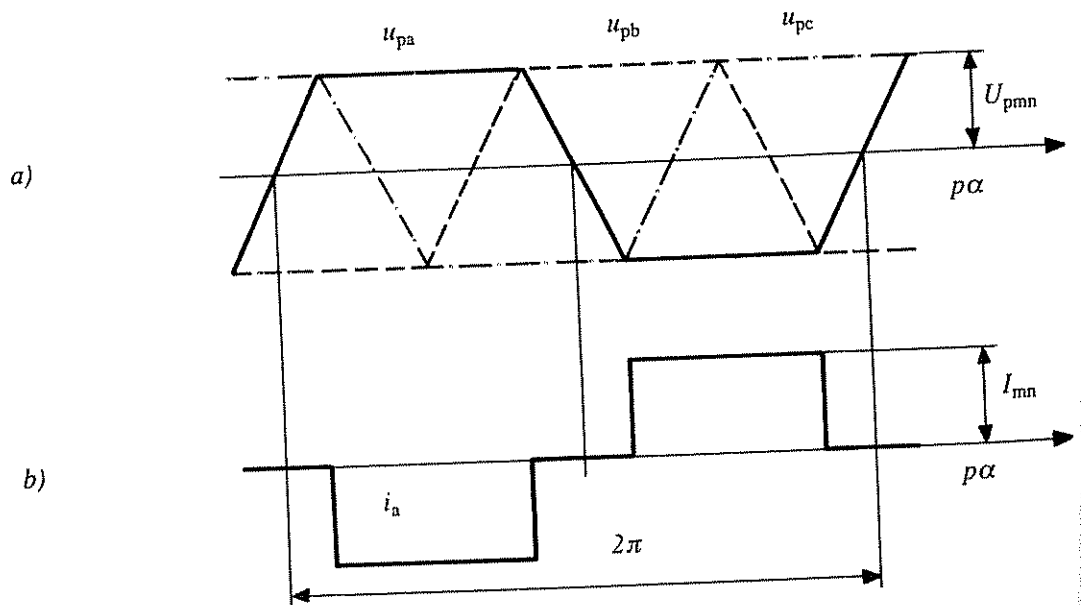
5.38. ábra. Indukciómező-alakok. a) négyszögmező, b) szinuszmező

Amint már említettük a gerjesztett forgórészű szinkrongépek közül a hagyományos kiállópólusú, radiális légrésű konstrukciót alkalmazzák, mivel ez egyszerűen elkészíthető nagy pólusszámmal is. Az állandómágneses szinkrongépek egyre szélesebb alkalmazást nyernek és várható, hogy a jövőben egyeduralkodók lesznek ezen a területen, ezért csak ezekkel foglalkozunk.

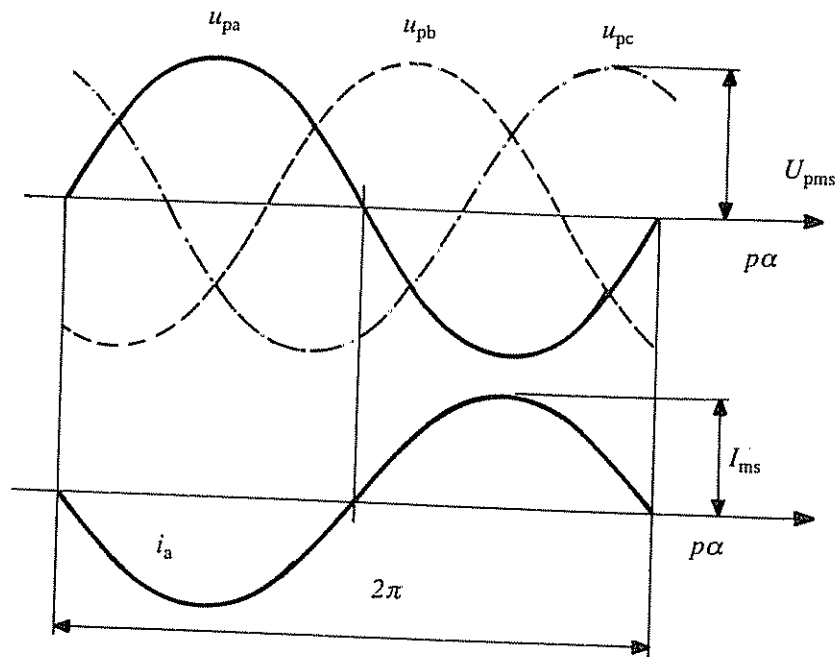
A radiális légrésű gépeknél az állandómágnes által létrehozott indukciómező térbeli eloszlásának az alakjától függően megkülönböztetünk *négyszögmezős* és *szinuszos mezős* szinkron gépeket (5.38. ábra). A négyszögletes mező trapéz alakú, a szinuszos mező szinuszos alakú pólus feszültségeket indukál az állórész tekercsekben, állandó w szögsebességen. Lüktetésmentes nyomatékot és minimális áramot eredményező optimális üzem mindkét esetben az állandómágnes forgórészhez szinkronozott, a mező alakjától függő áramszabályozással érhető el.

Négyszögmezős gépnél szélgenerátorokban olyan vezérlést alkalmaznak a motoroldali áramirányítóban, amelynél 60° -ként változnak az áramvezetési állapotok, és minden pillanatban egyszerre két fázisban (2F) folyik áram. Ideális, $\beta = 180^\circ$ széles mezőeloszlást feltételezve rajzoltuk fel az 5.39. ábrát. Az a. ábra a pólusfeszültségeket, a b. az „a” fázis áramát mutatja optimális generátoros üzemre a $p\alpha$ villamos szögben mért forgórész szögelfordulás függvényében. A „b” fázis árama 120° , a „c” fázisé 240° késéssel követi az „a” fázis áramát. Generátoros üzemből így kell a forgórészhez szinkronozni az áramokat.

A sima nyomatékú négyszögmezős gépeket általában kapcsolóüzemű, áramszabályozott teljesítmény-elektronikával táplálják. A legbelső áramszabályozás biztosítja a nyomatéknak megfelelő, forgórészhez szinkronozott előírt alakú áramokat. A külső fordulatszám szabályozókör a nyomatékigénnyel arányos i_{Ga} alapjelet írja elő. A megoldásban három impulzusszélesség modulációs (ISZM) áramszabályozó van. A fázisáramok $i_{aa}(\alpha)$, $i_{ba}(\alpha)$, $i_{ca}(\alpha)$ alapjeleit az alapjelképző képezi az előjeles i_{Ga} -ból és a P pozícióadó által szolgáltatott a rotorszögéből. (5.40. ábra).



5.39. ábra. Négyszögmezős gép jellemzői generátoros üzemből.
a) pólusfeszültségek ($w = \text{const.} > 0$); b) az a fázis árama



5.40. ábra. Szinuszmezős gép jellemzői generátoros üzemben.
a) pólusfeszültségek ($w = \text{const.} > 0$); b) az a fázis árama

A hálózati (ISZM) áramirányító úgy szabályozza a hálózati áram amplitúdóját, hogy a közbenső egyenáramú kör feszültsége állandó maradjon. Ezt olyan áramalapjelekkel valósítja meg, hogy a kialakuló hálózati áramok szinuszosak szimmetrikusak, és $\cos \varphi_H = -1$.

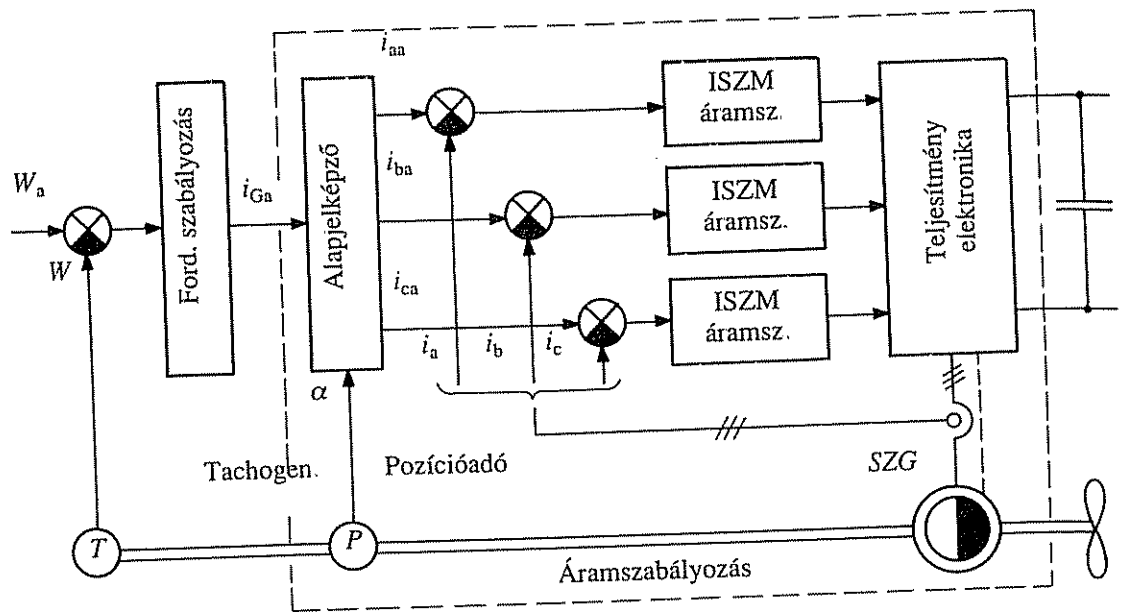
Szinuszmezős gépnél az 5.41. ábra mutatja, hogy optimális generátoros üzemben úgy kell az áramokat a forgórészhez szinkronozni, hogy a szinuszos fázisáramok elenfázisban legyenek a szinuszos pólusfeszültségekkel.

Megállapítható, hogy az áramok szinkronizálásához szinuszmezős gépnél a forgórész a szöghelyzetének a pontos ismerete, négyszögmezős gépnél csak a 60° -os szektorok ismerete szükséges. Emiatt egyszerűbb szöghelyzetadó használható négyszögmezős gépekhez mint szinuszmezősökhöz.

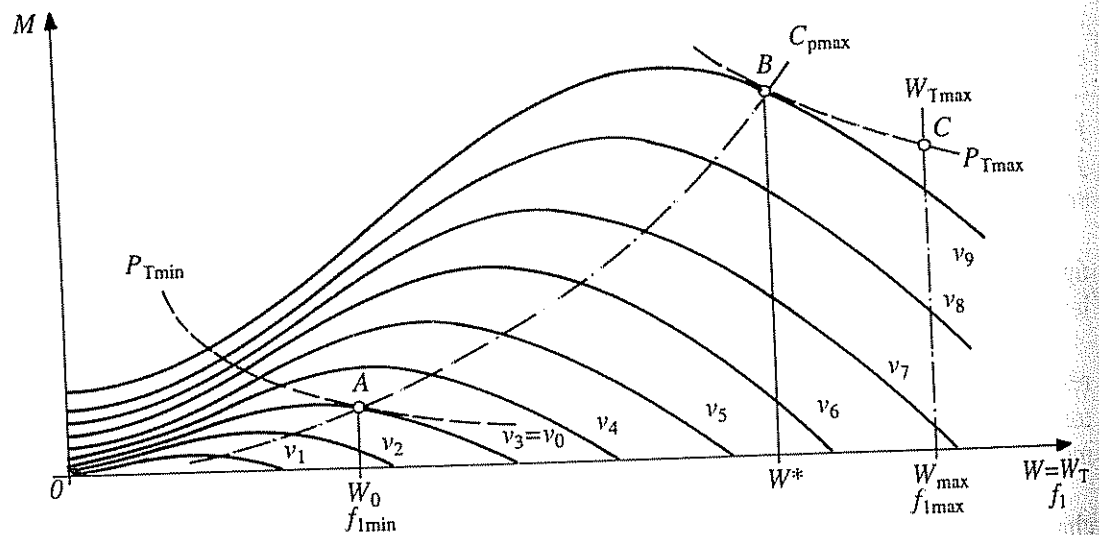
A szélturbinának a közös tengelyre vonatkozó $M(W)$ nyomaték-szögsebesség mechanikai jelleggörbéi az 5.42. ábrán láthatók. Ha feltételezzük, hogy az energiatermelés, a $W_0 \leq W \leq W_{\max}$ szögsebesség tartományban van, akkor szinkrongenerátor-nál ez $f_{1\min} \leq f_1 \leq f_{1\max}$ frekvencia tartománynak felel meg ($f_{1\min} = pW_0 / 2\pi$, $f_{1\max} = W_{\max} / 2\pi$). A W^* szögsebességű B pont szabja meg a szinkrongenerátor és a teljesítményelektronika áram igénybevételét, a W_{\max} szögsebességű C pont pedig a feszültség igénybevételét.

Az ISZM áramirányítós szinkrongépes megoldás az önindulásra képtelen szélturbinák indítására, hajtási üzemre is képes. Ilyenkor $\cos \varphi_H = +1$ -re szabályoz az áram szabályozó.

Az ISZM ÁH hálózati áramirányító megfelelő szabályozásával elérhető, hogy a szélgenerátor nem csak hatásos teljesítményt szolgáltat, hanem a közeli fogyasztók meddő teljesítmény igényét is kielégíti. Ehhez kapacitív, generátoros $\cos \varphi_H$ -ra kell szabályozni.



5.41. ábra ISZM áramirányítás, szinkrongépes szélgenerátor blokkvázlata



5.42. ábra. Szélturbina-jelleggörbék

A diódás egyenirányítású, szinkrongépes szélgenerátor mind négyszögmezős, mind szinuszmézős szinkrongéppel működőképes, mivel a diódás híd ún. természetes kommutációja mindkét esetben „elvégezi” az áramok szinkronizálását.

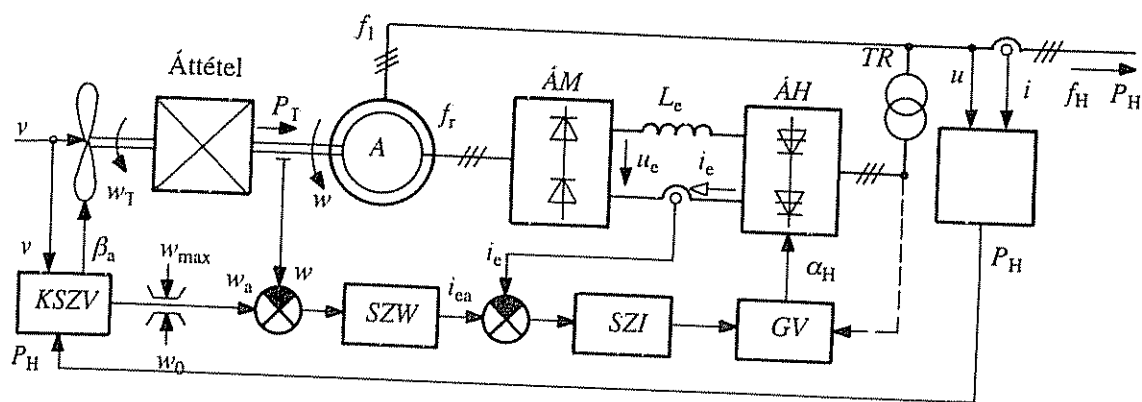
5.3.5. Kétoldalról táplált generátorok

Ebbe a kategóriába sorolhatók a csúszógyűrűs aszinkron gépes kaszkád kapcsolások és a kefenélküli kétoldalról táplált gépek.

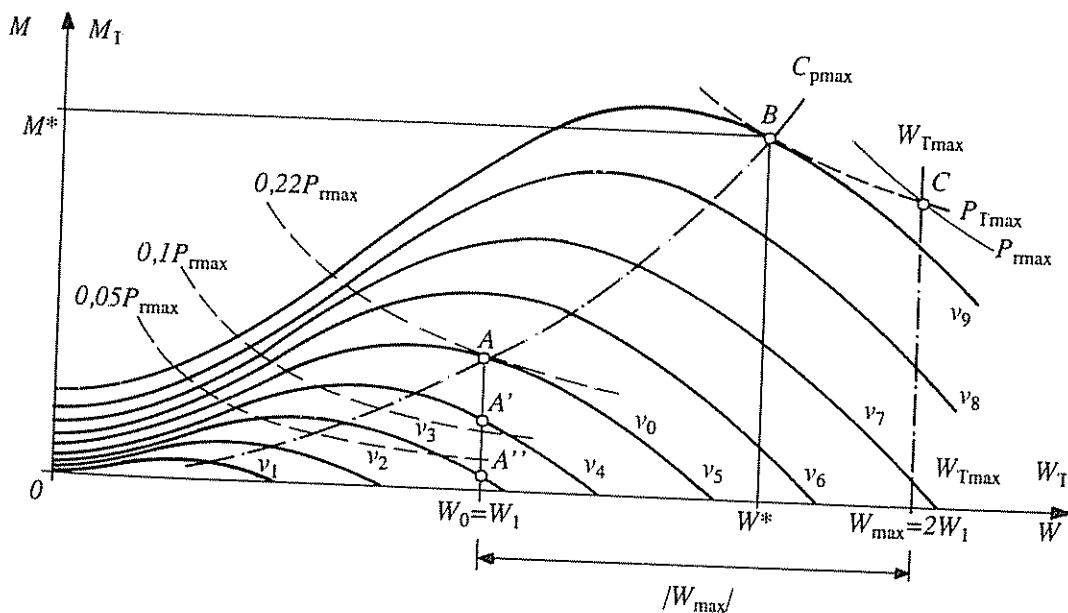
Szinkron alatti kaszkád (SZAK) hajtást alkalmazó szélgenerátor erősáramú és szabályozóköri blokkvázlatát mutatja az 5.43. ábra. A szélturbinának illetve az

SZAK generátorának nyomaték-szögsebesség mechanikai jelleggörbéi az 5.44. ábrán láthatók. Veszteségmentes, i nagyságú áttételt tételeztünk fel, így állandósult állapotban a turbina nyomatéka megegyezik a generátoréval. Az állandó v_1, v_2, \dots, v_9 szélsősebességű görbék mellett megadjuk $P_T = M_T W_T = P_{Tmax}$ maximális turbina teljesítmény és a $W_T = W_{Tmax}$ maximális turbina szögsebesség határ jelleggörbéket is. Az utóbbi a generátor tengelyén $W_{max} = i W_{Tmax}$ szögsebességnek felel meg.

Az SZAK hajtás a diódás AM motoroldali áramirányító következtében csak a $W > W_1$ szinkron szögsebesség feletti tartományban képes generátoros féküzemre. Ha feltételezzük, hogy az SZAK hajtás maximális szögsebessége $W_{max} = 2W_1$, akkor idealizált ($R_r \approx 0$ rotoellenállású) esetben a $W_1 \leq W \leq 2W_1$ tartomány fogható át kaskád üzemben. Az SZAK szélerőműnél az energiatermelés minimális szögsebessége $W_0 = W_1$, a minimális szélsősebesség ekkor a C_{pmax} görbén $v_0 = v_5$ az 5.44. ábrában. A $W_0 = W_1 \leq W \leq W^*$ szögsebesség tartományban az SZAK hajtás a pontvonalú C_{pmax} görbének megfelelően a lehető legnagyobb teljesítményt veszi ki a turbinából, és en-



5.43. ábra. Szinkron alatti kaskád szélgenerátor blokkvázlata



5.44. ábra. Szélturbina-jelleggörbék, és az SZAK üzem tartományai

nek P_H részét betáplálja a hálózatba. Veszteségmentes esetben $P_H = P_T$. A W^* szögsebességű B pontban $P_T = P_{Tmax}$, a W_1 szögsebességű A pontban pl. $P_T \approx 0,22 P_{Tmax}$ ez a teljesítmény. A v_0 -nál kisebb szélesség energiája a W_0 szögsebességű SZAK hajtással már nem hasznosítható a legjobban. Már a $v_4 < v_0$ szélességű A' pontban is $C_p < C_{pmax}$, a $v_3 < v_4$ teljesítményű A'' pontban pedig $C_p \approx 0$. Eszerint a $v < v_3$ szélesség tartományban nem képes energiatermelésre az SZAK szélerőmű.

A valóságban az 5.44. ábrában látható tartománynál kisebb fogható át SZAK-val, mert $W_{max} = 2W_1$ a röperők miatt általában nem engedhető meg csúszógyűrűs géppel. A gyakorlatban $W_{max} = (1,3-1,5)W_1$. Ekkor az ábrabelinél kisebb szélesség tartományban működhet optimálisan az SZAK szélerőmű.

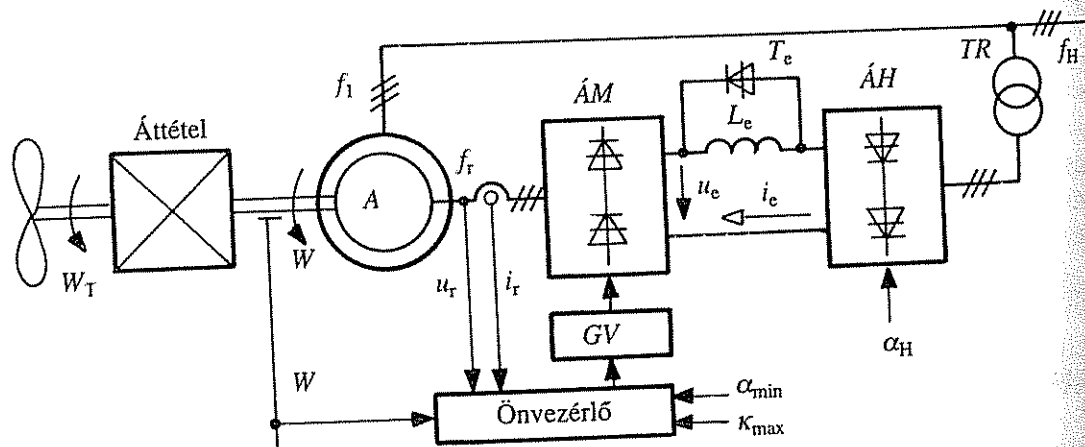
Az SZAK hajtás hátsó berendezése (az ÁM gépoldali áramirányítón, az L_c simító fojtótekercsen, az ÁH hálózati áramirányítón és a TR illesztő transzformátoron) a forgórészről kivett

$$P_e = U_e I_e \approx P_r = \pm MW_r \quad (5.41.)$$

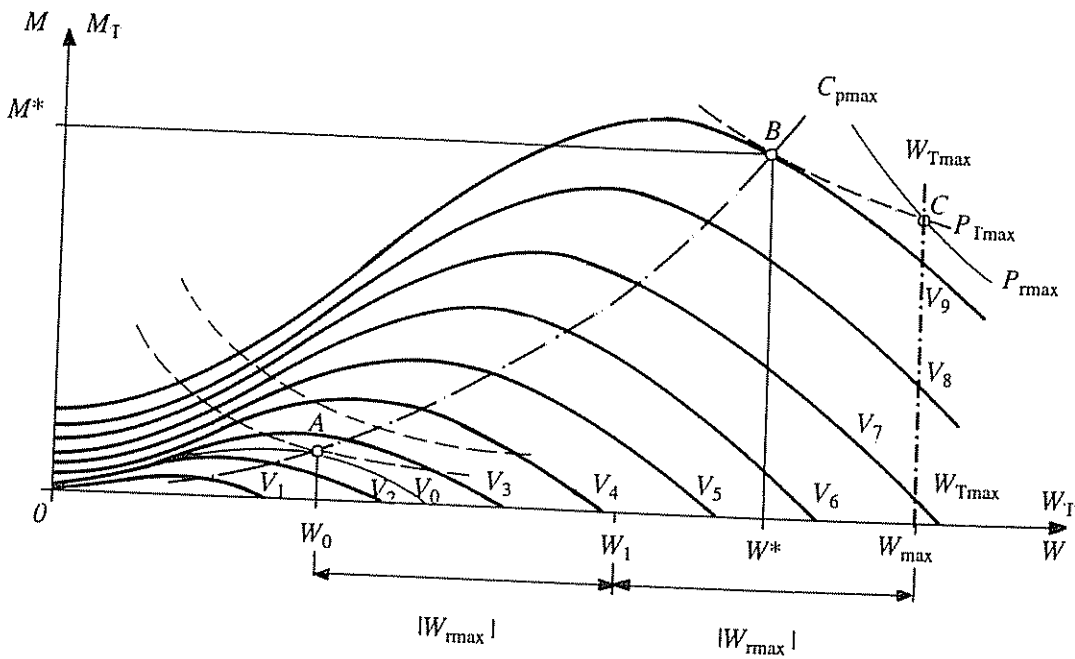
teljesítmény áramlik át ($W_r = W_1 - W$). A negatív előjel azért kell, mert a generátoros nyomatékot tekintjük pozitívnak.

Az 5.43. ábrában megadott generátor szabályozókör fordulatszám szabályozás alárendelt egyenáram szabályozással. A w_a szögsebesség alapjelet a menedzsment rendszer részét képező KSZV jelű központi szabályozó-vezérlő képezi a v szélességből és a P_H hálózati hatásos teljesítményből. A szögsebesség alapjel a működési $W_0 \leq w_a \leq W_{max}$ tartományra van korlátozva. A blokkvázlatban SZW a fordulatszám szabályozó, SZI az áramszabályozó, GV a hálózatról szinkronozott gyújtásvezérlő. Ha a turbina lapátszög állítható, akkor a lapátszög szabályozó részére is a KSZV adja a β_a alapjelet.

Az SZAK kapcsolatban mind az A aszinkron gép, mind az ÁH hálózati áramirányító jelentős meddő teljesítményt vesz fel a hálózatból. Az ÁH által felvett kommutációs meddő teljesítmény csökkenthető az egyenáramú körbe iktatott feszültségnövelő szaggató kapcsolással. Az ÁH hálózati áramirányító bemenő egyenfeszültségének megfelelő beállításával elérhető, hogy az ÁH áramirányító a teljes tartományban



5.45. ábra. Szinkron feletti kaszkád szélgenerátor blokkvázlata



5.46. ábra. Szélturbina-jelleggörbék, és az SZFK üzem tartományai

váltakozó áramú oldalon mindig a legkisebb I_1 árammal és a legjobb φ_1 fázisszöggel működjön. Kisfeszültségű ($3 \times 400\text{V}$, 50Hz) váltakozó áramú hálózat esetén nyenkor elhagyható a TR illesztő transzformátor.

Szinkron feletti kaszkád (SZFK) hajtást alkalmazó szélgenerátor kapcsolási vázlatát mutatja az 5.45. ábra.

A nyomaték-szögsebesség jelleggörbék az 5.46. ábrán láthatók. Ugyanazt a szélturbinát alkalmazzuk, mint SZAK szélerőműnél, így az $M_T(W_T)$ jelleggörbék változatlanok. Ha az SZFK kapcsolású generátorral a $0,05P_{Tmax} \leq P_T = M_T W_T \leq P_{Tmax}$ teljesítménytartományban óhajtunk optimális $C_p = C_{pmax}$ üzemet, akkor a $0,05 P_{Tmax}$ teljesítményű A pont határozza meg a W_0 minimális generátor szögsebességet. A W_0 és a W_{max} közötti fordulatszám átfogási tartomány közepére érdemes tenni a W_1 szinkron pontot: $W_1 = (W_0 + W_{max})/2$, mivel az SZFK hajtás a tirisztoros ÁM motoroldali áramirányító következtében mind a szinkron feletti, mind a szinkron alatti szögsebességen képes generátoros üzemre. A $W_0 \leq W \leq W^*$ szögsebesség tartományban az SZFK szélerőmű optimálisan $C_p = C_{pmax}$ -mal üzemel. A $P_T = 0,05 P_{Tmax}$ teljesítményhez tartozó v_0 szélesebbég alatt nem érdemes üzemeltetni az SZFK szélerőművet, mert a hajtás veszteségei felemésztenék a turbina teljesítményét. Az SZFK hajtás hátsó berendezéseiben idealizált esetben, az SZAK-hoz hasonlóan, a (5.41.) teljesítmény áramlik át. Az SZFK-val átfogható tartomány szempontjából is korlátot jelent a csúszógyűrűs áram megengedhető $W_{max} = (1,3-1,5)W_1$ szögsebesség.

SZFK-ban az ÁM motoroldali áramirányító tirisztorait az $f_r = sf_1$ változó rotorkörfrekvenciával kell gyűjtani. Ez a forgórészről szinkronozott önvezérléssel, pl. roffluxusról való vezérléssel oldható meg az 5.45. ábrában vázolt módon.

Az SZFK hajtás ÁM áramirányítójában a szinkron szögsebesség kb. $0,95W_1 < 1,05W_1$ környezetében pl. ÁH-val segített áram-nullaátmenetű „léptető” üzemet kell alkalmazni. Ezt az üzemet segíti elő az L_e fojtótekerics T_e tirisztorral való sőtölése.

Az α_h rész szabályozása az 5.43. ábrához hasonlóan történik.

Az SZAK és az SZFK hajtás az önindulásra képtelen szélturbinák indítására (szinkron szögsebesség alatti hajtásra) is képes, de ezt az indítás alatti hátsó berendezések méretezésekor a feszültség igénybevételnél figyelembe kell venni.

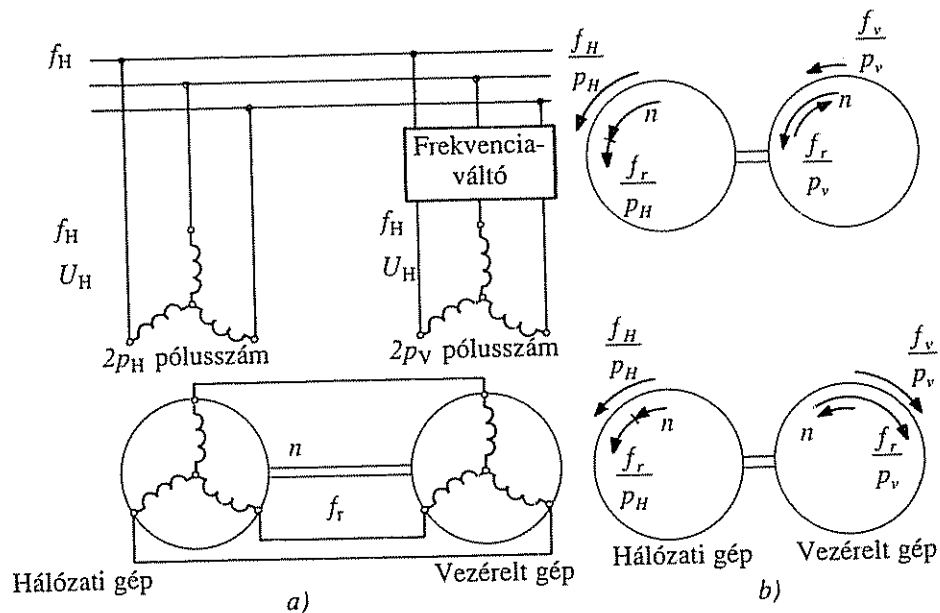
ISZM áramirányítós kaszkádok oltható félvezetőelemekből (tranzisztorok, GTO-k) épülnek fel tirisztorok helyett, és van áramgenerátoros és feszültséggenerátoros kapcsolás is. Mindkét kapcsolás képes pozitív és negatív $P_e = U_e I_e$ egyenköri teljesítményre és ezáltal szinkron feletti és szinkron alatti generátoros üzemre.

Mindkét megoldás képes arra, hogy ÁH hálózati árama közelítőleg szinuszos legyen $\cos \varphi = +1$, vagy -1 fázistényezővel. Ha ezzel egyidejűleg ÁM-t $\cos \varphi_1 = -1$ -nek megfelelően vezéreljük, akkor az eredő hálózati áram is $\cos \varphi_1 = -1$ fázistényezőjű lesz. Ennek megfelelően az ISZM áramirányítós kaszkádok nem igényelnek plusz meddő kompenzációt.

A kaszkád kapcsolások nagy hátránya a csúszógyűrűs aszinkron gép. A kefék mint gyakori hibaforrások folyamatos karbantartást igényelnek. E hátrányt küszöbölik ki a kefenélküli kétoldalról táplált gépek.

Kefe nélküli kétoldalról táplált generátorok

Kefe nélküli kétoldalról táplált aszinkron gépcsoport a legegyszerűbben két tekercselt forgórészű aszinkron gépből alakítható ki az 5.47. ábra szerint. A $2p_H$ pólusú hálózati gép állórésze az f_H frekvenciájú hálózatra, a $2p_V$ pólusú vezérelt gép állórésze az f_V változtatható frekvenciájú frekvenciaváltóra csatlakozik. A két forgórész merev tengelykapcsolatban van, és a két forgórész tekercs össze van kötve, de a vezérelt gépnél a bekötés fázissorrendje fordított a hálózati géphez képest. E mechanikus és villamos összeköttetés miatt a rotorok n fordulatszáma és a rotorköri f_r



5.47 ábra Kefe nélküli kétoldalról táplált aszinkron gépcsoport

frekvencia mindkét gépben megegyező, de a forgórész gerjesztés forgásiránya el-
lentetes a két gépben. Feltételezzük, hogy a hálózati gép állórészét pozitív sorren-
dűen tápláljuk, a vezérelt gép állórésze táplálható pozitív és negatív sorrendűen is.
A kialakuló fordulatszám:

$$n = (f_H + f_v) / (p_H + p_v) \quad (5.41)$$

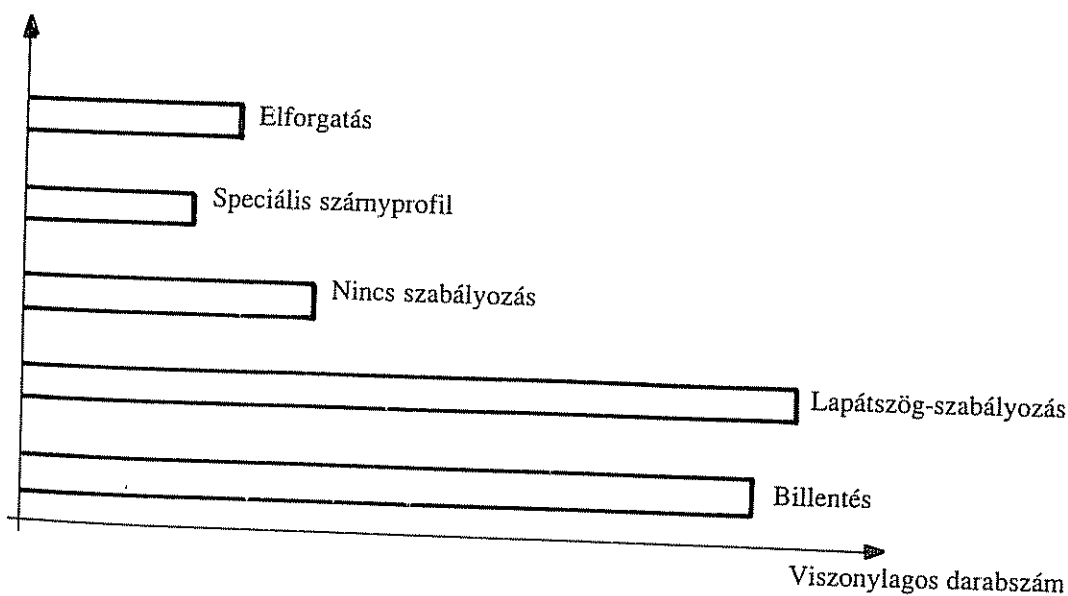
Ez a fordulatszám a vezérelt gép f_v tápfrekvenciájával változtatható.

5.3.6. A leggyakoribb szabályozási megoldások a mechanikai kivitelek szerint

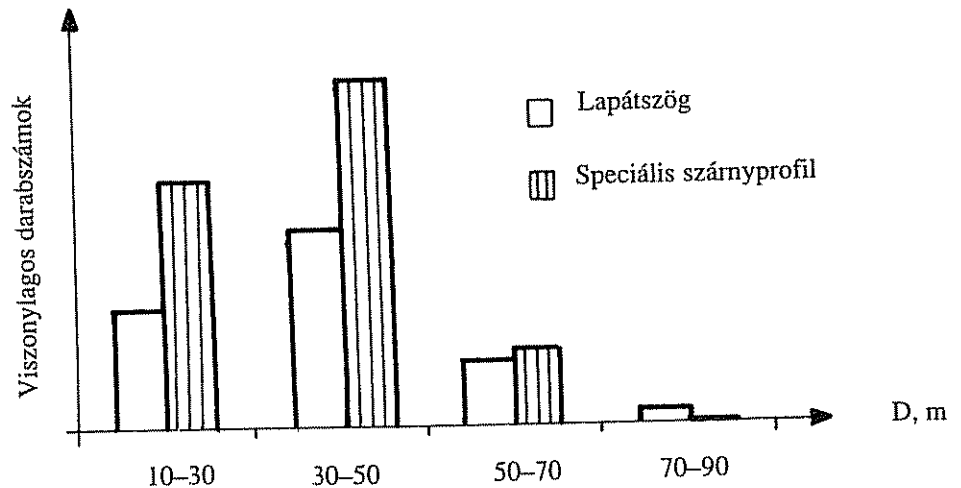
Így a fenti három szabályozási cél a megvalósításokban nem különíthető el éle-
en (hiszen a szélsősebesség itt egyben teljesítményt is jelent). Kis szélturbinák ($P_n <$
100 kW) esetén a következő lehetőségek közül választhatunk:

- a gépház és szélkerék függőleges tengely körüli elforgatása,
- a gépház és szélkerék vízszintes tengely körüli elbillentése,
- szabályozás nélküli kivitel,
- lapát egy, a csúcshoz közeli részének elforgatásával),
- a lapátszög változtatása a lapát hossz tengelye körüli elforgatásával (Pitch-control),
- a szárny profiljának aerodinamikailag megfelelő kialakítása, amely egy adott re-
latív szélsősebesség felett szélkerék sebesség és teljesítmény veszteséssel jár (az
angol és német szakirodalom ezt „Stall-control”-nak nevezi).

Nagy szélturbinák ($P_n > 600$ kW) esetén csak az utóbbi két megoldást alkalmaz-
ják. A billentés a kisebb berendezésekre jellemző (5.48. ábra), ezek nagy darabszá-
ma miatt változott az arány a javukra.



5.48. ábra A kivitelezett szélturbinák szabályozás szerinti aránya a különböző
gyakorlati szabályozási módok esetén



5.49. ábra. Különböző szabályozási módok részaránya – a kivitelezett berendezésekben a turbina átmérőjének függvényében

Nagy turbináknál a lapátszög változtatás és a speciális szárnyprofil dominál. A utóbbi években épült – főként kontinentális kiviteleknel – a Pitch rendszer a jellemző (5.49. ábra).

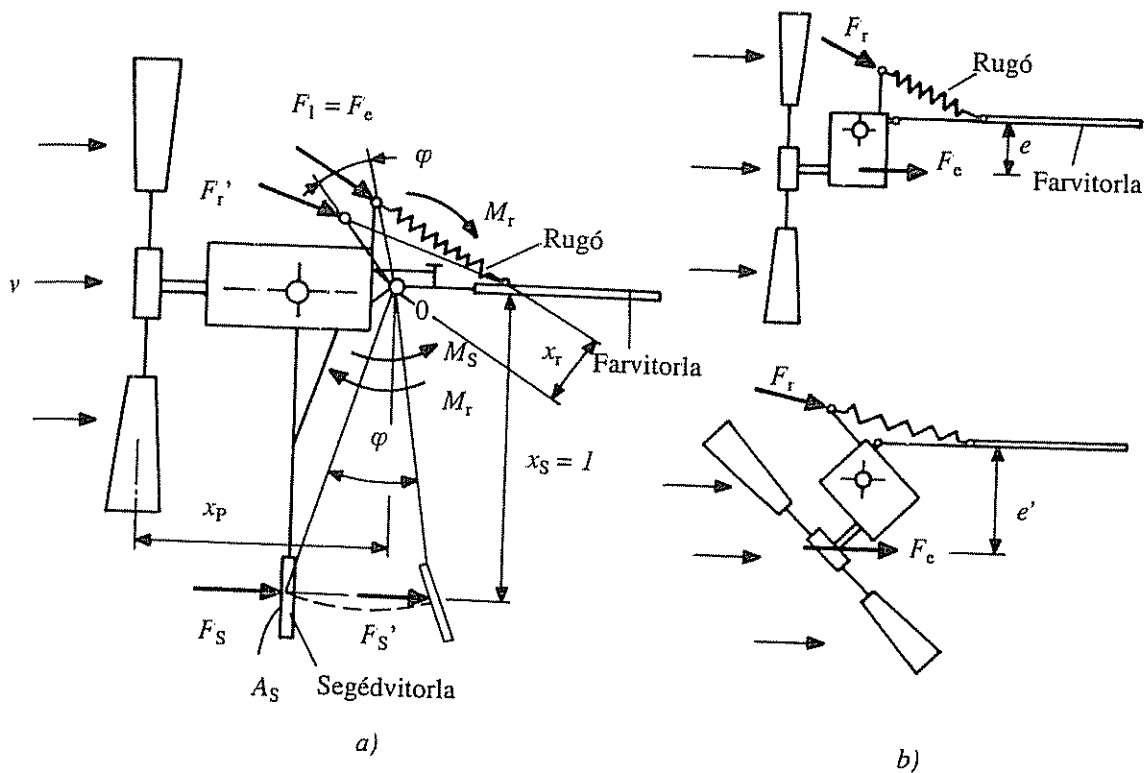
5.4. Viharvédelem segédlapáttal

A tervezőmunka fontos része a biztonságos viharvédelem megoldása. Mivel lassújárású rotoroknál a lapátszög állandó, a rotor lefékezése csak a túlpörgés ellen véd, a szélnyomás nagy viharban még megrongálhatja a szélerőgépet, hatásos védelem csak úgy biztosítható, ha az egész rotort kifordítjuk a szélirányból.

A kifordító szerkezetek azonban folyamatos üzeműek, így fontos szabályozó funkciót is betöltenek: a hasznos szélkeresztmetszet szélességtől függő szabályozásával kiegyenlítik a rotor fordulatszámát, megakadályozzák a rotor túlpörgését és behatárolják a torony szélnyomás okozta terhelését. A legtöbb esetben a szabályozó mechanizmus ellátja a hajtott munkagép védelmét is, szükség esetén azonban a hajtásláncba külön védelem is beépíthető (pl. nyírócsap, biztonsági tengelykapcsoló stb.).

A viharvédelmet is megoldó szabályozómechanizmusoknak több változata használható a lassújárású szélerőgépeken.

A rugós-segédlapátos módszernél (5.50.a. ábra) a farvitorla és a hajtóműház csuklósan kapcsolódik egymáshoz. Alaphelyzetben egy előfeszített húzórugó biztosítja a megfelelő irányúsíkot. A szabályozáshoz egy segédvitorlára van szükség, amely a rotor síkjával párhuzamosan oldalt kinyúlik a rotor teréből. A szél a segédvitorlán sebességétől függő nagyságú erőt fejt ki, amely kitérítő nyomatékot eredményez a hajtóműre. A rotor síkjának mindenkorli helyzetét a rugó és a segédvitorla kitérítő nyomatékának valamint a rotor precessziós nyomatékának egyensúlya határozza meg.



5 50. ábra. Rugós szabályozó mechanizmusok

Alaphelyzetben (kis szélességnél) a nyomatékegyenlet az 0 pontra:

$$F_s \cdot x_s - F_e \cdot x_r - M_p = 0,$$

ahol F_e a szabályozórugó előfeszítése, N .

Mivel az elfordulás szögsebessége kicsi, a precessziós nyomatékot elhanyagolhatjuk.

Növekvő szélességnél ez a kezdeti egyensúly megbomlik, a hajtómű a farvitorla síkjához képest 0 pont körül φ szöggel elfordul. A szabályozási szakasz kezdetére a következőket írhatjuk:

$$F'_s \cdot x'_s - F'_e \cdot x'_r = 0, \quad (5.42.)$$

Az ábra jelöléseit felhasználva és a rugóállandót D -vel jelölve az egyenlet jó közelítéssel:

$$\rho \cdot A_s \cdot \sin \varphi \cdot v^2 \cdot l(1 - \sin \varphi) - x_r (F_e + D \cdot \sin \varphi) = 0. \quad (5.43.)$$

Az (5.43.) egyenletet a szabályozószerkezet méretezéséhez használhatjuk fel. Például úgy, hogy adott v szélességnél meghatározott φ szögelfordulást írunk elő. A segédvitorla-kinyúlást (l) és a rugókar hosszát (x_r) felvéve, valamint a stabil alaphelyzethez szükséges F_e előfeszítő erőt meghatározva a rugókarakteristika ismeretében számíthatjuk ki a segédvitorla felületét (A_s):

$$A_s = \frac{x_r (F_e + D \cdot \sin \varphi)}{\rho \cdot \sin \varphi \cdot v^2 \cdot l(1 \pm \sin \varphi)}, m^2 \quad (5.44.)$$

A szabályozás segédvitorla nélkül is megoldható, ha a hajtóműház és a farvitorla excentrikusan kapcsolt (50.b. ábra). Ebben az esetben a kitérítő nyomatékot a rotor ellenállása szolgáltatja. Az előzőekhez hasonlóan levezethető az a nyomaték egyenlet, amelynek alapján az excentricitás (e) mértéke és a rugókarakterisztika illeszthető, a kikapcsolási szélsősebesség ($v_{ki} = 10-12 \text{ m/s}$) a gépen beállítható.

Rugó nélkül is megoldható a rotor leszabályozása – tömegáthelyezéssel. A rotor-tengely és a függőleges tengely ez esetben is eltolással készül. A rotor és hajtóműház szélirányból történő kifordulásakor egy ferde csap körül elforduló farlapát megemelkedik. Ha a szélnyomás csökken, ez a tárolt helyzeti energia fordítja vissza a rotort a szélirányba.

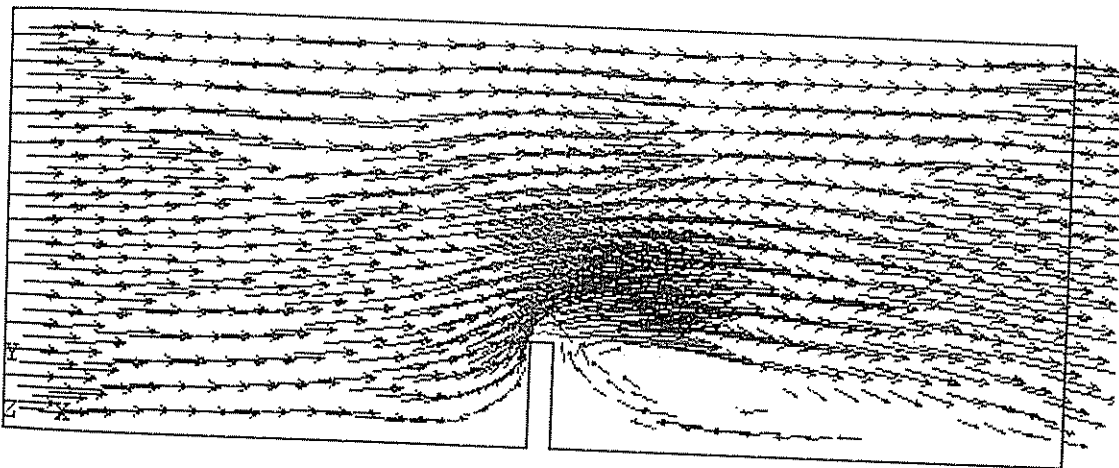
Az említett megoldások közül a biztonságosabb, könnyen beszabályozható rugósegédlapátos szabályozástechnika az elterjedtebb.

6. A SZÉLGENERÁTOR RÉSZEGYSÉGEINEK REZGÉSEI, A FOLYAMATOK MODELLEZÉSE

6.1. Aerodinamikus erők és együtthatók

A körüláramlott testre aerodinamikus erők hatnak. A test külső felületét a túlnyomásból és a szívásból eredő merőleges terhek, valamint a súrlódási erőkől származó tangenciális terhek veszik igénybe.

A levegő viszkozitása miatt keletkező súrlódási erők sokkal kisebbek, mint azok az erők, amelyek nyomáskülönbségekből adódnak. A test minden külső felületére ható teher egyetlen eredőerővé fogható össze – olyan aerodinamikus erővé – amely az egész testre hat. A test felületére ható terhek nagysága az áramlás sebességétől és az irányától, a test alakjától, a levegő sűrűségétől, a határrétegtől, valamint a leválási pont helyzetétől függ. Közvetlenül a test előtt áramlástorlódás keletkezik (6.1. ábra).



6.1. ábra. Áramlás az akadály felett

A torlópontban $v_s = 0$, és így az áramvonal [32.] Bernoulli-egyenlete a következő:

$$p_z + \frac{\rho \cdot v_z^2}{2} = p_s + 0.$$

Ebből adódik a torlónyomás, amely a teljes nyomással egyenlő és

$$p_s = p_z + \frac{\rho \cdot v_z^2}{2} = p_z + q_z,$$

ahol a p_z , a q_z , és a v_z a zavartalan áramlás nyomása és sebessége, jóval a vizsgált test előtt. A homloklapfelület szél felőli oldalának többi pontján a nyomás kisebb, mint p_s , mivel az áramlás ezeken a pontokon nem fékeződik le teljesen.

A testek körül áramló levegőnek, a kontinuitási egyenlet értelmében a test mindkét oldalán felgyorsulva kell tova mozognia, aminek következtében a statikus nyomás az oldalfelületeken csökkenni fog. Az éles sarkokon határréteg-leválás következik be, és örvények keletkeznek.

A leválás miatt ezen a falszakaszon a nyomás a legközelebbi áramvonalakban levő nyomástól különbözik, és empirikus módon határozható meg. A mérési adatok olyan nyomáseloszlást mutatnak, mint amilyen a 6.2. ábrán látható hasáb hosszmet-szetén.

Felületének helyi terhét a nyomáskülönbség hozza létre. Ha a testet légátnem-eresztőnek tételezzük fel, akkor a helyi teher egyenlő a körüláramlott test felületének a kérdéses pontban levő nyomása és a zavartalan p_z áramlástól körülvevő test statikai nyomása közötti különbséggel, a testtől igen nagy távolságra. Szélteher esetén p_z megfelel a légköri nyomásnak.

Ha a vizsgált felületelemre ható nyomást p_i -vel jelöljük, akkor ennek az elemnek a terhelése:

$$\Delta p = p_i + p_z$$

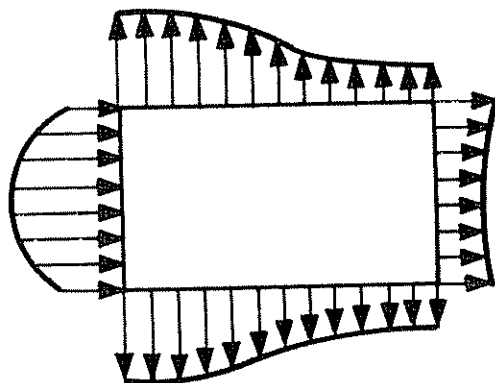
Be kell vezetni tehát egy dimenzió nélküli [87.] nyomástényezőt:

$$c_p = \frac{p_i \pm p_z}{q} = \frac{\Delta p}{q}$$

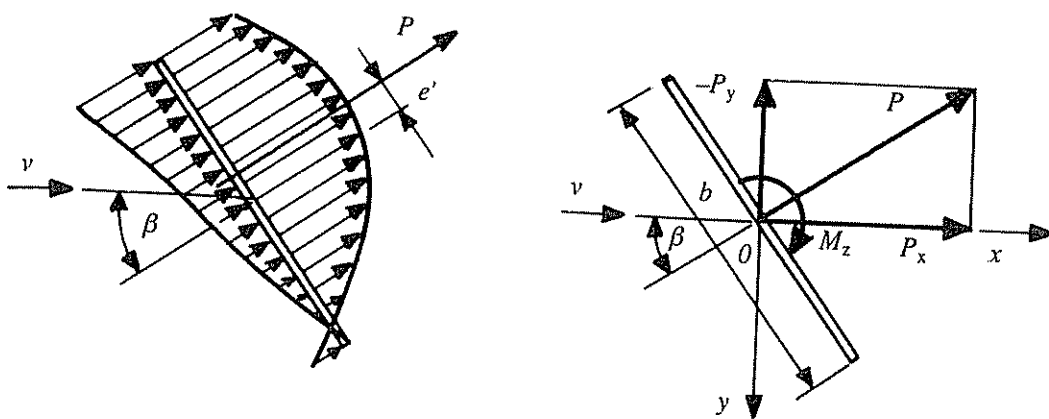
Ezáltal a terhek az áramlási sebességtől függetlenül összehasonlíthatók, és a különféle sebességekre egyszerűen átszámíthatók. Ha a testfelület c_p értékeinek az eloszlása ismert. Akkor ezeknek a felületeknek a helyi nyomásértékei, különféle szélsősebességek esetére, a következő egyenletből számíthatók ki:

$$p = q \cdot c_p,$$

ahol p a felületre merőlegesen ható nyomás, amely eltér a légköri nyomástól vagy szívás, q a dinamikus nyomás zavartalan áramlásban, nagy távolságra a test előtt.



6.2. ábra. Nyomáseloszlás sík áramlásban



6.3. ábra. Sík lemez terhelése: a) nyomáseloszlás; b) eredő és az erőösszetevők

Minden helyi teher (túlnyomás és szívás) és az összes részfelületre ható tangenciális teher (súrlódási erők) összege egy eredőt képez, amely a körüláramlott testre hat.

A 6.3. ábrán sík áramlásba helyezett, vékony, b szélességű és l hosszúságú síklemez látható.

A kis súrlódási erők elhanyagolása esetén a terhek eredőjére, [10.] azaz az F koncentrált erőre a következő összefüggés érvényes:

$$F = \int_A (p_0 \pm p_u) \cdot dA,$$

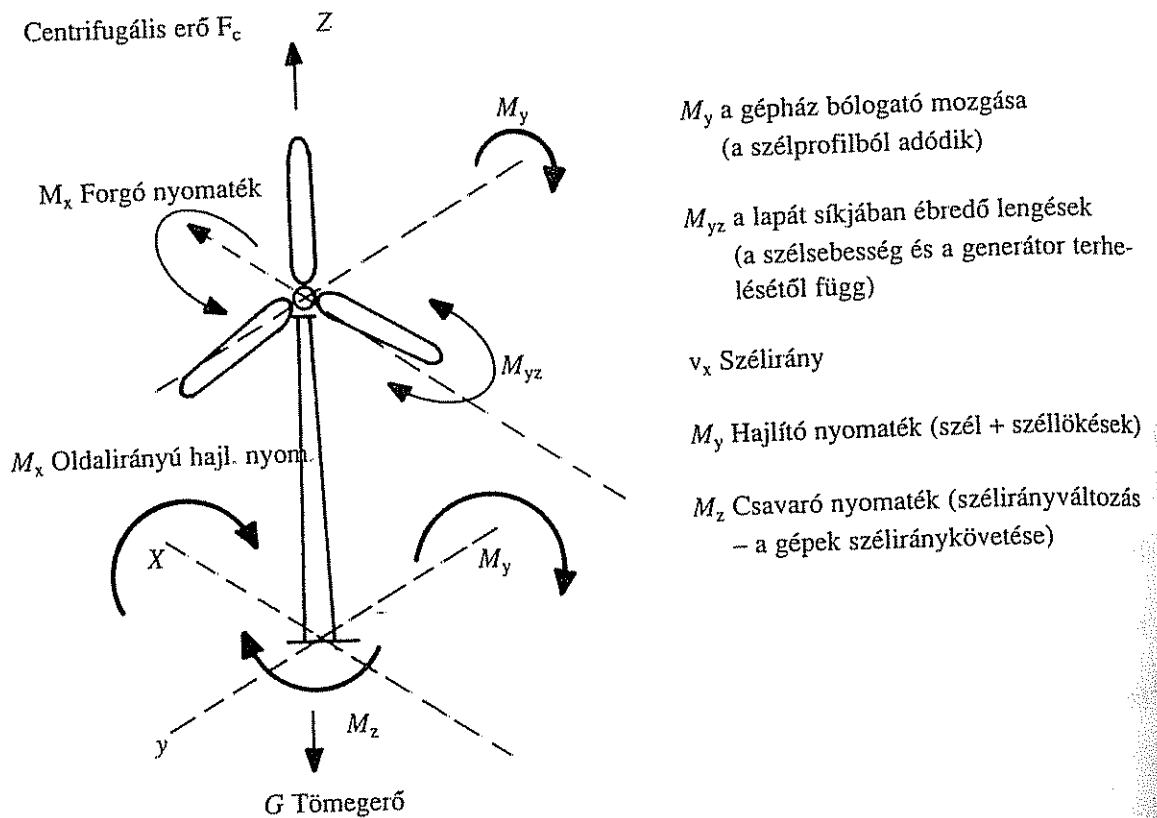
ahol $A = l \cdot b$; p_0 a nyomás a felső oldalon (szívás); p_u a nyomás az alsó oldalon (nyomás).

A p_0 és p_u nyomáseloszlás eredője ugyanabban az irányban hat. Az F erő a mért nyomáseloszlás vagy – a legegyszerűbb módon – a teljes teher közvetlen mérése útján határozható meg. Az F erőnek a dőféspontját a lemez középsíkján nyomásközéppontnak vagy semleges pontnak nevezzük. Az F erő a lemez középsíkjának minden más pontjára vonatkozóan nyomatékot okoz, amelyet aerodinamikus nyomatéknak nevezünk.

Síkbeli áramlás esetén az aerodinamikus erők eredője derékszögű koordináta-rendszerben két összetevőre bomlik, amikor is a koordináta-rendszer kezdőpontjára vonatkoztatott nyomatékot (az eltérítő nyomatékot) meg kell adni. Két koordináta-rendszert kell alkalmazni, közös kezdőponttal: az áramlással kapcsolatos x, y koordinátákat, amikor az x tengely mindig párhuzamos a sebesség vektorával és a testtel kapcsolatos x_1, y_1 koordinátákat. Az aerodinamikus erőösszetevőket és az aerodinamikus nyomatékot az xy koordináta-rendszerben kell meghatározni. Ekkor a következők érvényesek:

- aerodinamikus ellenállás: $F_x = qAc_x, N$;
- oldalerő: $F_y = qAc_y, N$;
- eltérítőnyomaték: $M_z = qAbc_{mz}, Nm$,

ahol q a dinamikus nyomás zavartalan áramlás esetén, a testtől távol, Pa ; b feltételezett vonatkoztatási hossz, m ; c_x dimenzió nélküli ellenállási tényező; c_y dimenzió nélküli oldalerő-tényező; c_{mz} dimenzió nélküli eltérítőnyomaték-tényező ha a vonatkoztatási felület m^2 .

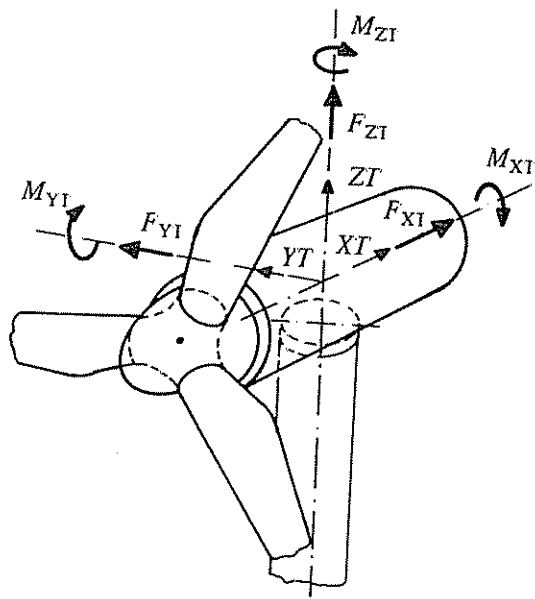


6.4. ábra. A szélérőmű terhelésrendszere és hatásmechanizmusa

Az átmenet az áramlással kapcsolatos x, y koordináták és a testtel kapcsolatos x_1, y_1 koordináták között az erőknek a megfelelő koordinátatengelyre való vetítésével érhető el. Amint az az ismertetett képletekből is látható, az aerodinamikusan erők az áramlási sebességtől, a levegő sűrűségétől, a test nagyságától és az aerodinamikusan tényezőktől függenek. A körüláramlott test nagysága egyik kiválasztott felület segítségével fejezhető ki. Ez a felület rendszerint a homlokfelület vetülete olyan síkra, amely merőleges a legfontosabb vagy a kezdeti sebesség vektorára. Minden test vonatkozási felülete változatlan, és független a sebesség irányának változásától. Az aerodinamikusan tényezők fejezik ki a körüláramlott testek geometriai alakjának, a határretegben folyó áramlás fajtájának, a leválásnak és az áramlás irányának az aerodinamikusan erőkre gyakorolt hatását. Az aerodinamikusan tényezőket a testtől távoli áramlási irány és a test tengelye közötti szög függvényeként adják meg (6.4. ábra).

Térbeli áramlás esetén a már ismertetett erőkön kívül még további összetevők is vannak: az F_z harmadik erőösszetevő a térbeli koordináta-rendszerben, valamint két további nyomaték: M_x és M_y . A szélgenerátor terhelése háromdimenziós áramlásban tehát három erő és három nyomaték segítségével határozható meg. Ezek az erők az áramlással kapcsolatos $x-y-z$ koordináta-rendszerben a következők (6.5. ábra).

- aerodinamikusan ellenállás: $F_x = qAc_x, N;$
- oldalerő: $F_y = qAc_y, N;$
- felhajtóerő: $F_z = qAc_z, N;$
- hajlítónyomaték: $M_x = qAbc_{mx}, Nm;$

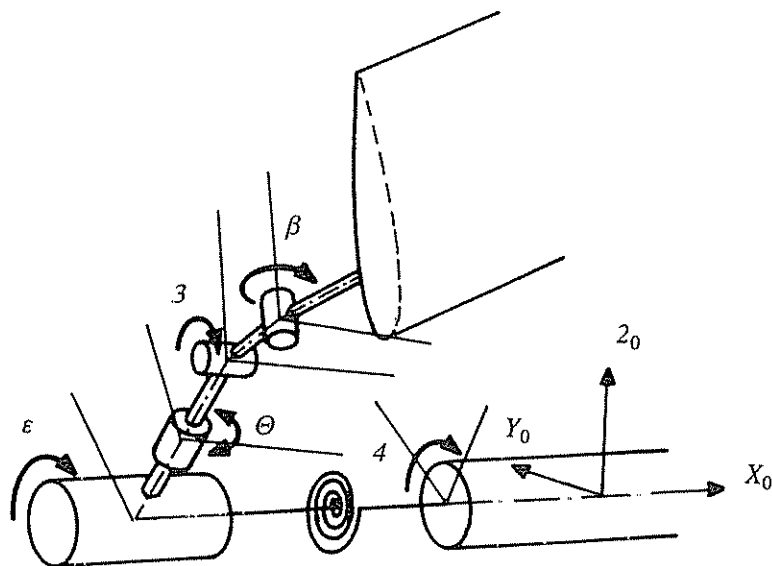


6.5 ábra. Az aerodinamikus erők derékszögű koordináta-rendszerben [8.]

- oldalirányú hajlítónyomaték: $M_y = qAbc_{my}$, Nm;
- csavarónyomaték: $M_z = qAbc_{mz}$, Nm.

Az aerodinamikus erők és nyomatékok mértékegység nélküli tényezői határozzák meg a különféle testek terhének fajtáját és nagyságát; ezáltal a terheket össze lehet egymással hasonlítani és különböző sebességek esetére meghatározni. Ezenkívül nem szabad megfeledkezni arról sem, hogy a test általánosan megválasztott felülete független a szél irányától.

A lapát és a főtengely kapcsolata illetve az elmozdulás-rendszere is kapcsolatban van a leírt koordináta-rendszerrel (6.6. ábra).



6.6. ábra. A lapát 3 szabadságfokú modellje

6.1.1. A szélteher számítása

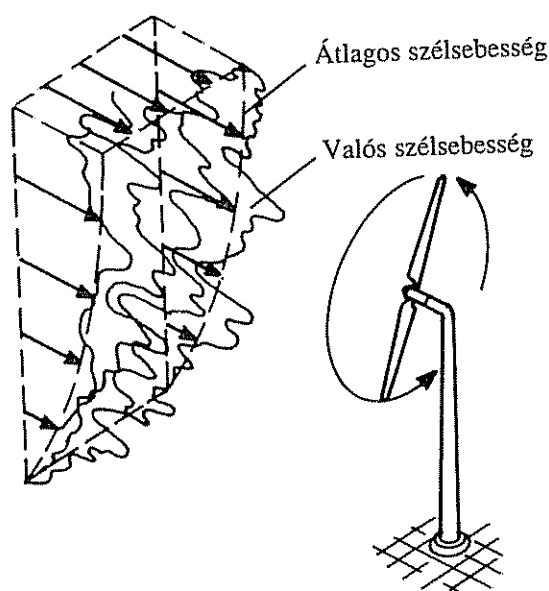
A szélteher a légáramlásnak építményre vagy szerkezetre kifejtett hatásából adódik, és számtalan tényezőtől függ, amelyek közvetlenül vagy csak közvetve hatnak, és amelyeket a következő négy csoportra lehet felosztani:

- a gradiens-szélsebesség és a levegő sűrűsége;
- az építmény környezete és a terep jellege;
- az építmény alakja;
- a szerkezeti megoldás (a tömegek és a merevség megoszlása, lengéscsillapítás)
- és az építmény nagysága (6.7. ábra).

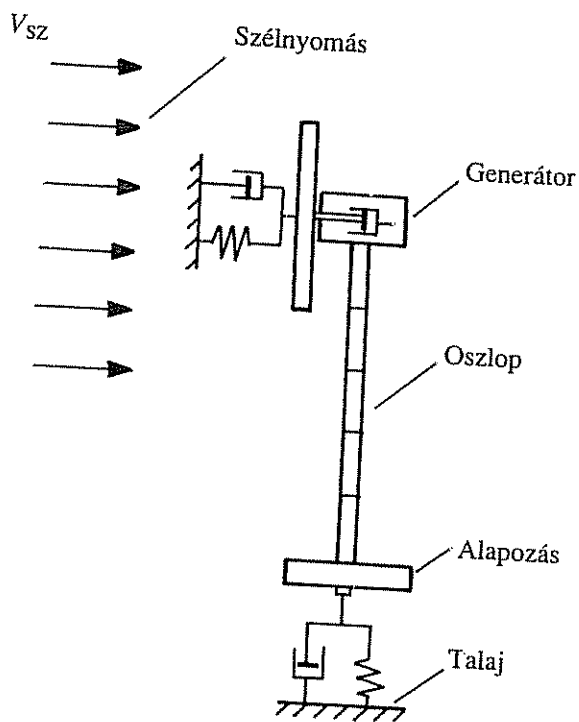
Az építmény terhét a nyomáskülönbségek és az építmény felületein a szél hatására keletkező súrlódási erők adják. Keletkezhetnek még tehetetlenségi erők is, ha az építmény kileng a légáramlatban. A szélgenerátorra alkalmazott mechanikai modell [48.] (KAISER, 1997) a 6.8. ábrán látható.

A légáramlatot a szél sebessége és iránya, a levegő sűrűsége, a sebességnek a magasságtól függő változása, valamint a turbulencia intenzitása határozza meg. A szél sebességére és egyéb tulajdonságaira – a terhelés egyik okaként – a terepadottságok is hatással vannak. A terhelést más tényezők is befolyásolják: az építmény alakja és nagysága, a szerkezet dinamikus tulajdonságai, a tartószerkezet, ill. a vizsgált építményrész geometriai méreteinek aránya és végül a szélökések. Ezekről a tulajdonságokról függ az építmény viselkedése a légáramlatban, és ezek eredményezhetik az aerodinamikus erők, a tehetetlenségi erők és a rugalmas erők kapcsolatát [17.].

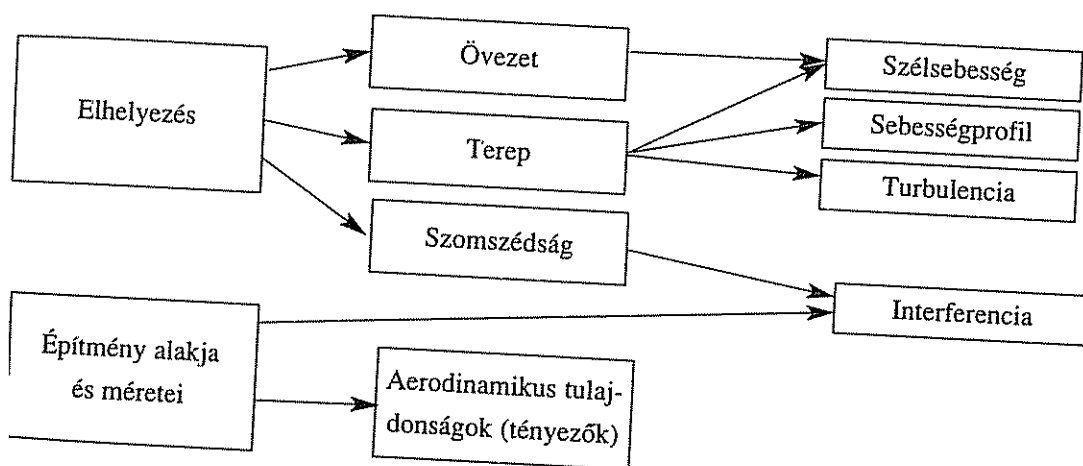
Minden tervezendő szerkezetet akkora teherre kell méretezni, amekkorát a szerkezetnek el kell tudnia viselni. Ez az ún. számítás szerinti teher, egy fiktív, meghatározott nagyság, és ezt az építmény előírás szerinti biztonságának figyelembevételével kell megállapítani. Ezért a fizikai nagyságokon kívül egyéb döntő tényezőket is figyelembe kell venni (6.9. ábra).



6.7. ábra. Az oszlop előtti szélnyomás eloszlás [29.]



6.8. ábra. A gép mechanikai modellje



6.9. ábra. A szélteher számítása szempontjából döntő fontosságú tényezők

6.1.2. Aerodinamikus karcsúság

szerkezet alakja és aerodinamikus tulajdonságai közötti összefüggés leírása a cél. Szerkezet geometriájának a befolyása az aerodinamikus-tényezőre igen nagy. Ennértékekként a kérdéses szerkezet, vagyis a körüláramlott test ún. aerodinamikus karcsúságát alkalmazzák. Aerodinamikus karcsúságnak nevezik a test hosszának egy szeltemetszeti mérethez (pl. a szélességhez) való arányát; egy fal aerodinamikus karcsúsága a szélirányra merőleges külső felület oldalárányával egyenlő.

A körhenger aerodinamikus karcsúsága:

$$\lambda = \frac{l}{d}$$

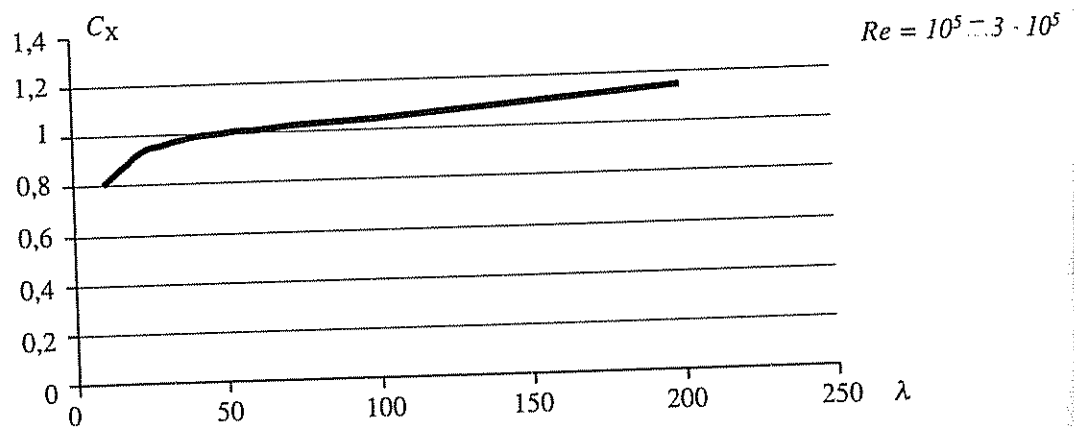
ahol l a henger hossza, m; d a henger átmérője, m.

Az aerodinamikus karcsúságnak döntő hatása van a körüláramlás módjára. Nagy karcsúság esetében a körüláramlás hasonlít a sík áramláshoz, és csak a test (pl. egy rúd) két végén keletkezik térbeli örvénylés. Ha ellenben kicsi az aerodinamikus karcsúság, akkor az egész áramlás térbeli. A szélárményékos oldal és a szél felőli oldal közötti nyomáskülönbségek ekkor a rúd mentén keletkező és a rúdvégek körüli áramlások útján egyenlítődnek ki; ennek következtében kisebbek az aerodinamikus tényezők, mint nagy karcsúságú testek esetén. Körhenger esetén, ha $\lambda > 20 \dots 30$, akkor gyorsan nő az ellenállási tényező, és ha $\lambda > 50$ a Re -szám kritikusan aluli tartományban, ill. ha $\lambda > 30$ az Re -szám kritikusan túli tartományában, akkor c_x gyakorlatilag már éppen olyan nagy, mintha $\lambda = \infty$ lenne. Az aerodinamikus karcsúságnak nemcsak a rudak aerodinamikus tényezői szempontjából van jelentősége, hanem minden karcsú építmény esetében is, mint a magas, henger alakú tartályok, hűtőtornyok, póznák, kémények és szélterelő oszlopok.

Változó keresztmetszetű épületek dinamikus karcsúsága (6.10. ábra) a következő képlettel fejezhető ki:

$$\lambda = \frac{h^2}{A}$$

ahol h az épület magassága; A az építmény vetülete függőleges síkon.



6.10. ábra A körhenger ellenállási tényezőjének az aerodinamikus karcsúságtól való függése

6.1.3. A holt zóna és az interferencia

Az áramlástól körülvevett test mögött – az utóáramlási övezetben – ún. holt zóna alakul ki, amely aerodinamikus árnyéknak nevezhető. Itt nyomáshiány mutatkozik, az áramlási sebesség kisebb, mint a test előtti zavartalan áramlásban. A holt zóna jelentős nagyságú lehet. Ha ebben a szakaszban még egy további test is van, akkor az er-

re a testre ható aerodinamikus erők, a lecsökkent áramlási sebesség következtében kisebbek, mint egy zavartalan áramlásban elhelyezkedő ugyanilyen test esetében. Ha a két test közötti távolság kicsi, akkor az áramlás irányában levő második test olyan nagy szívásba (légritkulásba) kerülhet, hogy az aerodinamikus erők a testen az első testtel ellentétes irányban hatnak. A második test befolyásolja az első test körüli áramlást, és így a két szomszédos test kölcsönhatásba kerül egymással. Ezt a jelenséget nevezik interferenciának.

6.1.4. Az aeroelaszticitás

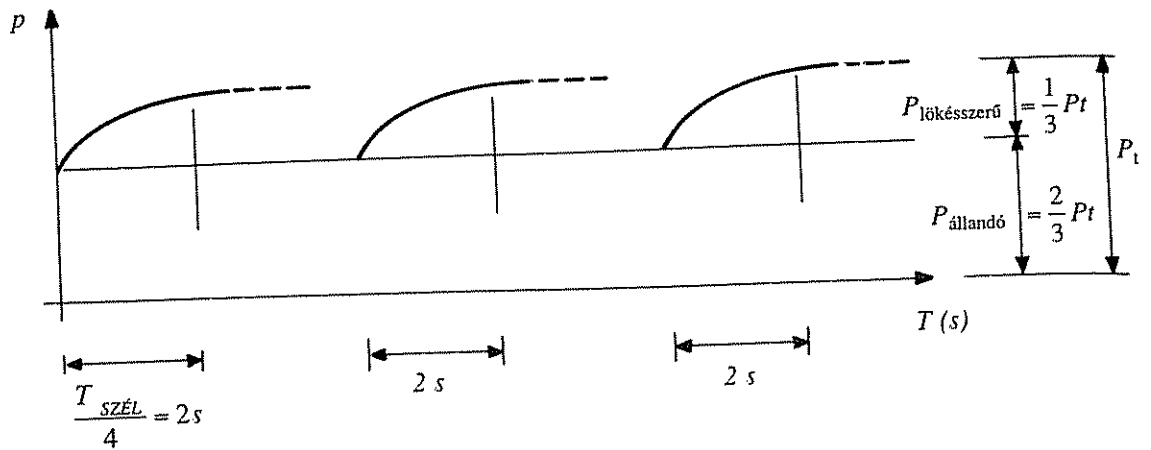
A széllökés rezgésbe hozhatja az építményt; ebben a szerkezet alakjának és rugalmasságának fontos szerepe van. Az építmény az aerodinamikusan, az elasztomechanikus és a tehetetlenségi erők hatására rezgésbe jön. Ezeknek az erőknek a kölcsönhatását és a szerkezetekre való hatását az aeroelaszticitás keretei között kell vizsgálni. Ha mindhárom ismertetett erő együtt hat, akkor az aeroelaszticitás dinamikus problémájáról van szó, ha pedig hiányzik a tehetetlenségi erő, akkor a statikus problémáival állunk szemben.

A dinamikus jelenségeket kényszerrezgésekre és öngerjesztett rezgésekre lehet felosztani. A kényszerrezgések magukban foglalják a dinamikus választ, az ún. örvény által keltett rezgést; azonban részben az öngerjesztett rezgések jellegét is magán viseli. A külső gerjesztésű rezgések csak külső erők hatására keletkeznek, amelyek idővel a rendszer rezgéseitől függetlenül megváltoznak; az örvények által keltett rezgés ezzel szemben a rendszer rezgésével együtt alakul ki. Fontos különbség a kényszer- (külső gerjesztésű) és az öngerjesztett rezgések között az, hogy a kényszerrezgéseket gerjesztő erő a szerkezetrezgésektől függetlenül keletkezik, míg az öngerjesztett rezgések a rezgéssel együtt eltűnnek. Az öngerjesztett rezgések az ismétlődő viharos széllökés esetén a rezgés lefolyása a rezgő rendszer meghatározott tulajdonságaitól függ. A terhek a rezgésekkel kölcsönhatásban állnak, és a rezgő rendszer határozza meg őket. Tehát visszacsatolás van a gerjesztő erő és a szerkezet reagálása között.

6.1.5. A széllökések dinamikus hatása

A széllökések közvetlen hatása természetesen szélirányú rezgéseket okoz. A szél-lökések közvetlen dinamikus hatását RAUSCH tárgyalta először (RAUSCH, 1968.) [78.]. A széllökés nem statikusan (azaz végtelenül lassan) terhel rá az építményre, ezért már egyszeri széllökés is dinamikus többletterhelést okoz. E dinamikus többletterhelés nagysága a széllökés kifejlődés időtartamának és az építmény (szélirányú) sajátrezgésszámának az arányától függ. Minél merevebb az építmény (azaz minél kisebb a rezgésideje), annál kisebb a dinamikus hatás, mivel az építmény sajátfrekvenciájához képest annál lassúbb a teherátadás, és annál inkább megközelíti a széllökés a statikus (végtelen lassú) megterhelést. A széllökés kifejlődésének görbét Rausch negyed szinuszhullámnak tekinti és feltételezi, hogy a teljes p_t torlónyomásnak $2/3$ része hat állandóan, és csak $1/3$ -a lökésszerűen (6.11. ábra).

Így levezethető, hogy $p_{lökésszerű}$ -t egy $(1 + \beta)$ tényezővel kell megszorozni ahhoz, hogy megkapjuk a dinamikus igénybevételeket. A dinamikus többletet reprezentáló

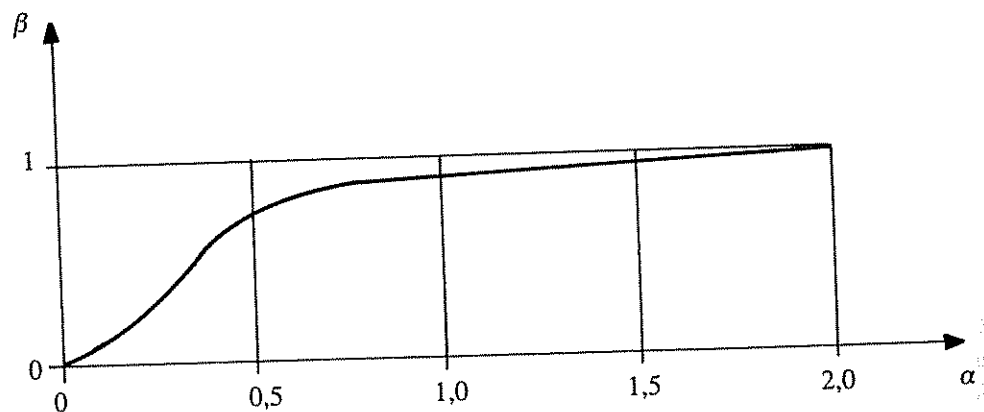


6.11. ábra. Rausch által alapul vett szellökések

β -tényezőt, az építmény T_S sajátrezgés idejének és a szellökés kiegészített („teljes”) $T_{szél}$ rezgésidejének $\alpha = T_S/T_{szél}$ hányadosától függő

$$\beta = \frac{\alpha}{|\alpha^2 \pm 1|} \sqrt{1 \pm \alpha^2 \pm 2\alpha \cdot \sin \frac{\pi}{2\alpha}}$$

kifejezés adja meg (6.12. ábra).



6.12. ábra. Egy szellökés dinamikus többletének β tényezője

Így a dinamikus nyomás:

$$P_{din} = \frac{2}{3} \cdot p_t + (1 + 3\beta) \cdot \frac{1}{3} p_t = (1 + \beta) \cdot p_t$$

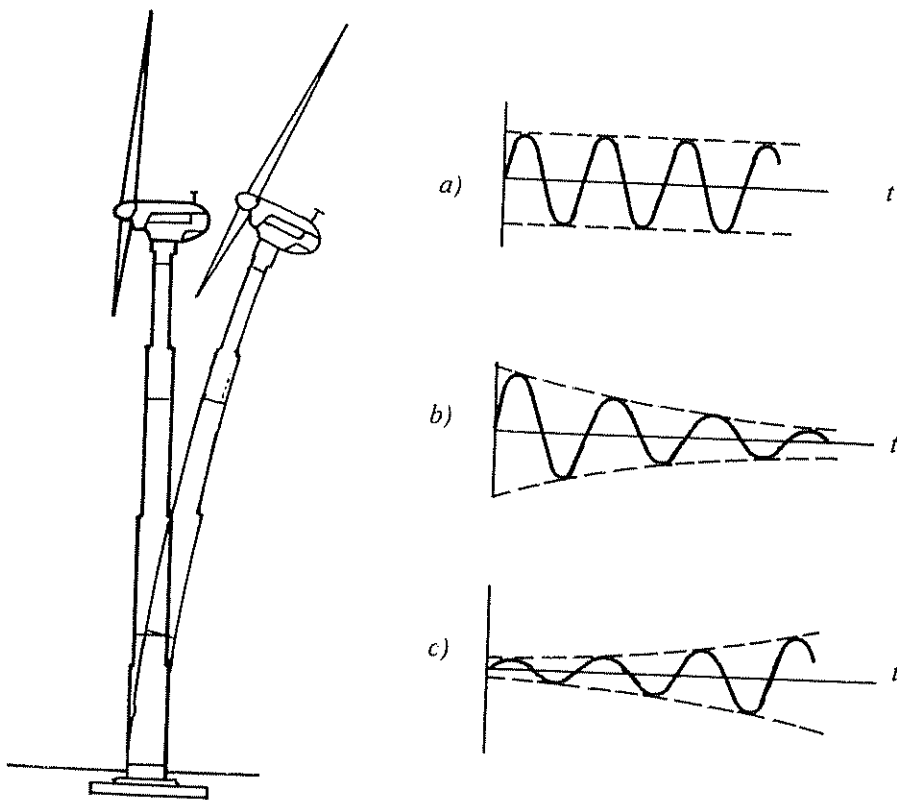
Szerint a szélteherből számíthatjuk. Egy szellökés kifejlődésének átlagos időtartamát Rausch szerint $T_{szél}/4 = 2s$ -ra tehetjük.

6.2. A szerkezet széllökésekre adott válasza (aerodinamikus admittancia)

A széllökés az építményt (szélgenerátor, vagy más magas, karcsú szerkezet) a szél irányával párhuzamos síkban rezgésbe hozza. Ezt a rezgést a szélsébség-ingadozás a frekvencia széles tartományában hozza létre. A szerkezet dinamikus válasza a mechanikus admittanciával kifejezett merevségétől és a széllökés energiájának gerjesztő erővé való átalakulásától függ. A széllökés hatására az egy szabadságfokú és az ω_0 saját frekvenciájú rendszernek a gerjesztésre adott legerősebb válasza akkor következik be, ha a sebességingadozás frekvenciájának és a mechanikus admittanciának időszaka egybeesik.

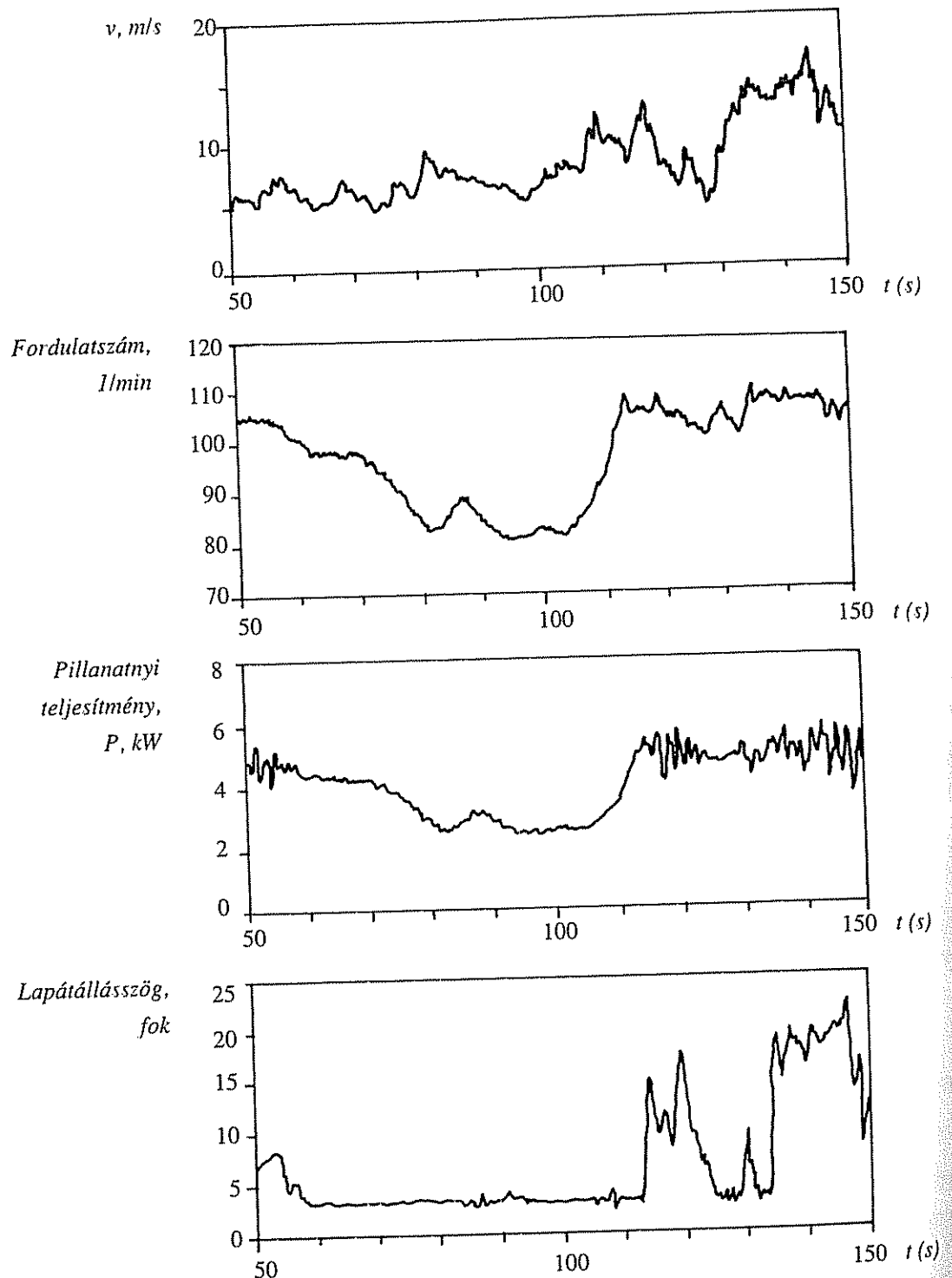
Ahhoz, hogy az építmény rezgése gerjeszthető legyen, a széllökésnek nemcsak megfelelő frekvenciájúnak, hanem az építmény nagyságának megfelelő hullámhosszúnak is kell lennie. Ez a viszony a λ/l hányadossal vehető figyelembe, ahol λ a széllökés hullámhossza, l az épület egyik lineáris mérete. Ebben az esetben tehát a lineáris turbulencia mértékének és az építmény nagyságának viszonyáról van szó.

Ha a széllökés frekvenciája igen nagy ($\lambda/l \ll 1$), akkor a széllökések az építmény szél felőli oldalán enyhén hangolódnak egymáshoz, és ezáltal kevésbé hatá-



6.13. ábra. A rezgések leírása. a) periodikus, b) csillapított, c) gerjesztett

sosak. Ha a szélnyomás az egyik helyen növekszik, a másik helyen ugyanakkor csökkenhet is. Ha a szélhőkés frekvenciája kicsi ($\lambda/l \gg 1$), akkor az építmény falán a szélhőkés erősen összehangolódnak egymással, és nagyon hatásosakká válnak. Ekkor nagy szélhőkésokról beszélhetünk, mely az egész szerkezetre kihat.



6.14. ábra. A lapát rezgései a szélgenerátor üzemelése közben.
a) szélsébség; b) fordulatszám; c) teljesítmény; d) állásszög

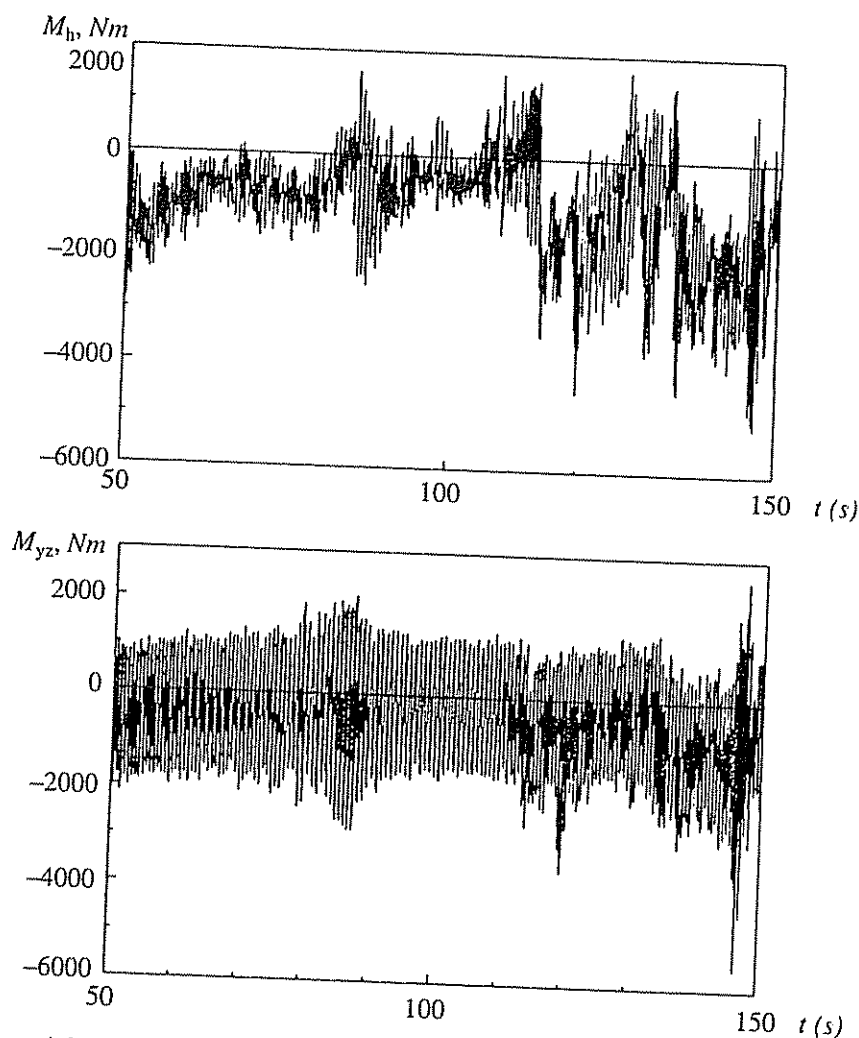
A szélökések hatásosságának (azaz a rezgésgerjesztésnek) mértékéül az aerodinamikai admittanciát használják, melyet aerodinamikus nagyításfüggvénynek is neveznek, és a következő empirikus képlettel határoznak meg:

$$X_a = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi\sqrt{A}}{\bar{v}} \right)^{4/3}}$$

ahol $\sqrt{A} = l$ a jellegzetes lineáris méret, A a fal szél felőli oldalának területe.

Meg kell jegyezni, hogy $\frac{n \cdot \sqrt{A}}{\bar{v}} > 0,13$ esetén, ahol n a sajátfrekvencia, az aerodinamikai admittancia gyorsan csökken (6.14., 6.15. ábra) [42.].

Az aerodinamikai és a mechanikai admittanciák a két spektrum – sebességingadozások és az építmény alakváltozása – közötti átviteli függvények. Az első szűrőként, a második erősítőként működik.



6.15. ábra. A lapát hosszirányú kihajlása keresztirányú (élirányú) rezgése

Az építmény legnagyobb alakváltozása, azaz a széllökés hatására adott válasza két részből áll: az \bar{x} átlagos alakváltozás és a pillanatnyi alakváltozás-növekedés összegéből. Ez utóbbi a σ_x szórás Ψ -szeres értékékként fejezhető ki:

$$x_{\max} = \bar{x} + \psi \cdot \sigma_x.$$

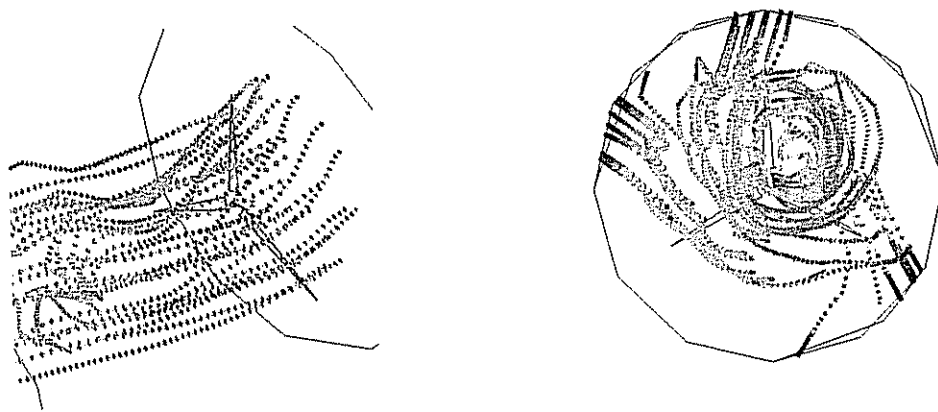
Átlagos alakváltozást átlagos sebességű szél okoz és a ψ együttható a választott átlagos időköztől és a pillanatnyi alakváltozás túllépésének valószínűségétől függ. A sebességingadozások Gauss-féle eloszlásának feltételezésével a legtöbb esetben a $\psi > 3$ értékeket alkalmazzák. A szélnyomás átlagtól eltérő része a $\psi \cdot \sigma_x$ szorzattal határozható meg. Az általánosan használt növelő tényezőt, mely az angol nyelvű szakirodalomban a széllökés választényezője (gust response factor) néven szerepel (széllökéstényezőnek is nevezik).

A széllökések időbeni eloszlása illetve a szerkezetre kifejtett hatása a 6.4.-es ábrán látható. A szélesebbesség-ingadozásnál a lapátelmozdulás hatványozottan nő.

6.3. Az örvények jellemzői

6.3.1. A lapátkerékről leváló örvények hatása

A szélből nyerhető energiatermelés során alapvető fontosságú a lapátkerék fordulatszámja. Az oszloptervezésnél is figyelembe kell ezt venni. Másik fontos szempont a szélerőmű-parkban telepített gépeknél, hogy tervezni a gépek közötti optimális telepítési távolságot. Elsősorban a lapátok alakja és a szélesebbességprofil jellege határozza meg a csavarodó áramvonalak jellegét (6.16. ábra).



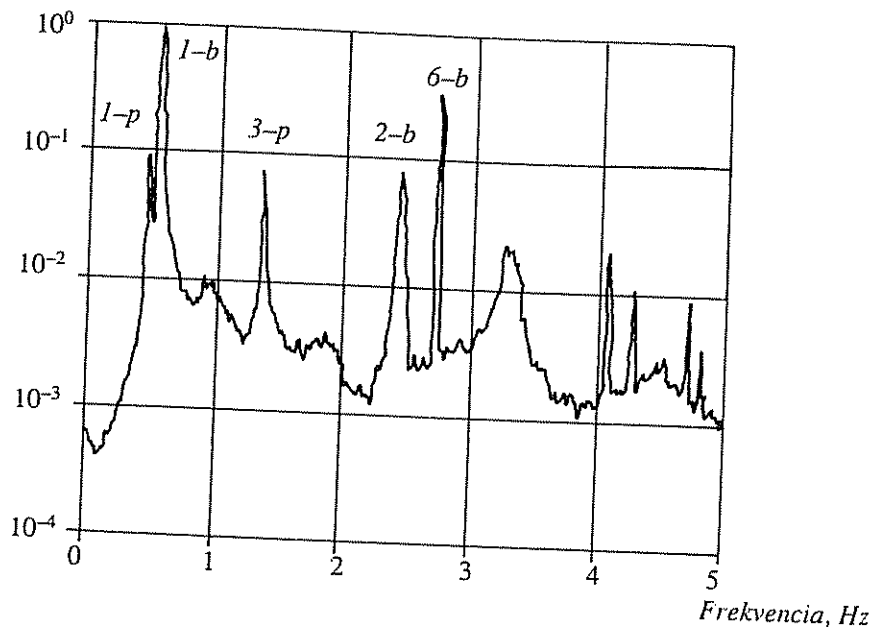
6.16. ábra. A lapátkerékről leváló örvények csavarodó áramvonalképe

6.3.2. A lapátok forgásából adódó sajátfrekvencia

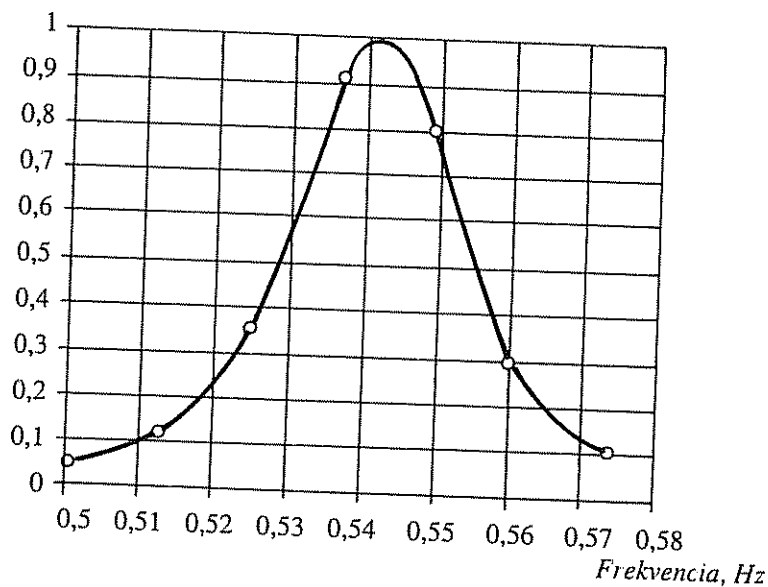
A lapátkerék forgásakor jelentkező sajátfrekvencia meghatározása az oszloptervezés során játszik fontos szerepet. Például a percnként húsz fordulattal üzemelő berendezés lapátkerékének sajátfrekvenciája 0,33 Hz. Alapvető követelmény, hogy az osz-

lop sajátfrekvenciája – a káros rezonancia elkerülése miatt – 10%-al magasabb legyen (6.17. ábra).

Deformáció, %



Deformáció, %



6.17. ábra. A sajátfrekvenciák számának növekedése (a) az üzemelő berendezésnél B oszlopfrekvencia, P lapátfrekvencia. (b) az oszlop sajátfrekvenciája kiemelve

6.3.3. A kör keresztmetsztű henger körüli áramlás

A testek körüli áramlás vizsgálatakor, ha a testek nem tekinthetők áramvonalasnak, akkor – a már említetteknek megfelelően – a viszkozitás által okozott súrlódási erők elhanyagolhatók, mert lényegesen kisebbek, mint a nyomáskülönbségből eredő erők. A fluidum viszkozitása ellenben erősen kihat a nyomáseloszlásra, mivel ez a döntő a

határréteg fajtája és a leválási pont helye szempontjából. Tehát ha a széláramlás útjába egy testet helyezünk, akkor – bizonyos, alább részletezendő feltételek mellett – e test két oldalán felváltva légörvények válnak le, amelyek oldalirányban mozgatják a testet. Ezt a henger mögötti örvényelrendeződést Benard–Kármán-féle örvénynek vagy Kármán-féle örvénysornak nevezik. Ha ez az örvényleválás periodikus, akkor a testet állandó sebességű szél is rezgésre gerjesztheti, keresztirányban. Az örvényleválás frekvenciája a körüláramlott test alakjától és az áramlás Reynolds-számától függ. Egy test közelében az áramlásra jellemző Reynolds-szám a következő:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu},$$

ahol v az áramlás sebessége a test előtt, m/s; d a jellemző szélesség (körhengernél az átmérő), m; ρ a levegő sűrűsége, kg/m³; μ a levegő dinamikus viszkozitása Pas.

Mivel, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, az egyenlet új alakban is felírható, amelyet gyakrabban [43.] szoktak használni. Ekkor:

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu},$$

ahol ν a levegő kinematikus viszkozitása m²/s-ban.

A Reynolds-szám a tehetetlenségi és a súrlódási erők közötti viszonyt fejezi ki. A Re kis értékei a tehetetlenségi erőkhöz képest sokkal több viszkozitási erővel végződő lamináris áramlásra utalnak, míg a Re nagy értékei, főként tehetetlenségi erők által meghatározott turbulens áramlásra. Különösen erősen jelentkeznek az aerodinamikai erők függése az áramlás jellegétől, ha az áramlás útjában álló test külső felületei konvexek, mégpedig nagy görbületes sugárral. A körhenger körüli sík áramlásból vonhatóak le következtetések a hasonló testek körüli áramlás jelenségeire. Mindezek alapján körhenger alakú testekre a Reynolds-szám függvényében az alábbi tartományokat lehetett megállapítani:

(Az egyes tartományok határait képező Reynolds-számok, természetesen nem határozott, pontos értékek, ezért rájuk az egyes szerzők némileg eltérő értékeket adnak). Alább két szerző által megadott értékek összehasonlítása található.

Először a KOLLÁR [51.] (1979) által közölt értékek:

- $Re < 10^2$ az áramlás lamináris nincs örvényleválás;
- $10^2 < Re < Re_{kr}$ itt az áramlás nagyrészt lamináris, de az örvényleválások frekvenciája jól definiálható, ezt. szubkritikus tartománynak is nevezik;
- $Re_{kr} < Re < 3 \cdot 10^6$ ebben a tartományban az áramlás turbulenssé válik, túlnyomórészt szabálytalan örvényleválások keletkeznek, ez a szuperkritikus, vagy aperiodikus tartomány;
- $Re > 3 \cdot 10^6$ esetében az áramlás turbulens marad, de az örvényleválások frekvenciája ismét periodikussá válik. Ez a transzkritikus tartomány.

A következő tartományhatárok a ZURANSKI [103.] (1986) által közölt értékek:

- $Re < Re_{kr}$ kritikuson aluli (lamináris) tartomány, a jól definiálható leválások tartománya;

- $10^5 < Re < 5 \cdot 10^5$ kritikus (átváltási) tartomány, a szabályos örvényleválások tartományából a szabálytalan lüktetések felé tartó átmenet;
- $Re > 5 \cdot 10^5$ kritikuson túli (turbulens) tartomány, ismét a periodikus örvényleválások tartománya.

ZURANSKI óvatosabban bánik a határokkal, azok jobban összemosódnak és nem négy, hanem csak három tartományt különböztet meg. A két típus között három jelentős különbség látszik. Az egyik, hogy az első esetben, a kritikus Re -számon aluli tartomány két részre bontható, van egy alsó, $Re < 10^2$ tartomány, ahol még nem tapasztalható örvényleválás. Ilyen a második csoportosításban nem található. A második különbség, hogy a ZURANSKI-féle átváltási tartományt a KOLLÁR-féle csoportosítás két részre bontja: egy kritikus Re - számon aluli és egy azon felüli tartományra, amelynek felső határa: $Re = 3 \cdot 10^6$. Ez a különbség a kétféle szemléletből adódik. Amíg az első esetben Kollár egy konkrét kritikus Re értékhez viszonyítja a folyamatokat, addig ZURANSKI [103.] kritikus értéknek egy tartományt ad meg és azt mondja, hogy ebben a tartományban nem lehet pontosan eldönteni azt, hogy az örvényleválások szabálytalanok lesznek – e vagy sem. A legnagyobb differencia a kritikuson túli tartományban van, ahol KOLLÁR szerint, ha $Re > 10^6$ akkor ismét periodikus az örvényleválások frekvenciája. Zuranski erről nem tesz említést.

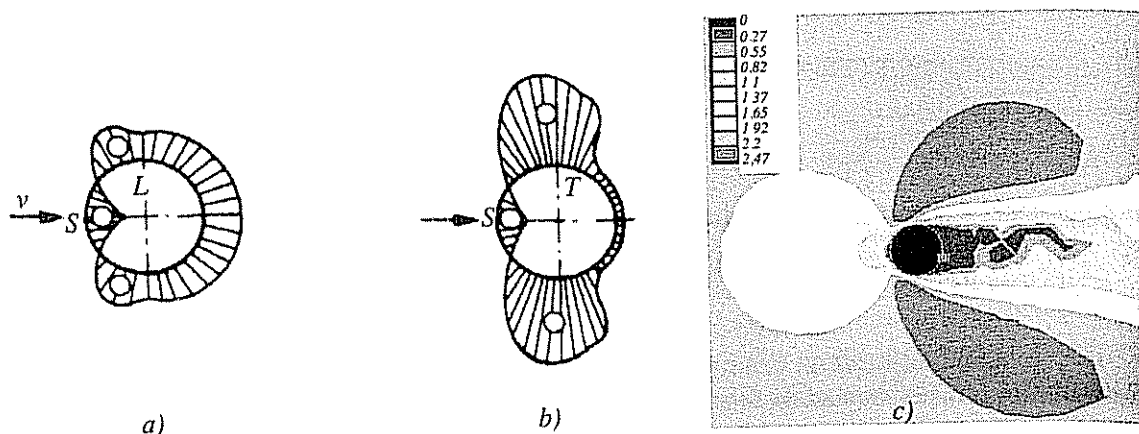
Meg kell jegyezni, hogy ez a transzkritikus tartománynak a felsoroltak közül a legkevésbé tisztázottak az áramlástanai viszonyok. ZERNA és KRÄTZIG, ROSHKO mérései alapján (legalábbis $Re < 10^7$ -ig) jól definiált örvényleválási frekvenciát tart érvényesnek. LENK viszont, a stuttgarti tv-tornyon hosszabb időn át rendszeresen végzett rezgés- és szélességmérései alapján azt találta, hogy az örvényleválás frekvenciája bármely szélességnél a torony sajátfrekvenciájával egyezik meg. Mindezt megerősítették ROSEMEIER elméleti kutatásai, aki áramlástanai oldalról igazolta, hogy az örvényleválás frekvenciáját a torony sajátrezgése szabályozza, ill. szabályozhatja (a leválási pont helyzetének befolyásolásán keresztül).

Valószínűnek látszik, hogy ez a jelenség a megfigyelt tv-tornyok, ill. kémények „egészben” való lengésével függ össze: az örvényleválás vezérléséhez ez a rúdszerű, „egészben” való lengés szükséges. A későbbiek során a számításokhoz a Kollár által megadott Re_{kr} érték lesz a mérvadó, mivel ez egy konkrét szám, így ehhez viszonyítva a számítás alapján kapott Reynolds-szám értékeket az áramlási viszonyok könnyen besorolhatók az egyes tartományokba. A kritikus Reynolds-szám: $Re_{kr} = 3 \cdot 10^5$.

A henger körüli áramlást és azon belül az örvényleválásokat érdemes még a leválás helyének kialakulása szempontjából is megvizsgálni. Ebből a szempontból az egyes tartományokban az örvényleválások helye a következőknek megfelelően alakul.

A kritikuson aluli tartományban a lamináris határréteg gyorsan elveszti kinetikus energiáját és a leválás hamar bekövetkezik az L pontban, amely kb. 80° -nak megfelelő ívhossznyi távolságra van a semleges ponttól. E körüláramlott szelvény mögött egy széles, zavart sáv keletkezik, az ún. holt zóna. A hátsó hengerfalon (a szélárnyékos falon) a két leválási pont között erős nyomáshiány uralkodik, ami a szél felőli oldalon levő túlnyomás következtében nagy nyomásellenállást idéz elő. A megfelelő ellenállási tényező: $c_x = 1,2$.

A kritikus tartományban a lamináris határréteg folyamatosan a turbulens határrétegbe vált át, amikor is a leválási pont hátrafelé, a szélárnyékos oldal felé tolódik el. Ennek következtében a holt zóna keskenyebb és az ellenállási tényező kisebb lesz. A kritikuson túli tartományban (6.18. ábra) a határréteg leválása a T pontban következik be, amely jóval hátrább van, mint a lamináris határréteg L pontja. Ha azonban az Re szám értéke növekszik, akkor a leválási pont kissé előbbre tolódik.



6.18. ábra. Áramlási képek: a) lamináris körüláramlás, b) turbulens körüláramlás nyomásviszonyai. c) VEM számított nyomáseloszlás (a sötét, az oszlop két oldalán látható aszimmetrikus sebességtartományban indul az örvényleválás)

A körhenger körüláramlására tehát az örvények a jellemzők, amelyek periodikusan és kölcsönösen keletkeznek a határleválási pont mögött, vagyis az ún. utószakaszban. A két örvénysor közötti h távolság és a két szomszédos örvény közötti távolság aránya $0,25 \dots 0,53$. A legtöbb esetben $h/l = 0,28$ örvényelrendeződések keletkeznek. A $h/l = 0,28$ az egyedüli stabil elrendeződés, minden más örvényelrendeződés instabil. Szabályos örvényrendszerek a Re -értékek szubkritikus tartományában jönnek létre.

Az örvényleválásra a mértékegység nélküli Strouhal-féle összefüggés alkalmazható:

$$Sr = \frac{f \cdot d}{v}$$

A leválások frekvenciája tehát:

$$f = \frac{v \cdot Sr}{d}$$

ahol: Sr a Strouhal-szám; $f = 1/T$ egy sor örvényleválásának frekvenciája (Hz); d a szelvény áramlásra merőleges mérete [körhengernél: d az átmérő, (m)]; v a szelvény előtti zavartalan áramlási sebesség, (m/s).

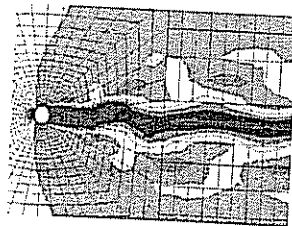
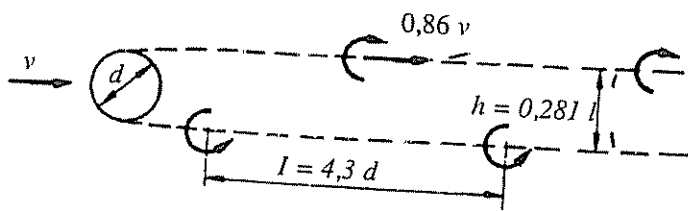
Az örvényleválásokra mutat példát a 6.19. ábra.

Az örvényleválás frekvenciáját megszabó Strouhal-szám a keresztmetszet alakjától és a Reynolds-számtól függ.

Mint ahogy az előző is sejthető a Strouhal-szám minden változása a c_x ellenállás tényező változásával függ össze. E két érték közötti összefüggés kapcsolatban van a határréteg leválásával és az örvénysoroknak a változásával. A c_x és az Sr közötti összefüggés a következő egyenlettel írható le:

$$Sr = 0,21 c_x^{-0,75}$$

A bemutatott egyenlet más, nem körhenger alakú gerendaszerű testekre is érvényes. Az ellenállási tényező annál nagyobb, minél kisebb az örvényleválás frekvenciája,



6.19. ábra. Kármán-féle örvénysor a) számított érték, b) VEM modellezett utószakasz

vagyis minél nagyobb az örvény kiterjedése és minél szélesebb az örvényút. Ha a két örvénysor közti örvényútba egy vékony lemezt tolunk be, akkor csökken az örvény nagysága és energiája, aminek következtében az ellenállási tényező is kisebb lesz. Ha az örvénysor közötti teret (a holt zónát) a henger mögött egy háromszögletű rúddal töltjük ki, akkor c_x még tovább csökken. Ha a keresztmetszetet a rúddal meghosszabbítjuk, akkor áramvonalas, kisebb c_x ellenállási tényezőjű test keletkezik.

6.4. A Kármán-féle örvénysorok szerkezetekre gyakorolt hatása

Periodikus örvényleválás következtében a nyomáseloszlás is periodikusan változik a hengerköpenyen, ami aerodinamikusan ingadozásokat és ezáltal az áramlási irányra merőleges pulzáló (lúktető) erőt idéz elő.

A keresztirányú gerjesztőerő időbeli változása ugyan nem követi pontosan a szinusz törvényt, de az egyszerűség kedvéért mégis a következő alakban írható fel:

$$P_y = c_y \cdot p_t \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t),$$

ahol: p_y a keresztirányú erő felületegységre eső értéke, Pa; c_y a keresztirányú erő alaki tényezője; p_t a torlónyomás alapértéke Pa; f a keresztirányú örvényleválás frekvenciája Hz.

A keresztirányú alaki tényező (c_y) értékére a mérések eredményei meglehetősen szórónak. Ez azt jelentheti, hogy az aperiodikus tartományban is vezérelheti a torony sajátrezgése az örvényleválást. Lehetséges az is, hogy a szabálytalan örvényleválásnak is van szabályos része, amely ha gyengébben is, de rezgésre gerjesztheti a szerkezetet. Feltehető, hogy a természetes széláramlás turbulencia foka kisebb a légcsatornában áramló levegőénél, és így a szélcsatornamérésekkel megállapított $Re = 3 \cdot 10^5$ -nél nagyobb Reynolds-számoknál is még periodikus lehet az örvényleválás. A transzkritikus tartomány c_y értékeit olyan karsú építményeken mérték, amelyek rúdként rezegtek, az örvényleválás frekvenciája tehát feltehetőleg a szerkezet sajátfrekvenciájával egyezett meg.

Ha az örvényleválás okozta nyomásváltozásokat az ellenállás tényezők oldaláról vizsgálva a következőképpen néz ki az örvényleválás folyamata. A c_x ellenállási két összetevőből áll: egy átlagos értékű állandó összetevőből és egy periodikusan pulzáló összetevőből. A c_y tényező egyetlen összetevője pedig periodikus, és átlagértéke nullával egyenlő. A c_y változásainak frekvenciája egyenlő az f örvényleválási frekvenciával. Ezzel szemben a c_x periodikus összetevőjének frekvenciája kétszer akkora, és ennek az összetevőnek az amplitúdója egy nagyságrenddel kisebb, mint c_y amplitúdója.

6.4.1. Rezgések a periodikus örvényleválás következtében

Ha az építményt széláram veszi körül, örvények keletkeznek és válnak le. Kivételnek csak azok a szerkezetek tekinthetők, amelyek a szél irányában igen karcsúk; így örvények csak kis mértékben keletkeznek. Egy állandó sebességű szélben álló építmény örvényleválása periodikus az építmény keresztmetszetére érvényes Strouhal-számnak megfelelő frekvenciával.

Ha az építményt körülvevő széláramlás a Reynolds-számtól függ, mint a körhenger esetében, akkor az örvényleválás periódusa is függ tőle. A periodikus örvényleválás a nyomás újra eloszlását okozza a hengerköpenyen, aminek következtében a szélirányra merőleges, ingadozó oldalero jön létre.

Ha az f örvényleválási frekvencia és az építmény n_0 saját frekvenciája egymással egyenlő, akkor rezonancia keletkezhet. Ilyenkor a szerkezet rezgésből eredő elmozdulása annál nagyobb lesz, minél kisebb a szerkezet merevsége, minél kisebb a csillapítás, és természetesen minél nagyobb a szél sebessége. Meghatározott szélesebség esetén mindkét fent említett frekvencia azonos lesz.

Ez a kritikus szélesebség:

$$v_{kr} = \frac{n_0 d}{Sr}, \text{ m / s,}$$

ahol n_0 a szerkezet saját frekvenciája, Hz; d a szerkezet átmérője (m); Sr a Strouhal-szám.

A szélgenerátor oszlopa esetén az ω_p körfrekvencia a következőképpen határozható meg:

$$\omega_p = 2\pi \frac{v_{kr}}{d}, \text{ 1 / s.}$$

Ha a rendszer csillapítását nagyon kicsinek tételezzük fel ($\gamma \ll 1$), akkor ha

$\frac{\omega_p}{\omega_0} = 1$ (rezonancia), akkor a legnagyobb elhajlás:

$$y_{\max} = \frac{\pi}{\delta} \cdot \frac{\rho v_{kr}^2}{2} \cdot \frac{c_y dl}{k}, \text{ m,}$$

ahol c_y az oldalero-tényező; l a henger hossza, m; π/δ a dinamikus együttható.

Mivel az az erő, amely az y_{\max} elhajlást idézi elő, a következő alakban írható fel:

$$F_y = y_{\max} k, \text{ N,}$$

így megkapható az a statikus erő, amely ugyanazt a y_{\max} elhajlást idézi elő, mint a vizsgált szélteher. Tehát:

$$y_{\max} = \frac{\pi}{\delta} \cdot \frac{\rho v_{kr}^2}{2} \cdot c_y dl, \text{ N}$$

A c_y együttható értékei aránylag széles határok között ingadoznak. WOOTTEN [101.] és SCRUTON szerint a körhenger c_y tényezőjének átlagos négyzetes értéke kb. 0,6, ha $Re < 10^5$, ez kb. 0,15-ra csökken, ha $Re = 5 \cdot 10^5$, és a Re növekedésével ismét enyhén nő. Számításokhoz a c_y értékei rendszerint 0,2...0,25 között vannak.

Amint az eddigiekből is kitűnik, az örvényleválások következtében keletkező rezgések rezonanciajelenségekről tanúskodnak. Ezek csak olyan szélességeknél tapasztalhatók, amelyek aránylag szorosan a kritikus sebesség határa körül mozognak, amplitúdójuk állandó és a szerkezet merevségétől és a csillapítástól függenek. Ha a szélesség nagyobb lesz, mint v_{kr} , akkor megváltozik az w_p frekvencia, és az amplitúdó csökken.

Szabályos örvényrendszerek az Re -értékek kritikusan aluli tartományában jönnek létre. Ha növekszik a Reynolds-szám és közeledik az Re_{kr} határértékhez, akkor kezdetben kisebb, rendszertelen lüktetések keletkeznek, amelyek azután a kritikus tartományban főszerepet játszanak. A kritikuson túli tartományban ismét némi rendszeres örvényelrendeződés figyelhető meg. Amelynek a leválási frekvenciáit LENK vizsgálatai szerint csak a szerkezet sajátfrekvenciája szabályoz. Az örvényleválás nemcsak végének oválissá válását is. Ilyen esetben a rezgés csillapodása csak gyenge lesz, és a gyűrűvel nem merevített szerkezetekben repedés, sőt törés is keletkezhet.

6.4.2. Oszlopok örvényleválások okozta rezgéseinek megelőzése

A kémények és tornyok rezgéseinek megelőzésére a következő eljárások ismertek:

- feszítőkötelek;
 - különböző megoldású érdes felületek (spirál bordák stb.), a periodikus örvényleválások zavarására;
 - utólagos belső burkolat és/vagy betétek, a csillapítás fokozására;
 - rezgő csillapító tömegek a legnagyobb elhajlás helyén;
 - a szerkezet merevségének növelése, ami által a sajátfrekvencia annyira megnő, hogy a kritikus sebesség a felületen nagyobb lesz a leggyakrabban előforduló szélességnél;
 - megfelelően méretezett tömeg pótlólagos elhelyezése a legnagyobb elhajlás helyén, ezáltal a csillapítás nő, a kritikus sebesség pedig csökken.
- A feszítőkötelek a szabadon álló és önhordó kémények esetén hatásosak (szükségtől még a kenderkötelek is hatásosak). A feszítőhuzalokkal tervezett kémény befogási merevsége kisebb és az ilyen szerkezetet – rezgésérzékenysége való tekintettel – mindig meg kell vizsgálni. Feszítőhuzalokkal azonban a lehetséges rezgések mindenestre hathatósan csökkenthetőek.

6.5. A mechanikai rezgések mérése

A gépek rezgési folyamatát általában a rezgés során érzékelhető kitérés nagyság, út (amplitúdó), frekvencia és fáziseltolódás jellemzi. Egyes esetekben a rezgési folyamatok pontosabb meghatározásához a sebesség és gyorsulás értékek ismerete is szükséges, ill. előnyt is jelenthet. Szerencsére a sebesség és gyorsulás érzékelése, vilamos jellé való átalakítása sokszor egyszerűbb, mint a kitérés nagyságának érzékelése. Ezért a rezgésátalakítók többsége sebesség, ill. gyorsulásérzékelővel működik.

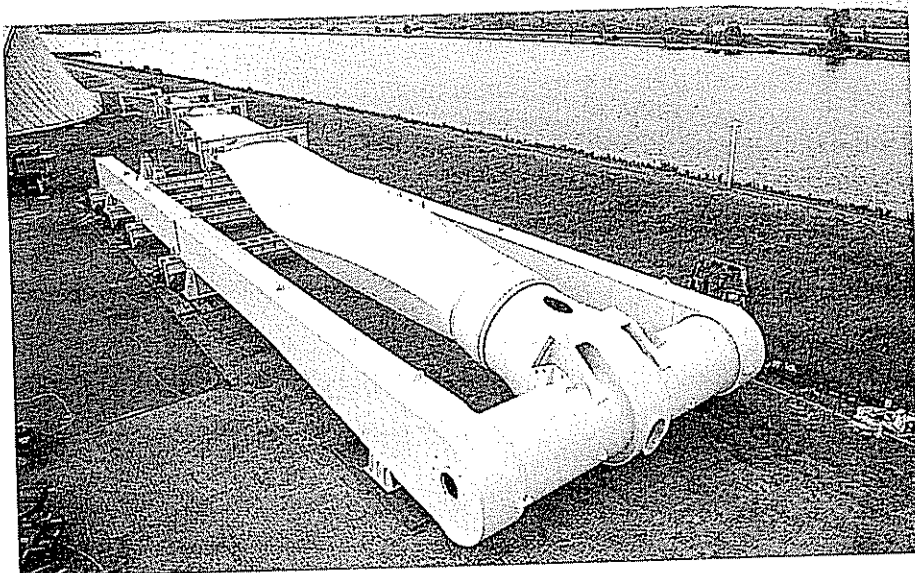
6.5.1. Lapátrezgések

A lapátfrekvenciákat gyakran rögzített helyzetben mérik, így tehát a lapátmerevség, amelyet a centrifugális erők okoznak számításba kell venni, [82.] mint ami kis mértékben növeli a frekvenciát. A sajátlengések gyakran a következő sorrendben fordulnak elő:

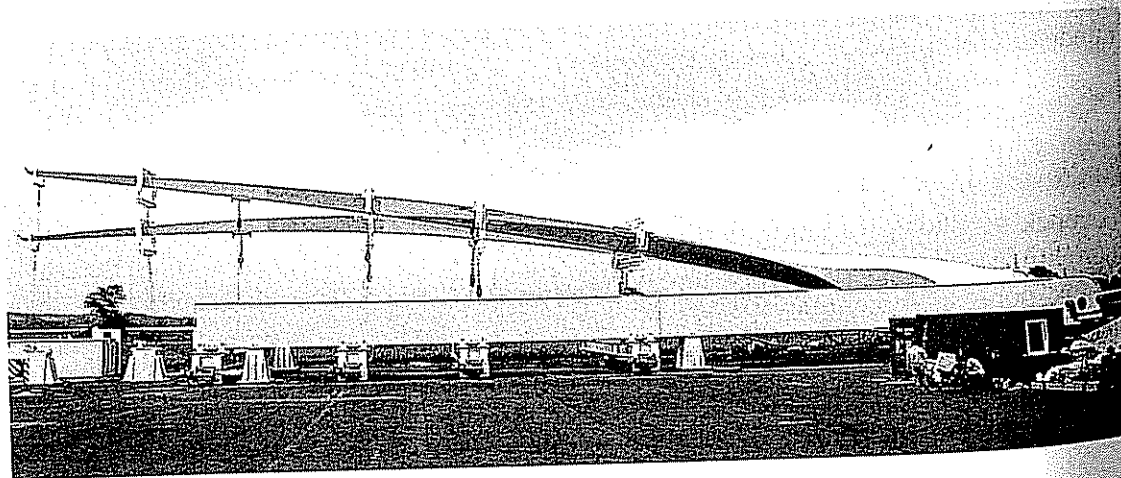
1. lapátirányú elhajlás;
2. élirányú;
3. második lapátirányú;
4. csavaró irányú.

A legnagyobb szárnylapát 52 m hosszú és 20 tonnás, a mérőállása 260 tonna tömegű volt. A méréskor a súlyerőből fakadó elhajlás szöge 10° -os volt a földfelszín irányában. Hat mérési pontot rögzítettek a terhelés közben. A végső terhelés elérte a másfélszeresét az üzemelés ideje alatt várható legnagyobbnak.

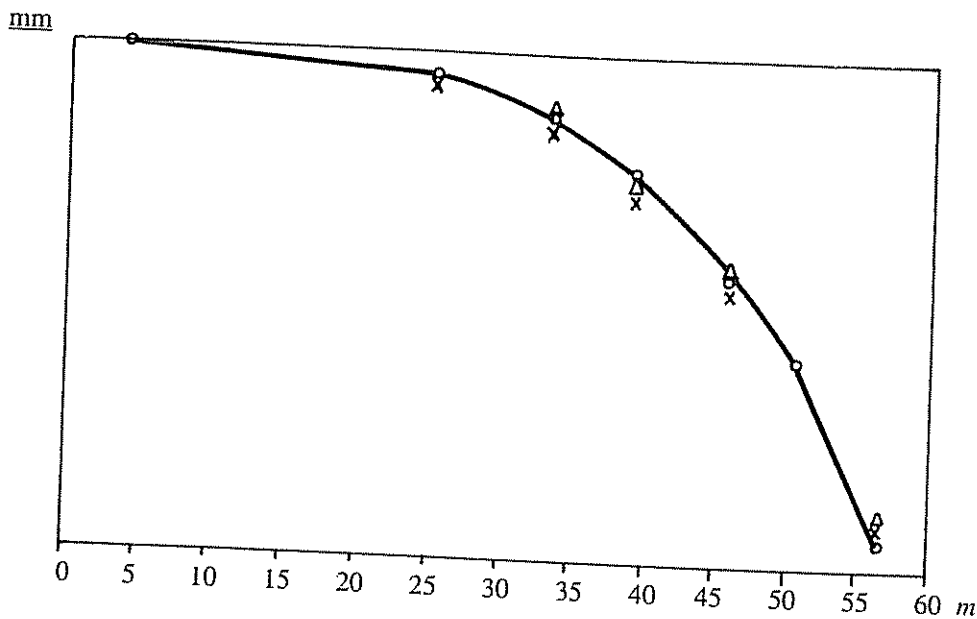
A szerkesztett fényképen jól látható az eredeti és a deformált szárnylapát. A megoszló terhelést több ponton felfekvő húzógyűrűkkel oldották meg (6.21. ábra).



6.20. ábra. A mérőállás



6.21. ábra. A deformált szárnylapát



6.22. ábra. A tömeg okozta kihajlás a három lapátnál. A görbe a számított értékeket jelöli

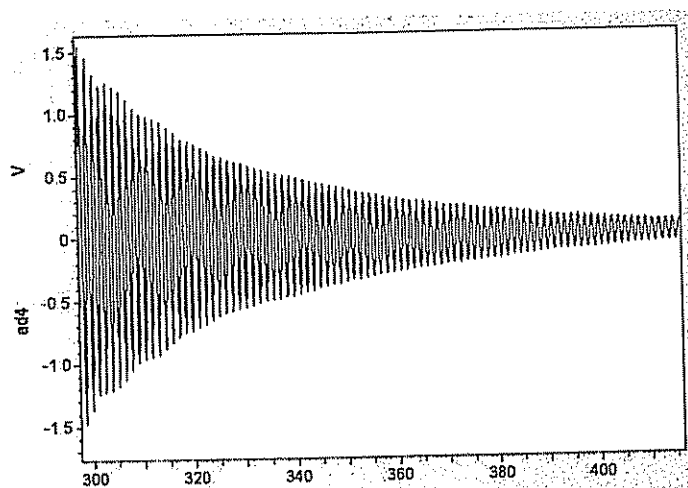
Az érzékelőket általában a mérendő testhez kapcsoljuk, vagy legalább hozzá szorítjuk, hogy azok mozgásjellemzőjét felvegyék, tehát a sebességgel vagy a gyorsulással arányos villamos jelet adjanak. Készülnek azonban érintkezés nélküli jelátalakítók is, amelyek sebességet vagy amplitúdót érzékelnek. Az érintkezés nélküli jelátalakítók általában a relatív mozgást érzékelik (pl. a csapágyházra felerősített érzékelő és a rezgő tengely közötti távolságot). Működési elvük szerint lehetnek elektrodinamikusak és kapacitásváltozáson alapulóak. Azt, hogy a rezgés melyik jellemzőjét (út, sebesség, gyorsulás) mérjük, azt a mérési feladat, ill. a rendelkezésre álló érzékelő fajtája határozza meg. A korszerű elektronikus készülékek azonban már bármelyik paraméter kijelzését lehetővé teszik differenciáló, ill. integráló áramkörök felhasználásával (6.22., 6.23. ábra).

A szélgenerátor gépházában történő rezgések mérését a 6.24. ábrán látható pontokon végezzük. A hajtási láncon vizsgált elemek viselkedését alapvetően a szélsébség, a széllökések időbeni eloszlása és a lapátkerék – generátor közötti elemek geometriai kialakítása határozza meg (6.25. ábra).

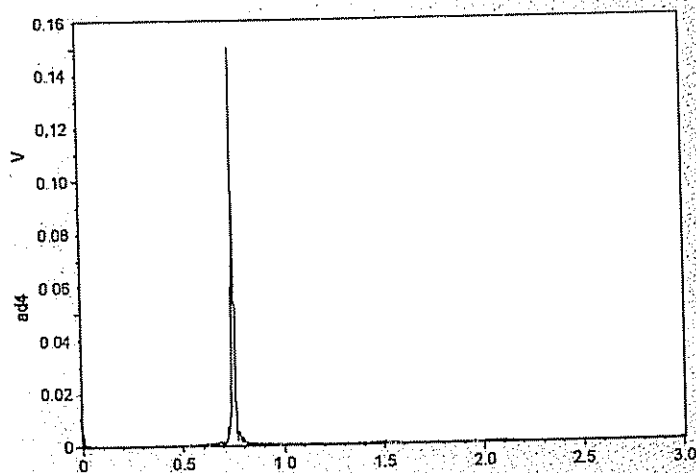
Ma a gyorsulásérzékelő berendezések a legelterjedtebbek és kijelző műszerükön a sebesség és kitérés értékek is leolvashatók. A gyorsulásérzékelők fő előnye, hogy viszonylag kis tömegűek és széles frekvenciatartományban használhatóak, mert viszonylag egyenletes a frekvencia-átvitelük.

A kis tömeg nemcsak az energia-felvétel és a mérendő gép elhangolásának elkerülése érdekében fontos, hanem azért is, mert előfordulnának olyan feladatok, amikor a gép egy pontjának a rezgését kell meghatározni. A gyorsulásérzékelő tömege nem lehet nagyobb a mért gép tömegének egytizedénél. A tág frekvenciatartomány azért is szükséges, mert a gépek néhány Hz-es lengéseitől kezdve, a golyóscsapágyak, gyorsan forgó turbinák, kompresszorok igen szapora ($f > 15$ kHz) rezgéséig szinte mindenféle frekvenciájú rezgések előfordulhatnak [98.]. Egyes gépek rezgései véletlenszerűek, sztochasztikusak. Ezek vizsgálatakor a tág frekvenciatartomány elengedhetetlen követelmény.

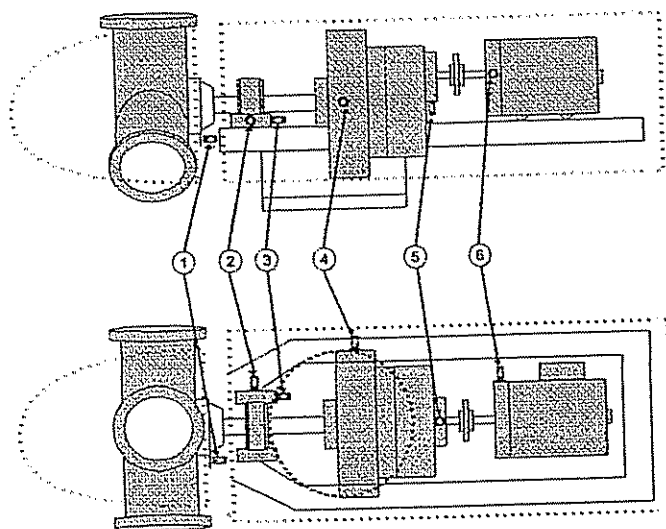
a)



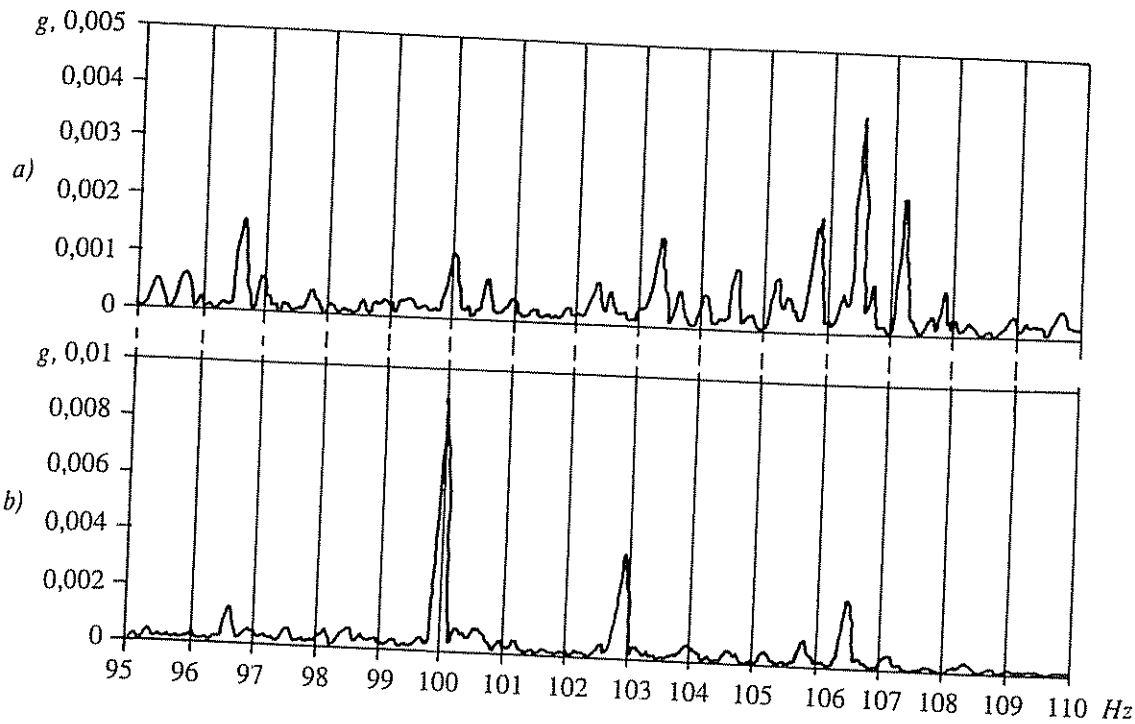
b)



6.23. ábra. A lapát sajátfrekvenciáját gerjesztett rezgéssel lehet meghatározni
a) lengésbe hozott szárnylapát mért kitérése, b) a Fourier transzformációval számított sajátfrekvencia



6.24. ábra. Mérési pontok a gépházban lezajló rezgések meghatározására



6.25. ábra. Sajátfrekvenciák: a) hajtóműn mért sajátfrekvenciák;
b) a generátor csapágyazásán mért sajátfrekvenciák

6.5.2. Oszlop és alapozás

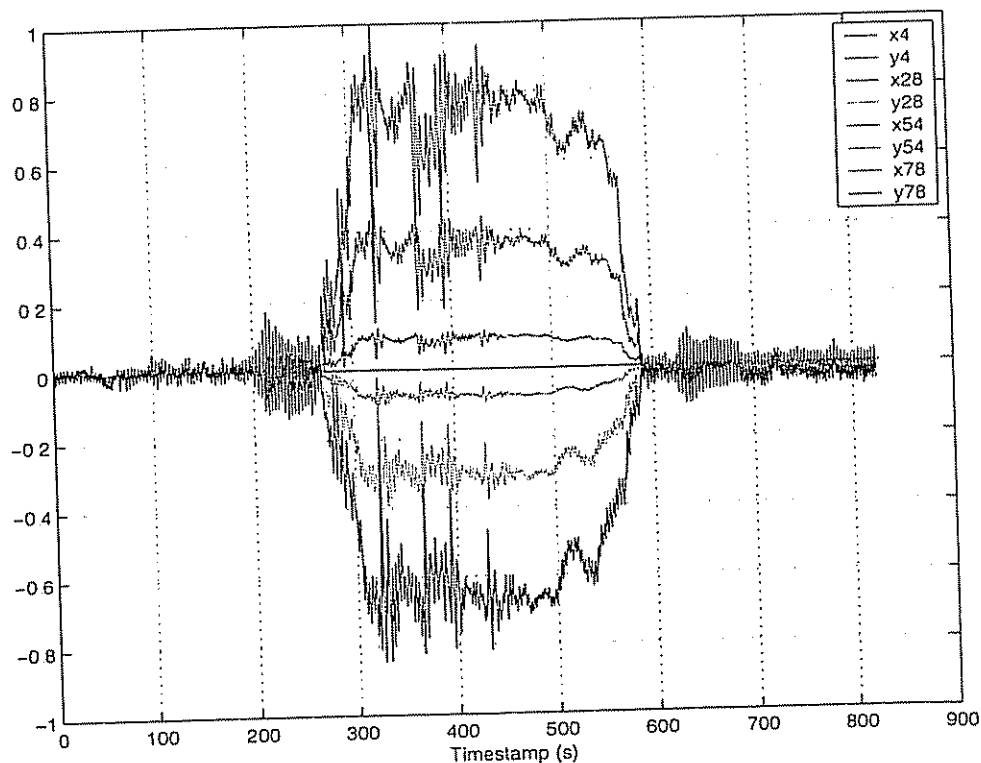
A gépészmérnökök gyakran alábecsülik a torony és az alap fontosságát, mint a szél-erőmű strukturális összetevőit. Másrészt a szélgenerátor megfelelő stabilitása az első, amit számításokkal alátámasztva a hatóságoknak bizonyítani kell ahhoz, hogy a szükséges építési engedélyt megszerezzük. A dokumentáció elkészítéséhez a gyártók részletesen elemezik a konstrukciókat. Az oszlop éppúgy fontos a szélturbina statikai stabilitása, mint a dinamikai viselkedése szempontjából (6.26. ábra).

Az oszlop több okból is fontos szerepet játszik az erőmű gazdasági hatékonyságában. Az oszlop 15–20%-ot tesz ki a teljes rendszer költségéből, így számottevő ártnyező, jelentős a szerepe a szállításnál és a felállításnál is. Az oszlop az egyik olyan részegység, amely az elmúlt évek során a legtöbb változáson ment keresztül.

Az előzőekben már bemutattuk, hogy az oszlop magassága fontos a turbina energiatermelése, s így a megtérülés szempontjából is. A kis méretű gépeknél, a lapátkerék tengely magassága – 20–25 m körül – és átmérője alapvetően megegyezik.

A rácsos szerkezetű oszlopok kisebb anyagigényűek, mint a kúpos acéloszlopok. Az első generációs dán turbinák jellemzően rácsos szerkezetű tartóoszlopokat használtak. Manapság Európában, legnagyobb számban az acéloszlopokat alkalmazzák, míg az Egyesült Államokban a tengerekhez közeli, alacsonyabb oszlopmagasságú szél-erőmű-parkokat telepítik rácsos tartóval.

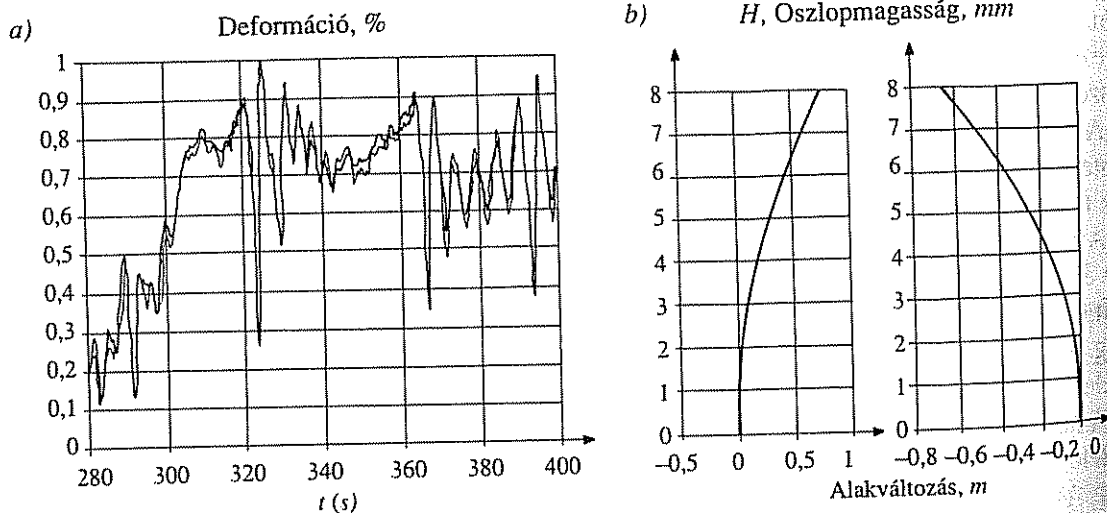
A hengeres oszlopoknak lehet kör- vagy sokszögletű keresztmetszete is. Jellemzően felfelé (kúposan vagy lépcsőről lépésre) fokozatosan szűkülő geometriával rendelkeznek. A hengeres oszlopok alapvetően acélból készülnek. Néhány gyártó betontornyokat is gyárt a költségek csökkentése érdekében. A lényegesen nagyobb tömegnek köszönhetően ez azzal jár, hogy a járulékos szállítási és felállítási költségek is nagyobbak.



6.26. ábra. A különböző magasságokban mért relatív elmozdulások

Az első 1 MW-os turbinák tesztelésénél a betontornyok igen népszerűek voltak. Ezek helyben épültek, a nagy méret és tömeg miatt megnehezítik az erőmű rekultivációját.

A feszítőkötéllel kipányvázott póznák a kis méretű turbináknál általánosan elterjedtek mivel könnyebbek, s egy hajlító rúd és egy csörlő segítségével telepíthetők. Így jelentősen csökken a szállítási és a felállítási költség. A kis oszlopoknál nehezebb a függőleges szilárdsághoz szükséges számításokat elvégezni a kötelekkel együtt. Ezek megadott előfeszítési értéket igényelnek, amelyet állandóan ellenőrizni kell.



6.27. ábra. Oszlopelmozdulások: a) Az optikai műszer segítségével mért elmozdulások 54 m magasságban; b) z oszlop elmozdulása a magasság függvényében, x és y síkban

A 6.27. ábrán optikai műszerekkel rögzített oszlopelmozdulást mutatunk be. Az elmozdulást az idő függvényében ábrázoltuk. A kilengést az oszlop tengelyére mérőleges x és y koordináta-rendszerben ábrázoltuk.

6.5.3. A rezgésamplitúdók elméleti meghatározása

Alapvetően két csoportra kell osztanunk az örvényleválás okozta rezgéseket. Az egyik csoportot az adott külső gerjesztő frekvencia jellemzi, amely csak a szélességtől függ. Ide tartozik a kör keresztmetszet is a szubkritikus tartományban. A másik csoportba tartoznak a „magavezérelte” rezgések, amikor a gerjesztő frekvencia a szélességtől függetlenül a szerkezet sajátfrekvenciájával egyezik meg: kör keresztmetszetű szerkezetek a kritikuson túli (aperiodikus és transzkritikus) tartományban.

6.5.4. Adott frekvenciájú külső gerjesztés okozta rezgések

Mivel ebben az esetben az örvényleválás f frekvenciája a szélességgel arányos ezért a rezgésamplitúdó a csillapított gerjesztett rezgés ismert elméletével határozható meg. A gerjesztőerő harmonikusnak vehető, intenzitása a v^2 -vel ebből következően f^2 -fel arányos. Erre az esetre az y_{din} rezgésamplitúdót [18.] a következő kifejezés adja meg:

$$y_{din} = \frac{y_{stat}}{\sqrt{\left(1 \pm \frac{f^2}{f_s^2}\right) + \left(\frac{\delta}{\pi} \cdot \frac{f}{f_s}\right)^2}},$$

ahol y_{stat} az oldalirányban statikusan hatóknak képzelt p_t torlónyomás okozta elmozdulása; megfelelő c_y oldalirányú alaki tényezővel számolva, m; f_s a szerkezet sajátfrekvenciája, Hz; f az örvényleválások frekvenciája, Hz; δ pedig a csillapítás logaritmikus dekrementuma.

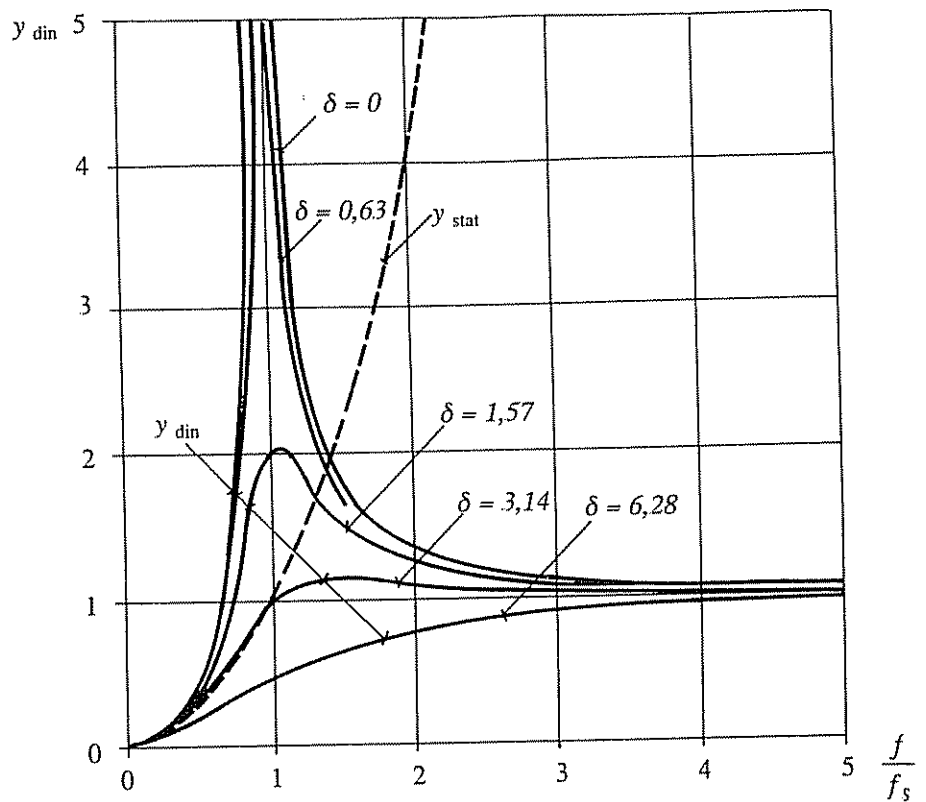
A szél okozta gerjesztett rezgések kialakulását nagymértékben befolyásolja a szerkezet belső csillapítása. Ezt az anyagok belső súrlódása illetve a talaj, rögzítés energia elvonó hatása okoz. A csillapítás mértékét a logaritmikus dekrementummal lehet megadni. A csillapítás logaritmikus dekrementuma táblázatból az egyes szerkezetekre meghatározható. Értéke általában 0,05–0,2 között van.

Rezonancia akkor lép fel, ha $f = f_s$. Az ezt okozó szélességet kritikus szélességnek nevezik.

Rezonancia estén a az előző képlet igen egyszerűvé válik:

$$y_{din} = \frac{\delta}{\pi} \cdot y_{stat}$$

A dinamikus rezgésamplitúdó a f/f_s függvényében a 6.28. ábrán látható. A görbék különböző logaritmikus dekrementum értékekre láthatóak.



6.28. ábra. Az örvényleválások által gerjesztett rezgés amplitúdói

6.5.5. A sajátfrekvencia meghatározásának elmélete

A különböző elméleteket tárgyaló részek közül a sajátfrekvenciák meghatározását tárgyaló rész került a második helyre. Ennek oka, hogy külső gerjesztések, ez esetben konkrétan a Kármán – féle örvénysorok okozta gerjesztés egy testre gyakorolt hatását addig nem lehet vizsgálni sem rezgéstani, sem szilárdságtani szempontból, amíg nem ismert a vizsgált szerkezet sajátrezgésszáma. Hiszen ekkor van csak viszonyítási alap, pl. a rezonancia szempontjából, de ugyanígy az elhajlás számításához is szükséges adat a szerkezet sajátfrekvenciája. Ha pedig a gyakorlati számítások kiinduló adatnak tekintik az önrezgésszámot akkor érdemes azt az elméleti fejtegetések során is már az elsők között említeni.

A sajátfrekvencia számítását bonyolultság szempontjából két csoportra lehet felosztani:

- Az első és egyszerűbb az állandó keresztmetszetű és folytonos tömegeloszlású szerkezetek sajátfrekvencia számításának esete.
 - A második lehetőség pedig és ez a gyakorlatban többször előforduló, amikor sem a tartó hajlítási merevsége, sem a tömegeloszlása nem folytonos.
- Állandó tömegeloszlású és hajlítási merevségű tartók sajátfrekvencia [14.] számítása:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}},$$

ahol f a sajátfrekvencia, Hz; m a szerkezet sajáttömege, kg; c pedig a konzol rugómerevsége, N/m.

6.6. A változó tömegeloszlású és hajlítási merevségű tartók sajátfrekvencia-számítása

Ebben az esetben két lehetőség áll rendelkezésünkre. Az egyik, hogy olyan egyszerűsítéseket kell tenni, amelyek nem jelentősen befolyásolják a végeredményt, azonban számítás szempontjából visszavezetik a problémát az előző pontban említett egyszerűen megoldható alakra. Például súlytalan konzol végére erősített súlyos anyagi pont modelljére lehet visszavezetni bizonyos eseteket. Ilyenkor, ha a konzolt csak saját tömege terheli, akkor annak egynegyedét kell figyelembe venni. A további terhelő tömegeket ehhez kell hozzáadni.

Energiamódszerek rezgéstani alkalmazásai. Még akkor is, ha a számítások az egyszerűsítések lehetőségével élve készültek el, a teljesség kedvéért érdemes megemlíteni egy bonyolult de szintén célravezető módszert. Ez pedig az ún. Rayleigh-féle módszer. RAYLEIGH módszerével csillapítatlan konzervatív rendszerek önrezgés-számát határozzák meg. A módszer segítségével olyan rendszerekben is viszonylag egyszerűen meghatározható az önrezgésszám közelítő értéke, ahol másféle számítás esetleg – a mérnöki gyakorlat keretei között – matematikai nehézségeket okozna. A módszer lényege, hogy az energia megmaradásának értelmében potenciális erők működése esetén a mozgást végző test helyzeti és mozgási energiájának összege a mozgás bármelyik pillanatában a test mechanikai jellemzőitől függő állandó.

Harmonikus rezgőmozgást végző test sebessége – következésképpen mozgási energiája is – nulla a legnagyobb kilendülés pillanatában, a nyugalmi állapotnak megfelelő pillanatban viszont a helyzeti energiája lesz nulla. Ebből az következik, hogy a maximális helyzeti energia, amely a legnagyobb kilendülés pillanatában adódik, egyenlő lesz a nyugalmi helyzetnek megfelelő pont mozgási energiájával, amely szintén maximális.

Az m tömegpontból álló rendszer maximális helyzeti [56.]energiája:

$$E_{h \max} = \frac{1}{2} \cdot a_n^* \cdot K \cdot a_n$$

alakban írható fel, ahol a $(A_{01n}, A_{02n}, \dots, A_{0mn})$ az n -edik normális rezgésalakhoz tartozó rezgésamplitúdókat tartalmazó oszlopvektor és K rendszer merevségi mátrixa.

Tekintettel arra, hogy az i -edik tömegpont maximális sebessége $v_{i \max} = \omega_0 A_{0i}$, az egész rendszer maximális mozgási energiája:

$$E_{m \max} = \frac{\omega_{0n}^2}{2} \cdot a_n^* \cdot M \cdot a_n$$

A két energiát egyenlővé téve, ω_{0n}^2 az n -edik sajátfrekvencia négyzete – a következő összefüggésből számítható:

$$\omega_{0n}^2 = \frac{a_n^* \cdot K \cdot a_n}{a_n^* \cdot M \cdot a_n}$$

A kapott egyenlet jobb oldalán levő ún. Rayleigh-féle hányados alapján a megfelelő sajátfrekvencia egzakt módon meghatározható [43.] (HÜTTE, 1993). Természetesen a valóságban „ a ” általában nem ismert, így ω_0 csak úgy határozható meg, ha a rezgésalakot valamilyen formában felvett függvénnyel helyettesítjük. Ezért a kapott eredmény pontossága is azon múlik, hogy miként közelíti meg a felvett függvény a normális rezgésalakot.

A vizsgálat tárgya most egy olyan tartó lesz, amely ún. hajlítórezgéseket végez, tehát rezgése közben az egyes keresztmetszetek csak hajlításra vannak igénybe véve. A tartó tengelyén levő pontok kilendülését y a tartó tengelyét pedig z koordinátatengely jellemzi. Harmonikus rezgés feltételezésével a tartó egy pontjának mozgásegyenlete a következő lesz:

$$y_n(z, t) = A_{0n}(z) \cdot \sin \omega_{0n} \cdot t.$$

(Az összefüggésben az n index az n -edik normális rezgésalakot jelenti). A legnagyobb $A_{0n}(z)$ kilendülés akkor következik be amikor $\sin \omega t = 1$.

Ha ismernénk a legnagyobb kilendülés pillanatában a normális rezgésalak egyenletét, akkor a maximális helyzeti energiát és az ezzel egyenlő mozgási energiát a következők szerint lehetne meghatározni. A rugalmasságtan szerint egy tartó helyzeti energiája a tartó belső saját alakváltozási munkájával egyenlő, amelyet a nyíró- és normális erő munkájának elhanyagolásával következőképpen lehet felírni:

$$E_h = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{M^2(z)}{E \cdot I} dz.$$

Az összefüggésben $M(z)$ az egyes keresztmetszetekre ható hajlítónyomaték, amelyet a tartó rugalmas vonalának differenciálegyenletével ki lehet fejezni:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = y'' = \pm \frac{M}{E \cdot I}.$$

Tehát a mozgási energia meghatározásakor a rezgés sebességére van szükség. Mivel a legnagyobb sebesség akkor következik be, amikor a nyugalmi állapotnak megfelelő

$$E_{h \max} = \frac{1}{2} \int_0^l E \cdot I \cdot [A_{0n}''(z)]^2 dz$$

ponton halad át, a

$$v_n = \frac{dy}{dt} = A_{0n}(z) \cdot \omega_{0n} \cdot \cos \omega_{0n} \cdot t.$$

A képletből $\cos \omega_{0n} = 1$ esetén

$$v_{\max} = A_{0n}(z) \cdot \omega_{0n}.$$

A tartó fajlagos tömegét $\mu(z)$ -vel jelölve, a maximális mozgási energiára azt kapjuk, hogy

$$E_{n \max} = \frac{\omega_{0n}^2}{2} \cdot \int_0^l A_{0n}(z) \cdot \mu(z) dz.$$

végül a két energia maximum egyenlővé tételéből a tartó n -edik normális rezgésalakjához tartozó sajátfrekvenciájára a következő összefüggést nyerjük:

$$\omega_{0n}^2 = \frac{\int_0^l E \cdot I \cdot [A_{0n}''(z)]^2 dz}{\int_0^l A_{0n}(z) \cdot \mu(z) dz}.$$

Általános elv, hogy a tartó önrezgésszámára igen jó közelítő eredményt kapunk, ha az összefüggésben ismeretlen $A_{0n}(z)$ függvény helyébe olyan függvényt helyettesítünk, amely a tartó alakváltozásaira vonatkozó kerületi feltételeknek eleget tesz, és a görbéje alakra helyesen megközelíti a várható rezgésalakot. Ugyancsak bebizonyítható, hogy az önrezgésszámnak az előbbieket szerint meghatározott értéke nagyobb lesz a pontos eredményénél vagy legfeljebb egyenlő lesz azzal.

6.7. Szélcsatornában végzett mérések

6.7.1. Modellkísérletek és a hasonlóság kritériumai

az építmények légáramlásban való viselkedését és a szélterhelést meghatározó aerodinamikus tényezőket kísérleti úton, empirikusan állapítják meg, a legtöbb esetben szélcsatornában végzett modellkísérletek útján. E kísérletek körülményei többé-kevésbé megfelelnek a természetes viszonyoknak. Mivel mind az eljárások, mind pedig a kísérletek feltételei különbözők, ezért a kísérleti eredmények sokszor igen egymástól különbözők, ezért csak elővigyázattal kezelhetők. A hasonlósági kritériumok és a választott kísérleti feltételek két csoportra oszthatóak: a hasonlóság az első csoportban a modellre és az építményre, a második csoportban pedig a szélcsatornában levő légáramlásra és a szélre vonatkozik. A szerkezetre statikus aerodinamikus ható erők (ha a turbulencia hatását elhanyagoljuk) és a szerkezet viselkedése nemcsak a szerkezet alakjától és az áramlás irányától függ, hanem a következő nyolc fizikai értéktől is:

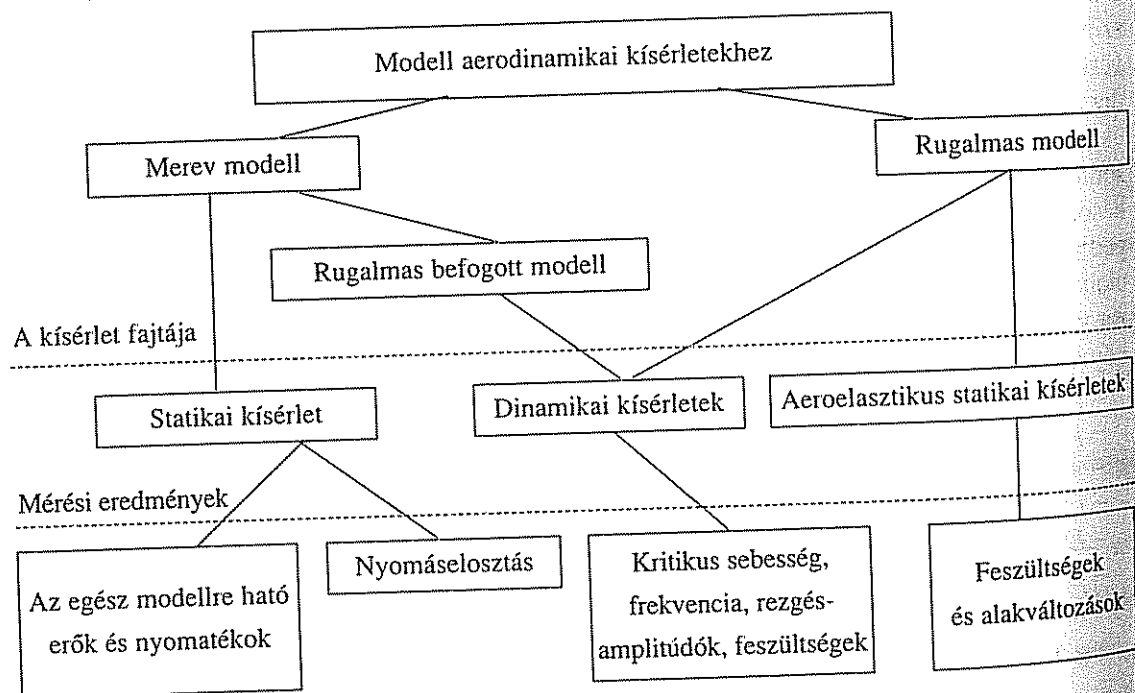
- ρ a levegő sűrűsége;
- μ a levegő dinamikus viszkozitása;
- v az áramlás sebessége;
- l a jellemző lineáris méret;
- E a szerkezet rugalmassági modulusa;
- ρ_k a szerkezet tömörsége;
- δ a szerkezet csillapításának logaritmikus dekrementuma;
- g a gravitációs gyorsulás.

6.1. táblázat. A hasonlósági kritériumok

A méret nélküli paraméter	Jelölés	Erő vagy energiaviszonyok
A logaritmusos csillapítás dekrementuma	δ	Egy periódusban felhasznált energia
		A rezgés összes energiája
Rugalmasság	$E/\rho v^2$	A tartószerkezet elasztikus erői
		A levegő tehetetlenségi erői
Sűrűségi viszony	ρ_k/ρ	A tartószerkezet tehetetlenségi erői
		A levegő tehetetlenségi erői
Froud-szám	$\rho d/v^2$	A tartószerkezet nehézségi erői
		A levegő tehetetlenségi erői
Reynolds-szám	$\rho v d/\mu$	A levegő tehetetlenségi erői
		A levegő viszkozitás erői

Az előzőekben ismertetett értékek öt dimenzió nélküli paraméterre vezethetők vissza, amelyeket a kísérleti eredményeknek, a szerkezet tényleges terhére való vonatkoztatásakor figyelembe kell venni. Itt erő- és energiaviszonyokról van szó. Ezenkívül figyelembe veendő a modell és a tényleges építmény alakjának a hasonlósága is (6.1. táblázat). A légszatórnában levő áramlás és a természetes szél hasonlósági feltétele akkor teljesülhet, ha a sebességgradiens a mérőhelyiség keresztmetszetében jön létre, és a szállókést utánozzák.

Az egyes szállókések és szélturbulenciák modellezése már lényegesen nehezebb, ha egyáltalán lehetséges. Hasonlósági kritériumok itt az intenzitás és a turbulencia mértéke. Gyakorlatilag egyetlen olyan kísérlet sincs, amely minden hasonlósági kritériumnak megfeleljen. Gyakran erre egyáltalán nincs is szükség. A kísérletek folyamán tehát csak a kiválasztott kritériumokat szokás figyelembe venni, amelyeknek teljesülniük kell vagy teljesülhetnek, a többi kritérium elhanyagolható. Az elvégezhető modellkísérletek típusai:



Eddig is külön készültek modellek az erők, a nyomáseloszlás vagy a frekvencia meghatározására egész építmények vagy csak a részeik számára. Az egyik legnehezebben megvalósítható hasonlósági kritérium a Reynolds-számok hasonlósága. Ezen belül is a kritikuson túli tartomány modellezése jelenti a legnagyobb gondot, mivel a természetes szél esetén ez a tartomány igen gyakran jellemzővé válik.

A vizsgált hasonlóság csak akkor lesz elérhető, ha az építmény tényleges méretei és a szélesebesség aránya, valamint a modell megfelelő mérete és a szélcsatornában lévő szélesebesség aránya egymással egyenlő. A szélesebesség növelésének az szab határt, hogy a szélesebesség nem közelítheti meg a hangsebességet.

6.7.2. A Reynolds-szám növelésének lehetőségei

Modell méretének csökkentése

A modell méretarányát lehetőségek szerint minél nagyobbra kell választani. Ez a megoldás óriási szélcsatornák alkalmazásához vezetne, amely a mérés szempontjából hatalmas költségeket jelent. Így maradnak az átlagos szélcsatornák, amelyekkel csak nehezen, vagy nem tökéletesen lehet megoldani a feladatokat.

Áramlási sebesség növelése

A szélesebesség növelése meglehetősen korlátozott. Az áramló levegő sűrűségváltozásának zavaró hatása, és a nagy energiafelhasználás határokat szabnak. Az áramlási sebesség a nagyobb szélcsatornában 100 m/s körüli.

Kinematikai viszkozitás csökkentése

A levegő sűrűségének változása hatással van a kinematikai viszkozításra. Legcélsebb, ha a közeg sűrűségét növeljük, amit túlnyomás előállításával tudunk elérni. Ennek érdekében zárt, acéllemezből készült szélcsatornákat építenek.

Reynolds-szám a szélgenerátor oszlopra:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\mu / \rho} = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

ahol D az oszlopátmérő.

A Reynolds-szám erősen függ a kinematikai viszkozitáson keresztül a hőmérséklettől. Például $T = 20$ °C-os víz esetén a $\nu = 0,1 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, levegőnél $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, ami azt jelenti, hogy 15-ször akkora sebességet kell biztosítani ugyanakkora Reynolds-számokhoz.

Modellkísérleteknél az egyik legfontosabb a modell méretaránya, és a légcsatorna mérete. A kísérletek folyamán az elérhető legnagyobb Re szám a modell méretétől, az áramló közeg sebességétől, és a kinematikai viszkozitástól függ.

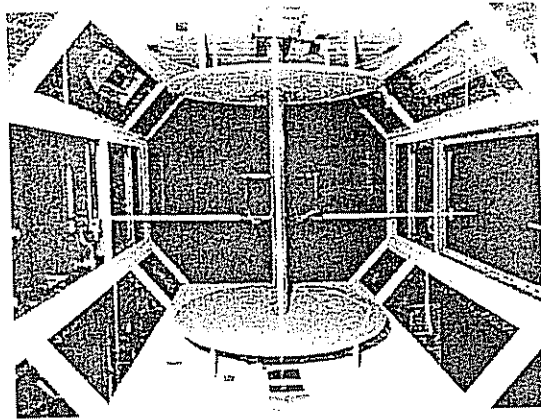
6.7.3. Szélcsatornás modellkísérletek

A szélcsatornába helyezett kisminta körüli áramlás rendszerint három szempontból tér el a szabadban lévőttől:

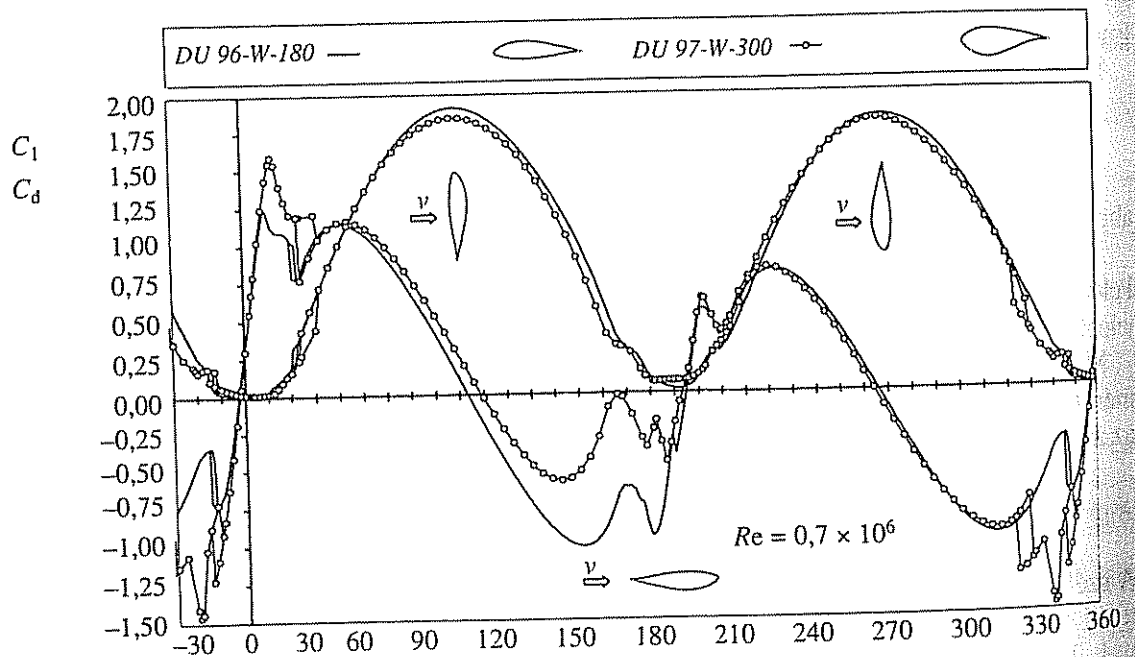
1. Többnyire kisebb a Reynolds-szám.
2. Az áramlás turbulens, míg a szabad levegőben (pl. repülőgépeknél a repülő méreteihez képest) turbulencia mentesnek tekinthető.
3. A sugár véges méretű a végtelennek vehető atmoszférával szemben.

A további három felosztás:

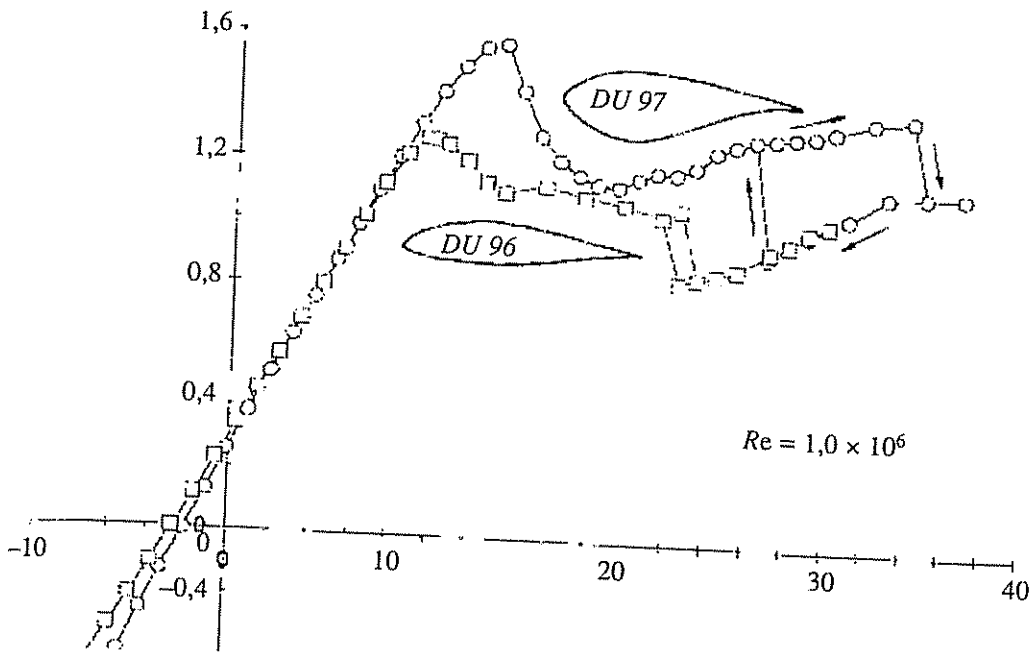
1. Ha a statikus nyomás a mérőtér hossz tengelye mentén nem állandó, akkor a hossz tengely irányában „felhajtóerő” ébred. Ezt az erőt hosszú, jól áramvonalazott testeknél, pl. repülőgép törzseknél kell figyelembe venni.
 2. A csatornában elhelyezett test keresztmetszet szűkítést jelent, ezért a test körül a sebesség nagyobb mintha a szabad légtérben lenne.
 3. Egy test után a sebességeloszlás nem egyenletes. A folytonosság tétele szerint a nyomon kívül (test esetében) nagyobb lesz a sebesség. Zárt mérőtér [25.] esetén a sebesség, falra merőleges komponense zérus, míg szabad levegőben a megfelelő helyen a test által okozott zavarás még esetleg számottevő lenne.
- A szélcsatorna mérésekre mutatnak példát a 6.29.–6.33. ábrák.



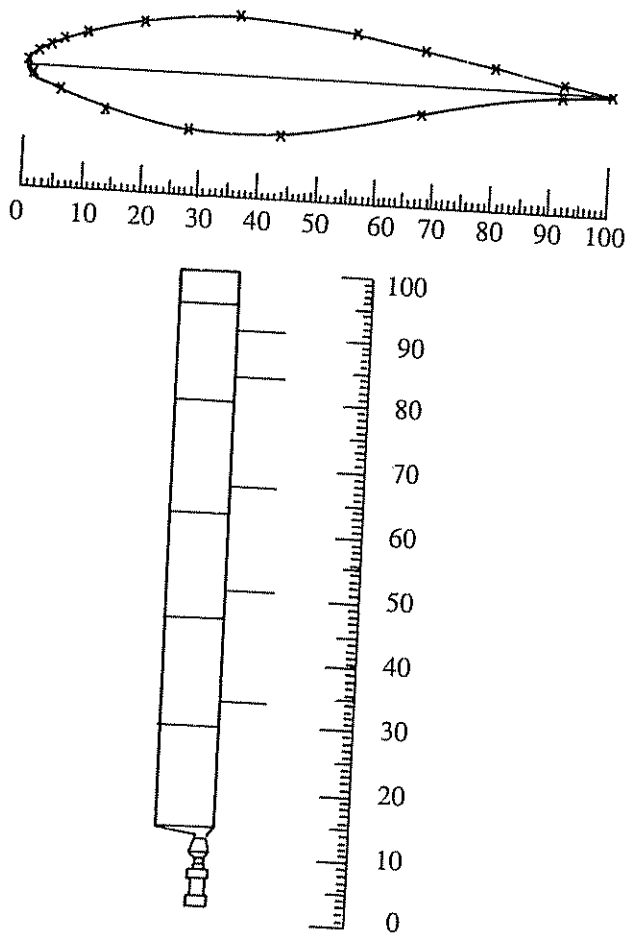
6.29. ábra Modern szélcsatorna a Delfti Egyetem Szélenergetikai Intézetében a szárnyprofil fizikai tulajdonságainak meghatározásához



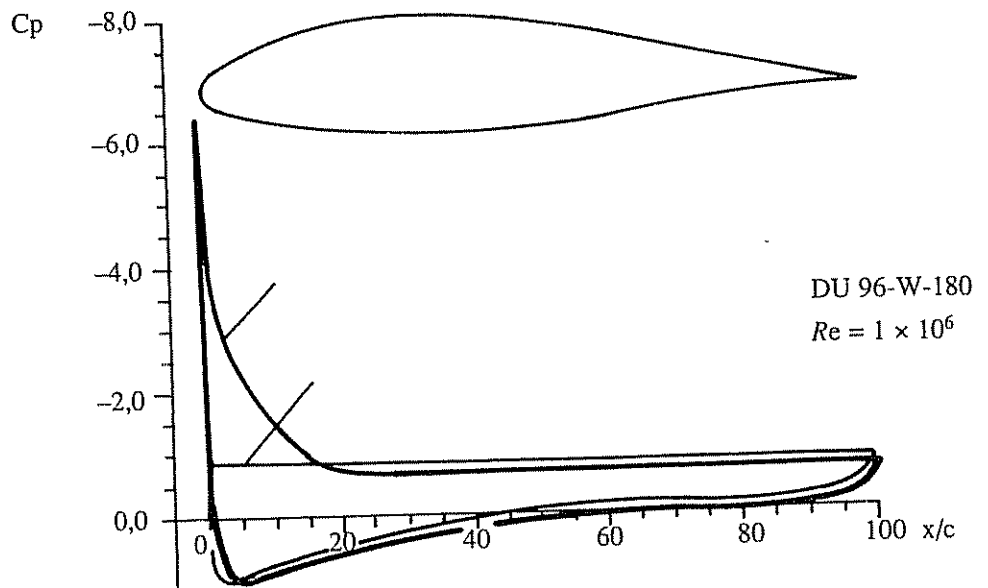
6.30. ábra. A szélcsatornában be lehet mérni a szárnymetszet tulajdonságait úgy is, hogy a rögzített szárnylapátot teljesen körbeforgatjuk. Alapvetően a felhajtóerő-tényező (c_l) és az ellenállás-erő-tényező (c_d) meghatározása volt a cél



6.31. ábra. Különböző szárnyprofilok felhajtóerő-tényezője az állásszög függvényében



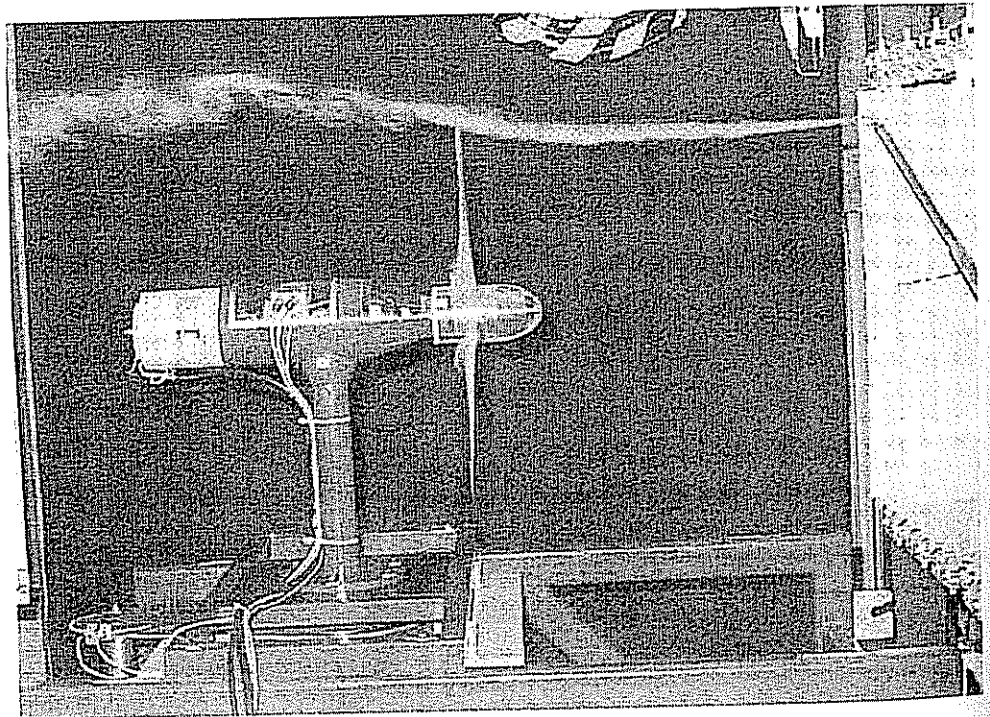
6.32. ábra. A szárnymetszeten kialakuló nyomáseloszlás meghatározása méréssel [veers, 98]



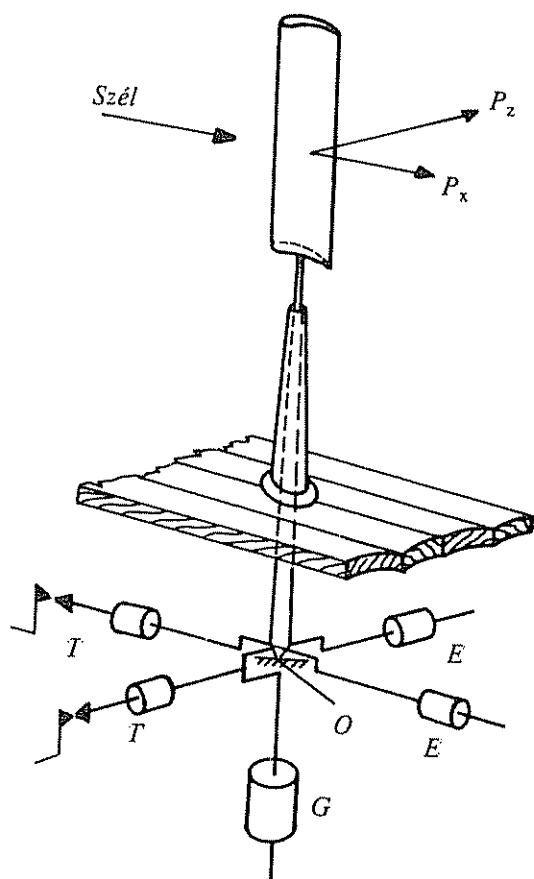
6.33. ábra. A nyomáseloszlás változása a szárnyprofilon az állásszög függvényében

6.7.4. Modellezés kismintákkal

Az egyik modellezési módszer, amikor a nagy kivitel méretarányosan lekicsinyített modelljével, „kismintájával” szélcsatornában végeznek különféle méréseket. Ezek a mérések lehetnek erőmérések, nyomáseloszlás mérések, sebességeloszlás mérések, feszültségvizsgálatok, rezgéstani elemzések, zajszint elemzések (6.34. ábra).



6.34. ábra. Modellkísérlet a lapátkerék mögött jelentkező légörvények meghatározására (Göttingen, Prof. ALBERT BETZ, 1932)



6.35. ábra. A szárnymetszeten kialakuló nyomáseloszlás meghatározása a klasszikus módszerrel

Ahhoz, hogy értékelhető valós értékeket kapjunk, hitelesíteni kell a mérőbélyegeket, hogy az általuk adott jelek (megnyúlás vagy összenyomódás) mekkora valós erőértékeket takarnak (6.35. ábra).

A bélyegek az elmozdulással arányos elektromos jelet generálnak, amelyet egy adatgyűjtő, erősítő, digitális jellé alakít, így a mérés a számítógép monitorán folyamatosan nyomon követhető.

A rezgésekre vonatkozó mérések:

1. A különböző oszlopok, tömegekkel terhelt sajátfrekvencia vizsgálata.
2. A különbözően terhelt oszlopok rezgéstani vizsgálata szélben. Ez a mérés elsősorban a Kármán-féle örvénysor okozta rezgések vizsgálatára irányult.

A sajátfrekvencia mérése

Egyszeri dinamikus lökést adva a próbatestre, melynek az elmozdulás-idő (terhelőerő-idő) függvénye természetesen az egyszerű csillapított rezgéseknek megfelelően alakul. A test úgy viselkedik, mint egy gerjesztés nélküli önálló hagyott lengőrendszer. Vagyis az egyszeri lökés hatására a sajátfrekvenciáján kezd el rezegni. Miközben az amplitúdó csökken a frekvencia állandó marad. Így tehát a legnagyobb amplitúdóhoz is ugyanaz a frekvencia tartozik mint a legkisebbhez, emiatt a kapott adatok alapján elvégzett Fast Fourier Transzformáció pontosan megmutatja a sajátfrekvencia értékét.

E vizsgálatok közül az egyik legfontosabb eljárás a nyúlásmérő-bélyeges (a továbbiakban mérőbélyeges) mérés.

Mérőbélyeges mérés

A bélyeges mérési mód az erő okozta ellenállás változásán alapszik. A bélyeg nyúlásával változik a vezeték keresztmetszete, így ellenállása is. A mérőbélyegeket Wheatstone-hídba kapcsolva (ez lehet egész illetve félhidas kapcsolás) alkalmazzák. A hídkapcsolás tulajdonsága, hogy két ága kiegyenlíthető a kapcsolt ellenállások helyes megválasztásával. Ha figyeljük a hidat tápláló, és a hídról levett feszültségek arányát, vagyis annak változását – mely arányos lesz az ellenállás változással – pontosan meg tudjuk határozni a mérés során a fellépő terhelést.

A mérőbélyegek által szolgáltatott jelre szuperponálódik a hőmérsékletmiatti nyúlás is. Ennek kiküszöbölésére kompenzáló bélyegeket alkalmaznak, mely egy, a mérőelemhez hasonló hőtehetlenségű acéllapra vannak felragasztva.

A Fourier [56.] transzformáció azon a feltevésen alapszik, hogy minden egyes időben változó jelet le lehet írni szinusz és koszinusz függvényekkel, ezt közelítéssel lehet megvalósítani, ahol $f_0 = 1/T$, ahol T a periódusidő.

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(2\pi k f_0 t) + b_k \sin(2\pi k f_0 t))$$

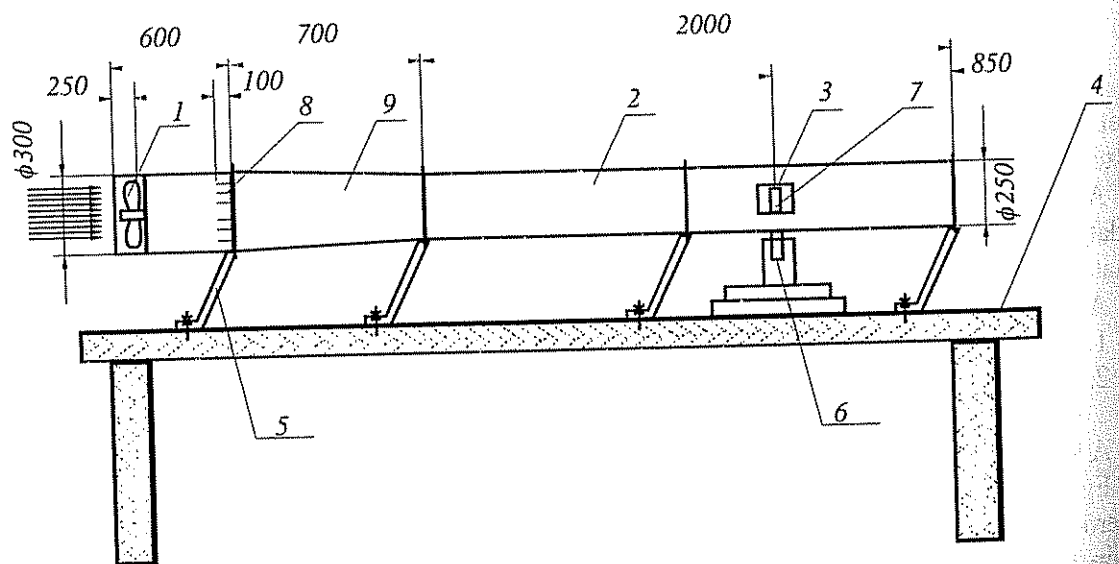
Az egyszeri lökészerű igénybevétel által okozott kihajlás alakja hasonló, mint a keresett frekvenciához tartozó elmozdulás alakja.

A Kármán-féle örvénysorok által gerjesztett rezgés frekvenciájának mérése

A szél nyomása illetve annak változásai a benyúló oszlop maketteket elmozdulásra kényszeríteti. Ezt az elmozdulást mérte az oszlop aljára erősített, és egyben az oszlop szempontjából befogásként is szolgáló SP4-2 típusú erőmérő cella. Minden mérés a széliránnyal párhuzamosan illetőleg arra merőlegesen elvégzendő (6.36. ábra).

A mérések menete

1. A megfelelő geometriájú oszlop felszerelése a mérőcellára.
2. A szélesség beállítása (értelemszerűen csak a szélben történő mérések esetén).
3. Mérés elindítása a számítógépen. (Ez 33 000 adat beolvasása után automatikusan leáll).
4. A mért adatok mentése.



6.36. ábra. Rezgéstani mérés meghatározásához alkalmazott szélcsatorna: 1 befúvó ventilátor szabályozható fordulatszámú motorral; 2 szélcsatorna; 3 légcatorna kémlelő nyílása; 4 padozat; 5 állványzat; 6 erőmérő cella forgatható állványzaton; 7 a szélcsatornába helyezett oszlopmakett; 8 egyenirányító; 9 szűkítő (konfúzor)

6.8. A végeelem-modellezés alkalmazása szélgenerátorok tervezésénél és ellenőrzésénél

E fejezetben röviden, nem a teljesség igényével bemutatjuk a generátorok tartóoszlopai-
ra a végeelem modellek elkészítésének lépéseit és a modellkészítés során felmerülő ne-
hézségeket, problémákat. Szólunk a végeelem modellezés előnyeiről, hátrányairól is.

6.8.1. Matematikai alapok

A végeelem módszer kidolgozása során mindig szerkezeti problémákból indultak
ki, és csak később vonatkoztatták a hasonlóságokat felhasználva másfajta (pl. folya-
dékáramlási vagy hőmérséklet-eloszlási) problémákra. A módszer matematikai alap-
jainak bemutatásánál ezt a sorrendet fogjuk követni.

Tengelyszimmetrikus rúd szerkezeti problémája

A problémát először differenciálegyenletek segítségével fogalmazzuk meg. Az
egyensúly fennállásához szükséges, hogy [59.]

$$A\sigma = \text{állandó} \quad (6.1)$$

legyen ahol A a keresztmetszet területe; σ a normális irányú feszültség.

Hook törvényének felhasználásával kapjuk a feszültség-deformáció összefüggést, ami

$$\sigma = E\varepsilon \text{ és } \varepsilon = \frac{du}{dx} \quad (6.2)$$

alakú, és ezzel az

$$AE\varepsilon = AE \frac{du}{dx} = \text{állandó} \quad (6.3)$$

egyenletet kapjuk.

Az x változó szerint deriválva

$$\frac{d}{dx} \left(AE \frac{du}{dx} \right) = 0 \quad (6.4)$$

egyenletet kapjuk, amelyet az $u(x)$ elmozdulásfüggvénnyel felírt egyensúlyi differen-
ciálegyenletnek nevezünk. Ezt kétszer integrálva az

$$u(x) = \frac{C_1}{E} \int \frac{dx}{A(x)} + C_2 \quad (6.5)$$

kifejezést kapjuk. Az integrálási állandók a peremfeltételekből számíthatók.

A probléma variációs megfogalmazásakor egy olyan I integrált keresünk, amely-
nek Euler-Lagrange egyenlete a rúd egyensúlyegyenlete. Az Euler-Lagrange egyen-

letből kiindulva, azt egy egyenlőre tetszőleges δu függvénnyel megszorozva és 0-tól L -ig integrálva a

$$\delta I = \int_0^L \frac{d}{dx} \left(AE \frac{du}{dx} \right) \delta u dx \quad (6.6)$$

eredményt kapjuk. Ennek az integrálnak az elmozdulásfüggvénnyel felírt egyensúlyi differenciálegyenlet miatt 0-t kell adnia. A δu függvényről feltételezzük, hogy folytonosan deriválható a $0 \leq x \leq L$ intervallumon. Az

$$\alpha = \delta u \text{ és } \beta = AE \frac{du}{dx} \quad (6.7)$$

jelölések bevezetése után parciális integrálással az

$$\int_0^L \alpha d\beta = (\alpha\beta)_0^L \pm \int_0^L \beta d\alpha \quad (6.8)$$

eredményt kapjuk. Az előbbi egyenleteket felhasználva

$$d\alpha = \frac{d}{dx} (\delta u) dx = \delta \left(\frac{du}{dx} \right) dx \text{ és } \beta = AE \frac{du}{dx}. \quad (6.9)$$

A fenti kifejezések a δI következő alakban történő felírását teszik lehetővé:

$$\delta I = \left(AE \frac{du}{dx} \delta u \right)_0^L \pm \int_0^L AE \frac{du}{dx} \delta \left(\frac{du}{dx} \right) dx = 0. \quad (6.10)$$

Ez a kifejezés δI -t egy kiintegrált tag és egy integrál összegeként állítja elő. Mivel az $AE \frac{du}{dx}$ erőt jelent, az egyenlet kiintegrált részét a virtuális elmozdulás során végzett munkaként értelmezhetjük. Bevezetve az $AEu' = X$ jelölést és felhasználva a második kifejezéseket, az utolsó egyenletet így is átírhatjuk:

$$\delta I = X \delta u_0^L \pm \int_V \sigma \delta \epsilon dV = 0, \quad (6.11)$$

ahol $dV = A(x)dx$ térfogatelem, a d pedig a virtuális elmozdulásoknak tulajdonított deformációnövekmény. A kiintegrált tag tehát a virtuális munkát jelentik, jelöljük ezt δW_{ext} -tel. Az integrál a rugalmasságtani deformációs energia virtuális elmozdulásokból eredő növekménye, jelöljük ezt δU -val. Ezekkel a jelölésekkel az előző egyenlet

$$\delta I = \delta W_{ext} \pm \delta U = 0 \quad (6.12)$$

alakban írható. Ez a virtuális elmozdulások elve, mely kimondja, hogy tetszőleges

egyensúly körüli virtuális elmozdulás során a külső erők által végzett munka megegyezik a deformációs energia növekedésével.

6.8.2. A végelem létrehozása

A végelemek összessége az egész testet idealizálja. Az egyes elemeken meg kell adni az elsődleges ismeretlent leíró közelítő matematikai formulákat. A közelítő függvények között a legegyszerűbbek a polinomok. A kiválasztott függvényeknek bizonyos feltételeket kell kielégíteniük:

1. A közelítő polinomok foka.

A hatványsor tekintetbe vett tagjainak száma legalább annyi kell, hogy legyen mint az elem szabadsági fokának száma.

2. Kompatibilitás.

A választott közelítő függvényeknek teljesíteniük kell az elem peremén bizonyos kompatibilitást. Rúd esetén ez azt jelenti, hogy a csatlakozó elemek közös rácspontjaiban $u_1 = u_2$ feltételnek teljesülnie kell.

3. Állandó deformáció.

Ha az elemen a deformáció állandó, a megoldások sorozatának ehhez kell tartania, különben konvergencia-problémák léphetnek fel.

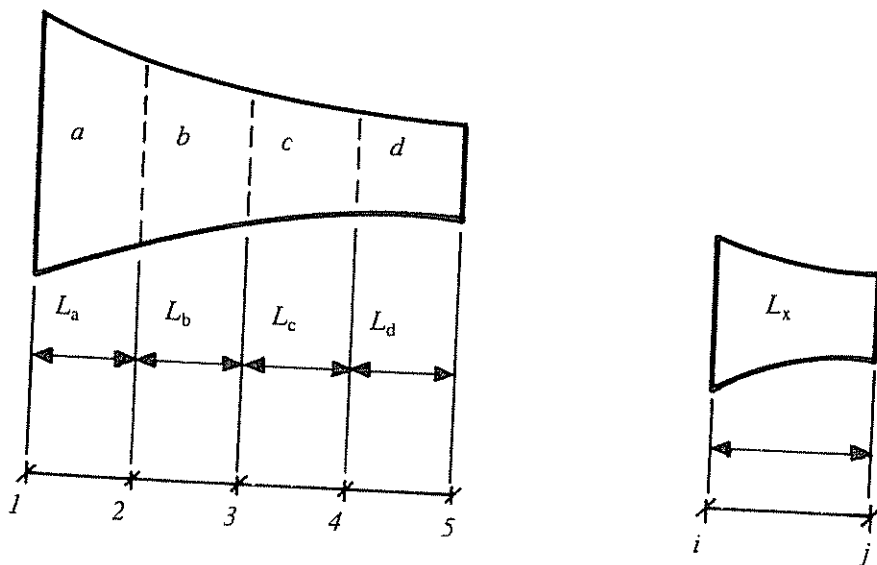
4. Differenciálhatóság.

Az elemen belül a problémát kifejező variációs elvnek megfelelő rendben differenciálhatónak kell lennie. Ez a polinomok esetén nem jelent problémát.

A tengelyszimmetrikus merevségelem elmozdulásának függvénye

A rúd tipikus elemét a 6.37. ábra mutatja. Egydimenziós, tengelyirányú elmozdulásokkal meghatározható, két szabadságfokú (u_i és u_j).

$$u(x) = a_0 + a_1 x = [1 \ x] \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = f(x)^T a. \quad (6.13)$$



6.37. ábra. Tengelyszimmetrikus rúd és végelemes idealizációja

Az u csúcsokban előírt értékeit felírva ($x = 0$ az i csúcsban, $x = L$ a j csúcsban) az

$$\begin{bmatrix} u_i \\ u_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} \text{ vagy } u_e = Ga \quad (6.14)$$

összefüggést kapjuk. Ezeket a -ra megoldva és a kapott eredményt az utolsó előtti egyenletbe beírva megkapjuk az $u(x)$ -et az u_e peremfeltételekkel kifejezve:

$$u(x) = f(x)^T G^{-1} u_e = N^T u_e \quad (6.15)$$

Az N mátrixon kívül még két mátrixra lesz szükségünk az elem meghatározásához. Felírjuk a rácsponti szabadsági fokokkal kifejezett deformációkat:

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} = f'(x)^T G^{-1} u_e = B u_e \quad (6.16)$$

A B mátrix a merevségegyenlet számításához szükséges második alapvető mátrix. Végül a feszültségdeformáció összefüggését kell megadni. Rugalmas esetben például

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma + \varepsilon_0 \quad (6.17)$$

ahol ε a teljes deformációt, ε_0 pedig az öndeformációt jelöli. Az egyenletet feszültségekre megoldva:

$$\sigma = E(\varepsilon \pm \varepsilon_0) \quad (6.18)$$

A megfelelő általános alak:

$$\sigma = D(\varepsilon \pm \varepsilon_0) \quad (6.19)$$

ahol σ az egész elemre vonatkozó valamennyi feszültséget, D pedig a feszültségdeformáció összefüggését megadó szimmetrikus mátrixot jelöli.

6.8.3. A tengelyszimmetrikus elem merevségegyenlete

Az előzőek során bevezetett és az elemet megadó mátrixok felhasználása előtt a δI -el kifejezett variációs összefüggést módosítjuk. A kiintegrált tag $X_L \delta u_L - X_0 \delta u_0$ alakú, ahol a pozitív X a rúd feszítését jelenti, azaz a pozitív X_0 a negatív x irányba mutat. Az előjeleket újra definiáljuk:

$$\delta W_{ext} = (X \delta u)_0^L = X_L \delta u_L + X_0 \delta u_0 = \begin{bmatrix} \delta u_0 & \delta u_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_L \end{bmatrix} = \delta u^T X \quad (6.20)$$

ahol a pozitív X_0 az összenyomást jelenti, míg pozitív X_L a rúd húzását. Ezeket figyelembe véve a δI így írható fel:

$$\delta I = \delta W_{ext} \pm \delta U = \delta u^T X \pm \int_V \delta u_e^T B^T D(\varepsilon \pm \varepsilon_0) dV \quad (6.21)$$

A deformációnövekmény: $\delta\varepsilon = B\delta u_e$ (6.22)
 Az egyedi elem variációjára a következő kifejezést kapjuk:

$$\delta I_e = \begin{bmatrix} \delta u_i & \delta u_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ X_j \end{bmatrix} \pm \int_{V^e} \delta u_e^T B^T D (\varepsilon \pm \varepsilon_0) dV \quad (6.23)$$

Behelyettesítve ε -t:

$$\delta I_e = \delta_e^T \left[X_e + \int_{V^e} B^T D \varepsilon_0 dV \pm \left(\int_{V^e} B^T D B dV \right) u_e \right] \quad (6.24)$$

Az egyes elkülönített területekről az azoktól függő, elemenkénti járulékokat összegezzük és megkapjuk a $\delta I = \sum_e \delta I_e = 0$ rendszer variációját. Egy elemen a variációt megválasztva csak a tekintett elem és a szomszédos elemek adhatnak a fenti rendszer-variációhoz nullától eltérő járulékot. Legyen az utolsó egyenletben a $\delta I_e = 0$. Mivel a δu_e^T rácsponti virtuális elmozdulás tetszőleges értéket felvehet, ez nem lehet azonos nullával. Ez azt jelenti, hogy

$$X_e + \int_{V^e} B^T D \varepsilon_0 dV = \left(\int_{V^e} B^T D B dV \right) u_e \quad (6.25)$$

Ez az eredmény a végelem merevségegyenletének általános alakja, és tetszőleges elemre alkalmazható, ahol D és B adottak. A bal oldalon levő tagok a rácsponti erőket jelentik, a míg a jobb oldalon az elem merevségmátrixának (a szorzat integrálja) és a rácsponti szabadsági fok vektorának szorzata áll. Ezeket figyelembe véve az egyenlet így írható:

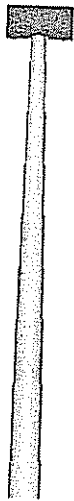
$$X_e + X_e^0 = K_e u_e \quad (6.26)$$

ahol: X_e az alkalmazott rácsponti erők; X_e^0 az öndeformációkat jellemző általánosított rácsponti erők; $K_e = \int_{V^e} B^T D B dV$ az elem merevségmátrixa.

6.8.4. A modellalkotásról gyakorlati szempontból

Bármilyen végelem modellezésre alkalmas szoftverrel, valamely probléma megoldása a következőképp történik:

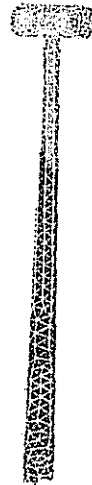
1. A geometriai modell megrajzolása (6.38. ábra). Ez lehet két illetve háromdimenziós. Egyszerűbb geometriák esetében ez elvégezhető a végelem modellező programon belül, bonyolultabb esetekben azonban célszerű valamilyen szilárdtest modellező programot segítségül hívni.
2. Az anyagtulajdonságok megadása.
3. Elem típus kiválasztása a modell hálózásához.
4. A végelem háló paramétereinek beállítása.



6.40. ábra. A kúpos oszlop
39 g terheléssel, geometriai modell



6.41. ábra. Kúpos oszlop
39 g terheléssel, hálózás után



6.42. ábra. A kúpos oszlop
39 g terheléssel, csavaró rezgés

A sajátfrekvencia vizsgálathoz elegendő a sűrűség és a rugalmassági modulus megadása. Ez az első komolyabb hibalehetőség a modellalkotás során. Az anyagtulajdonságok változása jelentős mértékben befolyásolja a sajátfrekvenciát. A választott elemtípus, e probléma megoldásához, a tetraéderez, 10 csomópontos elem, 3 szabadságfokkal.

A testek felosztása ún. „smart size mesh” segítségével készül, amely a geometria méreteinek változtatásával változtatja az elemek méretét is. Így egyenletes elemsűrűségű háló kapható eredményként (6.40., 6.41., 6.42. ábra).

Az egyes felületekre helyezett csomópontok számát a program határozza meg. Itt kell megemlíteni, hogy az alkatrészre vont háló sűrűsége nagy befolyással bír az eredményre. Ezt lehet optimalizálni, vagyis bizonyos sűrűség után az eredmény nem változik, a probléma ezzel kapcsolatban az, hogy a végelem háló sűrűségének hárt szab a számítógép memóriája.

Az oszlopok befogása az alsó lapjukon található csomópontokon történik, minden szabadságfokot elvéve. A számítást a program az ismert a Lanczos-féle módszerrel végzi.

6.8.6. Áramlástanai modellek

A geometriai modell felépítése ebben az esetben az előbbinél kicsit nehezkesebb. Először meg kell rajzolni a mérés során alkalmazott szélcsatorna geometriai modelljét.

Természetesen elegendő csak egy kiragadott részt vizsgálni, amelyben jól értelmezhetőek lesznek a kapott eredmények.

Ha elkészül a légáram geometriája akkor ebből a hengerből ki kell vonni a terheletlen, illetve a tömeggel terhelt oszlop geometriáját (6. 43. ábra).

A modell szélcsatornának az oszlophoz közelebbi kör határoló felülete a levegő beáramlásának a helye.

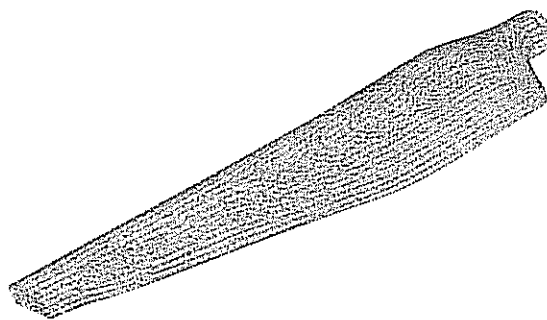
A választott elemtípus: háromdimenziós, áramlástanai problémák megoldására, a program által felkínált lehetőség. Az elem 8 csomópontos, tetraéderez és 7 szabadságfokkal rendelkezik. A geometria hálózása ebben az esetben is az előzőhöz hason-

5. Az alkatrész felosztása elemekre (6.39. ábra).
6. A terhelések, kényszerek megadása (nyomás, gravitáció, hő, befogás stb.)
7. A vizsgált probléma típusának kiválasztása (szilárdságtani, rezgéstani, áramlástan stb.).
8. A probléma megoldásához szükséges határoló paraméterek megadása. (Modell típus, szilárdsági, frekvencia tartományok, vagy áramlástan esetében, pl. az elvégzendő iterációk száma stb.).
9. A választott analízis futtatása.
10. Az eredmények értékelése.

A felsorolt lépések általános esetet tartalmaznak a sorrend sok esetben felcserélhető, illetve egyéb más lépések is sorra kerülhetnek. A következő néhány bekezdés az elkészült rezgéstani és áramlástan modelleket mutatja be a fentiek tükrében.



6.38. ábra. Számítógépes térbeli modell



6.39. ábra. A lapát végeelem hálója

6.8.5. Rezgéstani modellek

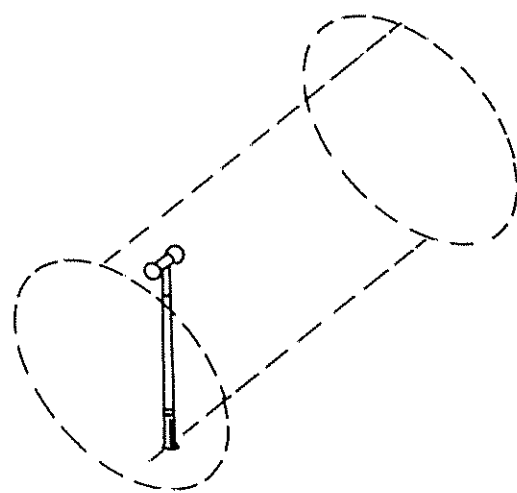
A geometriák megrajzolása a VEM programban történik. A modellek háromdimenziósak, egyrészt mert kevesebb a hiba lehetőség, mint a kétdimenziós modell esetén, másrészt szemléletesebb. A két dimenzióban készült modellek készítése esetében ugyanis, a másodrendű nyomatékokat, keresztmetszeteket külön számolni kell, am már kúpos oszlop esetében is igen bonyolult volna.

lóan történik. Itt különösen nagy jelentőséggel bír az, hogy a méretváltozásokat követi az elem nagysága, hiszen az oszlop makett és a szélcsatorna vizsgált szakasza között jelentős a méretbeli különbség. Így tehát a vizsgálat szempontjából lényeges helyeken, vagyis az oszlopot körülvevő részen, igen finom háló lesz az eredmény. Ez a nyomás és a szélsébségek számításának pontossága miatt elengedhetetlen. A modell anyaga ebben az esetben a levegő, amelynek a tulajdonságait a szoftver állítja be.

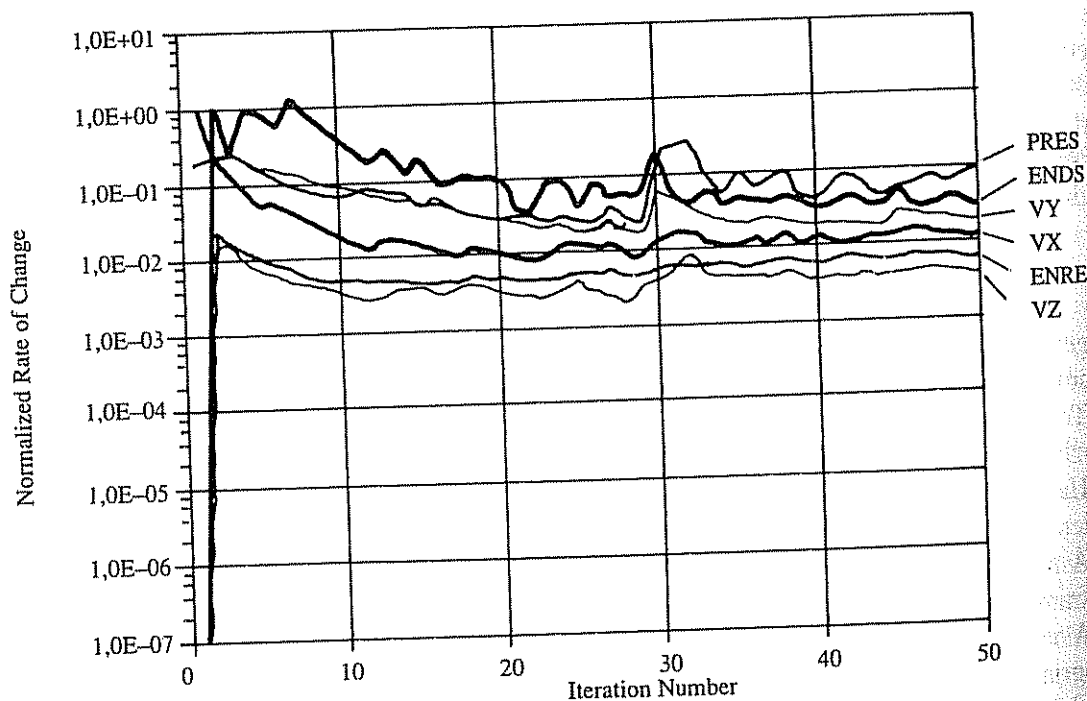
Terhelésként, a szélsébség és a légköri nyomás a kilépő és belépő felületekre a megadott érték. Az összes többi felületen a szélsébség 0 m/s.

A számítás beállításai: az áramlás turbulens és időben változó; az áramló közeg összenyomhatatlan. Ezeken belül állítható tulajdonságok (stabilitási paraméterek, turbulens áramlásra jellemző értékek stb.) a program által megadott beállításoknak megfelelőek.

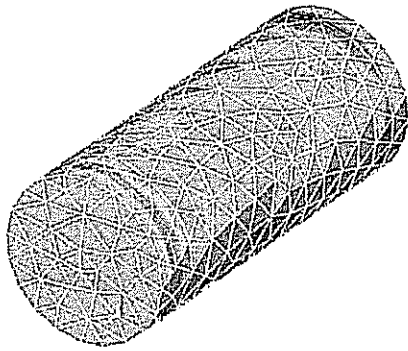
A program a felhasználó által definiált időintervallumokra számítja ki az áramlásra jellemző értékeket a szélcsatorna modell különböző pontjain. A számítás közelítő eljárás (6. 44. ábra), a közelítések száma az egyes időintervallumokon belül szintén megadható, így növelve a számítás pontosságát. Ezzel egy időben azonban nő a számításához szükséges idő is. A közelítések pontossága a képernyőről közvetlenül leolvasható a program futása közben.



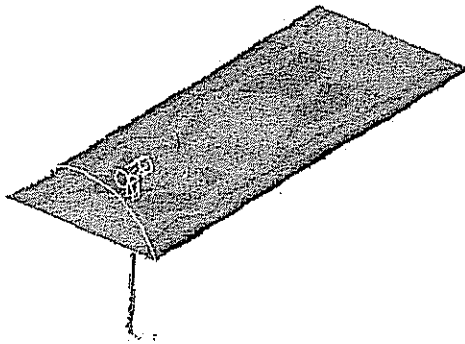
6.43. ábra. Az oszlop elhelyezkedése a szélcsatornában



6.44. ábra. A VEM program közelítése az egyes értékekre (eredeti szöveggel)



6.45. ábra. A nyomáeloszlás a palást mentén. Szélcsatornamodell



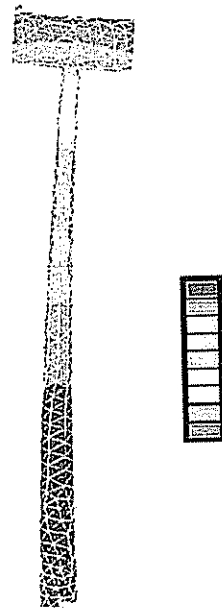
6.46. ábra. Nyomások az áramlási modell síkjában az oszlop hatására

A kapott eredmény kép formában jelenik meg, ahogy az már a rezgéstani modellek esetén látható volt. Az egyes színekhez a számértékek táblázatból leolvashatóak. Először csak a palást menti viszonyok jelennek meg (6.45. ábra). Erről metszeteket készítve lehet bepillantást nyerni a modellezett szélcsatorna belsejében lejátszódó folyamatokba (6.46. ábra).

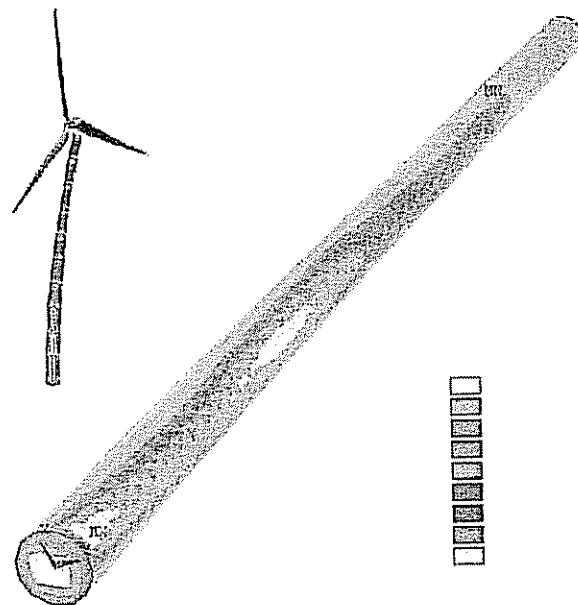
Mindenképp érdemes megjegyezni, hogy az így készült áramlási modellekről a nyomások és szélességek könnyen leolvashatóak, azonban az örvényleválások frekvenciáját pontosan nem lehet meghatározni, csak azt lehet biztonsággal eldönteni, hogy kialakulnak-e ilyenek, és ha igen, akkor a vizsgált geometriájú oszlop mely szakaszán.

6.8.7. A kapott nyomásértékek felhasználása bemenő terhelésként

Az előbb említett időintervallumokhoz tartozó áramlási viszonyok jellemzőit a program elmenti. Ha megvan annak a geometriának a szilárdságtani modellje, ami a modellezés során a légáram (vagy egyéb áramlás) útjába kerül, akkor arra, mint terhelés ráhelyezhető az áramlás során a körülötte létrejött nyomás. A nyomásteher mo-



6.47. ábra. A szélnyomás, mint statikus terhelés okozta elhajlás a hengeres ($\varnothing 14$ mm) oszlopon, terhelés: 109 g



6.48. ábra. A kúpos oszlop feszültségeloszlási (Pa) és elmozdulási képe a vizsgált szélteher hatására

delle helyezésekor ügyelni kell arra, hogy a szélcsatornában elhelyezett illetve a szilárdságtanilag vizsgált geometria teljesen egyforma, illetve a hálózás sűrűsége is közel azonos legyen (6.47. ábra, 6.48. ábra).

6.9. Szélgenerátor oszlop modellezése

6.9.1. A sajátfrekvencia és a felharmonikusainak meghatározása számítással

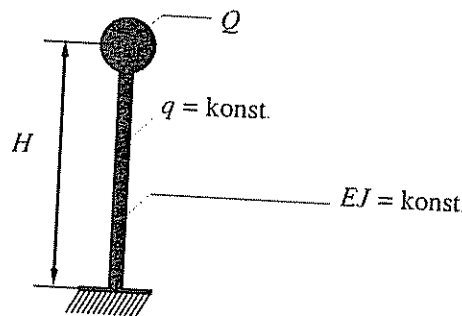
A tartószerkezetek tervezésénél alapvető tervezési probléma az adott helyen kialakuló szélviszonyok okozta kényszerrezgések és a transzverzális lengések rezonanciája. Mivel ha a szél okozta leválások időbeni eloszlása megegyezik a szerkezet saját frekvenciájával, ez az anyag repedéséhez vezethet.

A szélgenerátor oszlopok általában 30–120 m magasságú tartószerkezetek. A modellezések célja annak elemzése, hogy milyen eszközökkel lehet legkisebb fajlagos költséggel, a helyi (főként kontinentális) szélviszonyok előnyös kihasználása mellett, és a gyártási technológiát egyszerűsítő módon szélgenerátor oszlopot tervezni és kivitelezni.

A terhelés számítás és méretezés első lépése a szerkezet sajátfrekvenciájának a meghatározására, a nagy méretek és az összetett terhelések [54.] nagy bizonytalanságot rejtenek magukban manuális számítások esetén.

6.9.2. A sajátfrekvencia meghatározása manuális módszerrel

A sajátfrekvencia meghatározása Dunkerly-tétel értelmében a szerkezet elvi vázlata alapján (6.49. ábra):



6.49. ábra. A szerkezet mechanikus modellje

$$f' = f \sqrt{1 \pm \frac{n}{n_k}}, \quad (6.27)$$

$$n_k = 7,84 \frac{EI}{l^2}, \quad (6.28)$$

$$f = \frac{0,58}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\mu}}, \quad (6.29)$$

$$n = m \cdot g, \quad (6.30)$$

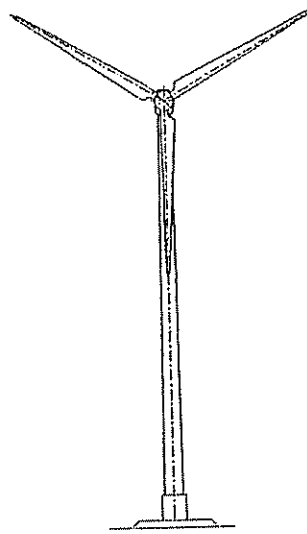
ahol: μ az egységnyi hosszúságú oszlop súlya (kg/m); m a gépház tömege; n a gépház súlya, N; n_{kr} a rezgésfajtának megfelelő kihajláshoz tartozó rugalmas kritikus erő, N.
A szerkezet első felharmonikusa:

$$f_2 = \frac{3,59}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\mu}} \quad (6.31)$$

6.9.3. Az oszlop sajátfrekvenciájának meghatározása végeelem analízissel

A gyakorlatban általában három típusú modellt alkalmazunk:

1. a rúdelemet (6.50. ábra);
2. héjszerkezetes modellt (6.51. ábra);
3. szilárdtest modellt (6.52., 6.53., 6.54. ábra).



6.50. ábra. 70 m-es kúpos csőoszlop (GE Wind)



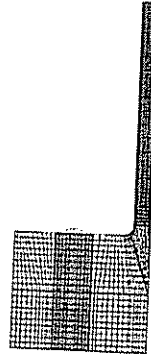
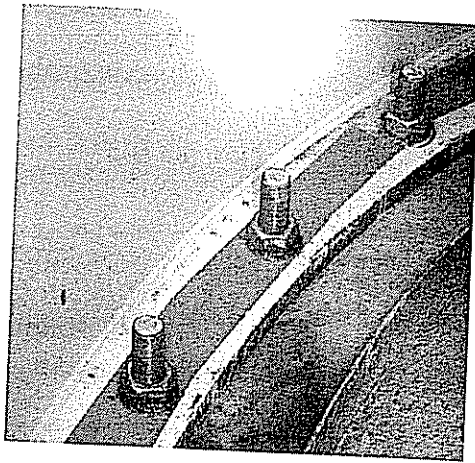
6.51. ábra. Héjszerkezet



6.52. ábra. Első sajátlengés
 $S_{11} = 0,45 \text{ Hz}$



6.53. ábra. Második sajátlengés $S_{12} = 3,54 \text{ Hz}$



6.54. ábra. A karima modellezése az előfeszített csavarral (GE Wind)

6.9.4. A kritikus szélesebbég számítása

$$v_{kr} = \frac{fd}{Sr} \left(\frac{m}{s} \right)$$

(6.32)

A Strouhal – számot általában 0,26-nak vesszük.

$$Re = \frac{v_{kr} d^6}{\nu}$$

(6.33)

Ha $Re > 5 \cdot 10^5$ az áramlás a kritikuson túli tartományba esik és ekkor az örvényleválást az oszlop saját lengése vezérli. A maximális szélesebbégre kell ellenőrizni a rezgés amplitúdót, amely a főterhelésnek számít.

A szélirányra merőleges erő és az ebből származó feszültségek és elmozdulások meghatározása

Az oszlop teljes hosszára eső keresztirányú erő:

$$F_y = \frac{\pi}{\delta} \cdot \frac{\rho_{lev} v^2}{2} \cdot c_y \cdot d \cdot l, N$$

(6.34.)

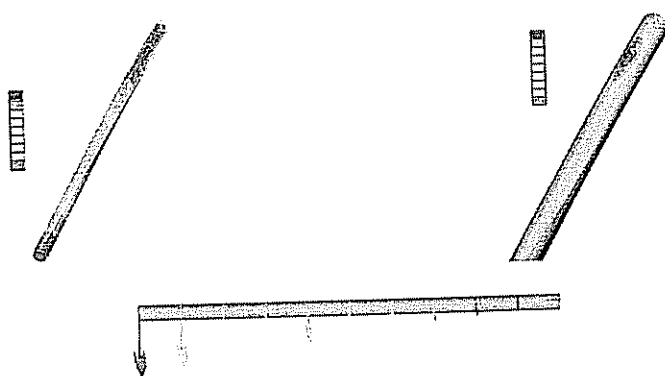
melyet a program statikus megoldó részében lefuttatva a következő eredményeket kapjuk (6.55., 6.56. ábra).

Ez a rezonancia hatás révén jön létre. Ugyanezt az esetet vizsgálva harmonikus terhelés esetén, a kritikus frekvenciát megadva és ábrázolva az amplitúdót a frekvencia függvényében jól látható, hogy a szerkezet saját frekvenciájának a közelében vannak az amplitúdó csúcsok, így ez is egy visszaigazolás a számítás ellenőrzésére.

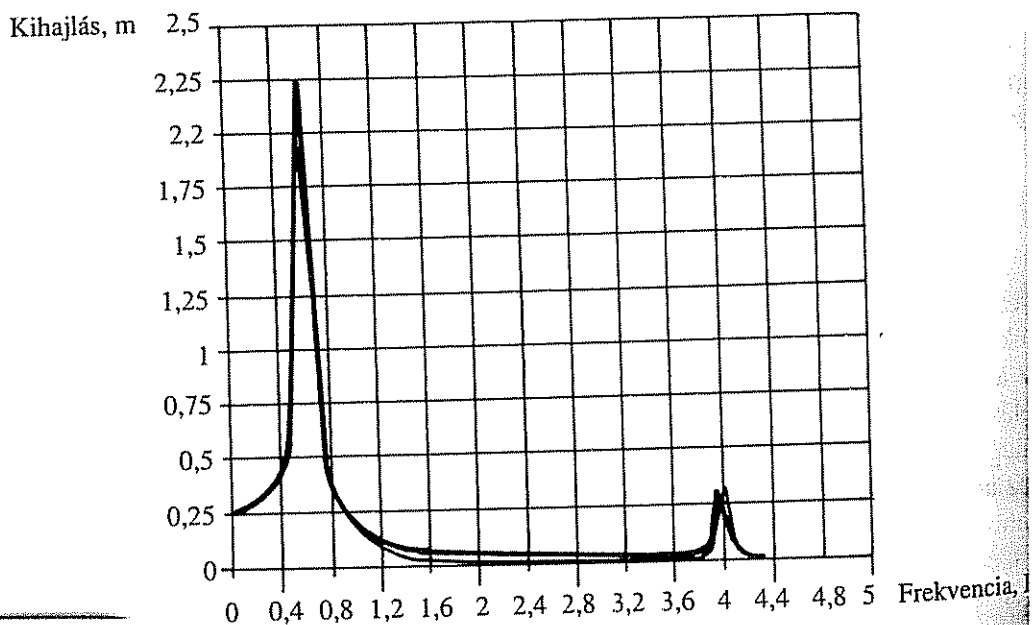
Ahhoz, hogy a végeredményt megkapjuk, és értékelni tudjuk, a következő metódika szerint kell eljárni:

1. A vizsgálandó szerkezet alapadatainak a megadása (sűrűség, rugalmassági modulus).

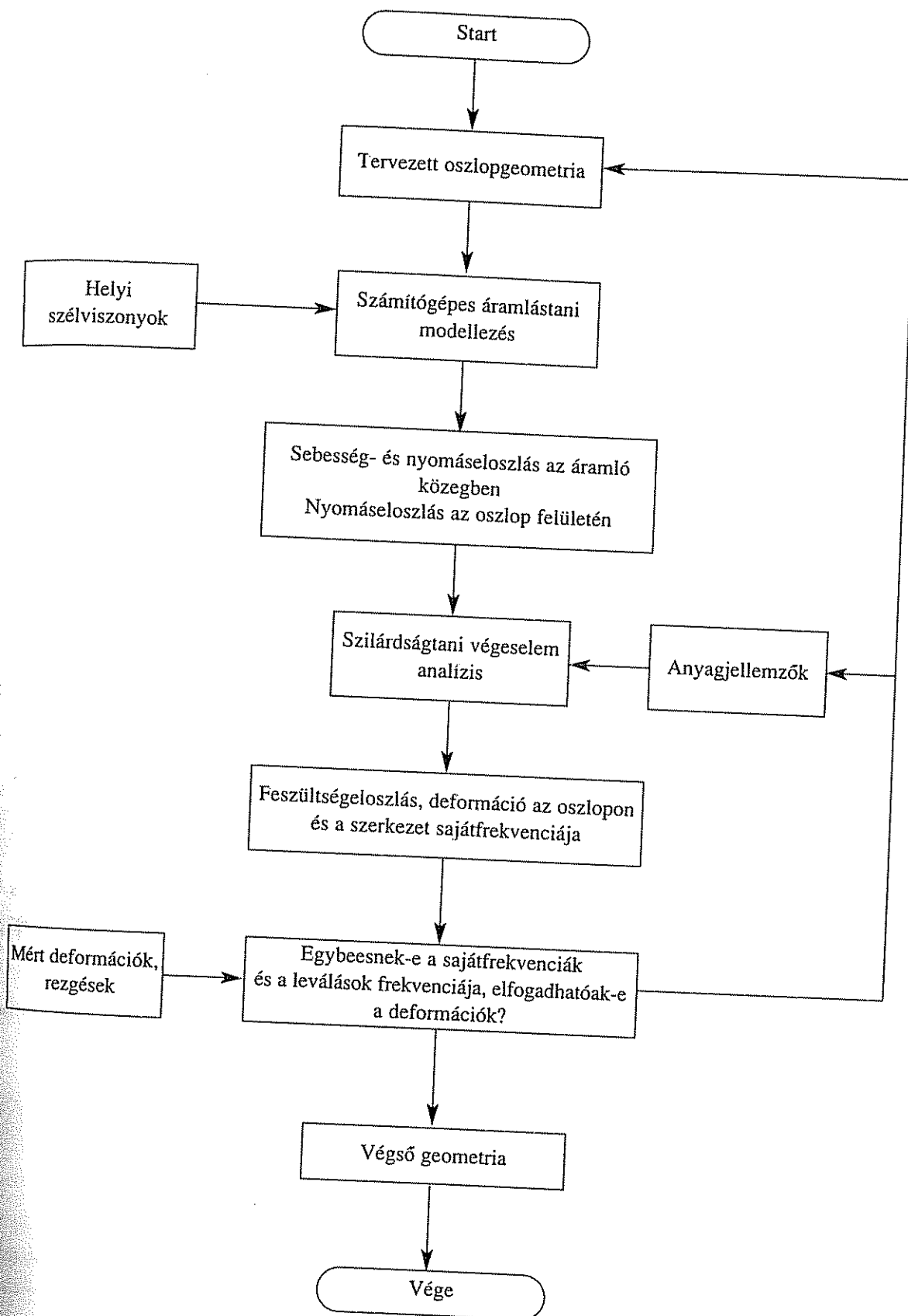
2. A szerkezet meghatározása a program rajzoló részével történt.
 3. A méretek és a számítógép memória kapacitásához a legoptimálisabb végelemekre való felosztása.
 4. Statikus analízissel az állandó terhelések lefuttatása (befogási csomópont megadása, gravitáció irány meghatározása, gépház súlyerejének meghatározása a terhelési csomópontokban.)
 5. Csomópont-analízissel a szerkezet sajátfrekvenciáinak a meghatározása.
 6. A számított oldalirányú szélteher meghatározása után a felületen ébredő nyomással, vagy a csomópontokban ébredő erőket alkalmazva harmonikus lengésmozgásos analízis vagy azzal egyenértékű erőkkel statikus analízis.
- A szélterhelés hatásmechanizmusa az eddigiektől eltérően összegezhető, amely gyelembe veszi a szerkezet sajátfrekvenciáit és a szél változásainak kölcsönhatását ez integrálható a végelem módszerrel végzett tervezési folyamatba is (6.57. ábr.)



6.55. ábra. A hengeres oszlop elmozdulás (m) a vizsgált oldalirányú terhelés hatására



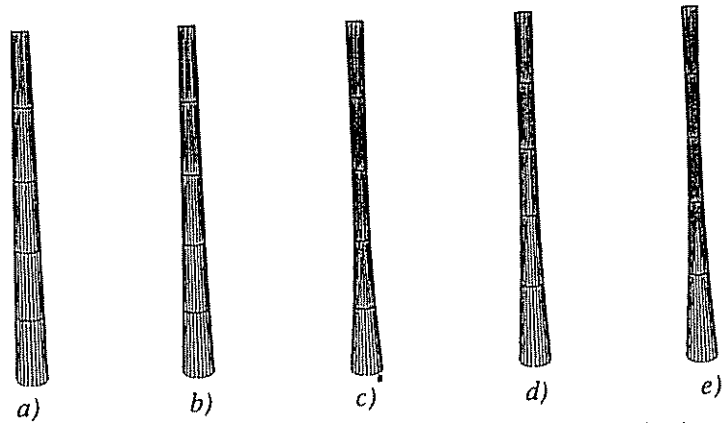
6.56. ábra. A szerkezet kilengése keresztirányban a gerjesztés frekvenciájának a függvényében



6.57. ábra. A szél és a szerkezet kölcsönhatásának folyamatábrája

6.10. A szélgenerátor oszlop geometriai méretének összefüggései

A geometria tudatos változtatásával befolyásoljuk a feszültségeloszlást az oszlopban (6.58. ábra).



6.58. ábra. Különböző íveltségű oszlopok (a, b és c); a legkisebb átmérő magasabban helyezkedik el (d és e)

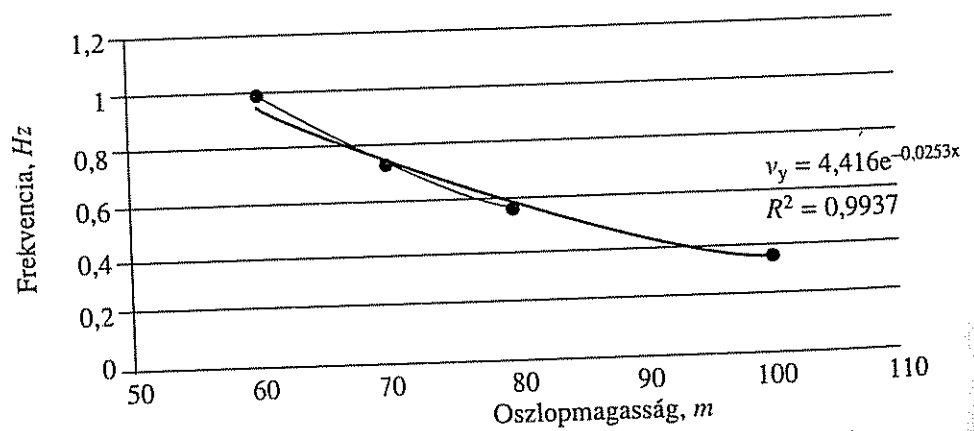
A szerkezet önlengése és a hossz méret változásának a kapcsolata

A szerkezetek sajátfrekvenciája függ:

- az anyagtól,
- a mérettől,
- az alaktól, és
- a szerkezetre ható statikus terheléstől.

A 60–100 m-es kúpos oszlop első sajátrezgésének változását vizsgáltuk a 40 t gépháztömeg esetén. A következő ábrán látható, hogy a szerkezet karcsúsításával a sajátfrekvenciák egyre kisebb értéket vesznek fel, ami a terhelés növelésével még inkább csökken (6.59. ábra).

Összefoglalva: A szerkezet sajátfrekvenciájának változása a hossz és a terhelés változtatás függvényében, azonos alak és falvastagság mellett a hossz méretváltozásokra érzékenyebb.



6.59. ábra. A sajátfrekvencia-változás a hossz méret függvényében

6.11. Szerkezeti elemek és erők

A szélturbinák minden erőátviteli eleme: a lapátok, az agy, a főtengely, a gépház csapágya az oszlop stb. úgy van méretezve, hogy:

- elviselje a túlterheléseket;
- ellenálljon az anyaghibából eredő gyors repedésnek (élettartam tervezés);
- mentes legyen a rezonanciától a működési sebesség tartományban.

A működésből fakadóan az aerodinamikai-, a centrifugális-, és a súlyerő kerülhet számításba. A számítások során különbséget kell tenni az idő függvényében változó terhelések között. A következőképpen csoportosíthatók;

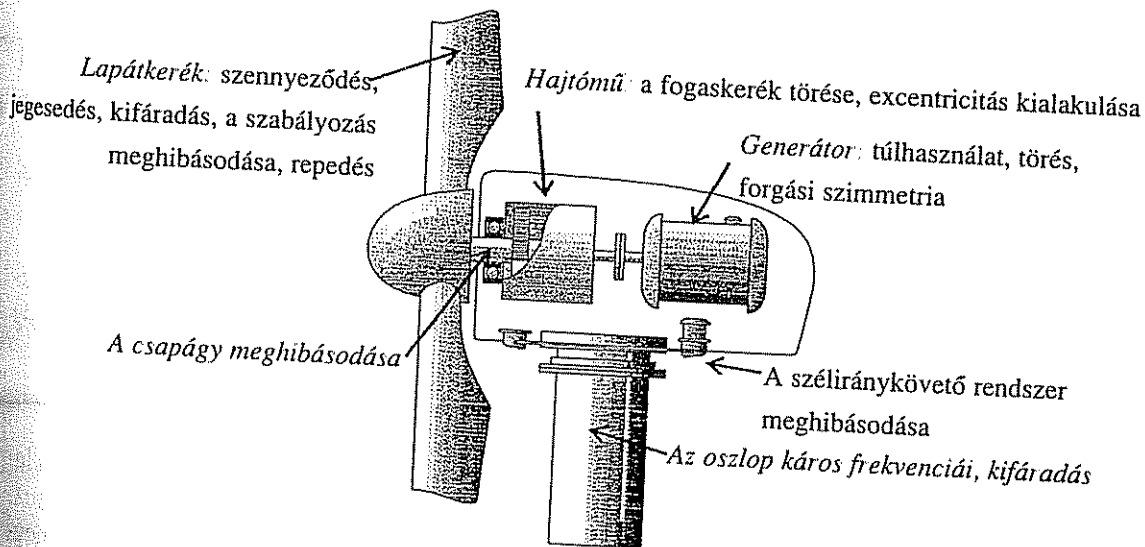
- *statikus terhelés*: az aerodinamikai terhelés az átlagos szélesebségnél, a centrifugális erő, s a gravitációs terhelés a gépház tömegéből fakadóan;
- *rövid idejű átmeneti terhelés*: a hálózat miatti leállítás;
- *ciklikus terhelés*: a torony árnyékhatása a lapátokon, forgás közben a lapátokon ébredő gravitációs erő, mechanikai vagy aerodinamikai kiegyensúlyozatlanság;
- *sztrohasztikus terhelések*: a turbulens, gyorsan változó szélökések.

Az extrém nagy erők üzemzavart, azonnali leállást okozhatnak. Hosszútávon a lapátkeréken a ciklikus és a strohasztikus terhelések vezetnek meghibásodáshoz.

6.11.1. Összetett terhelések

A részegységek terhelését meg lehet határozni, ha a különböző működési és környezeti viszonyok között fellépő terheléseket összegezzük. A jellemzőbbek:

- a normál működés;
- a mozgás mennyiség változás (indítás, fékezés, hálózattal való szinkronizálás);
- az extrém környezeti viszonyok hatása (jegesedés);
- a hibás üzem (generátor meghibásodás, extrém kiegyensúlyozatlanság, stb.);
- a telepítés során fellépő terhelések.



6 60. ábra. A szélerőmű részegységei magas fokú igénybevételnek vannak kitéve, ezért különböző meghibásodások érhetik ezeket az elemeket

Néhány terhelésforma egyszerre is felléphet, mint pl. a szélökések és a kiegyensúlyozatlanság. Más terhelések egyedileg jelentkeznek, pl. a hálózattal való összehangolás, vagy a fékezés idején. Ezért is az egyes terheléseket szuperponálva kell figyelembe venni a tervezés során (6.60. ábra).

A tervezésnél figyelembe kell venni az extrém igénybevételeket is. Kis és közepes méretű turbinák lapát-állásszög vezérlés nélkül gyakran kerülnek szélökéskor álló helyzetben maximális terhelést okozó helyzetbe. Gyakran a legnagyobb terhelés a lapátra érintőleges irányú, ilyen a fékezéskor, vészleállásnál és a generátor gyors indításánál.

6.11.2. Terhelések a szélgenerátorok lapátjain

1. Statikus terhelések

Az aerodinamikus terhelés a lapáton leírható a homogén szél nyomásával. Ezt minden egyes szárnylapát-metszetben számítjuk a szögsebesség függvényében. Számításnál szükséges figyelembe venni a metszetekben ébredő erőket és a teljesítmény karakterisztikát. Így a nyomáseloszlás kerületi és tengelyirányban is meghatározott.

2. Szélökésekből származó rövid távú terhelés

Az extrém szélökésből (kb. 60 m/sec) származó lapátterhelés viszonylag könnyen becsülhető. De a normális üzem közben is előfordulhatnak szélökések, amelyek nagy terhelést okozhatnak. Hogy a végső kitérést becsüljük tudnunk kell a szélökés típusát, az időtartamát, és a lapát sajátfrekvenciáját. A statikus kihajlás hozzáadódik a szélökések által okozott terheléshez.

3. Centrifugális és Coriolis erők által okozott terhelések a lapátkerék mozgása közben

hasonlóan az aerodinamikai erökhöz ezeket az eröket is metszetenként számítjuk ki a lapátra (megoszló terhelések és hajlító nyomatékok).

A centrifugális erök egyszerűbben számíthatóak, míg a Coriolis erök meghatározásánál figyelembe kell venni a lapátkerék szögsebességén kívül a széliránykövetésnél a csavarodás irányát ill. sebességét is mivel ez erősíti vagy gyengíti ezt a hatást. Így a gépházat rögzítő karima erőhatásait többszörös biztonsági tényezővel méretezik.

A lapátok súlya fontos terhelési tényező ami a forgáskor fejti ki a hatását a lapátra.

4. Ciklikusan jelentkező erök

A lapátkerék lehet az oszlop előtt vagy mögött. Az oszlop által okozott légmozgás-különbség, amely a lapátokra hat viszonylag csekély. A megfúvási szögkismértékű változását okozhatja az oszlop szélárnyéka.

5. Szélprofil, a turbulens határrétegben közel a talajhoz

A magasság függvényében nő a lapátkerékre ható átlagos szélesebesség, így a lapátkerék síkjában különböző erök ébrednek ezzel jelentős nyomatékot létrehozva. Emellett a lapát hatásfokát befolyásolja a domborzati viszonyok által meghatározott áramlás jellege.

6.11.3. Terhelések a gépházon és az oszlopon

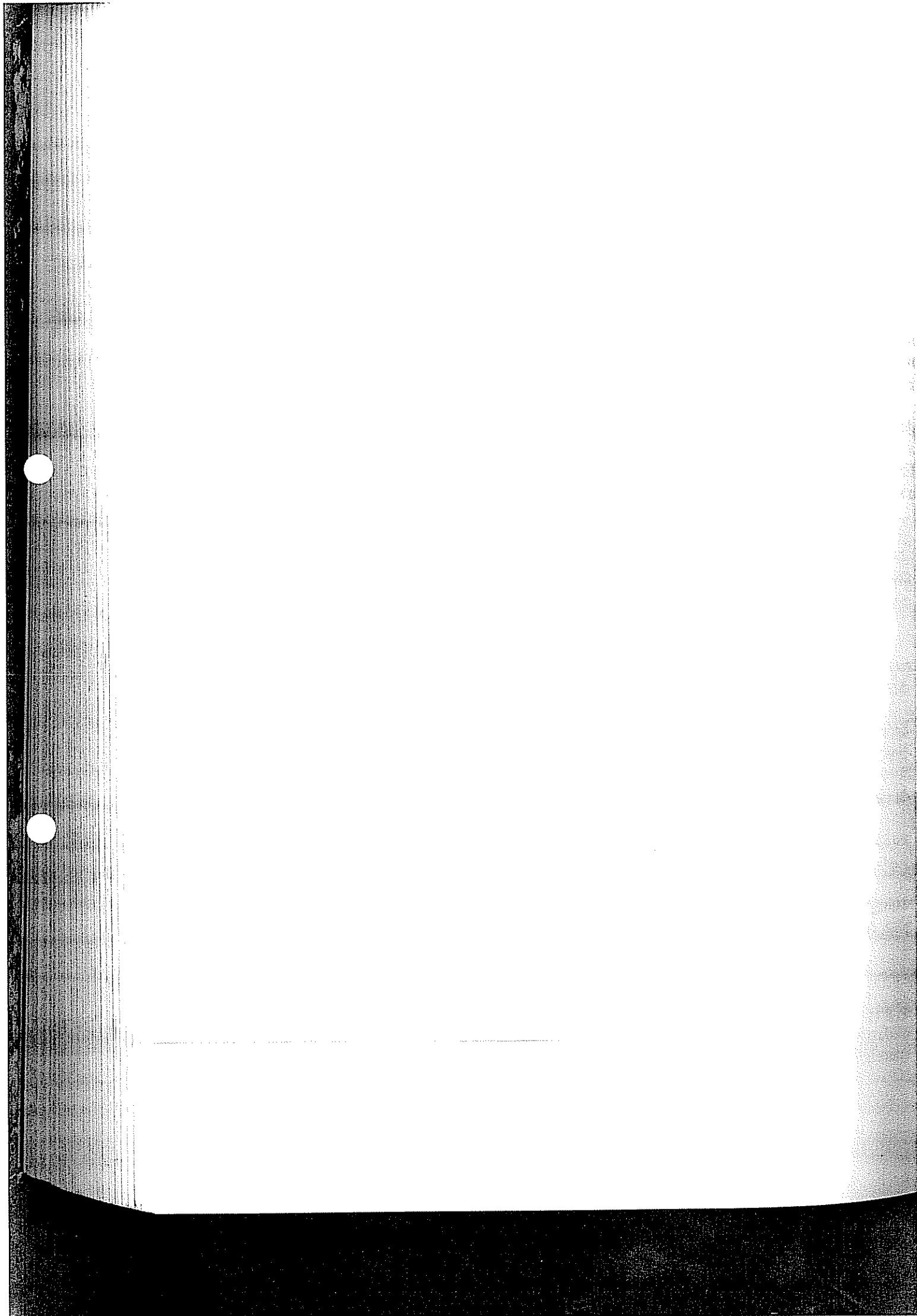
A legfontosabb erők a gépházon és az oszlopon a lapátkerék forgásából, rezgéséből és a súlyból erednek.

Az anyagok szilárdsági mutatói függvényében – a német Lloyd biztosító irányelvi szerint – biztonsági tényező számításokra van szükség. Az első lépés az, hogy meghatározzuk a szerkezetet érő terheléseket.

Az egyszerűsített módszer szerint maximum 20 éves élettartamra számítjuk a terhelést. Más alaposabb modellek szerint a működés körülményeitől függően a turbina élettartamát is tervezhetjük.

A Rain-Flow módszer csoportosítja a terhelések számított értékeit kéttényezős rendszerben alsó és felső értékek közé. A mátrix szintén tartalmazza a maximális és minimális terheléseket különböző üzemviszonyok között. A rendszer egyenletei az Eurocode 3-ban találhatóak meg [29.].

A Palmgren-Miner lineáris kifaradási kárhalmazódási hipotézis alapján a kifaradás minden osztályban a válaszreakciók ciklikus diagramja alapján számítható. N_i a vibrációk számát adja meg, amely még a szakítószilárdság alatti tartományban van. Ezeket összegezve a teljes kifaradási tényező értékének kisebbnek kell lennie egynél, a szélturbina tervezett élettartama alatt.



7. A SZÉLGENERÁTOROK VILLAMOS HÁLÓZATRA KAPCSOLÁSA

A különböző villamos szélerőgépek felhasználása üzemmód szerint kétféle lehet:

- szigetüzem, helyi energiafelhasználással,
- hálózati üzem, a megtermelt villamos energia elektromos hálózatra történő táplálásával.

A rákapcsolást úgy is ki lehet alakítani, hogy a szélgenerátorral mindkét üzemmódot meg lehessen valósítani.

A hálózatra kapcsolt gépek lehetnek egyediek, vagy csoportos telepítésűek. A csoportosan telepített szélerőműveket nevezzük szélfarmoknak.

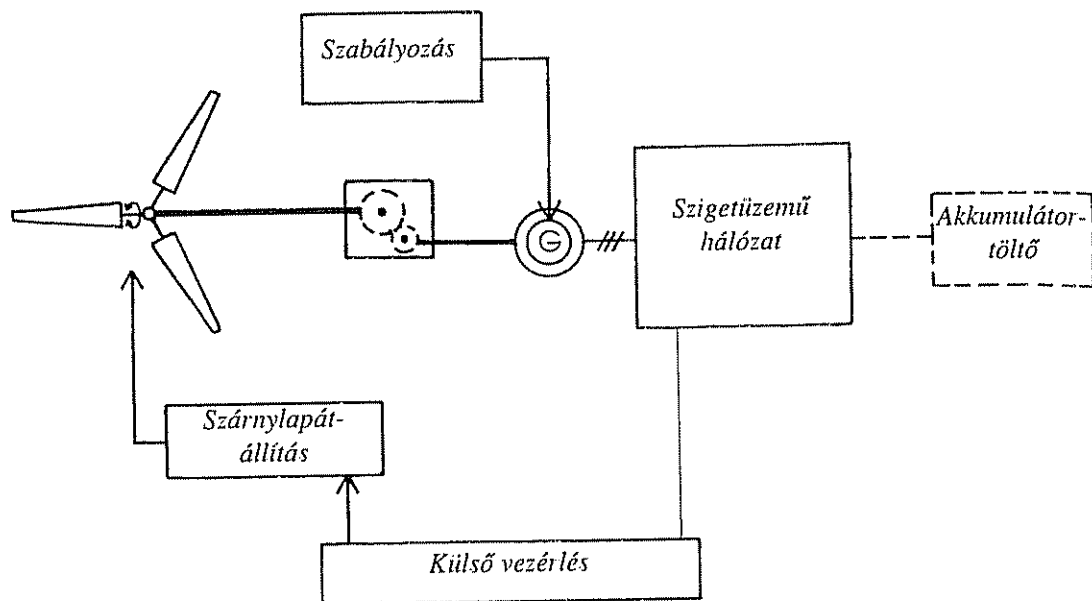
7.1. Szigetüzem

Szigetüzemről akkor beszélünk, mikor a termelt villamos energiát saját célra, a közcélú elosztóhálózattól függetlenül hasznosítjuk (7.1. ábra). Ez a villamos energiát termelőnek szuverén joga, viszont ezt a jogot csak a környezet veszélyeztetésének kizárásával gyakorolhatja. Ilyen veszélyforrás a kifeszültségű négyvezetős hálózatra tápláló generátor nullavezetőjén keresztül a fogyasztási helyen kívül eső, azzal fémes kapcsolatban levő közcélú hálózat (és más fogyasztók) nullavezetője potenciáljának veszélyes mértékű megemelése. Ilyen veszélyes mértékű potenciál emelés a fogyasztói vezetékhalózat és a közcélú hálózat nullavezetője fémes kapcsolatának szigetüzem esetén való megszüntetésével, vagy a potenciál veszélyes mértékű megemelése elleni védelem létesítésével megakadályozandó. A veszélyes mértékű potenciál mértékét az MSZ 172-1:1986 sz. szabvány 3.1.3. pontja (váltakozó áram esetén) 50 V felett határozza meg.

A szélgenerátort üzemeltető választhatja a generátor hálózati tartaléküzemét közcélú villamos hálózat kimaradása esetére. Ekkor a fogyasztói hálózat teljes egészében vagy részben szigetüzemben működik. Szigetüzemet a fogyasztó a tartalékellátás igénye nélkül kialakíthat más gazdasági vagy műszaki megfontolásból is.

A szélgenerátort üzemelőnek a szigetüzemre vonatkozó igényét az áramszolgáltatóval az engedélyezési eljárás során közölni kell, mint a hálózatra kapcsolás műszaki feltételeit meghatározó igényt [83.].

Ha az üzemeltető szigetüzemet tart, a fogyasztói hálózaton az engedélyezési eljárás során ki kell jelölni azt a megszakítót, amely a szigetüzemben maradó hálózat-részt a szinkronüzemű hálózatról leválasztja, és ezt nevezik a szigetüzemi határkapcsolónak.



7.1. ábra. A szigetüzem vázlata

A rendszer megtervezésénél fő feladat a szélenergia-konverter kiválasztása és a tárolókapacitás meghatározása. A szélenergia-konverter névleges teljesítményét az alábbi egyszerű összefüggésből határozhatjuk meg:

$$P_n = \frac{v_n}{v_a} (P_b + P_v) = \frac{v_n}{v_a} \left(P_v + \sum_{i=1}^n P_i \right), W, \quad (7.1)$$

ahol v_n – a névleges teljesítményhez tartozó szélesség, m/s.; v_a – a helyre jellemző átlagos szélesség, m/s; P_b – a beépített teljesítmény, a fogyasztók összes névleges teljesítménye, W; P_v a hálózat veszteségteljesítménye, W.

P_v -t meglehetősen körülményes meghatározni, ezért célszerű a hálózati jellemzők függvényében (vezeték hossz, keresztmetszet, fajlagos ellenállás, terhelés) a beépített teljesítmény 5–20%-a között megbecsülni.

A tárolókapacitást a következő összefüggés segítségével kalkulálhatjuk:

$$K_A = m \cdot \sum_{i=1}^n n_i \cdot \frac{P_i}{U_n}, A \cdot h, \quad (7.2)$$

ahol m a tartaléknapiok száma, azaz egy feltöltéssel elérhető üzemidő napokban; P_i/U_n az i -ik fogyasztó áramfelvétele, A; n_i az i -ik fogyasztó napi üzeme, h.

Az energiaellátás biztonsága az m helyes megválasztásán múlik. Ha a tárolókapacitás kicsi, időszakonként ellátási problémák lehetnek. Ha túl nagy, a megtermelt energia egy része veszendőbe mehet, mivel a feltöltött tárolókapacitás nem képes további energiát befogadni.

Az egyenfeszültségű hálózat és fogyasztók energetikailag nem előnyösek, jobb megoldás, ha a hálózat váltóáramú, normál váltóáramú fogyasztókkal. A váltóáramú ellátást úgy oldhatjuk meg, hogy a hálózat és az akkumulátorok közé egy DC/AC invertert (egyenáramú/váltóáramú átalakítót) építünk. Az átalakítás ugyan némi veszteséggel és többletköltséggel jár, azonban hosszabb távon a befektetés megtérül, és nem kell speciális fogyasztókat beszerezni.

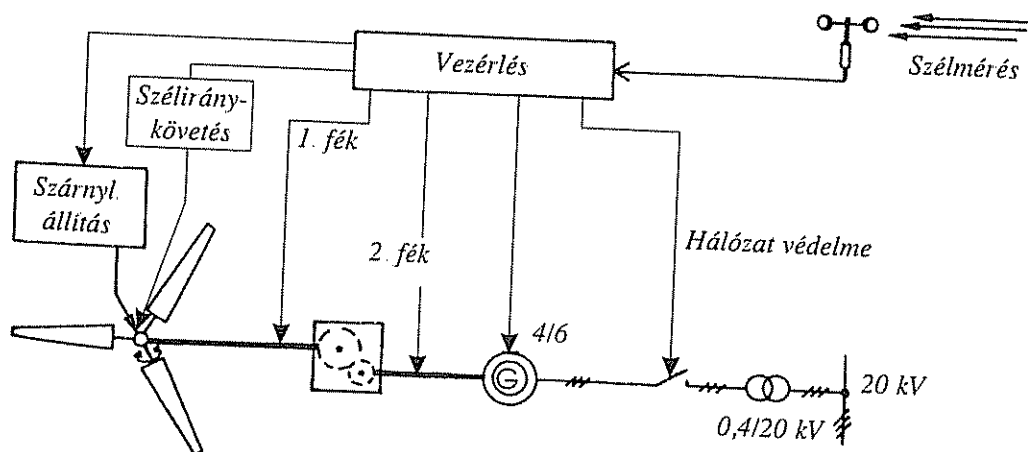
Ahol villamos hálózat is rendelkezésre áll, a két rendszer kombináltan alkalmazható. Az ellátást a villamos szélenergia-átalakító által megtermelt energiára alapozzuk, de szükség esetén (pl. csúcspont) a rendszert a hálózatról üzemeltetjük. A vegyes üzem intelligens áramköri elemekkel könnyen megoldható.

7.2. A villamos áram közcélú elosztóhálózatra táplálása

A leggyakrabban alkalmazott felhasználás a villamos áram közcélú elosztóhálózatra való rátáplálása (7.2. ábra). A szigetüzem, mint láttuk, a kisfogyasztók (háztartások, esetleg kisüzemek) lehetősége. Az ipari méretű villamosenergia-termelés szélenergiából azt jelenti, hogy a megtermelt energiát rátápláljuk a közcélú elosztóhálózatra. Így a szélenergia-átalakító szerves része lesz a hálózatot tápláló erőműrendszernek [84.].

A hálózati üzem minden előírt feltételét gazdaságosan csak a nagyteljesítményű szélenergia-átalakítókkal lehet teljesíteni. A fajlagos beruházási költségek kb. 100 kW feletti névleges teljesítménynél teszik lehetővé a gazdaságos hálózati üzemeltetést. A ma telepített villamos szélenergia-átalakítók a több száz kW-os teljesítménytől az 1–4 MW-ig terjedő kategóriákba tartoznak.

A 7.2. ábra a hálózati üzem elvi vázlatát szemlélteti. A rotorok nagy átmérője miatt ($D = 20\text{--}80\text{ m}$) a rotor fordulatszám alacsony ($n = 20\text{--}60\text{ 1/min}$), ezért a rotor és a generátor(ok) közé fordulatszám növelő hajtóművet kell beiktatni. A hajtómű többfokozatú, az 1000 1/min generátor fordulatszámot legalább három fokozattal célszerű előállítani.



7.2. ábra. A termelt áram villamos hálózatra táplálásának elvi vázlata

A szélerőmű két, egymástól független fékberendezéssel van ellátva. A rotor tengelyre ható fék (F1) a normális leállításra használható, a második, biztonsági fék (F2) vészhelyzetben lép működésbe és a generátor tengelyét fékezi.

A vezérlési funkciókat a szélerőmű mikroprocesszora látja el speciális vezérlő és adatgyűjtő programja segítségével. Mivel a vezérlés folyamatos energiaellátást igényel, a nagy szélerőművek csak villamos hálózathoz kapcsolva képesek működni.

A vezérléshez szükséges alapadatokat a csatlakozó szélmérő egység biztosítja, amely folyamatosan méri az aktuális szélesebességet és szélirányt. Ha a rotor beindul (ez általában kb. 3 m/s szélesebességnél következik be) a vezérlés gondoskodik a fordulatszám és terhelésszabályozásról: a rotor szárnyak állásszögét változtatja és szabályozza a generátort. Példánkban egy egygenerátoros szélerőművet vettünk, amelynél a terhelésszabályozás úgy történik, hogy a 4 és 6 pólusszámmal tekercselt generátornak kis szélesebességeknél a 6 pólusú körét kapcsoljuk, nagyobb szélesebességeknél (növekvő rotor fordulatonál) a 4 pólusú kör működik [29.].

(Itt jegyezzük meg, hogy a kettős tekercselésű generátorok alkalmazása csak egy lehetősége a terhelésszabályozásnak. Nagyobb gépeknél előnyösebb két, egy kisebb és egy nagyobb teljesítményű generátort alkalmazni.)

Ha a szélirány tartósan és számottevően megváltozik, szintén a vezérlés gondoskodik a rotor szélirányba állításáról: a villamos hálózatról táplált villanymotorok fordítják el a toronyhoz képest az erőműházat a szükséges mértékben, majd rögzítő fékekkel biztosítják a beállított irányt.

Amennyiben a szélesebesség eléri az erőműre veszélyes értéket (ez konstrukciótól függően 20–25 m/s szélesebesség) a rotor szárnyak állásszögét a vezérlő rendszer úgy módosítja, hogy ne ébredjen nyomaték a rotor tengelyen, a fék pedig megállítja a rotort és álló helyzetben rögzíti is azt.

7.3. A hálózatra csatlakozás (műszaki) feltételei

Erőmű létesítésére a villamos energia termeléséről, szállításáról és szolgáltatásáról szóló 1994. évi XLVIII törvény és a villamos energiáról szóló 2001. évi CX törvény (VET) valamint ezek módosításainak rendelkezéseit kell alkalmazni.

Csak az 50 MW és ezt meghaladó teljesítményű erőmű létesítése, működtetése, bővítése engedélyköteles tevékenység (Magyar Energia Hivatal).

Nem tagadhatja meg a közüzemi nagykereskedő az átviteli hálózatra csatlakozó erőműben a közüzemi szolgáltató az elosztó hálózatra csatlakozó erőműben termelt villamos energia átvételét, ha a villamos energia átadási teljesítménye 0,1 MW-nál nagyobb és a hálózatra adás megfelel az Üzletszabályzatban, valamint a villamosenergia-ellátási szabályzatokban meghatározott feltételeknek. Ez az átvételi kötelezettség többek között vonatkozik a szélenergia hasznosításával értékesítésre termelt villamos energiára is (a gazdasági és közlekedési miniszter 56/2002 GMK rendelete). Az idézett rendelet tartalmazza a villamos energia hatósági árait „csúcsidőszakra” és „völgyidőszakra” bontva.

A közcélú hálózatra csatlakozó szélerőművek hatást gyakorolnak a hálózat jellemzőire. Néhány ezek közül:

- Az állandósult állapotbeli feszültség szint (a hatás annál nagyobb, minél nagyobb a szállított hatásos és meddő teljesítmény, illetve minél gyengébb a hálózat).
 - Gyors feszültségváltozás, feszültség letörés. Szélturbinák esetében a turbinák indítása vagy a két generátor közti váltás okoz ilyen hatást. Gyenge hálózatoknál ez korlátozhatja a csatlakozó szélturbinák számát és névleges teljesítményét.
 - Periódikus feszültségváltozás (flicker). Ez elsősorban a fényforrások fényerejének változásán keresztül okoz kellemetlen hatást. A frekvenciaváltón keresztül hálózatra csatlakozó generátorok sokkal gyengébb flicker jelenséget okoznak, mint a hálózatra közvetlenül csatlakozó, állandó fordulatszámú generátorok.
 - Felharmonikus tartalom (elsősorban a 10 Hz–1 kHz tartományban). Ilyen felharmonikusokat mind a szélerőművek, mind az egyéb fogyasztók okozhatnak. Az MSZ EN 50160:2001 szabvány az egyes felharmonikusokra konkrét határokat ajánl a kis- és középfeszültségű elosztó hálózatokon. A teljes felharmonikus tartalomnak (THD) kisebbnek kell lennie 8%-nál.
 - Feszültség aszimmetria. Ezt elsősorban az egyfázisú fogyasztók aszimmetrikus eloszlása okozhatja a három fázison. 2~3% aszimmetriát el kell viselniük a szélerőművek generátorainak melegedés szempontjából.
 - A teljesítmény „minőségét” az előzőleg felsoroltakon túlmenően befolyásolja a hálózati frekvencia állandósága, a tápfeszültség rövididejű és tartós kimaradásának gyakorisága, túlfeszültségek stb. Jelenleg kidolgozás alatt áll egy nemzetközi szabvány a szélturbinák teljesítményének minőségére vonatkozóan.
 - A szélerőmű megnöveli a hálózat „zárlati teljesítményét”, zárlatok esetén a rátáplálás megnöveli a biztonsági berendezések szükséges kikapcsolási teljesítményét. Az elmondott hatások miatt az egyes áramszolgáltató cégek szabályzatai és irányelvei konkrét feltételeket szabnak meg a szélerőművek hálózatra való csatlakozásához és üzeméhez. Ezeknek az a célja, hogy a hálózatra csatlakozó fogyasztók zavartalanul működhessenek, és ne legyenek kitéve ártalmas hatásoknak.
 - A szélerőművek általában leválasztó transzformátoron keresztül csatlakoznak a hálózatra.
 - Kis teljesítményen (pl. Németországban 100 kW alatt) a csatlakozás történhet a 0,4 kV-os kiefeszültségű hálózatra. A gyenge hálózat erősen korlátozhatja a betáplálható teljesítményt. (Az alapprobléma az, hogy a hálózatot a teljesítmény szétosztására és nem az összegyűjtésére méretezték.)
 - Nagyobb teljesítményen (100 kW–1,5 MW) az erőmű a középfeszültségű (10, 20, 30 kV-os) hálózatra csatlakozik, esetleg a transzformátor alállomás középfeszültségű gyűjtősinjére.
 - Nagy szélparkok esetén a nagyfeszültségű (120 kV-os) alaphálózatra a leggyazdaságosabb a csatlakozás.
- Itt jegyezzük meg, hogy a szélerőművek berendezései – gazdasági okok miatt – általában 1000 V-nál kisebb névleges feszültségre készülnek.
- Az áramszolgáltatót célszerű bevonni a munkába már a tervezés szakaszában. Csak a tényleges igények ismeretében lehet alkalmazni az említett irányelveket, és meghatározni a csatlakozás pontos módját.

A hálózati csatlakozási pontnak és az áramszolgáltató kezelésében levő leválasztó kapcsolónak az áramszolgáltató személyzete számára mindenkor hozzáférhető helyen kell lennie. Ezt a megszakítót a védelmi berendezések működtetik, feladata, hogy az áramszolgáltató hálózatán vagy a szélerőműben bekövetkező hiba esetén az erőművet a közcélú hálózatról leválassza.

Az erőművek védelmi berendezéseit (pl. rövidzárlati, túlterhelési, földzárlati védelem) az érvényes MSZ szabványok szerint kell kivitelezni. A védelmi berendezések beállításait és a késleltetéseket szükséges az áramszolgáltatóval egyeztetni. A belső védelemnek kell a szélerőművet megvédeni az áramszolgáltató hálózatán bekövetkező gyors feszültségváltozások, gyors visszakapcsolások stb. káros hatásaitól. Pl. a hálózati oldali áramirányító védelmének azonnal fel kell ismernie a feszültség, ill. a hálózati frekvencia meg nem engedett változásait, és a határértékek elérésekor az erőművet le kell kapcsolnia a hálózatról az áramirányító tiltása és/vagy gyorskapcsoló működtetése útján. Visszakapcsoláskor ellenőrizni kell, hogy meg van-e mindhárom fázisfeszültség.

Számítással előzetesen ellenőrizni kell a csatlakozási ponton a feszültség változást a legkedvezőtlenebb esetekben. Szükség esetén meg kell változtatni vagy az erőmű névleges teljesítményét, szabályozási módját vagy esetleg a konstrukciót, a kapcsolást.

A felesleges meddő-teljesítmény szállítás elkerülésére a $\cos \varphi_H \approx 1$ teljesítménytényezőt kell elérni. A szükséges automatikus szabályozás a frekvenciaváltó hálózati áramirányítójának megfelelő vezérlésével könnyen elérhető.

A csatlakozási ponton mérni kell mind a hálózatba betáplált, mind az onnan felvett energiát. A fogyasztásmérő típusát, pontosságát és egyéb paramétereit az áramszolgáltató szabja meg, de rendszerint biztosítja is ezeket a műszereket. A tarifaváltáshoz szükséges átkapcsolás hangfrekvenciás vezérlő berendezésének felszereléséről is gondoskodni kell. Adott esetben a szélgenerátor motoros működésének ideje vagy teljesítménye korlátozva lehet.

A hálózati feszültség/áram felharmonikus amplitúdói és a teljes felharmonikus tartalom (THD) előnyösen befolyásolható a hálózati áramirányító megfelelő impulzus-szélesség modulációjával (ISZM). Adott esetekben szükség lehet hangolt felharmonikus szűrőkre, sávszűrőkre. A korábban említett fázisjavító kondenzátorok és a szűrő áramkörök azonban sokszor jelentősen lecsökkenthetik a hálózaton továbbított hangfrekvenciás vezérlőjeleket. Járulékos intézkedésekkel (pl. soros fojtók) azonban ezek a hatások javíthatók.

Az első üzembe helyezést az áramszolgáltató képviselőjének jelenlétében kell végrehajtani. Legkésőbb ekkor kell (újra) ellenőrizni a helyes fázissorrendű becsatlakozást.

7.4. Hálózat és a generátorok

A villamos hálózati összeköttetésnek több kényes pontja is van:

- A gépek rá- ill. lekapcsolásakor nagy pillanatnyi feszültségglökés léphet fel, ezért tirisztoros lágy indítót szoktak alkalmazni. Ez az indító áramot legfeljebb névleges áramerősségig engedi növekedni, majd néhány másodperc múlva kikapcsol, nehogy harmonikus rezgést okozzon.
- Az aszinkron generátorok rontják a teljesítménytényezőt. Ezt kondenzátorokkal javítják, vigyázva arra, hogy ha a szélgenerátor lekapcsolódik, akkor a frekvencia növekedése miatti öngerjesztés-növekedés ne okozzon elviselhetetlen feszültségnövekedést.

- A névleges teljesítmény elérése után a teljesítményt lapátállítás vagy átesés korlátozza, de ez nem elég érzékeny a turbulencia okozta gyors változásokra. Ezenkívül periodikus változást is okozhat a lapátok elhaladása az oszlop előtt vagy mögött. Ezt szerencsére több szélgenerátor együttműködése kisimítja, kb. a szélgenerátorok számának négyzetgyökével fordítva arányosan.
 - Ha valamelyik szélgenerátor üzem közben meghibásodna, az automata azt lekapcsolja, de a kis valószínűség miatt nem érdemes minden gépet külön védőkapcsolóval ellátni, elég egyet alkalmazni az egész szélfarm csatlakozásánál.
 - A szélgenerátorok közötti és a közös vezetéken a veszteség kb. 3-5%. A - rendszerint föld alatti - kábelek méretezése gazdasági kérdés. Célszerű minden szélgenerátornál transzformátort elhelyezni, hogy az összeköttetés már nagyobb feszültségen történjen.
 - A szélgenerátorok egyenkénti földelése gondot okozhat, különösen, ha azok sziklára vannak alapozva. Rendszerint egy csupasz földkábel vezetnek végig a kábelcsatornában, amelynek összes ellenállása nem lehet több mint 1 ohm.
- Fontos tényező az is, hogy a szélgenerátorban milyen generátor található. Ezt általában a gyártó cég határozza meg, de vannak olyan típusok is melyeket mindkét fajtaival gyártanak, és a helyi körülményeket figyelembe véve választják ki a megfelelő típust.

7.5. Szinkron generátor hálózatra csatlakozása

A szinkron gép alkalmazásánál felmerülő esetleges felharmonikus tartalom mértékét ellenőrizni szükséges. Amennyiben nem megengedhető mértékű, gondoskodni kell a felharmonikus tartalom csökkentéséről. A gerjesztőrendszer kialakítása legyen alkalmas a vézleállás miatt bekövetkező feszültségúllendülés megengedett határon belül tartására. Alkalmazni kell olyan alapvédelmeket, melyekkel a belső vagy külső hibák esetén a villamos hálózatról történő szelektív leválasztás elérhető és gépegység sérülése megelőzhető.

A szükséges védelmek:

- túlterhelés elleni teljesítmény növekedési védelem,
- vissz-teljesítmény védelem (1000 V-nál nagyobb feszültségű generátorra),
- testzárlat védelem (álló és forgórész testzárlat védelem, gyártói előírás),
- feszültségcsökkenés és emelkedés elleni védelem,
- gerjesztés kimaradás védelem (1000 V-nál nagyobb feszültségű generátorra),
- megszakító beragadás védelem.

Aszinkron generátor hálózatra csatlakozásának feltételei

Aszinkron gép alkalmazása esetén figyelembe kell venni, hogy az ÁSZ érintett elosztóhálózatának üzemeltetője előírhatja fázisjavító kondenzátortelep beépítését. Alkalmazni kell olyan alapvédelmeket, melyekkel a belső vagy külső hibák esetén a villamos hálózatról történő szelektív leválasztás elérhető és a gép egység sérülése megelőzhető.

A szükséges védelmek:

- feszültségcsökkenés és emelkedés elleni védelem,
- frekvenciacsökkenés és emelkedés elleni védelem,
- késleltetés nélküli túláram védelem,
- testzárlat védelem,
- megszakító beragadás védelem.

A szükséges védelmi funkciók mindkét generátor típusnál egyedi vizsgálat alapján feltárt feladatokra bővíthetők. A védelmek működtetésére akkumulátorról táplált segédüzemi rendszert szoktak létesíteni.

7.6. A villamos hálózat

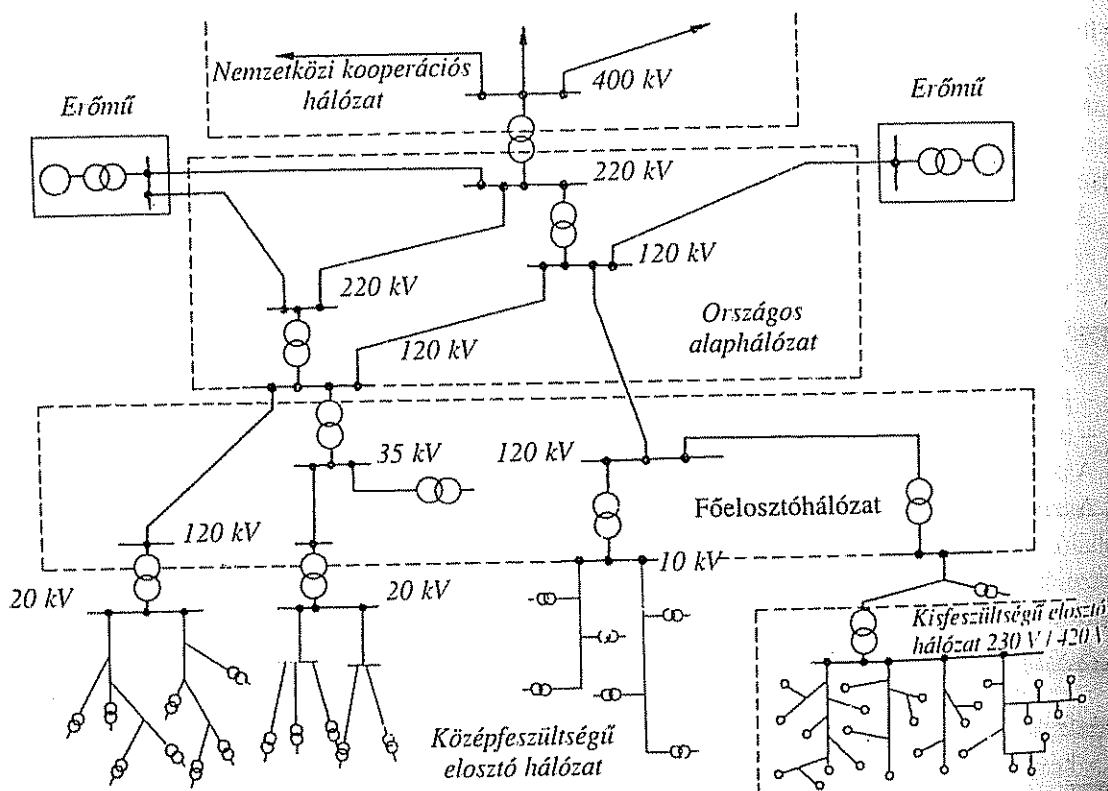
A hálózatok feladata az erőművekben – esetünkben szélerőmű – előállított villamos energia szállítása és elosztása. A hálózat feszültség szintjétől függően megkülönböztetünk kis- és nagyfeszültségű hálózatokat. Az általános nemzetközi gyakorlat szerint kisfeszültség az 1 kV és az ennél kisebb feszültség, míg az 1 kV-nál nagyobb feszültséget nevezünk nagyfeszültségnek.

A szabványos feszültség szintek hazánkban:

- törpefeszültség: 12 V, 24 V, 48 V,
- kisfeszültség: 230 V, 420 V,
- nagyfeszültség: 3, 6, 10, 20, 35, 120, 220, 400, 750 kV.

E feszültség szintek szerint osztják fel a villamos hálózatokat:

- Nemzetközi kooperációs hálózatok: a különböző országok alaphálózatait köti össze, biztosítva ezzel a nemzetközi energiaszállítást (750 kV, 400 kV).
- Országos alaphálózat: az erőművek és a csomóponti nagy transzformátorállomások üzemszerű összekapcsolása (400 kV, 220 kV).
- Főelosztó hálózat: a villamos energia elosztása az alaphálózati csomópontokból az elosztóhálózatok táppontjaihoz (35 kV, 120 kV).



7.4. ábra. Villamos hálózat elvi vázlata

- Elosztó hálózat: a villamos energia nagyfeszültségen való elosztása az állomások gyűjtősinjeitől a fogyasztói transzformátorokig (3–35 kV)
- Kisfeszültségű, vagy fogyasztói hálózat: a villamos energia közvetlen elosztása a fogyasztók között (220 V, 380 V).

20 kV-os gyűjtősinre vagy hálózatra táplálás követelményei

A csatlakozó szélgenerátort a vonatkozó szabványok szerint az áramszolgáltató üzemeltetőjével egyeztetve kell létesíteni. A 20 kV-os hálózata ellenálláson keresztül földelt csillagpontú, sugaras üzemelő kábel hálózat. A földzárlat kiválasztás az ívöltő tekercssel párhuzamosan automatikával bekapcsolt áramnövelő ellenállással történik, a megnövelt földzárlati áram értéke 100 vagy 200 A. A hálózaton tartós földzárlatos üzem megengedett.

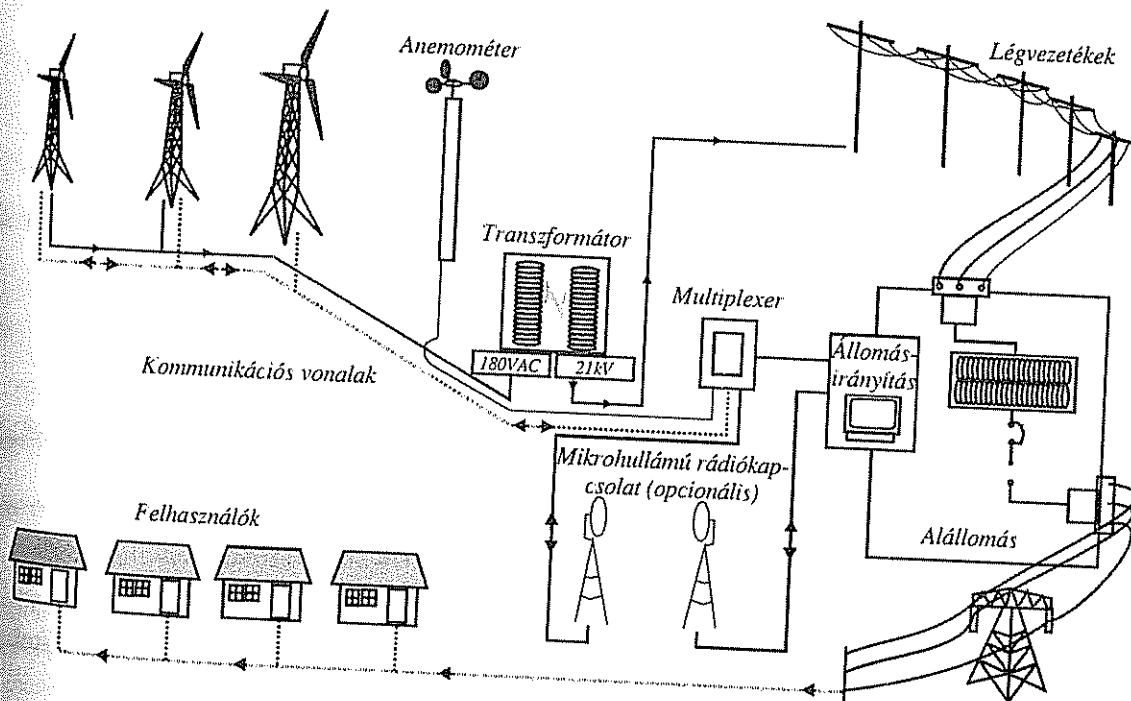
Ha a szélerőmű 20 kV-os csatlakozó vezetékének fogyasztói terhelése és az erőmű teljesítményének aránya azt indokolja, akkor csatlakozó célkábel kell az áramszolgáltató 20 kV-os elosztóhálózatának sinjéig kiépíteni.

A szükséges távvezetéki védelmek az áramszolgáltató 20 kV-os hálózatának táppontján:

- irányított két áramfokozatú fáziszárlati túláram-idő védelem,
- irányított földzárlati túláram-idő védelem,
- kétlépcsős visszakapcsoló automatika,
- gyűjtősin védelem,
- megszakító beragadás védelem.

Az előírások szerint gondoskodni kell arról, hogy a szélerőmű lekapcsolódjon, ha a csatlakozási pontját tápláló közcélú elosztóhálózat vonali mezőjének áramszolgáltatói táplálása megszűnik, amit a gép mikroprocesszoros vezérlése el is végez (7.5. ábra).

Általánosan elmondható, hogy a hálózati csatlakozásnál a következő villamos paramétereket kell folyamatosan ellenőrizni:



7.5 ábra. Szélparkok csatlakoztatása a villamos hálózatra

- feszültség,
- áram,
- frekvencia.

Ha bármely paraméter a megengedett értékhatárokon kívüli értéket vesz fel, gép a lekapcsol a hálózatról [36.].

Az előzőekben leírtakon kívül természetesen sok egyéb műszaki kialakítás is létezik, de csak a konkrét feladattal kapcsolatosakat említettük.

7.7. A csatlakoztatás jogi feltételei

A jogi feltételek vizsgálatánál ki kell térni:

- az 1994. évi XLVIII. törvény (Villamos Energia Törvény) ide tartozó rendelkezéseire és ezek később kiadott végrehajtásáról szóló rendelkezéseire,
- az Ipari, kereskedelmi és idegenforgalmi miniszter 55/1996. (XII. 20.) IKIM rendeletének ide vonatkozó paragrafusaira,
- az áramszolgáltató üzletszabályzatának ide vonatkozó rendelkezéseire.

Az Ipari, kereskedelmi és idegenforgalmi miniszter 55/1996. (XII. 20.) IKIM rendeletének 4. §-a szerint:

A villamos energia szállítója vagy szolgáltatója nem tagadhatja meg a megújuló energiát felhasználó erőműben, azaz a

- geotermikus erőműben,
- vízerőműben,
- naperőműben,
- szélenergiaerőműben,
- bioerőműben

termelt villamos energia átvételét, ha az erőmű szerződésben rögzített minimális átadási teljesítménye 0,1 MW-nál nagyobb (7.5. ábra).

A következőkben az áramszolgáltató üzletszabályzatának ide vonatkozó rendelkezéseit ismertetjük:

Az áramszolgáltató a Villamos Energia Törvény (VET) értelmében köteles a villamos energiát a legalacsonyabb áron beszerezni. A villamos energia – az üzemi szabályzatban taglaltak szerinti – vásárlása történhet:

- szállítótól,
- termelőtől,
- más szolgáltatótól,
- saját használatú erőműtől.

A szolgáltató köteles a szállítótól a kondenzációs erőművek által termelt villamos energiát a jelenlegi szolgáltatói csatlakozási pontokon átvenni, illetve ez esetben saját berendezéseit szállításra átengedni.

7.7.1. Értékesítési szándék bejelentése

A villamos energia értékesítési szándékkal jelentkező ez irányú igényét az áramszolgáltatónál írásban kell bejelentenie. A bejelentésnek tartalmaznia kell a következőket:

- termelőberendezés feszültség szintje,
- csatlakozás feszültség szintje,

- villamos teljesítmény,
- az áramszolgáltatónak felkínált teljesítmény havi és napszaki bontásban,
- tervezett éves üzemidő havi bontásban,
- átadásra felkínált villamos energia mennyisége havi és napszaki bontásban,
- az elhelyezési terv, amelyből a telekhatárok és a felállítási hely kitűnik,
- teljes villamos berendezés áttekintő kapcsolási rajza, a beépített eszközök adataival, (egyvonalas ábrázolás elegendő),
- adatok a középvezetési állomás zárlati szilárdságáról,
- adatok a kapcsolókészülékek zárlati szilárdságáról,
- a hálózati csatlakozáshoz alkalmazott transzformátor/transzformátorok leírása (névleges teljesítmény, áttétel, relatív rövidzárási feszültség),
- a védelmi berendezések leírása pontos adatokkal a fajtáról, gyártmányról, kapcsolásról és funkcióról,
- az üzemi erőmű hozzájárulása a kezdeti rövidzárlati áramhoz csatlakozási ponton,
- a hajtógép fajtájának és üzemmódjának leírása, a generátor és adott esetben a váltóirányító leírása, a hálózathoz kapcsolás,
- módjának leírása adatlapok és vizsgálati jegyzőkönyvek alapján,
- váltóirányítónál: a várható felharmonikus áramok és a közbenső harmonikus vizsgálati jegyzőkönyve,
- szél erőműveknél: a várható hálózati visszahatások tanúsítványa, vizsgálati jegyzőkönyve.

7.7.2. Az áramszolgáltató hálózatára csatlakozás feltételei

A csatlakozási pont helyét egyedi vizsgálat alapján minden esetben az áramszolgáltató jelöli ki a másik fél szempontjainak figyelembevételével.

A csatlakozó-berendezés kiépítésének költségei az értékesítési szándékkal jelentkező felet terhelik. Az elszámolási mérőberendezés a csatlakozó berendezés része.

A vásárolt villamos energia minőségi paraméterei

A minőségi jellemzők előírt tűréshatárokon belül történő tartása az értékesítési igénnyel jelentkező feladata.

A feszültség jellemzői

A feszültség névleges értékére és tűrésére az MSZ 1:2002 szabvány előírásai az irányadók. Kisfeszültségen a szabványos feszültségérték az európai egységes 230 V-ra való áttérés miatt a következőképpen alakul:

- 1994. 01. 01.–1995. 12. 31. 400/230 V +2,8% –11,5%
- 1996. 01. 01.–2007. 12. 31. 400/230 V +5,2% –8,7%
- 2008. 01. 01.-től 400/230 V +7,8% –7,4%

A szolgáltató vállalja, hogy a feszültség minőségére érkező jogos panaszok orvoslására a rendelkezésére álló eszközökkel mindent megtesz, és az esetek 90%-ban 2,5 éven belül a szabványos feszültséget biztosít.

A feszültség minőségével kapcsolatos panaszok kivizsgálásának az alapja a CENELEC (Európai Elektrotechnikai Szabványosítási Bizottság) által kiadott anyag.

Az ellátási feszültség jellemzőire a szabvány a várható határértékeket adja meg, amelyek között a jellemzők változhatnak, mivel a fogyasztó csatlakozási pontján a feszültség az elosztó hálózaton túlmenően nem független a felettes hálózat hatásaitól és a fogyasztók visszahatásaitól, amelyek időben változnak. Tehát az ellátó feszültség jellemzőit véletlen és előre nem látható hatások befolyásolják, amelyek uralása nem, vagy gazdaságos módon nem lehetséges.

A szabvány szerint az ellátási időtartam 95%-ában kell a megadott határértékeken belül lennie a feszültségnek és jellemzőinek.

A zavartartásokra különösen érzékeny készülékek esetén a kiegészítő intézkedésekről (pl. stabilizált tápegység) a fogyasztónak kell gondoskodnia.

Hálózati frekvencia

A szolgáltatott váltakozó áram frekvenciájának névleges értéke $50 \text{ Hz} \pm 2\%$.

Kereskedelmi szerződések kötésének rendje

Az áramszolgáltató és villamos energia vásárlási partnerei közötti együttműködésének feltételeit kereskedelmi szerződésben kell rögzíteni. A szerződés határozott időtartamra érvényes. A kereskedelmi szerződésnek tartalmaznia kell:

- a szerződő felek pontos megnevezését, telephelyét,
- a szerződés tárgyának, hatályának leírását,
- a tulajdonjogi határokat,
- a csatlakozási pontokat (üzemszerű, ill. tartalék),
- a villamos energia mérési pontokat,
- a mérőberendezések leírását,
- a hálózatra adott villamos energia mennyiségét, teljesítményét,
- a hálózatra adott villamos energia díját,
- a mérőleolvasási napokat,
- a számlázási időszakot,
- a fizetési feltételeket,
- a szerződésszegést és következményeit mindkét félre nézve egyaránt,
- a vitás kérdések rendezésére vonatkozó szabályokat,
- a szerződésmódosítás feltételeit,
- a szerződés mellékleteit,
- a szerződés érvényességi idejét.

Üzemviteli megállapodás

Az üzemviteli megállapodásnak tartalmaznia kell:

- a kooperációs hálózatképet,
- a műszaki létesítmények, berendezések leírását,
- az energiaellátás módját,
- az átadott villamos energia minőségi jellemzőit
- az üzemvitel, üzemirányítás rendjét
- karbantartást,
- védelmek, automatikák leírását,
- intézkedésre, kapcsolásra jogosultak megnevezését, hírközlést,
- egyéb rendelkezéseket.

Vásárolt villamos energia mennyisége

Az áramszolgáltató hálózatára adott, tervezett villamos energia mennyiség részletezése havi bontásban, napszakonként (éjjel, nappal, völgy és csúcsidőszakban), valamint külön hatásos ill. meddőenergiára vonatkozóan.

Az áramszolgáltató hálózatára adandó villamos energia mennyiségét a fogyasztás határozza meg. A kereskedelmi szerződésben azt kell meghatározni havi bontásban, hogy minimum és maximum mekkora teljesítményt tud biztosítani a szállító, illetve kíván igénybe venni az áramszolgáltató, csúcsidőben illetve csúcsidőn kívül.

A tervezett üzemidő és a kétfajta teljesítmény szorzata adja az átadandó villamos energia mennyiségének két szélső értékét. Az elszámolás alapja a mért mennyiség.

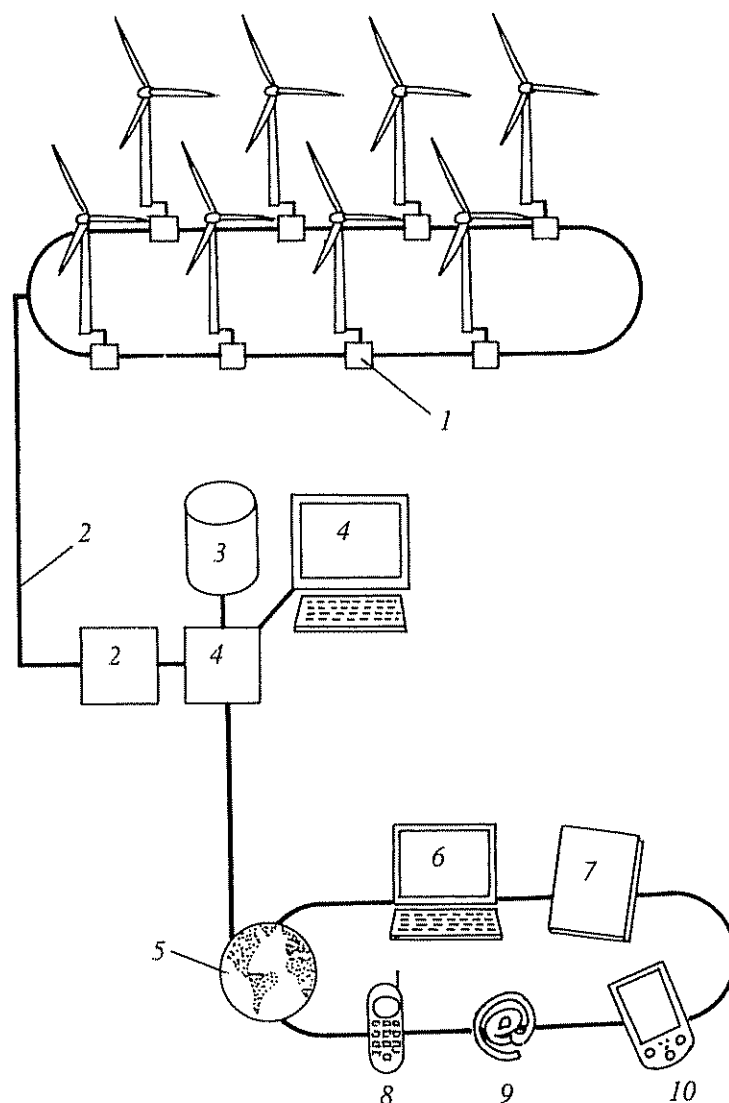
Az **Európai Unió** 2001. október 27-én új irányelvet fogadott el a megújuló energiaforrások szabályozásával kapcsolatban. Az alábbiakban az irányelv idevonatkozó „**Hálózati vonatkozások**” című cikkelye található.

1. Kötelezettség nélkül a hálózat (villamos energia vezetékes hálózata) biztonságának és megbízhatóságának fenntarthatóságára, a Tagállamok tegyék meg a megfelelő intézkedéseket annak biztosítására, hogy a nagyfeszültségű villamos alaphálózat-üzemeltetők és a (kis feszültségű) elosztási rendszer üzemeltetői a területükön garantálni tudják a megújuló energiaforrásokból termelt villamos energia átvitelét és eloszlását. Ezen kívül előnyben részesíthetik a megújuló energiaforrásokból termelt villamos energia becsatlakozását a hálózatba. A villamos energia hálózatni adásakor a nagyfeszültségű villamos alaphálózat-üzemeltetők részesítsék előnyben a megújuló energiaforrásokat hasznosító áramtermelő egységeket, amennyire a nemzeti villamos energiarendszer működése megengedi.
2. A Tagállamok léptessenek érvénybe egy jogi keretrendszert, vagy kötelezzék a nagyfeszültségű villamos alaphálózat üzemeltetőket, illetve a (kis feszültségű) elosztási rendszerüzemeltetőket, hogy állítsák fel és tegyék közzé saját irányadó szabályukat az olyan technikai alkalmazások költségeinek viselését illetően, mint a hálózati csatlakozások és hálózati fejlesztések, melyek szükségesek a megújuló energiaforrásokból származó villamos energiát termelők villamos energia hálózatra kapcsolásához.
Jelen szabályoknak pártatlan, átlátható és diszkrimináció-mentes kritériumokon kell alapulniuk, különös tekintettel a fent említett termelők hálózatra kapcsolásának összes költségére és hasznára. A szabályok rendelkezhetnek különböző típusú csatlakozásokról.
3. Ahol szükséges, a Tagállamok követelhetik a nagyfeszültségű villamos alaphálózat üzemeltetőktől és a (kis feszültségű) elosztási rendszer üzemeltetőitől, hogy – részben vagy egészben – viseljék a 2. paragrafusban említett költségeket.
4. Kötelezzék a nagyfeszültségű villamos alaphálózat-üzemeltetőket és a (kis feszültségű) elosztási rendszerüzemeltetőket, hogy minden új csatlakozni kívánó termelő részére részletes és átfogó, a csatlakozással kapcsolatos költségbecslést adjanak. A Tagállamok megengedhetik a hálózathoz csatlakozni kívánó, megújuló energiaforrásokból villamos energiát termelők számára, hogy versenytárgyalást (tendert) írjanak ki a csatlakozási munkálatokra.
5. A Tagállamok léptessenek életbe egy jogi keretet, vagy követeljék meg a nagyfeszültségű villamos alaphálózat-üzemeltetőktől és a (kis feszültségű) elosztási rendszer üzemeltetőitől, hogy állítsák fel és tegyék közzé saját irányadó szabályukat az

olyan rendszer-berendezések, mint a hálózati csatlakozások és fejlesztések, költségeinek – az összes hasznélvező termelő közötti – megosztására vonatkozóan.

A költségek megosztását kényszerítse ki egy pártatlan, átlátható és diszkriminációmentes kritériumokon alapuló mechanizmus, mely figyelembe veszi a kezdetben és később összekapcsolt termelőknek a nagyfeszültségű villamos alaphálózat-üzemeltetőknél és a (kis feszültségű) elosztási rendszer üzemeltetőinek a csatlakozásból származó előnyeit.

6. A Tagállamok biztosítsák, hogy az átviteli és elosztási díjak kiszabása nem különbözteti meg hátrányosan a megújuló energiaforrásokból termelt villamos energiát, különösen az olyan periférikus térségekben termelt megújuló energiaforrásokból származó villamos energia esetében, mint a szigetek, és az alacsony népsűrűségű térségek.



7.6. ábra Szélerőműpark nemzeti hálózatba kapcsolása: 1 generátorok, inverterek és transzformátorok; 2 hálózat; 3 helyi fogyasztók; 4 elosztó és vezérlő egység; 5 nemzetközi hálózat; 6 nemzetközi elosztó; 7 adatbázis; 8, 9 és 10 kommunikációs lehetőségek

Ahol szükséges, a Tagállamok léptessenek életbe egy jogi keretrendszert, vagy követeljék meg a nagyfeszültségű villamos alaphálózat-üzemeltetőktől és a (kis feszültségű) elosztási rendszer üzemeltetőitől annak biztosítását, hogy a megújuló energiaforrásaikat hasznosít) erőművekből származó villamos energia átalakításáért és elosztásáért kirótt díjak, az erőművek hálózatra történő csatlakoztatásából származó, realizálható költségelőnyöket tükrözzenek. Az ilyen költségelőnyök az alacsonyfeszültségű hálózat közvetlen használatából eredhetnek.

7. A Tagállamok, vagy az általuk kijelölt illetékes szervek értékeljék a létező törvényi és szabályozási keretet, készítsenek jelentést erről, amelyben, vegyék figyelembe a megújuló energiaforrásokból termelt villamos energia hálózatra történő csatlakoztatásának elősegítésére tett lépéseket is. A jelentés vizsgálja meg, többek között, a kétirányú mérés (áramfogyasztás és termelés számlálása egyben) bevezetésének kivitelezhetőségét (7.6. ábra).

7.8. Szélerőművek csoportos telepítése

A szélenergia hasznosításban is gazdasági előnyt jelenthet, ha az erőműveket koncentráltan, csoportosan telepítjük. Így viszonylag kis helyen erőműhálózat hozható létre, amely a fajlagos beruházási és üzemeltetési költségeket jelentősen csökkentheti, a szélből nyert villamos energia piaci versenyképességét növelheti.

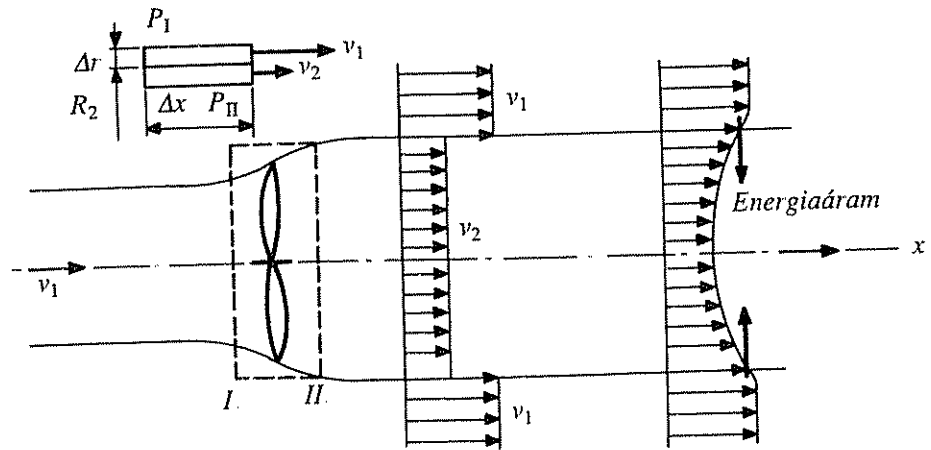
A szélfarmokkal kapcsolatban meglehetősen sok tapasztalat gyűlt már össze elsősorban az Egyesült Államokban (Kalifornia) és Nyugat Európában (Dánia, Anglia, Németország) létesített erőműhálózatok révén. Az erőműtelepeket a jó széljárású, tengerparti vidékeken és szeles fennsíkokon kezdték el telepíteni, ahol általában a lakosság gyér, a gépek telepítésére szinte korlátlanul áll rendelkezésre hely.

Más a helyzet kontinentális viszonyok között, például Európa „belsejében”. A viszonylagos helyszűke miatt a csoportos telepítés helyszíneinek kiválasztása nagy körültekintést igényel. A csoportos telepítés egyik alapvető kérdése a berendezések tér- és távközeinek meghatározása úgy, hogy egymás működését az erőművek ne zavarják. A domborzat általában a meghatározó, de pl. sík vidékeken ilyen támpont a tervezésnél nincs. A telepítési rend meghatározásához tudnunk kell, hogy hogyan alakulnak az áramlási viszonyok az erőmű után, meddig zavart a légáramlat az aktuális szélirányban a rotor mögött [36.].

A rotor, a levegő mozgási energiáját csökkenti, azzal hatáskeresztmetszetében sajátos áramlási viszonyokat eredményez. A rotor mögött kialakuló áramlási tér azonban nem marad állandó, a zavartalan légtömegek felől energia áramlik a rotor hatáskeresztmetszete irányába, amelynek eredményeként a rotor mögött bizonyos távolságban helyreáll az eredeti áramlási kép.

A feladat tulajdonképpen az, hogy leírjuk a rotor mögötti áramlás- vagy energia-egyenlítődési folyamatot, amely segíthet a szélerőművek csoportos telepítésének megtervezésében [83.].

A rotor keresztmetszetben és a rotor mögötti térben történő légáramlás bonyolultsága miatt most is kénytelenek vagyunk egyszerűsítő feltételekkel élni. Tételezzük fel, hogy az áramlás a rotor mögött is megőrzi lamináris jellegét, sűrűsége nem változik és eltekintünk a gravitációs hatásoktól is.



7.7. ábra. Vázlat a rotor mögötti tér áramlási viszonyainak tanulmányozásához

Tudjuk, hogy a rotor mögött a légáram lelassul, mivel mozgásmennyisége megváltozik. A mozgásmennyiség megváltozásával a nyomáskülönbségből származó erők tartanak egyensúlyt. A 7.7. ábra szerinti rotornál ellenőrzőfelületet felvéve az impulzustörvény szerint:

$$(p_1 \pm p_{II}) \cdot A = \rho \cdot A \cdot v(v_1 \pm v_2),$$

ahol v a rotoron átáramló levegő közepes sebessége:

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

A nyomáskülönbség így a rotor két oldalán:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} (v_1^2 \pm v_2^2), Pa.$$

Természetesen ez a nyomáskülönbség hat a határrétegben is, amely súrlódási erő eredményez a különböző sebességgel mozgó rétegek között. Az S súrlódási erő gyorsítja a rotor mögötti áramlási tér levegőmolekuláit. A zavartalan áramlási térből így energiaáram indul, az áramlás a rotor mögött kiegyenlítődik. A kérdés az, hogy a rotortól az áramlás irányában milyen távolságban történik meg az áramlás kiegyenlítődése, azaz praktikusán adott széliránynál mekkora távolságra telepíthető egy szélrózgától egy másik úgy, hogy egymás működésére ne legyenek lényeges befolyással.

A Navier-Stokes egyenlet alapján az áramló közegben fellépő csúsztatófeszültség:

$$\tau = \nu_k \cdot \rho \cdot \frac{dv}{dr}, Pa,$$

ahol ν_k a közeg kinematikai viszkozitása, m^2/s .

Esetünkben a határréteg mentén kiválasztott két Δr vastagságú és Δx hosszúságú elemi réteg között fellépő súrlódóerő:

$$S = \Delta A \cdot \tau = 2\pi \cdot \Delta x \cdot \nu_k \cdot \rho \cdot (v_1 \pm v_2), N$$

A lapátkerék mögötti v_2 sebességű légtömeg energiahiánya:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v_k (v_1 \pm v_2)^2$$

amelyet, amint említettük, a súrlódási erő visz át a v , sebességű áramlási térből. Ez az energiátanszport meglehetősen bonyolult áramlási viszonyokkal írható le, de ha megelégszünk a folyamat végeredményének meghatározásával, akkor nem szükséges komolyabb bonyodalmakba keveredni. A ΔE energiamennyiség teljes egészében a határrétegen át közvetítődik az áramcső belsejébe, a szükséges súrlódási munka:

$$E_s = \Delta E = S_h \cdot l, J.$$

Itt most azzal a feltételezéssel élünk, hogy a határrétegben ébredő súrlódási erő (S_h) a folyamat során állandó, és ennek az erőnek valamely l hosszon kell hatnia, tehát l az áramláskiegyenlítő elméleti úthossza. Az egyenletből

$$l = \frac{\Delta E}{S_h} = \frac{\frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot l (v_1 \pm v_2)^2}{2\pi \cdot l \cdot v_k \cdot \rho \cdot (v_1 \pm v_2)}, m.$$

Az egyenletben most a felgyorsítandó tömeget az l hosszal fejeztük ki, $m = A\rho l$. Egyszerűsítésekkel és tudva azt, hogy v_2 a teljesítménytényező C_p függvénye:

$$l \cong \frac{R^2 \cdot (v_1 \pm v_2)}{4v_k} = \frac{R^2 \cdot v_1}{4v_k} \left(1 \pm \sqrt{1 \pm C_p}\right), m.$$

Tekintettel arra, hogy a levegő kinematikai viszkozitása meglehetősen kicsiny ($\nu_k = 15,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T = 0 \text{ °C-on}$), l -re a szokásos rotorméreték mellett nagy értékek adódnak. Ne felejtjük azonban el, hogy lamináris áramlást feltételeztünk még a határrétegben is. Márpedig a valóságban az áramlási tér a rotor előtt, és főleg a rotor után nem tisztán lamináris, a határrétegben pedig elkerülhetetlenül fellép a turbulencia – elsősorban a szárnyvégi leválások miatt. Így az áramláskiegyenlítés hamarabb bekövetkezik a valóságban, mint az elméleti úton nyert összefüggésből ez adódna. A turbulenciából adódó rétegcseré, a szélirányváltozások az árnyékszóna lerövidülését okozzák [36.].

Ha a fenti egyenletnek közvetlen gyakorlati haszna nincs is, arra azért mindenképpen jó, hogy megmutatja az árnyékszónát befolyásoló tényezőket. A szélfarmokon szerzett tapasztalatok azt mutatják, hogy a rotor árnyékhatása a rotortól mért (20–30) R távolságban már elhanyagolható. A rotor környezetében a légáramlás – főleg nagyobb szélesebességeknél – nem jellemezhető a kinematikai viszkozitással. A rotor mögötti áramlási tér erősen örvényes (a szárnyak, lapátok „megcsavarják” a szelet), amelyet kénytelenek vagyunk figyelembe venni (7.9. ábra).

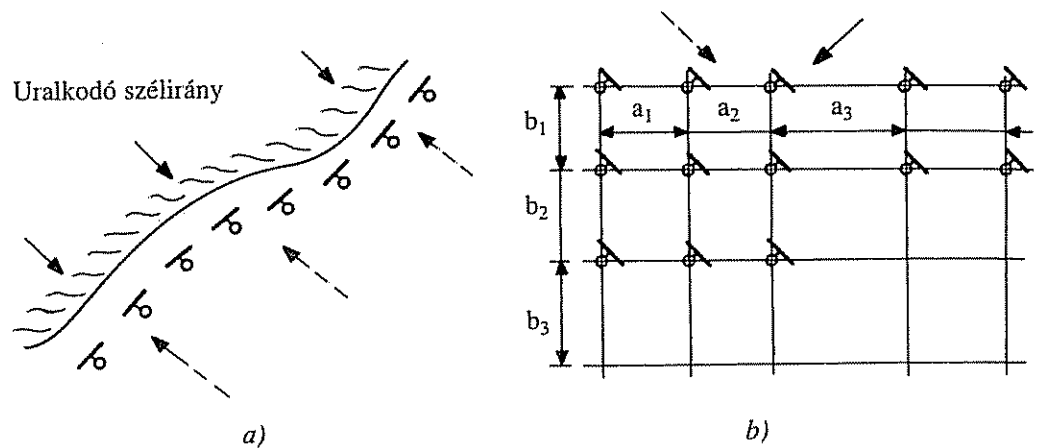
Hogy a fenti egyenletet a tapasztalatnak megfelelővé tegyük, vizsgáljuk meg az egyenletben szereplő ν_k tényezőt, amit kinematikai viszkozitásnak nevezünk. Ennek mértékegysége m^2/s , ami úgy is értelmezhető, mint időegység alatt bekövetkező keresztmetszet/felület változás. Ha tehát az egyenletbe egy olyan pl. K tényezőt helyet-

tesítünk v_k helyére, amely az árnyékvóna keresztmetszetének időegység alatti csökkenését jelenti és értékét tapasztalati úton meghatározzuk, akkor olyan összefüggéshez jutunk, amely a szélérőművek csoportos telepítésénél már jól felhasználható:

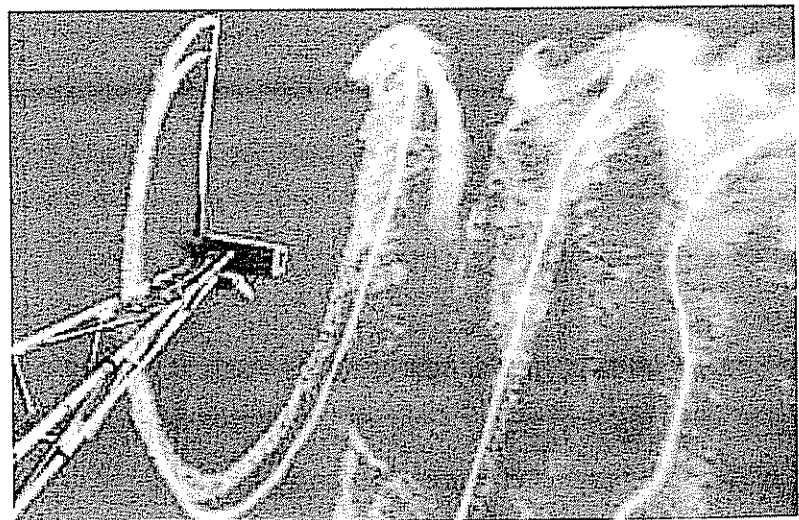
$$l \cong \frac{R^2 \cdot v_n}{4K} \left(1 \pm 3\sqrt{1 \pm C_p} \right), m,$$

ahol v_n – a szélérőgép névleges teljesítményéhez tartozó szélességen 1/s; $K \approx 0,2-0,3 \text{ m}^2/\text{s}$, a rotor kialakításától függően; l_{\min} – a telepítés legkisebb távolsága két szélérőgép között.

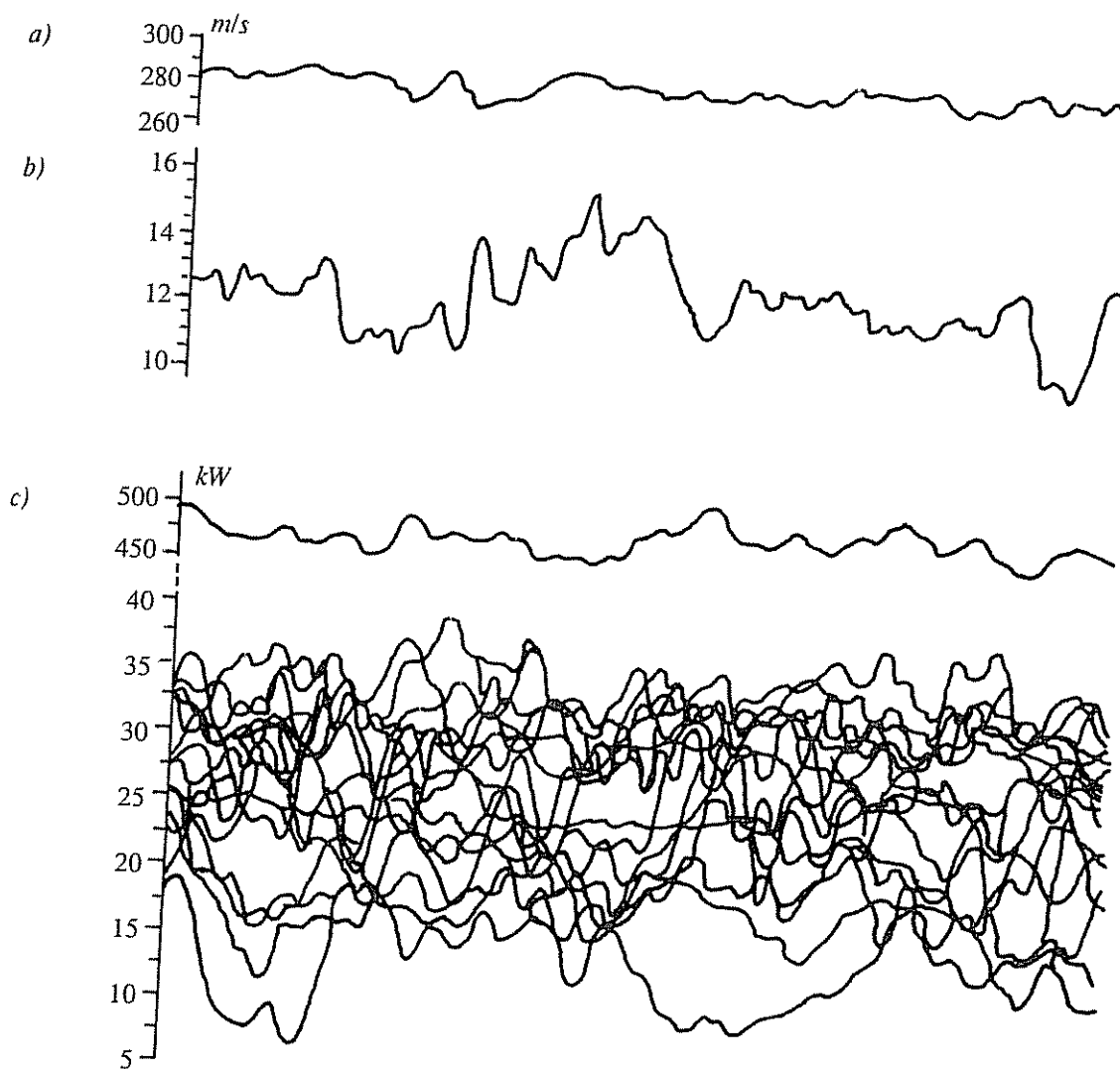
Csoportos telepítésnél természetesen a telepítési rendet nagyon sok más tényező is befolyásolja (domborzat, uralkodó szélirány(ok), természetes ill. épített objektumok stb.). Mi az egyenlet levezetésénél csak és kizárólag az áramlási viszonyokat vettük figyelembe és azt a minimális távolságot becsültük meg, amely aerodinamikai szempontból szükséges két berendezés között [37.].



7.8. ábra. Szélérőművek vonalas (a) és hálós (b) telepítése



7.9. ábra. Áramlás a lapát mögött

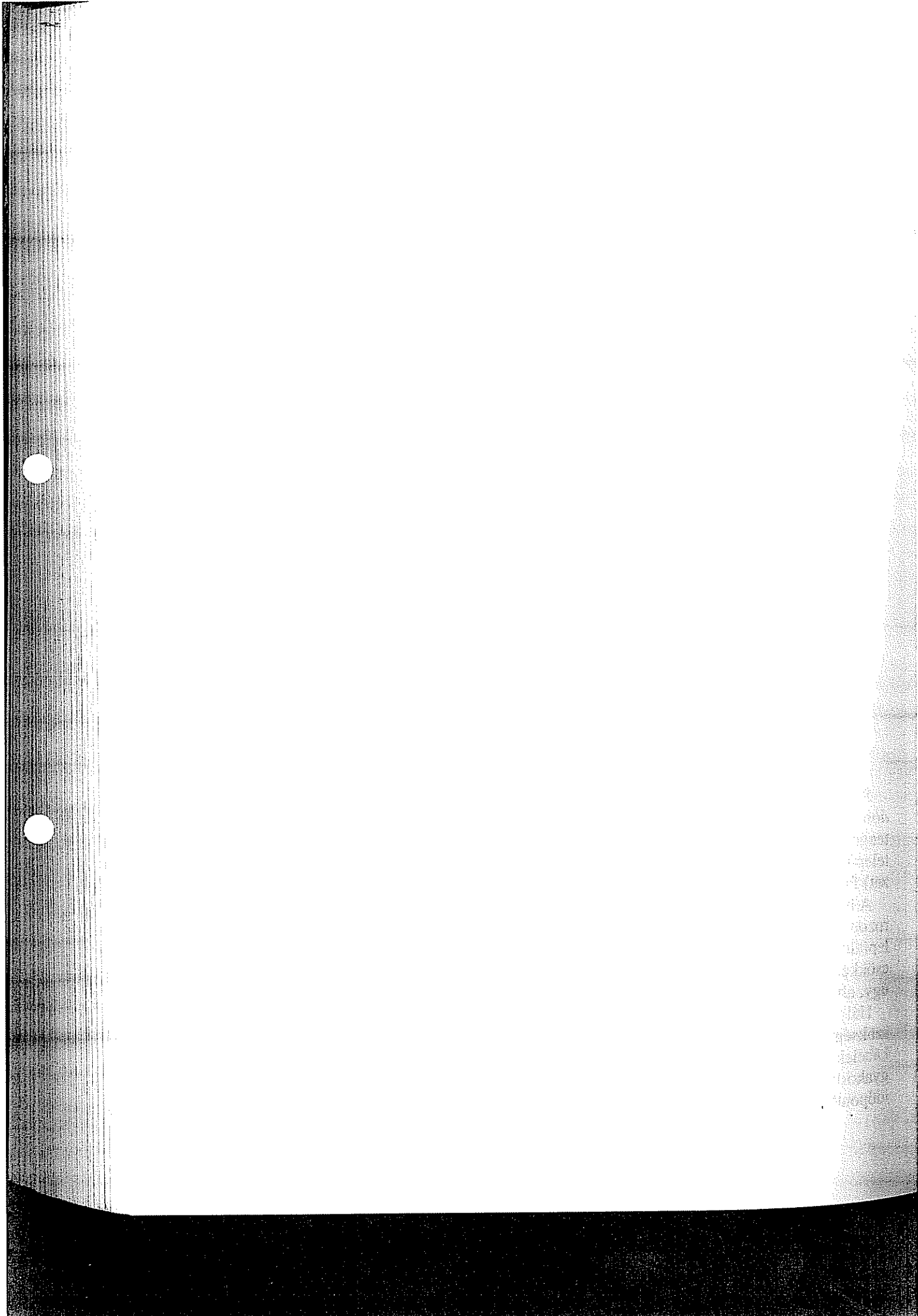


7.10. ábra Szélpark teljesítménye: a szélirány(fok);
b szélesség; c az összes és az egyes gépek pillanatnyi teljesítménye

Szélenergia gépek telepítési rendje alapvetően kétféle lehet: vonalas vagy térhálós (7.8. ábra). Vonalas telepítés akkor előnyös, ha van igen határozott uralkodó szélirány (pl. tengerpartokon, hegygerinceken). Ebben az esetben a gépeket sűrűn egymás mellé telepíthetjük ezzel is csökkentve a kiszolgáló infrastruktúra (utak, elektromos hálózat) fajlagos költségeit.

A hálós telepítés esetén a szélenergia gépek több sorban vannak elhelyezve, meghatározott térrész távközökkel. Ha a csoportban eltérő teljesítményű szélenergia gépeket telepítünk, természetesen változtatni szükséges a tér- és távközöket. A beépített terület csökkenthető, ha a hálót úgy tervezzük, hogy az uralkodó szélirány erre átlós legyen úgy, ahogy az 7.8. b. ábra szemlélteti.

Hálós telepítésnél az elektromos rendszert és a kiszolgáló utakat optimalizálni szükséges. Az elektromos hálózat kialakítása a földben célszerű, a táp- ill. termelő kábeleket egyesítik, több erőmű így csoportosan kapcsolódik a transzformátorhoz. A gyakorlat szerint egy adott szélenergia gépek parkban levő berendezések teljesítménye adott időpontban jelentősen eltérő (7.10. ábra).

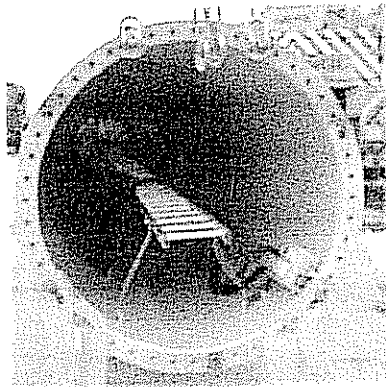


8. A MEGÉPÍTETT SZÉLERŐMŰVEK VIZSGÁLATA

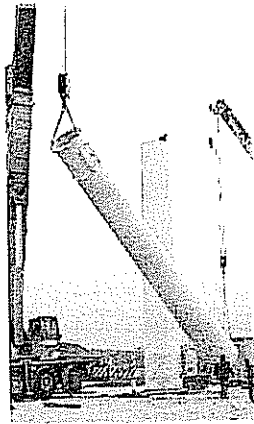
8.1. Építés (Inota)

Az első magyarországi szélturbina Inotán létesült. A telepítés kiviteli terveket TRANSELEKTRO Rt. Erőművi Mérnökirodája készítette (KAJOR, 2000). A beruházó BAE Rt. a lehetőségeihez mérten a dán NORDEX cég N29/250 típusú gyártmányát találta a legmegfelelőbbnek. 1999. augusztusban kezdődött a tervezés, négy hónap alatt készültek el a kiviteli tervek, a berendezés még az évben felállítására került (december 15.). Az alapozási munkákat követően a berendezés fő egységeinek összeszerelése gyakorlatilag másfél napot vett igénybe.

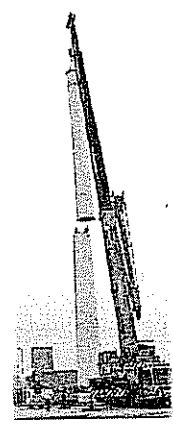
A cső oszlop két előre gyártott szerkezeti egységből áll. A cső belsejében található a generátort megközelítő létra (8.1. ábra), továbbá a villamos kábelek, melyek a generátortól vezetnek a transzformátorállomáshoz ill. az elektronikus egységekhez, melyek részben a toronyban, részben a torony melletti vezérlő szekrényben (házban) nyertek elhelyezést. A berendezés felállításához 2 db nagyteljesítményű daru szükséges. Kezdséknél az első toronyegységet az alaphoz csatlakoztatják, majd ezt követi a második egység felhelyezése (8.2. ábra). A nagy kinyúlású csúszógémes daru néhány méterrel a csatlakozási pont fölé emeli a torony felső egységét, majd a két egységet csavarokkal rögzítik (8.3. és 8.4. ábra). A rögzítés és a csavarok meghúzását (nyomatékkulcs) követően kezdik meg a generátor felemelését ugyancsak a nagyobb teljesítményű daruval (8.5., 8.6., 8.7. ábra). Ezután csavarokkal rögzítik a generátorházat, csatlakoztatják a szélirányba állításhoz szükséges fogaskoszorút és meghajtó szerkezetét. A gondola rögzítését és provizórikus beállítását követően kezdik meg a lapátok összeszerelését. A lapátokhoz csatlakoztatják a fékszárnyakat (8.8. és 8.9. ábrák) a 3 lapátot pedig a turbinaagyhöz (8.10. és 8.11. ábrák). A lapátokhoz még a gyárban rögzítették a féklapátok mozgatásához szükséges hidraulikus rendszert. Ez munkahengerből és a munkahengerhez csatlakoztatott acél sodronykötélből áll, amely karos mechanizmuson keresztül fordítja el a féklapátot. Az agyban lévő furatok ovális kialakításúak azért, hogy a lapátszögek a helyi szélviszonyoknak megfelelően beállíthatók legyenek. Ezt a helyszínen kell igen nagy pontossággal elvégezni, a turbina járása csak így lesz egyenletes. Mind a három lapát illesztését követően megkezdődhet a lapátkerék felemelése a gondola tengelycsonkjára (8.12. ábra). Ezt a két daru együttesen végzi. A nagyobb méretű daru végzi a szerkezet emelését és megfogást (8.13., 8.14. és 8.15. ábrák) a második daru csupán a pozíció stabilizálását szolgálja. A teljes felemeléshez és beállításához 30–35 percre van szükség. A gondolában lévő szerelő a pontos beállítást követően összekapcsolja az agyat a főtengettel, és csavarokkal rögzíti. Gyakorlatilag ezzel a berendezés felállítása befejeződött (8.16. ábra). Természetesen ebben az állapotban a szélgenerátor még nem üzem-



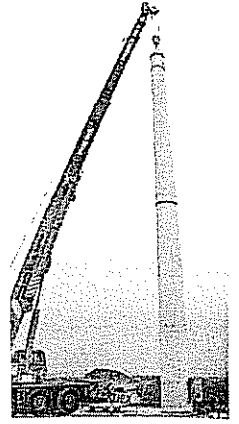
81. ábra



82. ábra



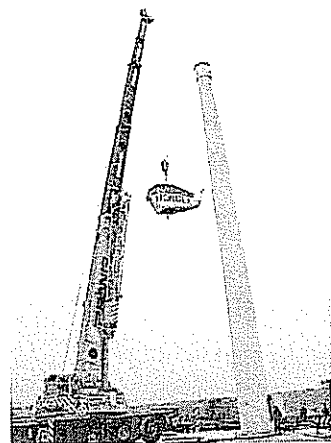
83. ábra



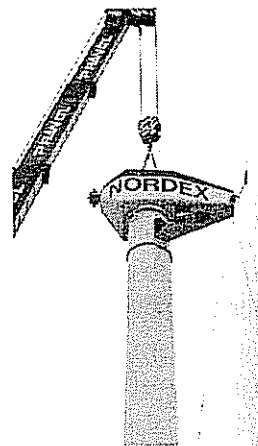
84. ábra



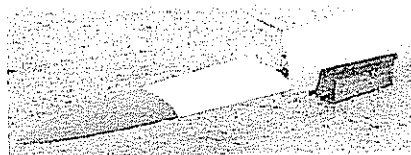
85. ábra



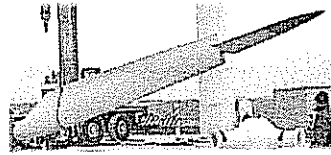
86. ábra



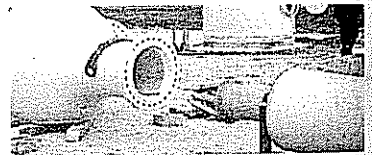
87. ábra



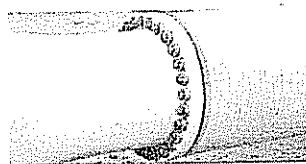
88. ábra



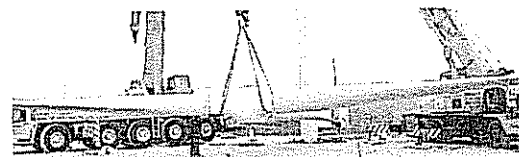
89. ábra



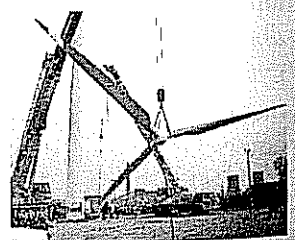
810. ábra



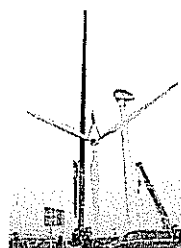
811. ábra



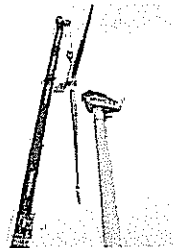
812. ábra



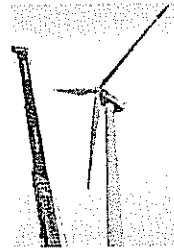
813. ábra



814. ábra



815. ábra



816. ábra

81-816. ábrák.
A 250 kW teljesítményű
szélérőmű felállítása

képes, további szerelési munkák szükségesek (a teljesítménykábelek és a vezérlőhuzalok összekötése stb.).

A felállítástól számítva a berendezés teljes installálásához, bejáratásához, a tényleges próbaüzemeltetésig 5 nap szükséges. Ez alatt az idő alatt minden részegység bemérésre kerül, beleértve a csapágyak melegedését, a járás egyenletességét, a torony tapasztalható vibrációs jelenségeket is stb.

Főbb műszaki adatok

Típus/Névleges teljesítmény: N29 / 250 kW

Főbb méretek, kialakítás

Rotor átmérő:	29,7	
Lapátok		
– száma:	3	m
– hossza:	13,4	db
– anyaga:	üvegszálás műanyag	m
Súrolt terület:	693	
Torony		
– magassága:	30	m ²
– kialakítása:	összefüggő acélpalástú csonka kúp	m

Szélességi határértékek

Indító szélesség:	3–4	
Névleges szélesség:	15,5	m/s
Leállító szélesség:	25	m/s
Túlélő szélesség:	55	m/s

Erőátviteli paraméterek

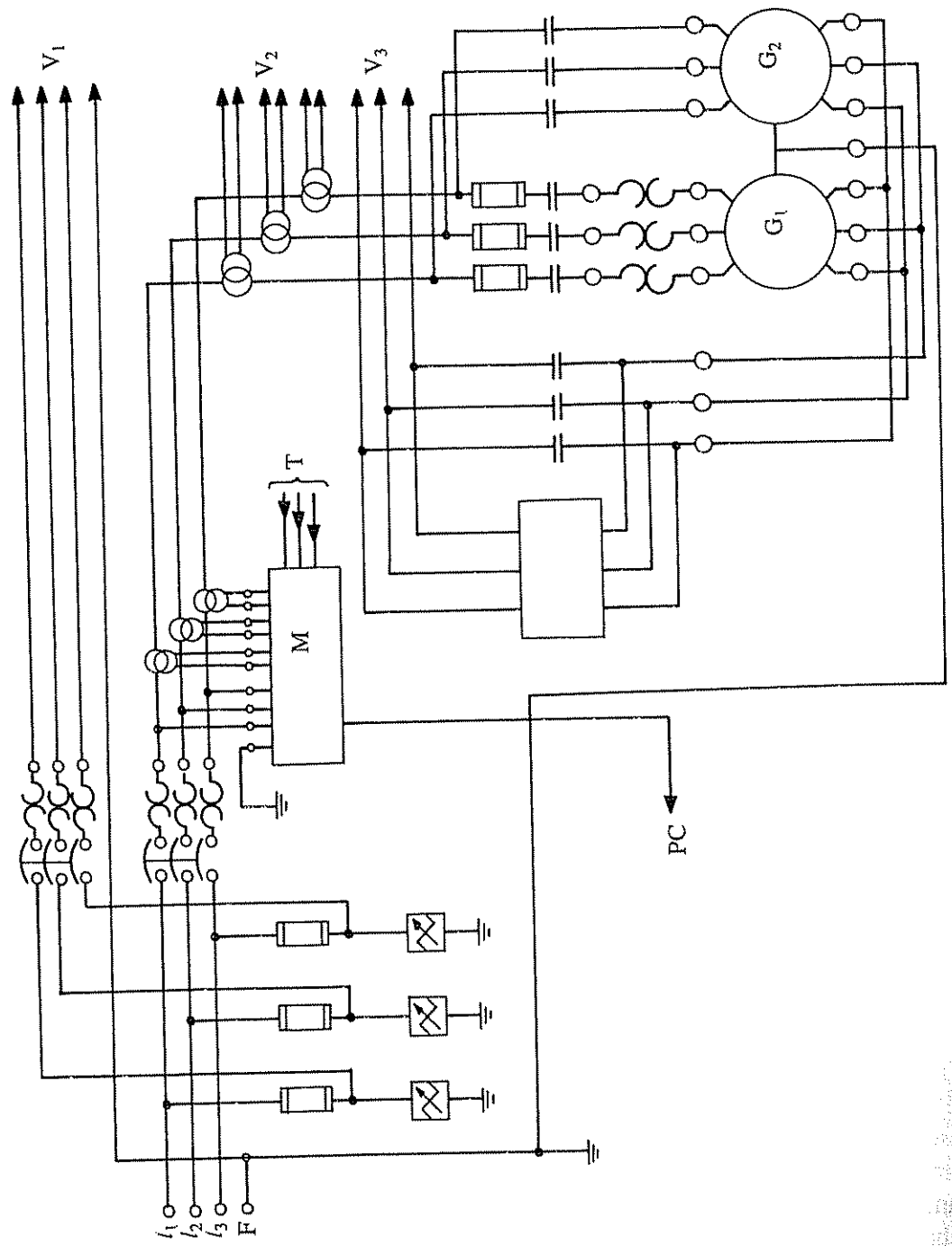
	Alsó fokozat	Felső fokozat	
Rotor fordulatszám:	29,5	39,5	f/perc
Generátor – pólusszáma:	8	6	db
– villamos teljesítménye:	45	250	kW
– feszültsége:	415	415	V
– áramerőssége:	82	424	A

Tömegadatok

Torony:	15	t
Gondola (rotor és lapátok nélkül):	12,5	t
Rotor a lapátokkal:	4,3	t
Hajtómű:	6,5	t
Generátor:	1,8	t

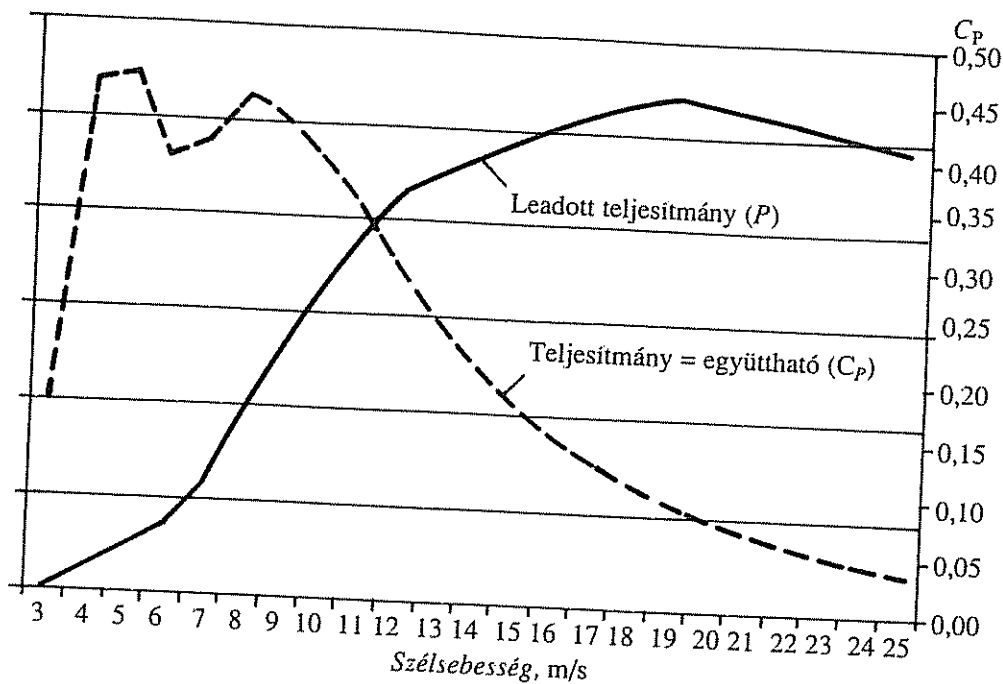
A lapátok fix szögállásúak. A végükön van egy-egy kb. 2 m hosszúságú, 85°-kal elfordítható szakasz, amelyek hidrodinamikai fékként működnek mind a határsebességeknél bekövetkező leállásnál, mind az esetleges meghibásodásból eredő olajnyomás leeséskor.

A berendezés a szélesség függvényében két fokozaton, két fordulatszám tartományban, s ennek megfelelően kétféle teljesítménnyel (40 ill. 250 kW) képes működni. Kisebb szél esetén a 40 kW-os kapcsolási rendszerben működik, s csak a nagyobb szeleknél kapcsol át 250 kW-os teljesítményre. A fokozatváltás éppúgy, mint az egész rendszer üzemeltetése teljesen automatikus, számítógép vezérlésű (8.17. ábra).



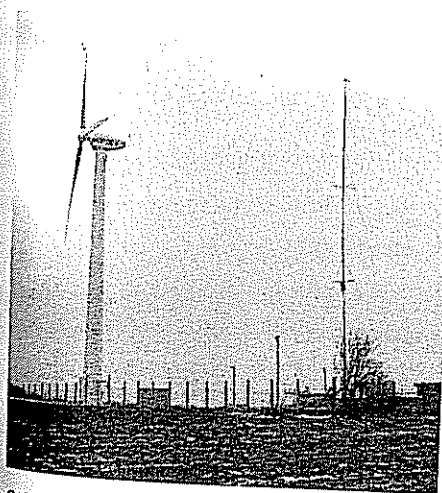
A Nordex cég közvetlen telefonkapcsolatot létesített a berendezés vezérlő számítógépével, s figyelemmel kísérik a szélturbina működési paramétereit, az esetlegesen fellépő rendellenességeket stb.

Az 8.18. ábra Nordex által garantált teljesítmény jelleggörbét szemlélteti. A C_p görbén jól megfigyelhető a fokozatváltás hatása.



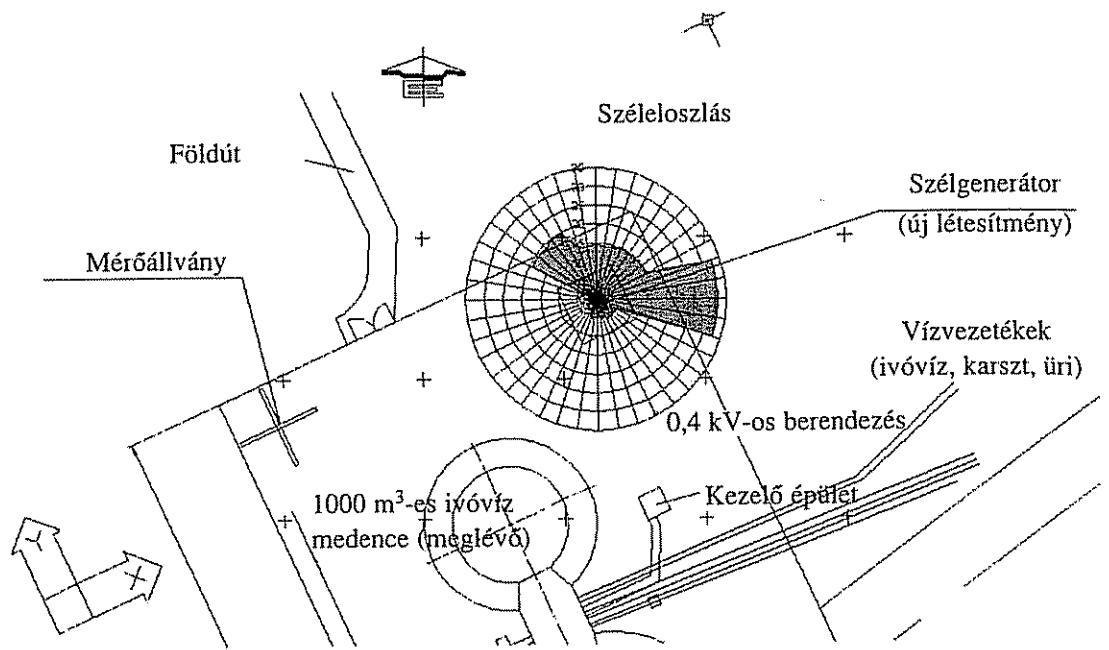
8.18 ábra. Nordex N29/250 gyári teljesítmény – és C_p jelleggörbéje (Forrás: KAJOR, 2001)

8.2. Szélgenerátor beépítést követő ellenőrző vizsgálata (Inota)

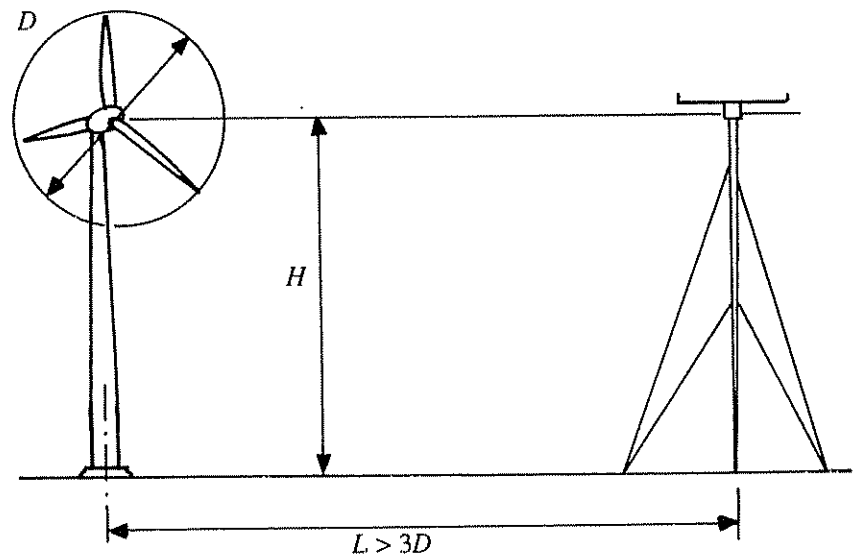


8.19. ábra A helyszínen készült felvétel (a berendezés és a mérőállvány)

A szélérőmű átadását követően ISO előírások szerint a SZIE Gépészmérnöki Kar és a TRANSELKTRO RT. szakemberei elvégezték a berendezés teljesítmény ellenőrzését. A következőkben (rövidített formában) e mérések kivitelezését és a kapott eredményeket mutatjuk be (8.19–8.21. ábrák).



8 20. ábra. A mérés elrendezési rajza



8 21. ábra. A mérőegység szabványos elrendezése

8.2.1. A mérés műszerei

A szélességmérő frekvenciája a szélesség függvényében:

$$f = 4,02 \frac{\text{Hz}}{\text{m/s}} + 1,33, \text{ m/s.}$$

8.1. táblázat. A műszerek és gyártóik

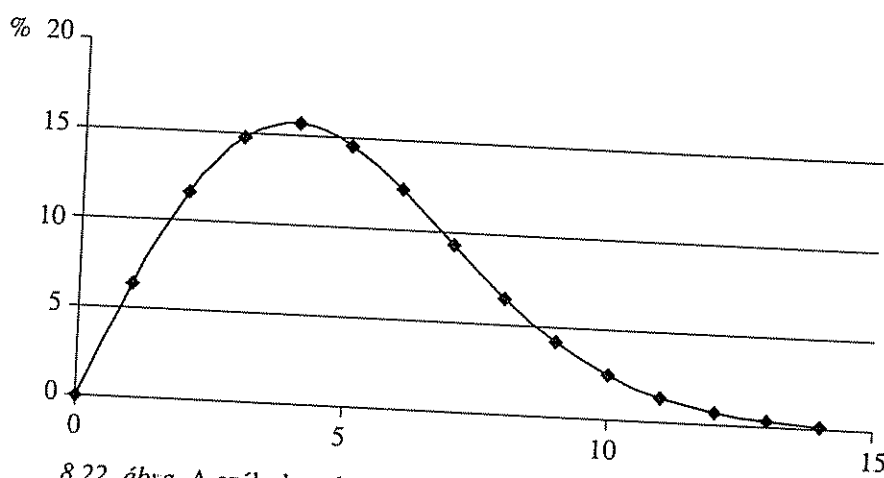
A műszer megnevezése	A műszer gyári száma/gyártója
PC	Toshiba
SPIDER-8 mérésadatgyűjtő	Hottinger Baldwin Messtechnik GMBh
DATCON DT-530 háromfázisú teljesítménymérő	DATCON 32188/01
TESTOSTOR-175 hőmérséklet és páratartalom adatgyűjtő	TESTO 906 76 57
C21X Micrologger mérésadatgyűjtő	CAMPBELL SCIENTIFIC INC. 5695
Szélesség-szélirány érzékelő	Ammonit
Áramváltók	

A karakterisztikája 40 m/s-os szélességig lineáris.
A kimeneti feszültség a szélirány függvényében:

Szélirány	U_{ki}
É	2,5 V
ÉK	1 V
K	0,5 V
DK	3 V
D	3,5 V
DNY	0 V
NY	1,5 V
ÉNY	4 V

8.2.2. Az adatok feldolgozása, a vizsgálati eredmények

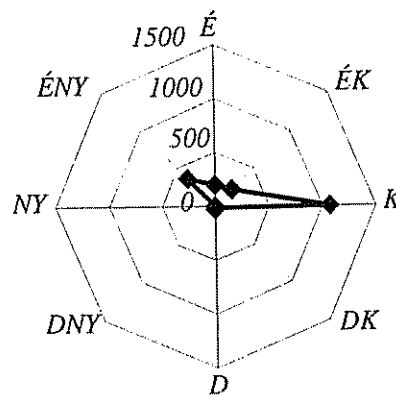
A mérési időtartam: 2001. január 18. 21óra 00 perctől 2001. február 1. 09 óra 20 percig.
A mért adatok, a számítások eredményét tartalmazzák a 8.22.–8. 30. ábrák, és a 8.2.–8.9. táblázatok.



8.22 ábra. A szélesség-eloszlás Rayleigh szerint ($v_4 = 4,9$ m/s)

8.2. táblázat. A szélesebbesség-eloszlás értékei

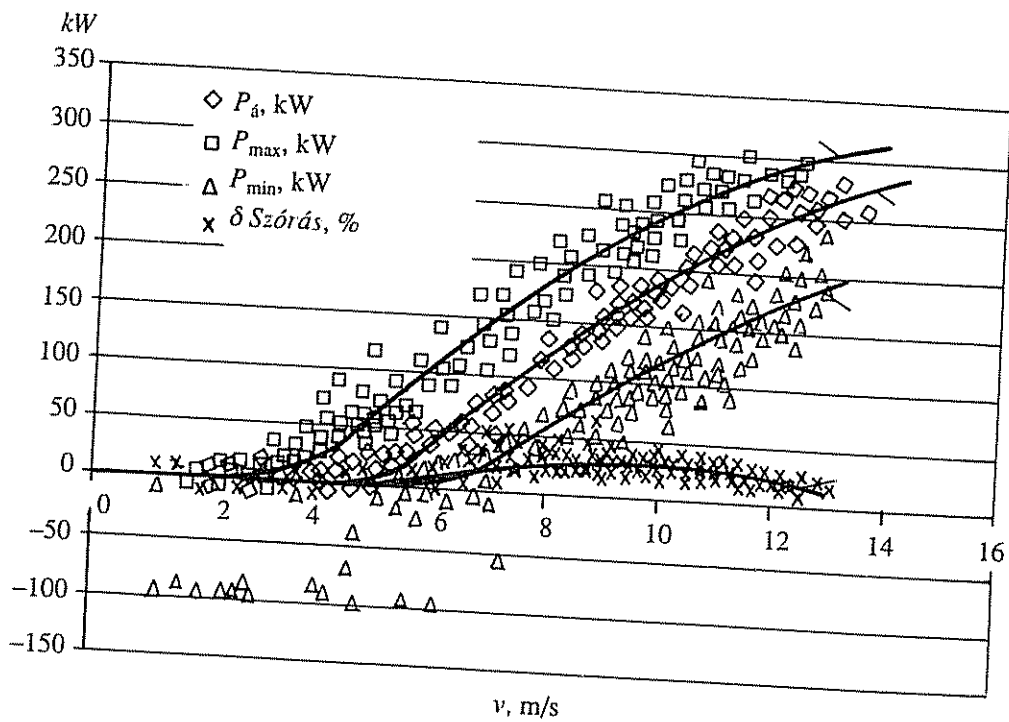
$v_a=4,9$ m/s	%
0	–
1	6,4
2	11,6
3	14,8
4	15,7
5	14,6
6	12,2
7	9,3
8	6,5
9	4,2
10	2,5
11	1,4
12	0,7
13	0,3
14	0,2



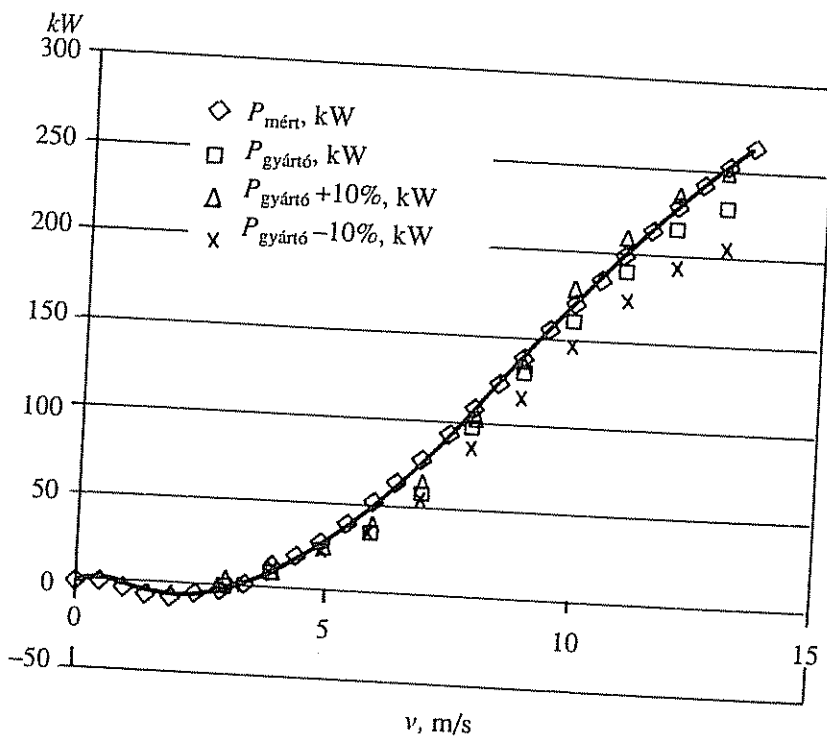
8.23. ábra. A szélrózsa

8.3. táblázat. A szélirányok gyakorisága

Szélirány	Gyakoriság (10 perces időközök)
É	206
ÉK	232
K	1070
DK	35
D	23
DNY	4
NY	5
ÉNY	372



8.24. ábra. A mért kimenő teljesítmény átlagos értéke, maximuma, minimuma és szórása a szélesség függvényében



8.25. ábra. A mért teljesítménygörbe megadása feltüntetve a gyártó által garantált pontokat

8 5. táblázat A mért teljesítmény a szélesebbesség függvényében

v, m/s	P, (kW)	Pgyártó, kW	Pgyártó +10%, kW	Pgyártó -10%, kW
0	0			
0,5	0			
1	-2,8			
1,5	-5,7			
2	-6,4			
2,5	-5,0			
3	-1,6	2	2,2	1,8
3,5	3,6			
4	10,5	12	13,2	10,8
4,5	19,0			
5	28,8	24	26,4	21,6
5,5	39,8			
6	51,9	35	38,5	31,5
6,5	64,9			
7	78,8	58	63,8	52,2
7,5	93,2			
8	108,2	95	104,5	85,5
8,5	123,5			
9	138,9	128	140,8	115,2
9,5	154,5			
10	169,9	161	177,1	144,9
10,5	185,1			
11	199,8	190	209	171
11,5	214,0			
12	227,6	213	234,3	191,7
12,5	240,2			
13	251,9	225	247,5	202,5
13,5	262,4			

8 6. táblázat. A teljesítményt befolyásoló érzékenységi tényezők

Teljesítménygörbe		Érzékenységi tényezők		
Szélesebbesség, V, m/s	Teljesítmény, P, kW	Nyomás, hPa/kW	Hőmérséklet, K/kW	Szélesebbesség, 0,5 m/s/kW
0	0			
0,5	0			
1	-2,8			-2,79
1,5	-5,7			-2,95
2	-6,4			-0,69
2,5	-5,0			1,44
3	-1,6			3,40
3,5	3,6	0,004	0,014	5,23

8.6. táblázat folytatása

Teljesítménygörbe		Érzékenységi tényezők		
Szélesség, V, m/s	Teljesítmény, P, kW	Nyomás, hPa/kW	Hőmérséklet, K/kW	Szélesség, 0,5 m/s/kW
4	10,5	0,011	0,040	6,90
4,5	19,0	0,019	0,070	8,42
5	28,8	0,029	0,10	9,80
5,5	39,8	0,040	0,15	11,03
6	51,9	0,052	0,19	12,11
6,5	64,9	0,065	0,24	13,04
7	78,8	0,079	0,29	13,83
7,5	93,2	0,093	0,34	14,46
8	108,2	0,108	0,40	14,95
8,5	123,2	0,123	0,45	15,29
9	138,9	0,139	0,51	15,48
9,5	154,5	0,154	0,56	15,52
10	169,9	0,170	0,62	15,42
10,5	185,1	0,1850	0,68	15,17
11	199,8	0,120	0,73	14,77
11,5	214,0	0,214	0,78	14,22
12	227,6	0,228	0,83	13,52
12,5	240,2	0,240	0,88	12,67
13	251,9	0,252	0,92	11,68
13,5	262,4	0,262	0,96	10,54

8.7. táblázat. A becsült energiatermelés (AEP) a szélesség-eloszlás függvényében

Szélesség, V, m/s	Teljesítmény, P, kW	Éves energiatermelés, kWh
0	0	0
1	6,40	-1565,72
2	11,60	-6527,97
3	14,78	-2048,22
4	15,67	14473,42
5	14,59	36774,89
6	12,22	55560,21
7	9,32	64294,12
8	6,52	61777,56
9	4,2058	51186,51
10	2,51	37348,85
11	1,39	24309,42
12	0,71	14230,65
13	0,34	7532,544
14	0,15	3617
Σ		360963

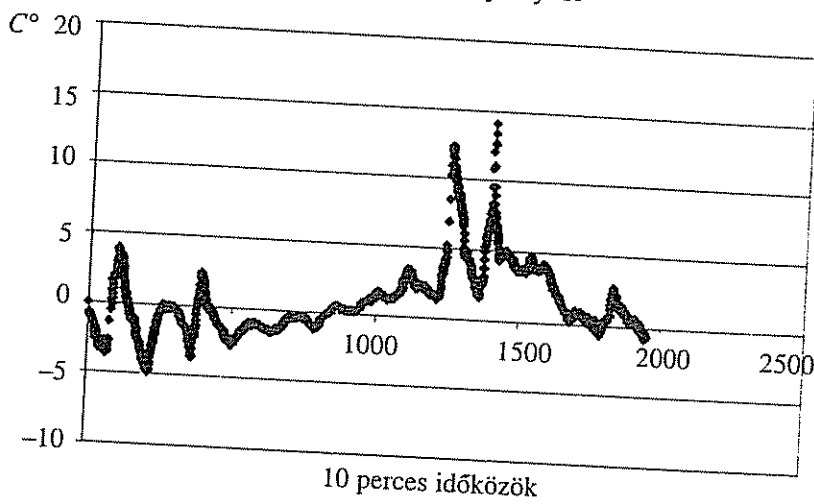
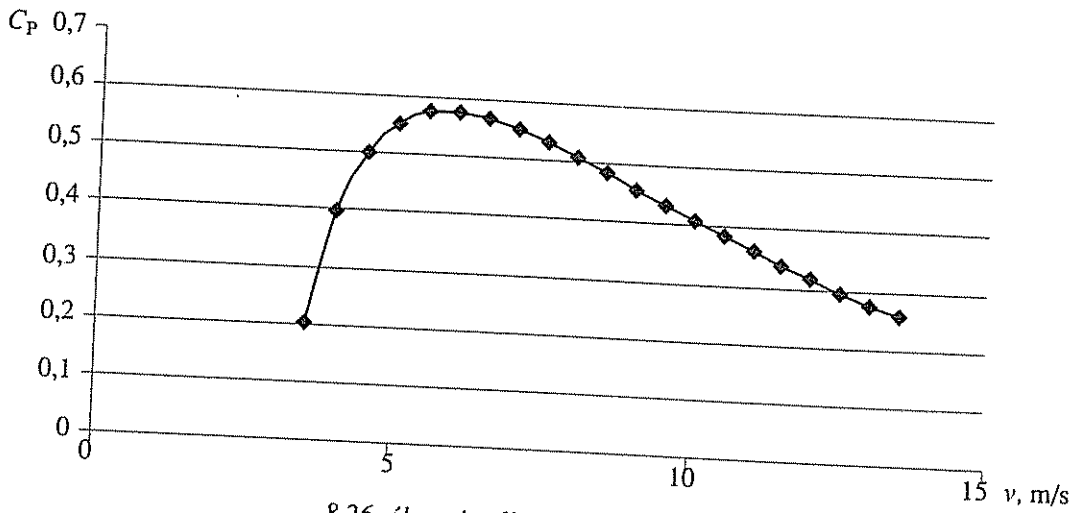
8.8. táblázat. A becsült és a gyártó által közölt energiatermelés

v, m/s	A mérések alapján becsült várható éves energiatermelés, kWh	A gyártó által közölt várható éves energiatermelés, kWh
4,9	360 963	
5	378 489	364 000
6	562 798	534 000
7	777 709	711 000
8	994 314	887 000
9	1 140 568	1 045 000

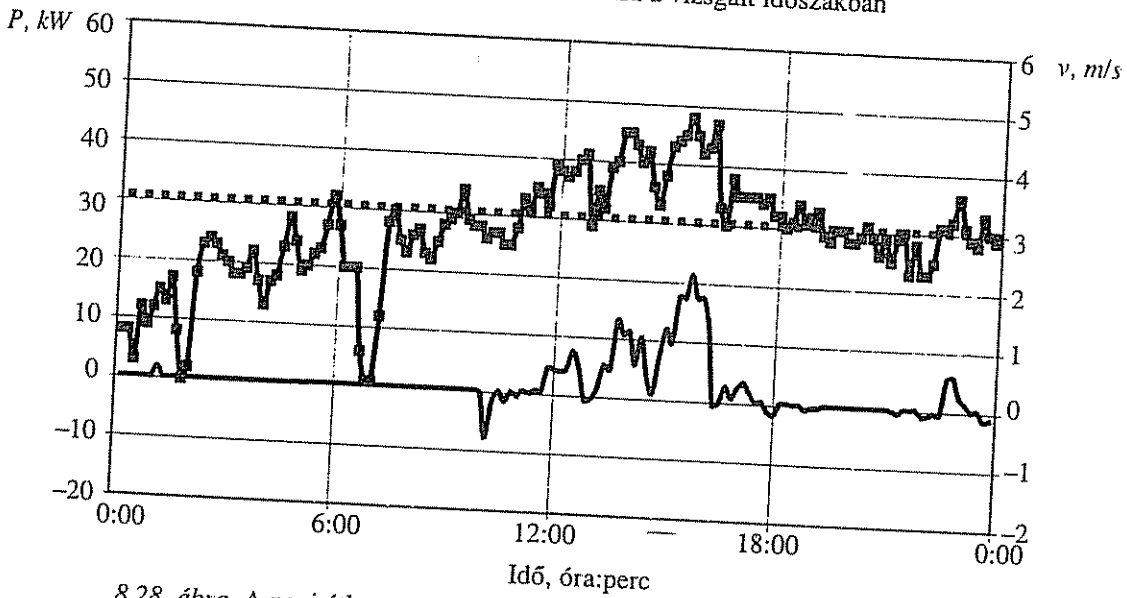
A teljesítmény-tényező számítása (C_p)

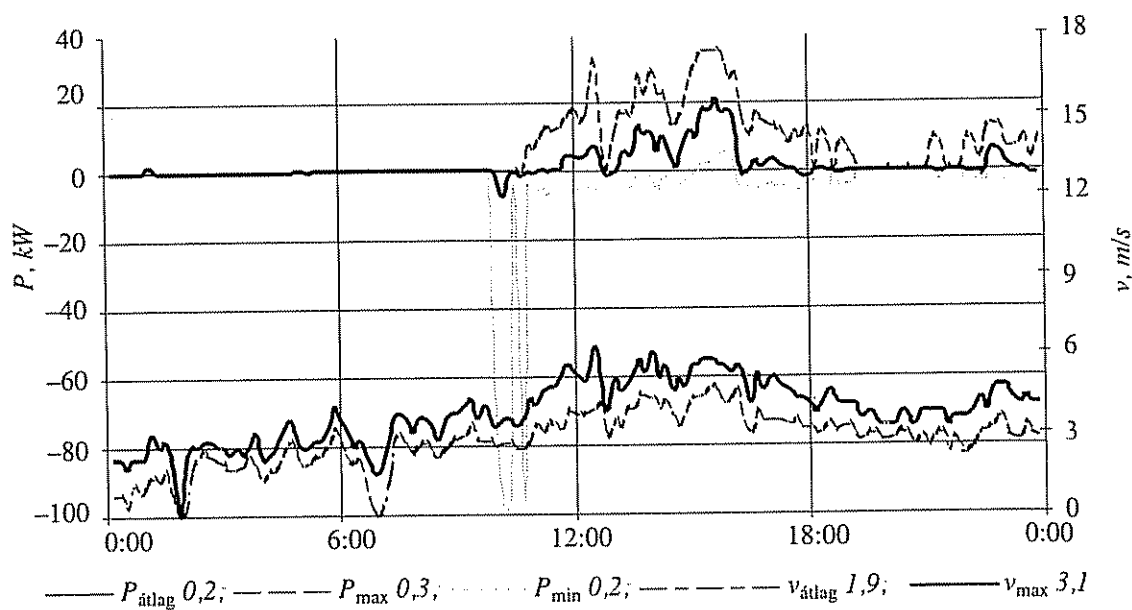
8.9. táblázat A teljesítménytényező változása

V, m/s	P, kW	P _{elm} , kW	C _p
3,5	3,6	17,8	0,20
4	10,5	26,6	0,40
4,5	19,0	37,9	0,50
5	28,8	51,9	0,55
5,5	39,8	69,1	0,58
6	51,9	89,8	0,58
6,5	64,9	114,1	0,57
7	78,8	142,5	0,55
7,5	93,2	175,3	0,53
8	108,2	212,8	0,51
8,5	123,5	255,2	0,48
9	138,9	303,0	0,46
9,5	154,5	356,3	0,43
10	169,9	415,6	0,41
10,5	185,1	481,1	0,38
11	199,8	553,2	0,36
11,5	214,0	632,1	0,34
12	227,6	718,1	0,32
12,5	240,2	811,7	0,30
13	251,9	913,1	0,28
13,5	262,4	1022,5	0,26

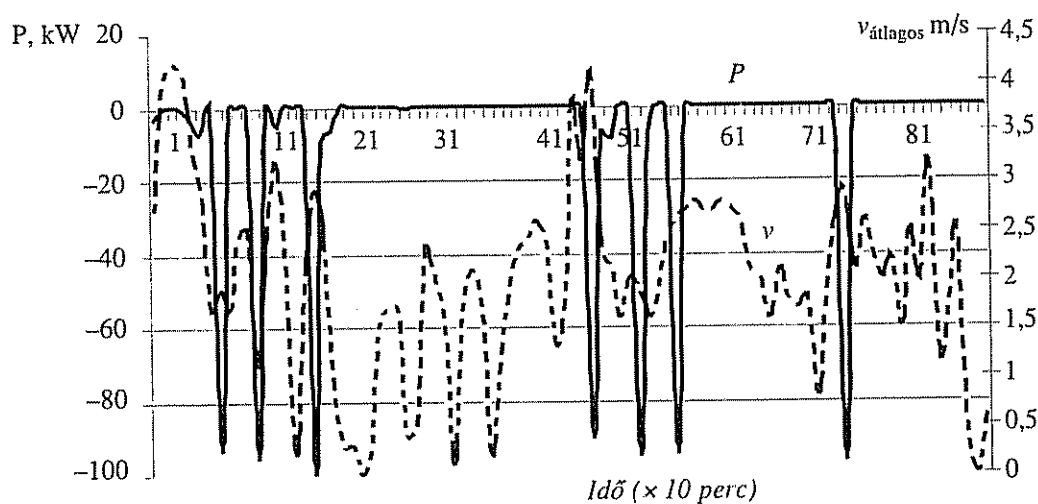


8.27. ábra. A hőmérséklet változása a vizsgált időszakban





8.29. ábra. Az átlagos, a maximális szélesség és a villamos teljesítmény napi alakulása (legkisebb, legnagyobb és átlagos értékek)



8.30. ábra. Az indításhoz felhasznált teljesítmények, ha a szél az indulási sebesség közelében változik

8.3. 600 kW teljesítményű szélerőmű Kulcs térségében

8.3.1. A telepítés előkészítése, a gép kiválasztása

A Kulcson megvalósult 600 kW teljesítményű szélerőműhöz a méréseket a Szent István Egyetemen működő Magyar Szélenergia Tudományos Egyesület (MSZTE) szakemberei végezték.

A kulcsi energetikai vizsgálatok eredménye kedvező volt. Az előzetes becslések szerint a várható generátor kihasználás 65 m magasságban 24%-ra adódott. WASP

modellezés szerint a mérés helyétől 500 méter távolságban is hasonló szélviszonyok várhatók, ahova a telepítés kedvezőbb volt, mivel közelebb esett a termelt energia fogaadására alkalmas 20 kV-os villamos hálózattól.

Ezt az építési ponton a talajmechanikai viszonyok meghatározása követte, mivel az alapozási terv csak ezek ismeretében készíthető el (betonozási terv, bekötő út stb.)

A laza talaj miatt terjedelmes alap kellett, amelyet a berendezés igen jelentős tömege is indokolt (a fődarabok a 30–50 tonnát is elérhetik). A Kulcson mért ún. kontinentális szélviszonyokra kiválasztott berendezés főbb jellemzőit a 8.10. táblázat szemlélteti.

A generátor földtől mért távolsága 65 méter. E csőtorony felső pontján van a 40–50 tonna tömegű generátort is magába foglaló gondola, amelynek kivezető tengelyéhez a szárnylapátok csatlakoznak. A szárnylapátok hossza 20 méter, a lapát agyrészét is figyelembe véve a szélkerék teljes átmérője 44 méter. A lapátok tömege egyenként 3,5 tonna.

8.10. táblázat A berendezés főbb jellemzői

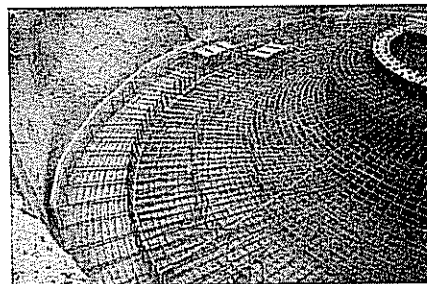
Típus	ENERCON E-40 Hajtómű nélküli, változtatható fordulatszámú kivitel
Névleges teljesítmény	600 kW
Lapátkerék átmérő	44 m
Oszlopmagasság	65 m
Szárnylapát	Változtatható lapát állásszögű
Szárnylapát forgási iránya	Az óramutató járásával megegyező
Lapátok száma	3
Lapátok által súrolt felület	1521 m ²
A lapátok anyaga	Üvegszálás poliészter
Fordulatszám	18–34/ min ¹
A lapátvég sebessége	41–78 m/s
A hajtás átvitel merev tengelyének főcsapágya	Kétsoros golyóscsapágy
A generátor	ENERCON típusú gyűrűs generátor
Hálózatra csatlakozás	ENERCON frekvenciaváltóval
Fékrendszer	Három különálló lapátfék vészhelyzet esetén, továbbá lapátkerék fék és rotorhelyzet rögzítő fék.
Széliránykövetés	Aktív szélirányba állító, fordulatszám-független állandó nyomású hidraulikus hajtóművel.
Indítási szélesség	2,5 m/s
Névleges teljesítmény	12 m/s szélességnél
Szabályozó rendszer	Elektronikus (ENERCON SCADA)

8.3.2. Építés

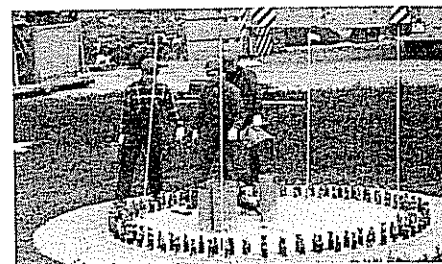
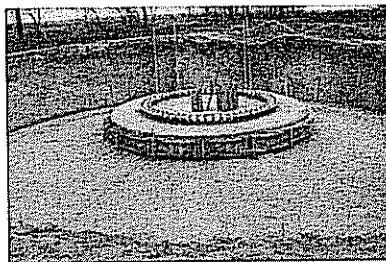
Az építés fázisait követhetjük a 8.31.–8.38. ábrán [84.].

A Kulcson megvalósított berendezés napjaink egyik legkorszerűbb kivitelének tekinthetjük. A generátor védelme teljes egészében elektronizált és automatizált. Védve van a káros túlpörgéstől, s a káros vibrációktól. A sokpólusú generátora következtében a fordulatszám alacsonyabb, mint a hajtóműves berendezéseké. Így a generátor

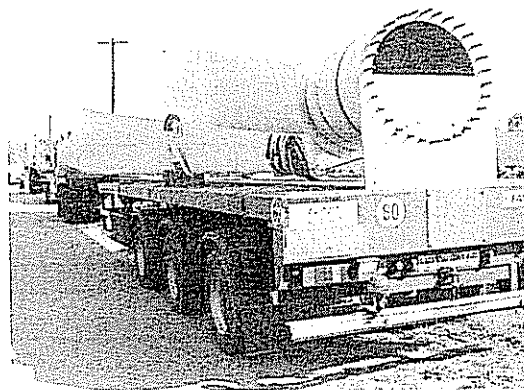
hajtása közvetlenül a lapátok tengelyéről történik. Leegyszerűsítve a szabályozási folyamatot: a generátor által előállított váltakozó áram egyenirányításra kerül, majd ezt az egyenirányított (fordulatszámától független) áramot, alakítják át a hálózatnak megfelelő váltakozó árammá, és transzformálják a 20 kV-os hálózati feszültségre.



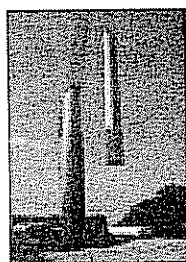
831. ábra. Az alaphoz készített vasalás



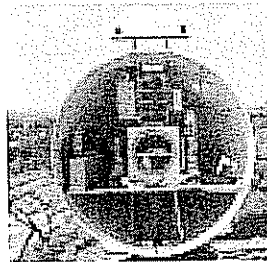
832. ábra. Az elkészült alap (a), ill. az alap a torony beemelése előtt (b)



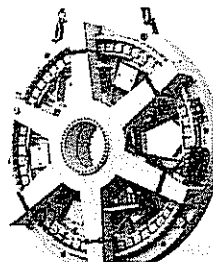
833. ábra. A lapátok szállítása



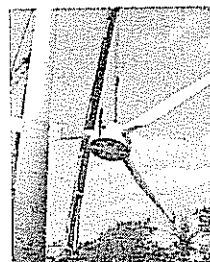
834. ábra.
Az oszlop
beemelése



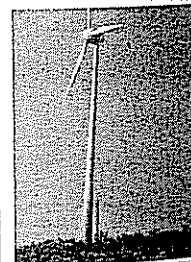
835. ábra.
A generátorház
beemelése



836. ábra.
A generátor
beemelése



837. ábra.
A lapátkerék
beemelése



838. ábra.
Az elkészült
szélgenerátor

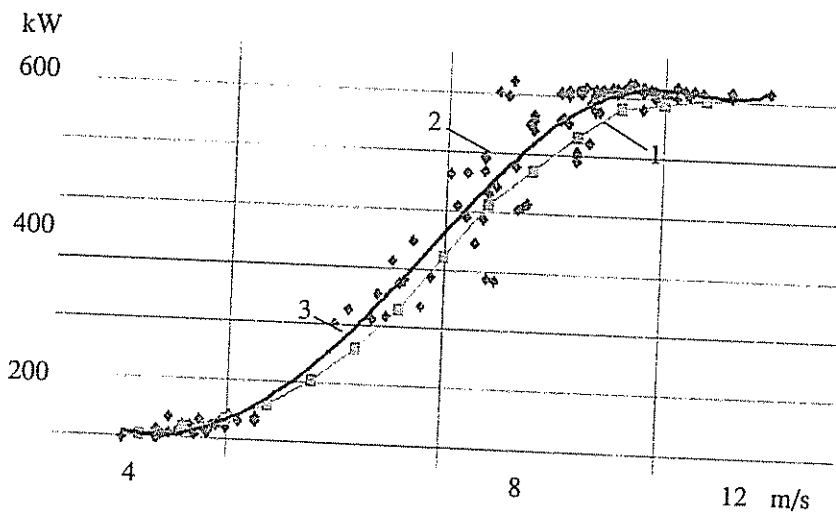
8.3.3. Vizsgálatok

A berendezésnek kiváló a szélesebbesség (m/s) követése. A diagramon jól látható (8.40. ábra), hogy a rotor fordulatszám (1/min) csak kisebb mértékben változik, miközben a teljesítmény (kW) görbe és a szélesebbesség görbe szinkronban fut.

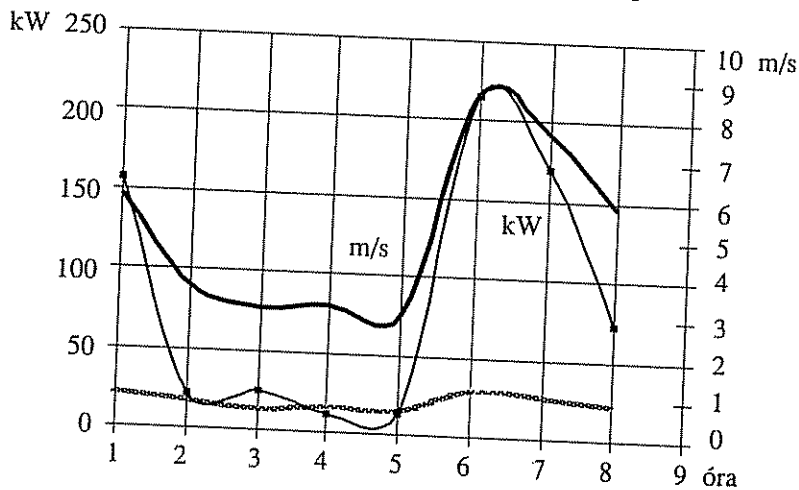
A 8.41. diagramból egyértelmű, hogy a legnagyobb energiatermelés a leginkább szélgazdag hetekre adódik, viszont látható az is, hogy a kisebb átlagos szélesebbességű hetekben a hosszabb működési idő az energiatermelésben kompenzál.

A 8.42. ábrán jól látható az átlagos szélesebbesség, a leadott teljesítmény és a nyert energia tendenciózus „együttlátása”.

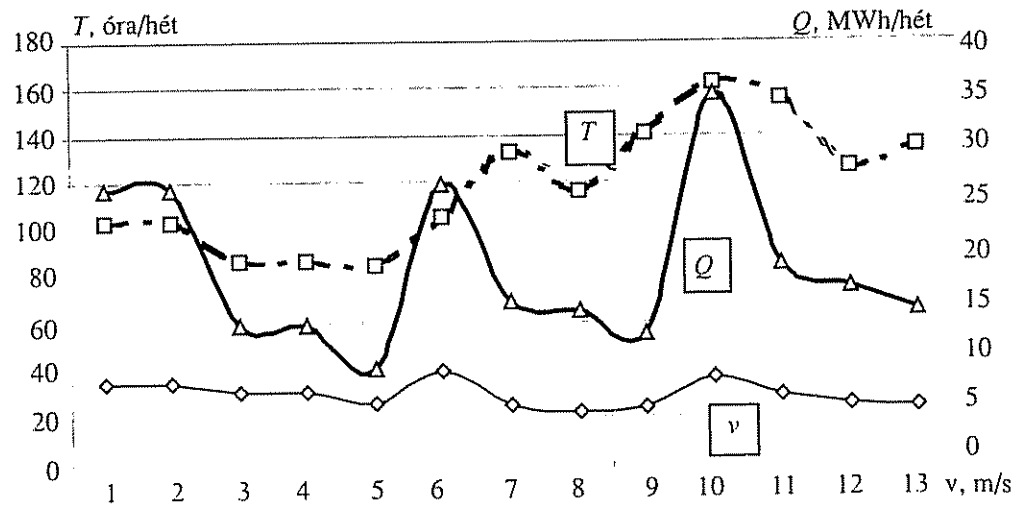
A berendezés a gyártó által megadott, ill. a tervezettnek megfelelő energiamentyiséget szolgáltatja (8.39. ábra). Az üzemeltetés során az első évben regisztrált energia 1210 MWh/év volt, a szélérések alapján számított (prognosztizált) érték 1240 MWh volt (8.11. táblázat, 8.43. ábra).



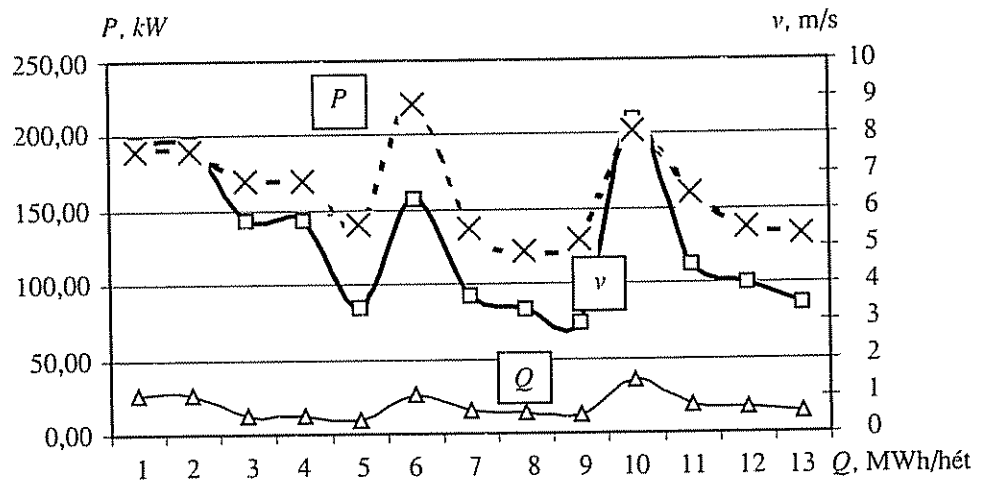
8.39. ábra. A szélesebbesség-teljesítmény jelleggörbék: 1 gyári jelleggörbe; 2 mérési pontok; 3 a mérési pontokra illesztett átlagteljesítmény-görbe



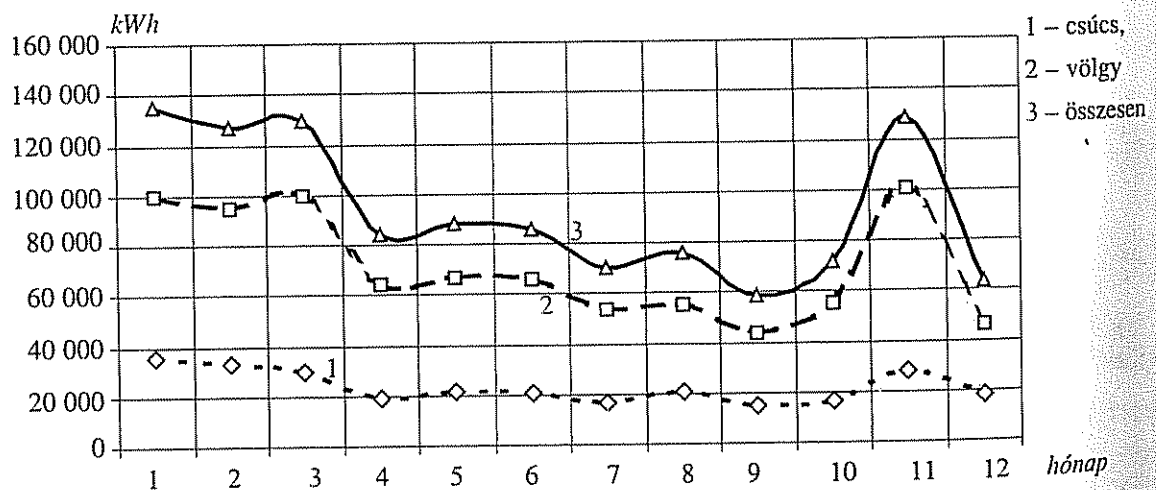
8.40. ábra. A leadott villamos teljesítmény, a szélesebbesség és a lapátkerék fordulatszáma az idő függvényében



8.41. ábra 14 hét mérési adatai működő szélörmúnél. T a heti energiatermelés időtartama; Q a heti összegezett energiatermelés; v a heti átlagos szélességek alakulása az idő függvényében



8.42. ábra. 14 hét mérési adatai működő szélörmúnél. P a heti energiatermelés teljesítmény átlaga; Q a heti összegezett energiatermelés; v a heti átlagos szélességek alakulása az idő függvényében



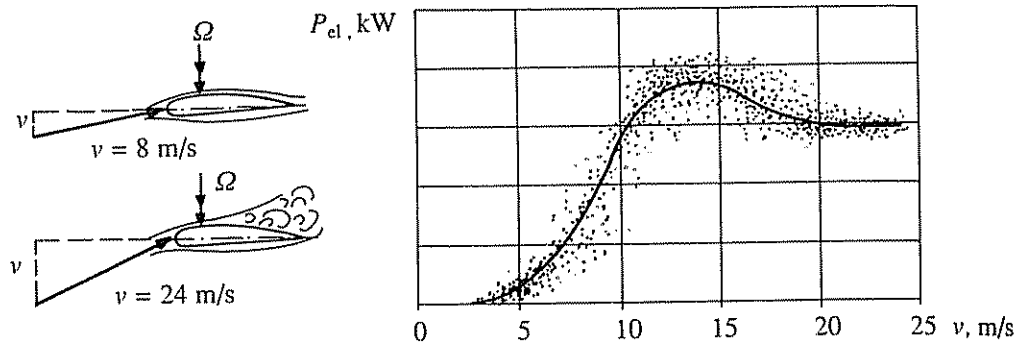
8.43. ábra. A 2002. évben termelt energia, fizetési osztály szerinti megoszlásban az idő függvényében

8.11. táblázat. A 2002. évben termelt energia, fizetési osztály szerinti megoszlásban

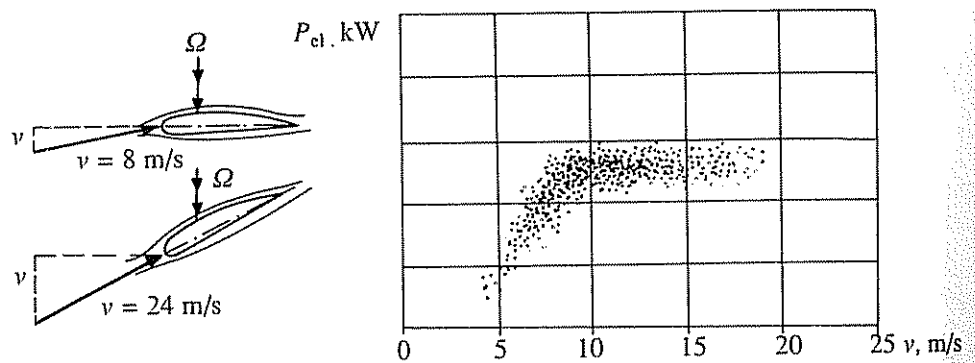
	I. hó	II. hó	III. hó	IV. hó	V. hó	VI. hó	VII. hó	VIII. hó	IX. hó	X. hó	XI. hó	XII. hó	Összesen kWh/év
Csúcsidő, kWh	35 225	32 870	29 440	19 368	21 595	20 207	16 481	20 790	14 639	16 317	28 198	17 801	272 931
Csúcson, kívül, kWh	100 025	94 457	100 027	64 484	66 909	65 661	53 263	55 285	44 008	55 352	100 444	45 799	845 714
Összesen, kWh	135 250	127 327	129 467	83 852	88 504	85 686	69 744	76 075	58 647	71 669	128 642	63 600	1 118 645

8.4. A két vizsgált generátor jellemzése

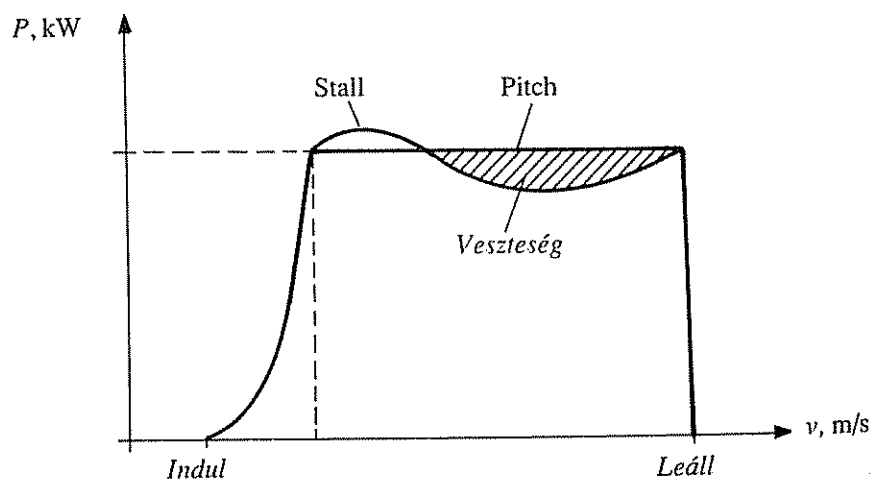
A Pitch rendszerű gépek alacsonyabb szélességeknél nagyobb energia kihatallal működnek, az energiatermelésük egyenletesebb a nagyobb szélességi tartományokban is. A Stall rendszer később éri el a csúcsteljesítményt, de a csúcs magasabb, viszont a csúcs rövidebb időtartamú, mivel a lapát aerodinamikusan fékezi, az energiatermelés jobban kötődik a szélességekhez [100.]. Az elvi modelleket a 8.44.–8.46. ábrák szemléltetik, de megfigyelhető a mérési diagramokon is.



8.44. ábra. Inotán felépült Stall rendszerű gép teljesítménygörbéje



8.45. ábra. Kulcson felépült Pitch rendszerű gép teljesítménygörbéje



8.46. ábra. A Pitch és Stall szabályozási rendszer teljesítményeltérése

8.5. A menedzsment rendszer feladatai

A menedzsment rendszer alapvető feladata a szélérőmű automatikus és biztonságos üzemének biztosítása és meghatározott feltételek között az erőmű átvitele egyik üzemiállapotból a másikba. Ehhez figyelnie kell a rendszer fontos elemeit és állapot-változóit.

A további megállapítások elsősorban egy frekvenciaváltón keresztül hálózatra tápláló, lapátszög szabályozással ellátott szélérőműre vonatkoznak. Az üzemiállapotok, lehetnek átmenetiek vagy állandósultak.

1. **Az erőmű ellenőrzése, vizsgálata (átmeneti).** A menedzsment rendszer üzembehelyezés után ellenőrzi a főbb elemeket és vezérlőjeleket, valamint az alrendszerek kimenőjeleit és azok határait. Sikeres teszt után a rendszer átmegy a soronkövetkező működési állapotba.
2. **Álló állapot állandósult.** Ezt az állapotot a turbina álló állapota és a rögzített fékek jellemzik. A lapátok és a szélkerék síkja a széliránnyal azonos helyzetben vannak. Ha a csatlakozó kábelek a gondola előző forgása miatt erősen elcsavarodott helyzetben vannak, akkor azokat alaphelyzetbe kell hozni, ez azonban csak alacsony szélességen tehető meg. A generátor nincs rákapcsolva a hálózatra. A felfutási feltételek ellenőrzése után ha minden rendben van, az erőmű indítható.
3. **Indulási állapot (átmeneti).** Az indulás villamos terhelés nélkül történik és a forgórész az előre meghatározott sebességre fut fel. Ez a lapátok megfelelő szög szabályozásával lehetséges. A lapátkeréket és hajtómű házat ekkor forgatják be a szélirányba. Az előírt sebesség elérésekor a rendszer átmegy „várakozási” állapotba.
4. **Várakozási állapot (állandósult).** Ekkor már az erőmű valamennyi részegysége kész a működésre. A forgórész sebességét a lapátszög szabályozás megadott határokon belül tartja. A generátor-frekvenciaváltó egység még nincs a hálózatra kapcsolva. A fontos jellemzők folyamatos ellenőrzés alatt állnak.
5. **Felfutási állapot (átmeneti).** Ha a szélesség elég nagy ahhoz, hogy a generátor-frekvenciaváltó egységet a hálózatra kapcsolhassák, akkor a lapátszög szabályozással a forgórészt felfuttatják az előre meghatározott sebességre. Közben folyamatosan működik a „hiba-kikapcsolási” állapot feltételeinek az ellenőrzése. A lapátkerék folyamatosan szélirányban van tartva. Az előírt sebesség elérésekor a rendszert a hálózatra kapcsolják, amely elkezd az energia betáplálását. Az erőmű ekkor még részterheléssel üzemel.
6. **Részterheléses üzem (állandósult).** A lapátszög optimális értékre szabályozott (C_{pmax} -ra, vagy minimális mechanikai igénybevételre). A sebesség- és teljesítményszabályozás a frekvenciaváltóval történik. A lapátkerék síkja folyamatosan a szélre merőleges irányban van tartva. Ha a szél sebessége elég nagy, akkor a rendszer automatikusan átmegy a teljes terhelési állapotba.
7. **Teljes terhelésű üzem (állandósult).** Lapátszög szabályozással a sebesség és teljesítmény a névleges értékeken van tartva. A frekvenciaváltó a generátor nyomatékát a névleges értékre szabályozza. Kismértékű túlterhelés (elsősorban a szellőkések és lüktető nyomatékok miatt) megengedett, ezért a lapátszög-szabályozásnak nem kell olyan sűrűn és gyorsan működnie. A túlterhelési szakaszok idejét korlátozni kell a rendszer melegedési állapotától függően. A lapátkerékkel mindenkor követik a szélirány változásait.

8. **Kikapcsolási állapot (átmeneti).** A rendszernek az 5., 6., és 7. állapotokból minden pillanatban képesnek kell lennie átmenni a „várakozási” állapotba, ha a megfelelő értékek beállítását a menedzsment rendszer elvégezte. A leadott teljesítményt a frekvenciaváltóval, a sebességet a lapátszög szabályozással csökkenti a rendszer. Amikor a jellemzők elérik az előre meghatározott értékeket, a rendszer lekapcsolja a generátort a hálózatról, és a „várakozási” állapotba viszi a szélerőművet. Közben a „hiba kikapcsolási” állapot jellemzői folyamatos ellenőrzés alatt állnak.
9. **Megállási üzem (átmeneti).** A megállásnak minden állapotból kiindulva lehetségesnek kell lennie. A kezdete hasonló a kikapcsolási állapothoz. Amikor a menedzsment rendszer lecsökkenti a forgórész sebességét az előre meghatározott értékre, akkor a forgórész és a gondola fékei aktivizálódnak. A „hiba kikapcsolási” állapot jellemzőit folyamatosan ellenőrzi a rendszer.
10. **Hiba lekapcsolás (átmeneti).** A megállási üzemállapothoz hasonló, de általában gyorsabban megy végbe mint a normál kikapcsolási folyamat, és annál nagyobb kezdeti sebességről is indulhat. Az előre beállított sebességnél a forgórészt és a gondolat befékezik, és a rendszer „álló” állapotba megy át. A fékezés folyamatosan ellenőrizve van.
11. **Biztonsági kikapcsolás (átmeneti).** Akkor alkalmazzák, ha a normál leállítás nem lehetséges. Ezt a kikapcsolási módot a menedzsment rendszer vagy egy magasabb biztonsági rendszer indíthatja el. Előfordulhat a teljes sebességen való kikapcsolás is, valamennyi fék egyidejű működtetésével. A legbiztosabb, bár mechanikai szempontból legkedvezőtlenebb megoldás a fékek azonnali működtetése, és a lapátszög szabályozás használata fékezés céljára. Utoljára a forgórész rögzítődik. Bármilyen további működést a menedzsment rendszer megakadályoz, újbóli üzembe helyezés csak kézi „kireteszeléssel” lehetséges. Normális esetben a **hibákat** a menedzsment rendszernek előbb kell felismernie, mint a biztonsági rendszernek, hogy az minél ritkábban „szólaljon” meg. A legfontosabb hibafajták a következők.
- Hálózati hibák esetén – még ha rövid idejűek is – meg kell akadályozni a forgási sebesség túlzott növekedését. A tárgyalt esetben a hálózati hibákat először a frekvenciaváltó érzékeli, amely kikapcsol, és üzenetet küld a menedzsment rendszernek. Ez a lapátszög szabályozással – és szükség esetén fékezéssel – biztosítja, hogy a forgórész sebessége a „várakozási” értékre csökkenjen. A hálózati hiba elmúltával a rendszer automatikusan átmegy a „felfutási” állapotba.
 - Rövidzár jelentkezésekor a főkapcsolót kell azonnal leoldani. A generátorban keletkezett rövidzárlatot arról lehet felismerni, hogy a megfelelő nagy fordulatszám ellenére egy, vagy több fázisban a feszültség csökken. A frekvenciaváltóban bekövetkezett zárlatnál először a teljesítményelektronika védelme jelez.
 - Névleges feletti sebesség akkor fordulhat elő, ha a szélesebbesség nagyobb a névleges értéknél. A szabályozási tartalék kb. 10%-os túllépést megenged a lapátszög szabályozás késleltetett működésén keresztül. E határ felett azonban azonnal „hiba lekapcsolást” kezdeményez a menedzsment rendszer. Ha a sebesség mégis tovább növekedne, akkor a biztonsági rendszer lép működésbe, amely a „biztonsági” kikapcsoláson keresztül hat.
 - Az erőmű bármelyik részében a túlmelegedés meghibásodásra, vagy túlterhelésre utal. Ekkor a „hiba” kikapcsolást kell elindítani.

9. A szélerőmű környezeti hatásai

9.1. Általános megfontolások

9.1.1. Komfortérzés és környezet

A szélenergia lokális környezeti hatásainak vizsgálatánál ebben az anyagban megkülönböztethetjük a komfortérzésre gyakorolt hatásokat a környezeti hatásoktól. A „komfortérzés” ebben az összefüggésben olyan tényezőket foglal magába, amelyek az emberi érzékelésre vagy viselkedésre vannak hatással. Az ilyen tényezők közül a vizuális hatás és a tájkép, a hang és az elektromágneses zavarás fontosak. A környezetvédelem ebben az értelemben a növény és az állatvilágra gyakorolt minden közvetlen és közvetett anyagi hatást magába foglal. Ezek közé tartoznak általában a madarak, a ritka növényfajták és a lokális hidrológiai feltételek változásai stb. A regionális, nemzeti és nemzetközi megnevezések azt jelzik, hol várhatóak elfogadhatatlan hatások és ezek gyakran képezik a fő részét a tervezési útmutatóknak.

9.1.2. A globális felmelegedést okozó anyagok kibocsátásának elkerülése

A légköri CO₂ koncentráció 25%-kal növekedett az iparosodás előtti idők óta, és 2050-re várhatóan megkétszereződik. A Klimatikus Változások Kormányközi Testülete (IPCC) 1996-os becslése szerint a globális átlaghőmérséklet 0,3–0,6 °C-kal növekedett 1900 óta és további 1,0–3,5 °C (a legjobb becslés 2,0 °C) növekedést prognosztizál 2100-ra. Az átlagos tengerszint várhatóan 15–95 cm-rel növekszik. Az emberi tevékenységeknek tulajdonítható globális felmelegedést jelenleg már tényként ismerik el, és az IPCC kutatói nagyobb környezeti változásokat jeleznek.

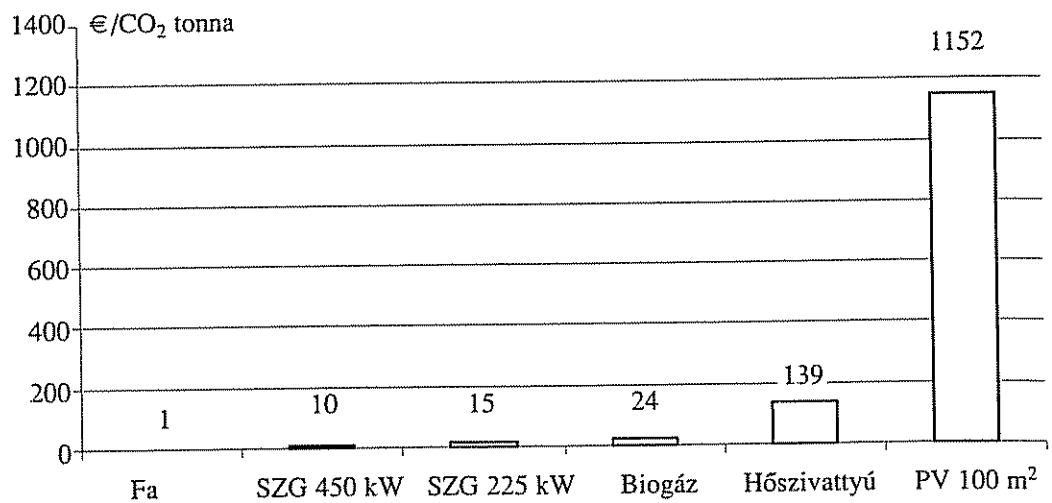
Az Európai Unióban a CO₂ kibocsátás mintegy egyharmada származik energiatermelésből. Minden 1%-nyi hagyományos energiatermelő kapacitás megújuló forrásokkal való felváltásával 0,3% CO₂ kibocsátás-csökkenés érhető el.

Például egy 600 kW-os szélerőmű 20 évre tervezett élettartama alatt átlagosan 20 000–35 000 tonna CO₂ kibocsátást előz meg a hagyományos energiaforrásokhoz képest.

A 9.1. táblázat, amit a Világ Energia Tanácsának 1993-as „Megújuló energiaforrások: lehetőségek és korlátok, 1990–2020” című jelentésében publikáltak, a különböző elektromosáram-termelő technológiák általi kibocsátásokat hasonlítja össze.

A felsorolt technológiák közül négynek kisebb a CO₂ kibocsátása a szélerőművekénél, de kereskedelmi szempontból jelenleg csak a nagy vízierőművek versenyképesek.

sek. A fosszilis tüzelőanyaggal működő erőművekből kibocsátott CO₂ csökkentésére nincsenek kielégítő vagy kereskedelmileg életképes eszközök.



9.1. ábra. Az elkerülhető CO₂ kibocsátás tonnánkénti költsége különböző energiatermelő technológiák esetén (euró/tonna CO₂ csökkenés), SZG szélgenerátor; PV fotoelektromos

9.1. táblázat. CO₂ kibocsátás különböző elektromosáram-termelő technológiák esetén

Technológia	Tüzelőanyag kinyerésnél	Építésnél	Üzemelésnél	Összesen
Szén-tüzelésű	1	1	962	964
Olaj-tüzelésű	–	–	726	726
Gáz-tüzelésű	–	–	484	484
Geotermikus	< 1	1	56	57
Kis vízi	nincs adat	10	nincs adat	10
Nukleáris	-2	1	5	8
Szél	nincs adat	7	nincs adat	7
Fény	nincs adat	5	nincs adat	5
Nagy vízi	nincs adat	4	nincs adat	4
Napenergia	nincs adat	3	nincs adat	3
Fa	-1509	3	1346	-160

9.1.3. A savasodást előidéző anyagok kibocsátásának elkerülése

A savas ülepedés káros az emberi egészségre, a termésre és a környezeti rendszerekre: a szárazföldi, a vízi és az épített környezetre. A savasodásra vonatkozó korábbi becslések szerint a károk összege hozzávetőlegesen 6000 €/tonna, mind az SO₂, mind a NO_x esetében.

A hatások nem lokalizáltak, ezért a kibocsátási forrástól több ezer kilométerre is érzékelhetők. Ezek a hatások – eltekintve az emberi tevékenységből eredő, üvegházhatást okozó gázok kibocsátástól – nem globálisak.

A 9.2. táblázatban összehasonlítható a fosszilis tüzelőanyagokkal üzemelő erőművek SO_2 és NO_x kibocsátása a szélenergia-kibocsátásával.

A nemzetközi kibocsátások közötti legnagyobb eltérés a különböző tüzelőanyagforrások kombinálásából és a füstgáz-kéntelenítő berendezések Dániában és Hollandiában elterjedtebb alkalmazásából adódik.

A kéntelenítő berendezések jelentősen megnövelik a fosszilis tüzelőanyaggal működő erőművek beruházási és üzemeltetési költségeit és ezért a termelt elektromos áram egységárát. Ehhez a folyamathoz nagymennyiségű mészkő fejtésére van szükség, ami károsítja a környezetet. A hulladéktermék gipsz, ami – bár építőanyagként, mint pl. gipszkartonlemez felhasználható – olyan mennyiségben keletkezik, hogy az messze meghaladná az előrelátható szükségleteket. A kéntelenítő berendezések jelentős mértékű telepítése másodlagos hulladék-elhelyezési problémát okozhat [27.].

9.2. táblázat. A fosszilis tüzelőanyaggal üzemeltetett erőművek és a szélenergia-fajlagos kibocsátásai, g/kWh

Szennyezőanyag	Fosszilis tüzelőanyaggal üzemeltetett erőmű			Szélenergia
	Hollandia	Egyesült Királyság	Dánia	
SO_2	0,38	14,0–16,4	2,9	0,087
NO_x	0,89	2,5–5,3	2,6	0,036

9.1.4. A szélenergia-hasznosítás globális előnyei

A 9.3. táblázat összefoglal néhány olyan szennyezőanyag-kibocsátást, amelyek elkerülése a szélenergia hasznosításnak köszönhető (1997).

A 9.4. táblázatban az EU-ban elkerülhető szennyezőanyag-kibocsátás becslését adjuk arra az esetre, ha a szélenergia fejlődése az Európai Szélenergia Szövetség (EWEA) trendjét követné.

Az erőművekből kibocsátott CO_2 mennyisége az EU-ban 1992-ben 973 millió tonna volt. Ez a szám várhatóan 1195 millió tonna/év CO_2 -re fog növekedni 2020-ban. Ha az EWEA szélenergia-fejlesztési céljai 2020-ra beteljesednek, az EU energiaszektorának CO_2 -kibocsátását több mint 11%-kal lehetne csökkenteni a fent leírt feltételezések alapján.

9.3. táblázat. Az EU-ban működő szélenergia-erőművek által elkerült károsanyag-kibocsátások (1997)
(Megjegyzés: 2002-ben ennek kb. háromszorosa)

Paraméter	Mennyiség
Üzembehelyezett kapacitás	4 425 MW
Előállított energia	8,8 TWh/év
Elkerült CO_2 kibocsátás	7 800 000 t/év
Elkerült SO_2 kibocsátás	26 000 t/év
Elkerült NO_x kibocsátás	22 000 t/év

9.4. táblázat. A tervezett szélenergia-felhasználás révén évente elkerülhető szennyezőanyag-kibocsátások az EU-ban

Év	EWEA célok a szélenergia kapacitás telepítésére	Termelés TWh/év	CO ₂ csökkenés t/év	SO ₂ csökkenés t/év	NO _x csökkenés t/év
2000	8 000	16	14 400 000	48 000	40 000
2005	20 000	40	34 200 000	114 000	95 000
2010	40 000	80	64 800 000	216 000	180 000
2020	100 000	200	134 400 000	480 000	400 000

A becslések azt mutatják, hogy 16 500 MW szélenergia kapacitás kerül telepítésre a nem-európai országokban 1997 és 2005 között a globális szélenergia fejlesztési előrejelzések szerint. Ezekben az országokban a környezetvédelmi előnyök gyakran nagyobbak lesznek, mivel a szélenergia olyan elektromos áramot fog helyettesíteni, amit egyébként erősen szennyező fosszilis tüzelőanyagokkal üzemelő erőművekben állítanának elő. Ugyanazt a feltételezést használva, mint az 9.4. táblázatban, az elkerülhető kibocsátás 28 000 000 tonna/év CO₂, 94 000 tonna/év SO₂ és 78 000 tonna/év NO_x feletti érték lenne.

9.1.5. A nukleáris energiával kapcsolatos aggodalmak

A nukleárisenergia-hasznosítása jelentősen csökken. A nukleárisenergia-termeléssel kapcsolatban a következő aggodalmak időszerűek:

- az üzemanyag-ciklus és a leszerelés alatt termelődött nukleáris hulladék biztonságos elhelyezése;
- a nagyobb baleseteket követő káros sugárzás kibocsátása.

Ezzel ellentétben a szélenergia nem hoz létre semmiféle veszélyes hulladékot. A lakosság egyetlen tagja sem sérül a szélenergia létesítményektől és nincs kockázata a nagy katasztrófa baleseteknek.

9.1.6. Fosszilis tüzelőanyag-tartalékok

A hagyományos tüzelőanyag-készletek legújabb becsült értékeit az alábbiakban mutatjuk be. Az adatok pontossága korlátozott, mivel minden évben új készleteket találnak, és az új technológiák megvalósíthatóvá teszik ezeknek a készleteknek a gazdaságos kinyerését az új helyszínekről.

A jelenlegi felhasználási sebesség hozzávetőlegesen 300 000-szor nagyobb, mint az a sebesség, amellyel a fosszilis tüzelőanyagok természetes úton képződnek. A hagyományos tüzelőanyagok felhasználása az elkövetkező években folytatódni fog, de végül a készletek kimerülnek.

Ezzel ellentétben a szél megújuló, és szabadon rendelkezésre álló természeti erőforrás. Ezért a szélenergia azon kívül, hogy csökkenti a veszélyes szennyezőanyagok légköri kibocsátását, hozzájárulhat az energiaellátás biztonságosságához.

A fosszilis tüzelőanyagok még lényegesebb felhasználási módja a kémiai alapanyagként való felhasználásuk olyan szerteágazó folyamatokhoz, mint pl. a műanyagok és az acélgártása. Ehhez nem állnak más ismert anyagok rendelkezésre. Ebben az értelemben ezek-

9.5. táblázat. Becsült fosszilis tüzelőanyag-készletek

Tüzelőanyag	Bizonyított készletek (GTOE)	Élettartam az 1996-os kinyerési arányok mellett, év
Szén és lignit	630	235
Olaj	141	43
Gáz	129	66

nek a fontos anyagoknak az elégetése ahhoz, hogy elektromosságot termeljünk alacsony hatásfokkal, nem lehet hosszú távú cél. A szélenergia, mint a nem fosszilis energia-előállítási technológiák egyik változata, hosszabb távon képes megelőzni az „alapanyag-krízist”.

9.2. Közvetlen hatások

9.2.1. Földterület-felhasználás

A földterület 99%-a, amelyen szélerőmű-park helyezkedik el, fizikailag éppúgy rendelkezésre áll, mint azelőtt. A mintegy 10 méter átmérőjű szélerőmű alapzatok, normál körülmények között teljesen a földben helyezkednek el, így lehetővé teszik a mezőgazdasági művelést egészen az oszlopig.

Nincs arra bizonyíték, hogy a szélerőmű-parkok nagyobb mértékben zavarnák a földművelést vagy az állattenyésztést. A szélenergia viszonylag kis sűrűségű energiaforrás, de a földterület felhasználására vonatkozóan bármiféle más energiatermelő eszközzel való összehasonlításnál figyelembe kell venni a teljes tüzelőanyag ciklust, amint azt a 9.6. táblázat mutatja.

A széntüzelésű energiatermeléshez felhasznált földterület nagy részét a bányászati és szállítási tevékenység indokolja, mivel a bányák távol esnek az erőművektől.

9.6. táblázat. Az energiatermelő technológiákhoz szükséges földterület/GWh 30 évre [28.]

Energiatermelő technológia	Szükséges földterület per GWh30 évre, m ²
Geotermikus	404
Szél	800-1335
Napfény – áramtermelésre	3237
Napfény – melegítésre	3561
Szén	3642

9.2.2. Vizuális hatás

A szélerőmű-parkoknak szabad területen kell lenniük ahhoz, hogy kereskedelmileg életképesek legyenek. Ezért jól láthatóak. A szélerőmű-park látványára való reagálás nagymértékben szubjektív. Sok ember a tiszta energiát üdvözlő szimbólumként szemléli őket, míg néhányan a tájkép barátságtalan kiegészítőinek tartják őket.

A szélenergia szélesebb értelemben vett környezeti előnyeinek értelmezése olyan tendenciát mutat, hogy javul a lakosság reakciója a szélerőmű-parkok megítélésében.

Az ipar jelentős erőfeszítéseket tett azért, hogy a kifejlesztett gépeket beleillessze a tájképbe. Számítógépes fotomontázsok, animációk és a vizuális hatás feltérképezett zónáival együtt objektív előrejelzéseket adnak az objektum megjelenéséről.

A nagyobb szélturbinák irányába mutató trend csökkenti a szubjektív vizuális hatást adott kapacitás esetén.

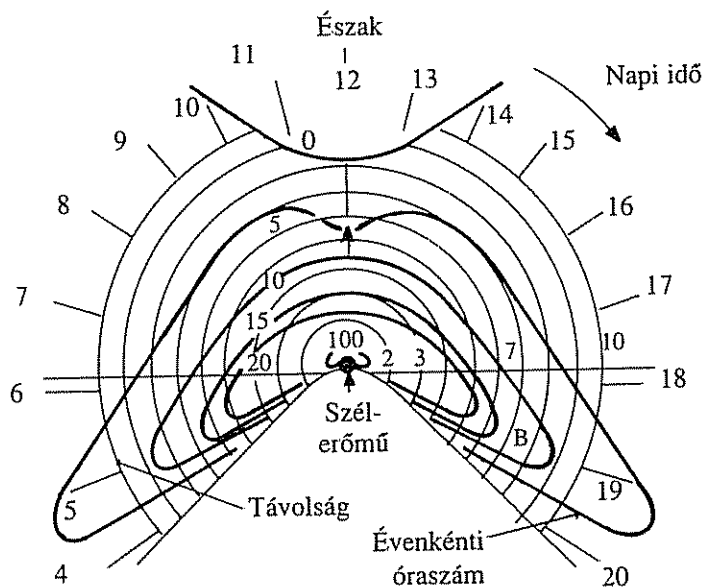
Jól dokumentált, hogy a szélerőmű-parkok látogatóinak túlnyomó többsége kellemes benyomást szerez és nem ismeretlen a fejlesztők számára az sem, hogy szkeptikus, a tervezéssel foglalkozó hivatalnokokat szállítsanak busszal valódi szélerőmű-parkra, igen pozitív eredményekkel. Véletlenszerű megkérdezésen alapuló független vélemények megerősítették, hogy néhány helyi lakosnak a tervezési szakaszban jelzett félelme a felszerelés után megváltozott.

Manapság a legtöbb szélerőmű hosszú, kúpos acéltoronyra van felszerelve, amit a legtöbb ember esztétikusabbnak talál, mint az USA-ban széles körben használt rácsos tornyokat. Számos szélerőmű gyártó cég professzionális tervezőket alkalmaz gépei megjelenésének kellemesebbé tételére.

Rendszerint tájképfomálással foglalkozó építészeket vonnak be az új tervek vizuális értékelésébe.

A napfény periodikus tükröződésének (felvillanás) vagy megszakításának (árnyékvibrálás) hatásait a gép telepítésénél és a lapátkerék felületi kezelésénél figyelembe veszik. Ezek a jelenségek teljes mértékben előre jelezhetők, és kijavításuk könnyen beilleszthető a szélerőmű-park tervezésbe, annak kezdeti szakaszában.

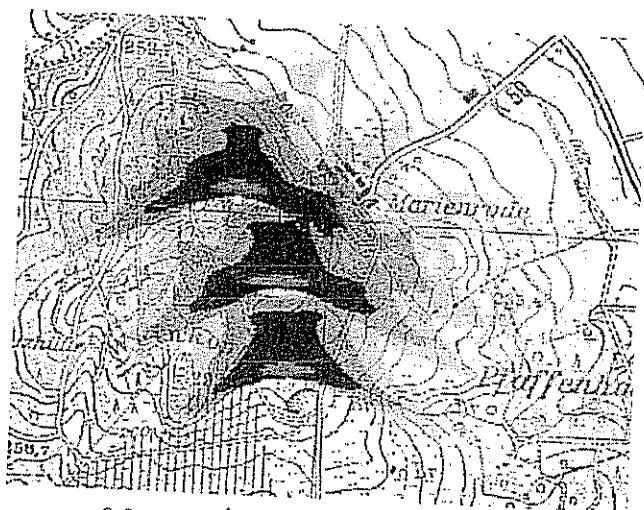
A 9.2. ábra példát mutat be az árnyékhatásának számításáról. Az ábrát Dánia esetére szerkesztették. Az eredmények más országok esetében változhatnak a különböző mértékű felhőtakarás és a különböző magasságok miatt. A képen A-val és B-vel jelölve két ház van a középpontban lévő turbinától a 6-os és 7-es magasságvonalon. Az ábra azt mutatja, hogy az „A” házban évenként 5 órán keresztül fogják érzékelni a turbinától eredő árnyékot. A „B” házban évenként mintegy 12 órán keresztül fogják az árnyékot érzékelni. A szezonális változás ugyancsak benne van a számításban.



9.2. ábra. Az árnyékhatás számítása

Dániában az általánosan használt útmutató szerint minimum 6–8 lapátkerék-átmérő távolság van a szélerőmű és a legközelebbi, szomszédos turbina között. A házakat hatszoros lapátkerék-átmérő távolságra (a 600 kW-os gép esetében hozzávetőlegesen 260 m-re) telepítik a szélturbinától. Így a fenti szektorok bármelyikében két perióduson keresztül érvényesül a hatás, mindegyiknél évenként 5 héten keresztül.

9.2.3. A zajhatás

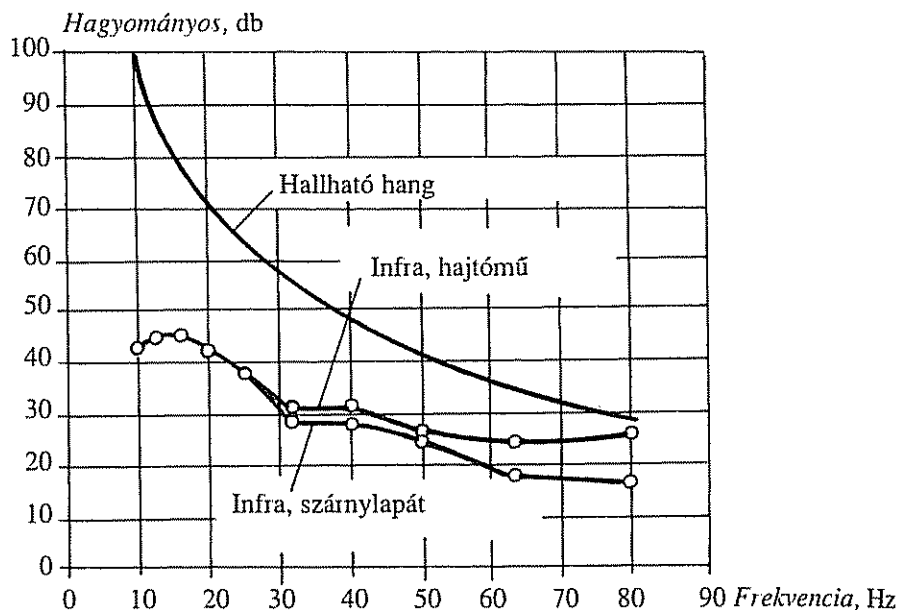


9.3 ábra Árnyékhatás 3 erőmű esetén

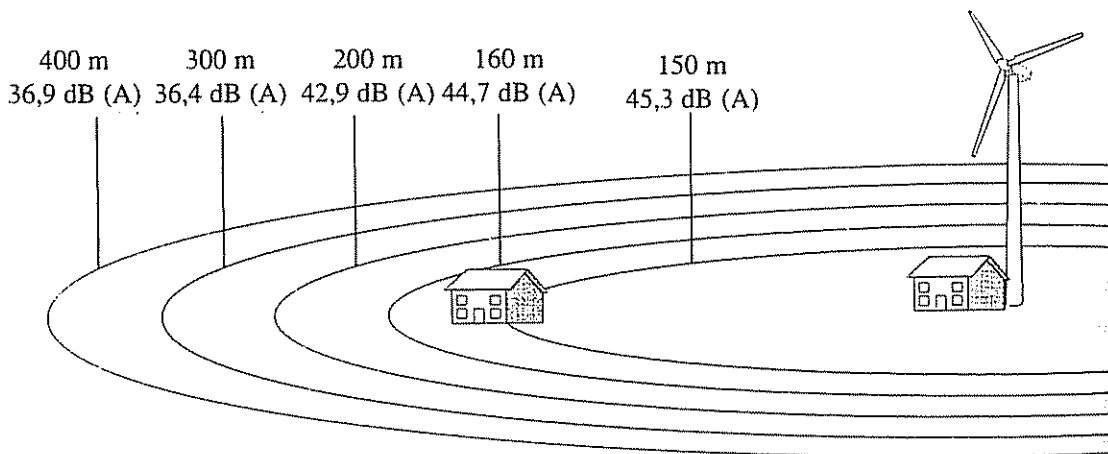
A modern szélturbinák csendesek. Ahhoz, hogy ezt az állítást objektíven meg tudjuk ítélni, valamennyire meg kell érteni a zaj fizikáját és terjedésének módszereit. A hangot decibelben (dB) mérik logaritmikus skála felhasználásával. A decibel a hang nyomásszintjének mértéke – a levegőben lévő nyomásváltozás nagyságrendje. 3 dB növekedés a hangnyomás megkétszerezésével egyenlő és ezért ez már figyelemre méltó változás hangerő-ségben. 10 dB növekedés nagyjából olyan mint a „hangosság” megkétszereződése. A környezeti zaj mérése dB(A)-ban történik, ami az emberi fül érzékenységének korrekcióját is magába foglalja. Formálisan a hang méréséhez néhány további jellemzőre is szükség van: az ábrázolás típusára és arra az időre, ami alatt a hangot mérik és ami tipikus esetben 1 perc, 10 perc vagy 1 óra. A szélturbinák esetében ezek a különböző megközelítések nagyon hasonló eredményeket adnak, ezért itt nincs szükség részletes megvitatásukra.

A hangnyomás szintje a szélerőműtől 40 méter távolságban 50–60 dB(A), nagyjából ugyanolyan szintű, mint a beszélgetésé. 500 méterrel távolabb lévő háznál, amikor a szél a turbina felől a ház felé fúj, a hangnyomás szintje körülbelül 35 dB(A), ami annak a hangnak felel meg, ami egy nyugodt házon belül van. Szélerőmű-park a legközelebbi 500 méteres távolságban 42 dB(A) hangszintet teremt ugyanilyen feltételek mellett, ami azzal a hanggal egyenértékű, ami a nyugodt irodában van. Amikor a szél ellenkező irányba fúj, a hang szintje jelentősen, akár 10 dB-el is csökken.

A potenciális hangeffektust úgy becsülik meg, hogy megjósolják a hangokat, amelyeket a turbinák felől a ház irányába fújó szél kelt, ami konzervatív feltételezés. A szélerőmű hangja kismértékben emelkedik a szél sebességével. A szél hangja a fák és élő sövények mellett, épületek körül és a helyi terepen átfújva ugyancsak növekszik a szélesebséggel, de rendszerint nagyobb mértékben, és így gyakran elnyomja a turbina hangját.



9.4. ábra. Frekvencia függvényében az infrahangnyomás (dB) a toronytól 10 m-re (600 m-re az értékek nem voltak kimutathatók)



9.5. ábra. A hallható hanghatás az oszloptól távolodva

A jelenlegi csendes gépek megalkotása érdekében figyelmet fordítottak a formára, a lapátkerékre továbbá a gép mechanikus részeire. Ennek eredményeként a hang nem okoz gondot a körültekintően tervezett és telepített modern szélturbináknál.

9.2.4. Elektromágneses zavarás

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a szélerőmű-park körültekintő tervezése elkerülhetővé teszi a telekommunikációs rendszerek bármiféle zavarását. Rádióhullámokat és mikrohullámokat széles körben használnak kommunikációs célokra. A szélturbinák úgy kelhetnek elektromágneses zavaró hatást, hogy a jelek visszaverődnek a lapátkerékről úgy, hogy a közelben lévő vevőkészülék fogja mind a közvetlen, mind a visszaverődött jeleket.

Az üvegszálas poliésztert amit a modern lapátkerekhez használnak, részlegesen áteresztő az elektromágneses hullámok számára, ezért közbenső helyet foglal el az elektromágneses zavarás skáláján.

Az elektromágneses zavaró hatások, a TV- és rádióadásokat, mikrohullámú és cellás rádiókommunikációt valamint a különböző navigációs és légi közlekedési ellenőrző rendszereket befolyásolhatják. A szélerőmű parkok tervezői konzultálnak az illetékes polgári és katonai hatóságokkal, hogy megállapítsák, várható-e elektromágneses zavarások. A mikrohullámú hálózatokat és a légügyi kommunikációs rendszereket befolyásoló problémákat már ebben a szakaszban el kell kerülni.

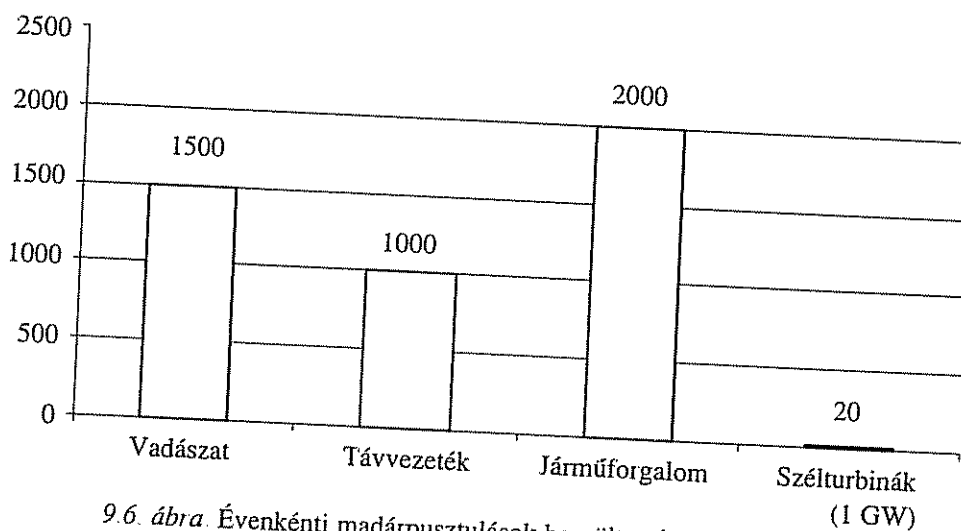
9.2.5. Hatás a madarakra

A madarak gyakran ütköznek olyan szerkezetekkel, amelyeket rosszul látnak, különösen a nagyfeszültségű távvezetékkel, árbocokkal, oszlopokkal és épületek ablakaival. De elpusztítják őket a mozgó járművek is, különösen az országúti forgalomban. A madarak viselkedése fajok és telephelyek szerint specifikus tendenciát mutat. A különböző emberi okoknak tulajdonítható évenkénti madárpusztulások becsült értékét Hollandiára vonatkozóan a 9.6. ábra mutatja be.

Szélturbinák esetében a becsült érték 1000 MW telepített kapacitásra vonatkozik, míg Hollandiában jelenleg 300 MW feletti kapacitás van telepítve.

A madarakat ritkán háborgatják a szélturbinák. A Dánia nyugati partján lévő Tjaereborgra vonatkozó radarvizsgálatok – ahol egy 2 MW-os szélerőmű van telepítve 60 méter átmérőjű rotorral – azt mutatják, hogy a madarak hajlanak arra, hogy repülési útvonalukat a turbinától 100–200 méterrel távolabb megváltoztassák, és afelett vagy amellett biztos távolságban haladjanak el. A megfigyelések szerint ez a viselkedés éppolyan következetes éjszaka, mint napközben. Dániában számos példa van arra is, hogy sólymok a szélturbinák tornyaira erősített ketrecekben fészkelnek.

Mindazonáltal ezt a kérdést mind a szélerőmű tervezők, mind pedig az üzemeltetők egyaránt komolyan veszik és a fejlesztésekből normál esetben kizárják a madár-érzékeny területeket, mint például a madárvédelmi körzeteket.



9.6. ábra. Évenkénti madárpusztulások becsült száma Hollandiában

9.2.6. Egyéb környezeti hatások

Az egyéb szárazföldi környezetre gyakorolt hatások elsődlegesen építési tevékenység, föld-elhordás és hidrológiai erózió következményei. Ezeknek a hatásoknak a mértéke az ökológiai rendszer típusától, a vízvezetés módjától, az építési módszerektől és azok időtartamától, valamint a helyreállítási gyakorlattól függ. Mindezen tényezők és a kár mérsékléséhez szükséges intézkedések megvitatásra kerülnek a környezetvédelmi hatásfelmérésnél, aminek részletezése a következő fejezetben található.

Az erodált földet a környező rendszer számos helyen gyorsan visszaállítja. Bizonyítékok azt sugallják, hogy sem a vadállatokra, sem a háziállatokra nincs hatással a szélerőmű-park.

Környezeti hatások összefoglalása

- Károsanyag-kibocsátások. A szélturbinák működésének nincs közvetlen károsító hatású kibocsátása.
- Energiaegyensúly. A szélturbina költségeire vonatkozik mindaz, ami jellemzi a többi megújuló energiaforrás hasznosítását is, azaz a megtérülési idő után szinte teljes mértékben elhanyagolható az üzemeltetési költség.
- Bontási költségek és társadalmi kötelezettségek. A szélturbina-generátorokból nyert elektromos energia járulékos és társadalmi költsége rendkívül alacsony, és az elavult szélerőművek lebontása nem jár különleges kötelezettségekkel. A modern szélturbina majdnem minden része újrafelhasználható.
- Területhasználat. A szélerőmű-park által elfoglalt terület 99%-a érintetlen marad, vagy mezőgazdasági célokra felhasználható. A szélerőmű-parkoknak általában 8–13 MW/km² a területigénye.
- Zajkibocsátás. A turbinazaj okozta kellemetlenség az egyik legfontosabb korlátozó tényező a szélturbinák lakott területekhez közeli elhelyezésében. Az elfogadható kibocsátási szint nagyban függ a helyi szabályozástól. Európában a szélturbinák és a lakóterületek közötti jellemző távolság több mint 150–200 m.

A 9.5. ábra egy átlagos szélturbina környezetében a zajszint értékeket mutatja dB(A)-ban. Ez a mérték a legtöbb zajszint mérő műszeren közvetlenül leolvasható. A szélturbinától 160 m távolságra a zajszint már csak 44,7 dB(A), és távolodva tovább csökken.

A zaj fő forrása elsősorban a gépészeti berendezés és a szélturbina lapátkerék áramlási zaj. A zajszint értékeléséhez az egyes zajforrások tipikus zajszint értékei:

Sugárhajtású repülőgép (mellette):	140 dB(A)
Légkalapács (a dolgozónál):	120
Ipari zaj (fogaskerék hajtómű):	100
Sztereo zene:	90
Átlagos motorzaj az autó belsejében:	80
Átlagos irodai zaj:	60
Lakásban (nappal):	50
Szélturbina (160 m távolságra):	45
Hálósoba (éjszaka):	30
Suttogás:	20
Hulló levelek:	10

A felsorolásból megállapítható, hogy a szélturbinák zaja a megszokott napi zajok között nem jelentős.

- Vizuális hatás. A vizuális hatás – bár igen nehéz meghatározni – komoly tervezési korlátozás alá esik a legtöbb európai országban.
- Madarak veszélyeztetése. Németországban, Hollandiában, Dániában és az Egyesült Királyságban készült tanulmányok szerint, a szélturbina-generátorok nem jelentenek komoly veszélyt a madarakra.
- Interferencia elektromágneses kommunikációs rendszerekkel. Néhány területen a szélturbinák visszaverhetik az elektromágneses hullámokat, ami szétszóródik és megtörik, vagyis a szélturbinák zavart okozhatnak a telekommunikációs kapcsolatokban.
- Személyes biztonság. Nincs személyi sérüléssel járó olyan nyilvántartott eset, amelyet a lapátok, vagy a meglazult jég okozott volna. A Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság nemzetközi szabványt adott ki a szélturbinák biztonsági előírásairól.

Környezeti megfontolások

A technikai elemzés készítésekor a beruházónak a lehetséges helyszín környezeti elfogadhatóságát is mérlegelnie kell. A lehetséges helyek kezdeti környezeti elfogadhatóságát adatokon alapuló tanulmányokkal támogatják. Az Európai Szélenergia Szövetség ajánlja a környezeti hatástanulmány elkészítését. Ezenkívül fontos a területről szóló jelentések és térképek áttekintése az esetlegesen felmerülő különleges technikai vagy környezeti kérdések meghatározására, ill. a beruházónak számba kell vennie a meglévő nemzeti, regionális és helyi tervezési politikát is. Figyelembe veendő néhány további szempont:

- Vizuális szempont. A beruházónak értékelnie kell a javasolt helyszín láthatóságát és a fontosabb tervezett nyilvános fejlesztések helyeiről való láthatóságot.
- Lakónegyedekhez való közelség. A szélturbinák nem lehetnek olyan közel a lakónegyedekhez, hogy zavarják azt zajjal, árnyékvibrációval, látvánnyal vagy a tükröződő fénnel.
- Ökológia. A fejlesztőknek számításba kell venniük a rendelkezésre álló információkat a terület ökológiai rendeltetéséről és a szezonálisan vagy egész évben ott élő védett fajokat.
- Polgári és katonai repülőterek. A repülőterekhez közel eső helyeknél a reptéri hatósággal kell konzultálni.
- Korlátozott területek. Korlátozások lehetnek a szélturbina-generátorok kifejlesztésében a biztonsági területek közelében, mint katonai területek, telekommunikáció stb.

9.3. Energia- és anyagfelhasználás a szélerőmű élettartama alatt

9.3.1. Energiafogyasztás

A modern szélgenerátorok gyorsan megtermelik azt az energiát, amit gyártásukra, felszerelésükre, karbantartásukra és végül leszerelésükre kell fordítani. A tipikus szélerőmű park ezt 3–4 hónap alatt termeli meg, ez az eredménye a Dán Szélerőmű Gyártók Szövetsége által végzett, szélturbinákra vonatkozó részletes élettartam-elemzésnek. A tanulmány felbecsüli a szélerőmű minden részegységének energiaigényét és a

9.7. táblázat. Tipikus 600 kW-os szélérőmű energiaszükséglete

Folyamat	Energia, MWh
Gyártás	528
Felszerelés	137
Üzemeltetés és karbantartás	215
Leszerelés (elhasznált)	145
Összes	821

9.8. táblázat. Tipikus 600 kW-os szélérőmű energiamérlege

Szélérőmű terepének egyenletlenségi osztálya	Szélérőmű elektromos áram termelése, MWh/év	Széntüzelésű erőmű primer energia fogyasztása, MWh/év	Szélérőmű energiafelhasználása, MWh	Szélérőmű energiafelhasználás megtérülésének időtartama, hónap
1. osztály	1393	3202	821	3,1
2. osztály	1130	2598	821	3,8

termelési lánchoz kapcsolódó valamennyi egység globális energiaigényét. A tanulmány a Dán gazdaság „input-output” modelljét alkalmazza, amit a Dán Központi Statisztikai Hivatal publikált. Ennek a módszernek a műszaki számításokon túlmenően az az előnye, hogy megfelelő módon figyelembe tudja venni a részegységek gyártói által, azok gyártóberendezései által, az épületek stb. által felhasznált energiát a termelési lánc minden kapcsolatában. A becslés eredményeként a tipikus dán 600 kW-os szélérőmű energiaszükséglete 20 éves élettartama alatt a 9.7. táblázatban látható.

Ezután a tanulmány az ugyanolyan évi elektromos teljesítményű modern, széntüzelésű erőműhöz hasonlítva becsüli meg a szélérőmű energia-megtérülési idejét, amint azt a 9.8. táblázat mutatja.

Ezek konzervatív becslések, mivel a széntüzelésű erőműre vonatkozó energiafogyasztás becsült értékei csak a közvetlen tüzelőanyagokra vonatkozó költségeket (szén energiatartalma és szállítása) foglalják magukba. Ugyanakkor nem tartalmazzák a széntüzelésű erőmű építési és üzemeltetési költségét (ami 50% fölött lehet) vagy a közvetett energia-felhasználást a széntüzelés során. Sőt, az összehasonlítás 45%-os termikus hatásfokot tételez fel, ami messze felette van az EU-ban üzemelő széntüzelésű erőművekben tapasztalt átlagos értéknek.

9.3.2. Anyagszükséglet

A szélérőmű-park anyagszükségletére vonatkozóan a legújabb és legrészletesebb elemzés egy esettanulmány, ami a Spanyolországban lévő Baix Ebre szélérőmű-park adatain alapul, és amit a THERMIE DG CVII című, az egész élettartamra vonatkozó környezetvédelmi hatásvizsgálás (LCA) részeként készítettek. A környezeti hatásvizsgálás általánosan alkalmazható eszköz az áruk és szolgáltatások környezetvédelmi költségeinek értékelésére „a bölcsőtől a sírig”. Az alább ismertetett adatok ebből a munkából valók.

A Baix Ebre szélérőmű park 27 db Ecotecnia típusú, 150 kW-os turbinából áll egy magas hegygerincen Katalóniában. Bár a gépek kisebbek mint a jelenlegi ipari szab-

ványtípus, újabban széleskörű érdeklődés mutatkozik arra vonatkozóan, hogy terjesszék a környezeti hatástanulmány módszerét a többi esettanulmányra is.

A 9.9. táblázat a szél erőmű-park részegységei által képviselt anyagok súlyát mutatja be. Az összesített értékek a teljes szél erőmű-parkra vonatkoznak, míg a súlyra eső teljesítmény értékeket az összesített értékek 4,05-tel való osztásával nyertük (a felszerelt szél erőmű-park teljesítménye). Miközben óvatossá kell lennünk ennek a közelítésnek a használatánál, mivel az anyagbeviteli adatok nem szigorúan arányosak a felszerelt kapacitással, a súlyra számított teljesítmény értékek hasznos hozzáteljesítmény, általánosított közelítést adnak, amelyek sokkal szélesebben alkalmazhatók. A 9.10. táblázatban alternatíva, az anyag típusonkénti bontás látható.

A fenti adatok alapján nyilvánvaló, hogy a szél erőmű-parkhoz szükséges anyagok között a turbina talapzatához használt beton és az acél dominálnak, amely utóbbiból az oszlopokat készítik. Az alapvető tervezési elv az, hogy a tömeg költség-növelő tényező, ezért a szél turbinák anyagszükségletének csökkentése folytatódik.

9.9. táblázat Az anyagok bontása a szél erőmű-park részegységei szerint

Szél erőmű-park részegysége	Tömeg, t	Tömeg/teljesítmény, t/MW	Részarány, %
Megfigyelő antennák	< 1	< 1	-
Turbinák	436	108	17
Turbina talapzatok	1800	444	73
Egyéb infrastruktúra	241	60	10
Összesen	2478	612	100

9.10. táblázat A felhasznált anyagok anyag típusonkénti bontásban

Anyag	Tömeg, t	Tömeg/teljesítmény, t/MW	Részarány, %
Beton	1847	456	74
Acél, vas	544	134	22
Üvegszálás poliészter	49	12	2
Réz	12	3	< 1
Kavics	14	3	< 1
Alumínium	6	< 2	< 1
Kenőanyagok	< 2	< 1	< 1
Polietilén (PET)	< 2	< 1	< 1
Polivinilklorid (PVC)	< 2	< 1	< 1
Poliuretán (PUR)	< 1	< 1	< 1
Egyéb	<< 1	< 1	< 1
Összesen	2478	612	100

9.4. Követelmények az EU-n belül

Dániában, Írországon, Németországban, Franciaországban és Finnországban a környezeti hatásvizsgálata nem követelmény a szélenergia javasolt alkalmazásához. Hollandiában, Svédországban, Görögországban és az Egyesült Királyságban ugyanakkor olyan törvényeket fogadtak el nemzeti szinten, amelyek felhatalmazzák az illetékes

hatóságokat arra, hogy megköveteljék a fejlesztőtől a környezeti nyilatkozat benyújtását. Olaszországban és Spanyolországban a követelmények régióról régióra változnak. Az „Ajánlások a szélenergia fejlesztésének következetes és kívánatos módszereit tárgyaló világos és szakmai útmutatókhoz” című Altener program megkísérli azt, hogy útmutatót adjon a tagállamoknak arról, hogyan alakítsák törvényeiket ebben a vonatkozásban.

9.4.1. A „legjobb gyakorlat”

A „legjobb gyakorlat” (Best Practice) kifejezést arra fogadták el, hogy leírja a szélenergia berendezéseinek javasolt fejlesztéshez, üzemeltetéshez és leszereléséhez elfogadandó legmegfelelőbb módszert. Az ilyen útmutató szándéka az, hogy biztosítsa az érzékeny projekt kidolgozást a megfelelő területen.

A legjobb gyakorlat kiforrott eljárási útmutató melynek alapján a környezeti hatástanulmány elkészíthető és a beruházás megvalósítása és működtetése elvégezhető. A szélenergia projekt fejlesztőjének rendelkeznie kell a projekt tervvel. Először az EU-nak a nemzeti és helyi energiára, környezetvédelemre és tervezési politikára vonatkozó politikájára kell tekintettel lenni, amelyeket alkalmazni lehet a javaslatban.

9.4.2. Telephely kiválasztása

Nincs olyan törvényi előírás, amely a telephely kiválasztási eljárását szabályozná. Minden telephely kiválasztási és felmérési eljárásnak foglalkoznia kell a projekt műszaki, kereskedelmi és környezetvédelmi aspektusaival annak meghatározása érdekében, hogy a terület alkalmas-e szélenergiával kapcsolatos fejlesztésekre. A műszaki szempontokon kívül már korai szakaszban figyelembe kell venni a szükséges tervezési kereteket, különösen a tájképi, ökológiai, archeológiai vagy egyéb megjelöléseket, amelyeket a telephelyen fel lehet használni vagy a javasolt telephely közelében el lehet helyezni. Ebben a szakaszban előzetes konzultációkat kell kezdeményezni a terveket engedélyező hatóságokkal és főbb tanácsadókkal; ha alkalmas, a projektben való helyi részvételt is meg kell fontolni. Ebben a szakaszban számos fejlesztő több telephely összehasonlító felmérését is elvégzi annak meghatározása érdekében, melyik elégíti ki a továbbfejlesztés követelményeit.

9.4.3. Környezeti nyilatkozat

A Környezeti Nyilatkozat célja az, hogy részletesen bemutassa a javasolt projektet a hatások alapos felmérésével együtt. A nyilatkozatban a fejlesztőnek, a helyi építésügyi- és más szakhatóságoknak meg kell állapodnia valamennyi kérdésben. Nem minden EU tagállam követeli meg ezt. Néhány tagállamban, ahol nincsenek rendelkezések részletes információkat fognak kérni a projekt környezetére vonatkozó kérdésekről, ezért a fejlesztőnek ezeket tisztáznia kell az illetékes hatóságokkal.

9.4.4. Tervezés, építés és üzemeltetés

A javaslat végső tervrajzához valószínű, hogy végre kell hajtani bizonyos módosításokat az eredeti javaslatához képest. Ez vonatkozhat egyes széltermőművek elmozdítá-

sára vagy eltávolítására, az erőművek választékára vagy üzemelési mutatóikra, a megközelítési útvonal elhelyezésére, az elektromos csatlakozások kialakítására és az építés menetrendjére. Ily módon a tervezési folyamaton keresztül valószínűleg mérés- és módosításokat kell végrehajtani ahhoz, hogy elérjünk a fejlesztés leginkább elfogadható formájához, ami már kielégít bármilyen tervezési feltételt vagy követelményt, amelyet előírhatnak.

9.4.5. Leszerelés és rekultiváció

A leszerelés a berendezés valamennyi elemének eltávolítását, valamint az eredeti viszonyok helyreállítását foglalja magában. Ennek kivitelezési módja benne van a tervezési lépésekben. Ugyanakkor a leszerelési költség legnagyobb része, visszanyerhető a turbinák fémhulladékának értékéből. A szélerőművek leszerelése – más energia-termelési technológiákkal összevetve – jelentős környezetvédelmi előnye a szélenergiának.

9.4.6. Újrahasznosítás

Ha igény van a másodlagos nyersanyagokra, a szélturbinák elemei nagymértékben újrahasznosítható (termelési folyamatba visszavezethető) anyagokat tartalmazó berendezések. A 9.11. táblázat összefoglalja a szélerőművekkel kapcsolatos hulladékkezelés jelenlegi lehetőségeit.

A dőltbetűs lehetőségek még nem állnak rendelkezésre, de a fejlesztés viszonylag előrehaladott stádiumában vannak.

9.11. táblázat Szélturbinákra vonatkozó hulladékkezelési lehetőségek

Részegységek	Újrahasznosítás	Elégetés	Talajfeltöltés
Lapátkerék Poliészter	Üvegszálas poliészter A gyanta a nagyolvasztókban redukálószer, az üvegszállal salakot formál és a cementművekben felhasználható.	Háztartási hulladék	
Epoxi	Cementművekben a gyanta tüzelőanyagként, az üvegszál cementadalékanyagként felhasználható	Rotor légcsavarak hulladékégetőben	
Talapzatok és törmelékhalomok	Acél az acélművekben beton tömbökben (pl. új betonként)		Törmelék, Lerakóhely
Torony: csőacél vagy betonacél	A beton tömbökben (pl. új betonként vagy útalapozáshoz)		
Generátor és hajtómű	Ötvözött acélt minőségi acélokat gyártó acélművekbe. A hajtóműolaj másodlagos finomítása. Réz a rézöntődékben.	Hajtóműolaj hulladékégetőben (veszélyes)	

A szélturbinák alkatrészeinek újrafelhasználható tervezésére vonatkozó javaslatok a következők:

- a részegységek számának minimálisra csökkentése és könnyű leszerelhetőségük biztosítása;
- szárnylapátok PVC habot mellőző legyártása;
- újrafelhasználható betondarabok felhasználása az alapozásoknál;
- az alapozások könnyű szétszedésének szem előtt tartása pl. robbantólukak behelyezése;
- újrafelhasználható kenőanyagok használata;
- az anyagok összetételének pontos megjelölése, különösen ötvözött acéloknál;
- a szárnylapátok felújítható alapanyagokból való tervezése.

9.5. Európai célkitűzések

9.5.1. A közösségi stratégia

A Közösségi Stratégia Fehér Könyve a Megújuló Források részére ajánlásként 12%-os célt tűz ki, hogy ilyen mértékben járuljanak hozzá az Európai Unió energiafogyasztásához 2010-re.

A Fehér Könyvben három kulcsfontosságú, a fejlett technológiáknak megfelelő ágazatot jelöltek meg, melyek lényeginek tekinthetők a 12%-os MEF cél eléréséhez. Piaci térnyerésük felgyorsításához kezdeti ösztönzésre van szükségük.

A következő kulcsfontosságú ágazatok népszerűsítése javasolt a Kampány során:

- 1 000 000 napelem rendszer,
- 15 millió m² napkollektor,
- 10 000 MW szélgenerátor,
- 10 000 MWth kapcsolt hő és energia biomassa létesítmény,
- 1 000 000 biomasszával fűtött lakhely,
- 1 000 MW biogáz létesítmény,
- 5 millió tonna folyékony bio-üzemanyag.

Európának nagy szélenergia tartalékai vannak. A szélenergia alkalmazásokra potenciálisan megfelelő területek megoszlának az Európai Unió országai között. A nagy szélenergia tartalékkal rendelkező területek között szerepel: Nagy-Britannia, Írország és az EU északnyugati kontinentális területei: Dánia, Észak-Németország, Svédország délnyugati része, Hollandia, Belgium és Franciaország északnyugati területei. Ezen kívül Északnyugat-Spanyolország és a görög szigetek jelentős része.

Sem Magyarországról sem a környező közép-kelet-európai országokról ez idáig nem készült olyan szélátlasz, amely támpontot adhatna a szélből kinyerhető energia feltérképezéséhez.

9.5.2. Stratégiai célok

Az Európai Szélenergia Egyesület a következő javaslatot készítette, amit az Európai Unió Bizottsága elfogadott. A kiaknázható szélenergia hasznosítási potenciál 20%-át kellene elérni 2030-ra, ami megegyezik az Európai Unió jelenlegi igényének 10%-val. Ennek elérése érdekében 100 000 MW kapacitást kellene telepíteni.

9.12. táblázat. A szélenergia-telepítések felfutása

Ország, régió	1994-ben telepített kapacitás, MW	1994-ben működő összes kapacitás, MW	2000-ben telepített összteljesítmény, MW	2002 végéig telepített összkapacitás, MW
USA	100	1722	2 800	
Kanada			126	
Latin-Amerika	4	10	84	
Amerika	104	1732	3 010	
Németország	307	632	5 000	12 001
Dánia	52	539	1 900	2 880
Spanyolország	16	73	2 000	4 830
Hollandia	30	162	433	688
Nagy Britannia	40	170	361	552
Olaszország	7	22	300	785
Svédország	10	40	221	328
Görögország	10	36	144	276
Ausztria			43	139
Írország	6	8	76	137
Portugália	-	9	62	194
Franciaország			38	145
Finnország	3	4	38	41
Lengyelország			7	27
Cseh Köztársaság			4	7
Svájc			3	5
EURÓPA	485	1723	10 630	23 035
FÁK	-	-	10	-
India	141	201	1 000	-
Kína	18	29	300	-
Japán			81	-
Új Zéland			35	-
Ausztrália	-	6	11	-
Egyiptom	1	5	53	-
Összesen	756	3708	15 130	-

9.5.3. Fejlesztési célok

Az Európai Szélenergia Szövetség másik fontos célkitűzése, hogy a kutatás fejlesztés segítségével olyan versenyképes árat kell teremteni, ami a fejlődő világban is lehetővé teszi a fenntartható energia rendszerek hasznosítását.

A fenti stratégiai célkitűzésből hat egymástól független cél adódott az európai kutatás, fejlesztés számára:

1. Csökkenteni a szélenergia-termelési költséget. Az 1994. évi, átlagos európai szélturbina segítségével megtermelt kWh-kénti költséget 2000-re 30%-kal, 2005-re 40%-kal, majd 2030-ra 50%-kal kell csökkenteni a versenyképesség és a megfelelő arányú elterjedés ösztönzése érdekében. Az európai piac egyike a világ legnagyobbjainak. Ugyanakkor a termelési költségek csökkentése nélkül visszaszorulhat.
2. Összehangolt európai szabványok, jogi struktúra és intézményi háttér kialakítása. Ennek megvalósítása érdekében a következő elérhető célokat tűzték ki.
3. A technológia hitelességének növelése annak érdekében, hogy a pénzüzetek és biztosítók könnyebben fogadják be az ilyen beruházásokat. A szélenergia hasznosítás pénzügyi és műszaki bizonytalanságainak minimalizálása. A szélenergia hasznosításokkal szemben mind a mai napig számos országban bizalmatlanság tapasztalható. Ez jobbra a technológiai ismeretek hiányából és a beruházás lefolytatásának, társadalmi egyeztetési folyamatának kevés tapasztalatából ered. A hiányos ismeretek pénzügyileg is befolyásolják a projektek gazdaságosságát.
4. A szélenergia hitelességének növelése a szolgáltatók szempontjából. A szélenergia minőségének és kiszámíthatóságának biztosítása. Szélenergia továbbítási és kapcsolási költségeinek csökkentése. Szélenergia tapasztalattal nem rendelkező országokban az energiaszolgáltatók vonakodnak elfogadni a szélenergiát. Ez gyakran a szolgáltatók technikai kérdésekkel kapcsolatos aggodalmából fakad, mint az energia minőség, kiszámíthatóság és a hálózathoz való kapcsolódás. Elektromos teljesítmény előrejelzés a szélerőmű parkokon 24 órával előre.
5. A szélenergia nyilvános elfogadottságának fenntartása és növelése Európában. A szélturbina telepítés és működtetés környezeti és társadalmi következményeinek minimalizálása.
6. Szélenergia alkalmazása nagy EU hálózatokon kívül és a fejlődő országokban. Fejleszteni kell a megbízható hibrid rendszereket, akkumulátor töltő megoldásokat és szélmotoros alkalmazások feltárását. Ennek érdekében még több demonstrációra és ez irányú technológia transzfer növelésére van szükség.

9.5.4. A megvalósítandó terv

A szélenergia ma már versenyképes és széles körben telepítik kedvező feltételekkel bíró helyszínekre. A szélenergia alkalmazására potenciálisan megfelelő területek az Európai Unióban szétszórtan találhatóak. Jelenleg, vannak, akiknek járulékos költségeket kell elviselniük adott földrajzi helyzetük miatt, mely növeli a telepítési és/vagy működési költségeket (meglévő hálózatoktól távol eső területek, nagyon hideg, meleg vagy poros éghajlatok, part menti területek, szigetek, távoli vidéki területek stb.)

A kampányban öt piaci szegmens szerepel, minden egyes szegmensre a megvalósítható telepített kapacitást becsülik (9.13. táblázat).

- Magántulajdonban lévő szélerőművek. Általában néhány kW-tól 2 MW-ig terjednek. Farmerek, kis szövetkezetek, helyi hatóságok, ipari gyárak stb. tulajdonában vannak.
- Kis kereskedelmi szélerőmű-parkok (<5 MW). Befektetői csoportok, nagy szövetkezetek, ipari gyárak stb. telepítik. Azokat kell támogatni, amelyek kedvezőtlen adottságú területeken, elszigetelt területeken, szigeteken, kevésbé szeles területeken vannak.

9.13. táblázat. Ajánlott forgatókönyv a kulcsfontosságú ágazatok fejlesztésére 1999–2003

Ágazat	Kampány döntő lépései	Becsült telepített kapacitás	Becsült teljes beruházási költség milliárd euró
Napenergia	650 000 napelem rendszerek: EU	650 MWp	2,85
	350 000 napelem rendszerek: TC	350 MWp	(2,45)
	15 millió m ² napkollektor	15 Mm ²	4,7
Szélenergia	10 000 MW szélturbina generátor	10 000 MW	10,1
Biomassza	Kapcsolt hő és energia biomassza létesítmények 10 000 MWth része	10 000 MWth	5,5
	1 000 000 lakhely biomasszával fűtve	10 000 MWth	4,4
	1 000 MW biogáz létesítmény	1 000 MW	1,2
	5 millió tonna folyékony bio-üzemanyag	5 millió tonna	1,25
Összesen			30 milliárd euró

- Nagy kereskedelmi szélörmű-parkok (5–100 MW). Szakosodott beruházók által létrehozott nagy projektek, melyek a projektet építik és üzemeltetik.
- Áramszolgáltató tulajdonában lévő szélörművek (5–100 MW). A szélből nyert elektromos áram része a közmű energiatermelési választékának.
- Piaci rések. Ebbe a kategóriába a viszonylag kicsi, önálló létesítmények tartoznak a vidéki infrastruktúra nélküli vagy gyenge infrastruktúrával rendelkező területek villamosítása, valamint az olyan speciális alkalmazások, mint a szél – sótalánítás, szél – dízel, jégtermelés, vízszivattyúzás, telekommunikáció.

A projekt előkészítés költsége jelentős mértékben függ a helyi körülményektől, mint például a talaj állapota, az útviszonyok, az elektromos hálózat alállomásának közelsége. A telepített szélörmű teljes költsége körülbelül 1 kW/1000€.

9.6. A szélörművek létesítésével kapcsolatos szabályozás az EU-ban

9.6.1. Az irányelvek természete

Az EU szerte hivatalosan szabályozott irányelvek természetük alapján gyakorlatiasak, ugyanakkor jobbra a fejlesztők számára meghatározóak. A projektek egyéni értekelése miatt nem jó megoldás a teljesen egységes szabályozás kialakítása. Ezért az alábbi irányelvek célja elsősorban az, hogy körvonalaiiban meghatározza a megvalósításához szükséges folyamatot és a résztvevők megközelítését. Az irányelvek elsősorban műszaki, környezeti és tervezési szempontokat, ill. a folyamatot meghatározó egyéb egyeztetési feltételeket vesznek figyelembe.

A szélturbinákkal kapcsolatos szabványokat az Európai Unió különböző tagállamai már kidolgozták, ill. most folyik a kidolgozásuk. Uniós szinten a nemzetközi szabvány kidolgozása egységes szabályozást fog eredményezni, ami minden érintett országra vo-

natkozik. A harmonizáció a nemzetközi szélturbina piac kialakulásához elengedhetetlen. Az európai szabványok kidolgozásáért a több tagszervezetből álló EUREC-Agency (European Renewable Energy Centres Agency) felelős, melynek European Wind Turbine Standards (EWTS) nevű projektje foglalkozik a szabványosítással.

Elsősorban technikai problémákat vizsgáltak: a szélerőmű-parkok környezeti hatásai, a terhelési mérések megvalósítása a tervezés során, a szélturbinák biztonságtechnikai kérdései, kitérnek a terhelési kérdésekre, az extrém szélfeltételekre, a meghibásodási lehetőségekre, a szélturbina lapátok tervezési méréseire, az áramtermelés kiértékelése és a telepítési terület összefüggéseire.

Az EWTS tíz tanulmánya:

1. Terhelési skála a szélturbina tervezéshez.
2. Biztonsági tényezők kalibrálása.
3. A szélturbina biztonságának meghatározása; javasolt gyakorlat.
4. A szélerőmű biztonságának meghatározása.
5. Szélsébség mérések (A szélerőmű gazdaságossági kérdésének eldöntéséhez).
6. Telepítési helyszín ellenőrzése.
7. Mechanikai terhelési mérések.
8. A villamos energia minőség mérésének folyamata.
9. MEASNET: az EUREC által elismert mérési intézmények hálózata.
10. Az Európai Közösségi direktívák (irányelvek) elfogadhatósága.

A szélerőművek – más gépi berendezésektől eltérően – potenciálisan nagy mértékű hatásuk van a környezetre.

A jól megtervezett és legyártott szélturbinák nem veszélyes beruházások.

A tervezett beruházások megvalósításához nélkülözhetetlen a köz által történő elfogadtatásuk. Az elfogadás növelése érdekében minimálisra kell csökkenteni az esetleges balesetek okozta társadalmi kiadásokat.

A szélturbinák okozta kockázatok ismertek, de módszeresen gyűjtött működési adatok, baleseti statisztikák vagy meghibásodási mutatók nem állnak rendelkezésre. A modern szélturbinákat 20 évi folyamatos üzemre tervezik. Nagy méretű kereskedelmi beruházásra csak 1985 után került sor, ezért 20 évi üzemi tapasztalattal még nem rendelkeznek.

9.6.2. A szélerőmű megvalósíthatósági terve

A szélerőmű megvalósíthatósági tervezése három fázisra osztható:

Első fázis: helykiválasztás.

Második fázis: tervezés.

Harmadik fázis: részletes értékelés.

9.6.3. Helykiválasztás

Bármilyen beruházás alapja a kezdeti helykiválasztás. A folyamat kezdőpontja a kiválasztott terület megtekintése, hogy végül egy, vagy több fejlesztésre alkalmas helyet lehessen megjelölni. A kezdeti elemzésnek az összes nyilvánosan megszerezhető környezeti és technikai adatot számításba kell vennie, ahogy ez később leírásra kerül. A tervezéshez azonban általában sokkal részletesebb vizsgálatokat kell lefolytatni. Rendszerint a rendelkezésre álló adatok nem elégségesek.

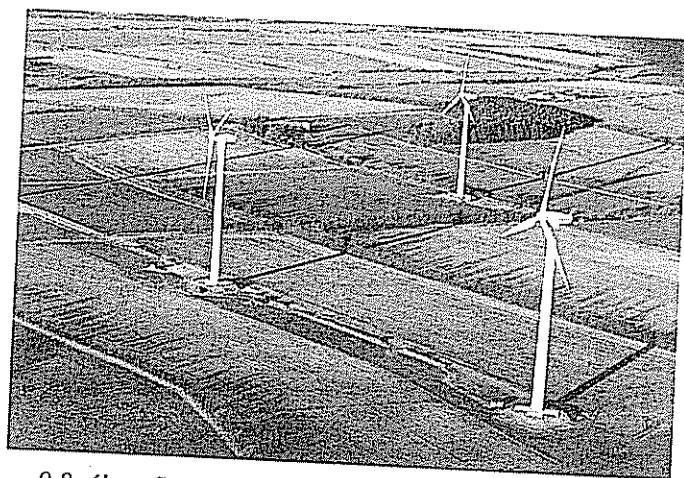
Ennek a fázisnak a célja megfelelő helyek kijelölése, ill. bármilyen technikai (műszaki), kereskedelmi és környezeti kényszer feltárása, hogy csak a legmegfelelőbb helyek kerüljenek a beruházási folyamatban továbbvitelre.

Technikai/kereskedelmi megfontolások

Kezdeti technikai elemzés

A hely kiválasztásának nagy részét a tanulmányok készítése teszi ki, hogy a helyek kielégítik-e a sikeres fejlesztés alapvető technikai kritériumait, melyek az alábbiak:

- Ebben a fázisban még csak becsléseink lehetnek a területek szélesebbségeiről, a fejlesztő általában olyan helyeket határoz meg, melyek megfelelő szélenergia-potenciál lehetőséggel rendelkeznek. Ez a terület térkép, számítógépes modell-eredmények, meteorológiai irodák vagy egyéb tapasztalati megközelítések segítségével határozható meg. A 6 m/s feletti átlagos szélesebbségű területek mindenképpen ígéretesek.
- A helyi villamos rendszerek vizsgálata és a párbeszéd a helyi áramszolgáltatóval, hogy a javasolt helyszín elektromos hálózatba való bekötése technikailag és kereskedelmileg megvalósítható-e (ez persze csak olyan projektekre vonatkozik, ahol a hálózatba való kapcsolás szükséges). A terület elektromos hálózatáról, az elektromos vezetékek térképéről és a kapcsolódási lehetőségekről a helyi elektromos szolgáltatótól lehet az információt beszerezni. A szolgáltató a kapacitás kihasználások ismeretében arról is becslést adhat, hogy mennyi lesz a gyakorlatban a szélturbina generátorok hálózathoz való kapcsolásának várható költsége.
- tanulmány a helyi úthálózatról a javasolt helyszín megközelíthetőségének akadályáival.
- A helyszín tulajdoni viszonyainak meghatározása.
- Lehetséges befektetők. A pénzügyi lehetőségeket a projektbe helyezett tőke határozza meg. A szélturbina generátorok működtetéséhez szükséges megfelelő jogi formát ki kell dolgozni. A jogi forma lehet korlátolt felelősségű társaság, szövetkezet, de akár az önkormányzattal és a helyi áramszolgáltatóval közös közhasznú társaság is. Általában elmondható, hogy minél több ember vesz részt a projektben, ez annál jobb hatással van a befogadására, ugyanakkor gyakorta megnöveli a megvalósítás idejét.



98. ábra. Szélturbinák mezőgazdasági területen

9.6.4. A tervezés

A második fázis elejére a fejlesztőnek meg kell határoznia a helyszínt a további vizsgálatokra. Ezen a helyszínen a következő vizsgálatok kerülnek elvégzésre:

- részletesebb technikai értékelés, mely helyszíni szélenergetikai felmérést is tartalmaz;
- értékelési és cél meghatározási munka, hogy a különleges környezeti problémák és lehetőségek azonosíthatók legyenek még a vállalás előtt;
- a fentieket együttesen figyelembe vevő gazdaságossági értékelés,
- tervezési problémák értékelése.

Szélből kinyerhető energia számítása

Manapság az a gyakorlat, hogy a mért értékekből a Weibull eloszlással jól lehet becsülni a környékre jellemző szélesebesség eloszlást. Alapvető fontosságú, hogy figyelembe vegyünk a különböző felületi és domborzati viszonyokat. Így elkerülhetetlen olyan modell megalkotása, ahol a terep domborzati viszonyaiból következtethetünk a szél mérés várható eredményeire. Ezt úgy érhetjük el, ha összevonjuk a mai elméleti összefüggéseket a gyakorlati eredményekkel. Szükséges megalkotni a modellt, amely figyelembe veszi a szélárnyékok hatását.

Amíg a legtöbb helyen az uralkodó szélesebesség megközelítő becsléséhez adatbázisokból és számítógépes modellek segítségével hozzájuthatunk, addig az energia hozam érzékenységvizsgálatát (ami a gazdasági életképesség kalkulációjához elengedhetetlenül fontos) csak helyszíni szélesebességek – megfelelő magasságban és mérési módszerrel lefolytatott – mérései alapján tudjuk megadni. Ezeket megfelelő mintavételezési idejű anemométerek (szélmérők) felhasználásával lehet elvégezni.

Meglévő földhasználat

A föld meglévő felhasználójával, bérlőjével, vagy akinek joga van használatba venni a földet, tárgyalni kell, hogy lehet-e és ha igen, hogyan lehet a legjobb módon integrálni ezekkel a meglévő felhasználásokkal.

- Földtani viszonyok. A helyen lévő föld állapotát meg kell vizsgálni, hogy kiderüljön, hogy a szélturbinák alapjait, az építményeket és a bekötőutakat fel lehet-e építeni és gazdaságos-e.
- Hely megközelítése. A szélenergia projekt kialakítása megköveteli, hogy teherautók juthassanak el a területre. A hely megközelíthetőségét értékelni kell, hogy a meglévő nyilvános és magán utak megfelelőek-e és milyen javítások szükségesek a fejlesztés elindításához.
- Elektromos hálózati kapcsolat. A meglévő elektromos hálózathoz való kapcsolódás lehetséges útjait és természetét az állomás elhelyezkedésével együtt értékelni kell. A szélturbina generátorok elektromos hálózathoz való kapcsolásának költségei változóak lehetnek. A legközelebbi kapcsolódási ponttól való távolság meghatározó.
- Projekt koncepció. A fenti feltételek végig gondolásával lehet kialakítani a projekt koncepciót.
- Helyi tervező hatóságok. A beruházónak értesítenie kell e helyi tervező hatóságot a kiválasztott hely megvalósíthatóságának vizsgálati szándékáról. Minden fél érdeke a világos kommunikáció, hogy a felesleges munka elkerülhető legyen.

– Helyi közösségek. Ebben a szakaszban a beruházónak együtt kell dolgoznia a helyi tervező hatósággal, hogy a nyilvános informális konzultációt miként folytassák le, és eredményeit hogyan használják fel. Amint korábban már szerepelt, a folyamatnak ez a megvalósítási fázisa megköveteli egy vagy több, anemométer állványra történő felszerelését, hogy kiderüljön, hogy a helyen elegendő szél van-e a gazdaságos üzemeléshez. Több lehetőség van a javasolt szélenergia projektekre, azonban a beruházónak meg kell jelölnie a javasolt projekt előre látható méretét. A rendelkezésre álló terveknek világosan meg kell jelölnie a társadalmi egyeztetések jövőbeli szakaszait. A lakosoknak tudniuk kell, hogy milyen lehetőségek léteznek a számukra a problémás kérdések kezelésére. A helyi visszacsatolás igen hasznos a projekt koncepció kialakításához, újraértékelésében. A beruházó csak akkor valósítja meg a harmadik fázist, amikor az első és második fázisból rendelkezésre álló információ azt mutatja, hogy a javasolt beruházás gazdaságilag és környezeti szempontból is életképes. E fázis elején a beruházónak már elvi gépkiosztással kell rendelkeznie.

Technikai/kereskedelmi megfontolások

A legmegfelelőbb szélturbina generátor kiválasztása
A szélesebbesség profilja meghatározza a szélturbina generátor kiválasztását, míg a szélenergia-potenciál befolyásolja a lapátkerék, generátor és tengelymagasság relatív méreteit.

Környezeti megfontolások

- Környezeti nyilatkozat szükségessége
A környezeti hatásvizsgálat elvégzéséhez kötött tevékenységek köréről és az ezzel kapcsolatos hatósági eljárás részletes szabályairól szóló 20/2001. (II. 14.) Kormányrendelet 1. sz. mellékletének, a hatásvizsgálat-köteles tevékenységek listájának 74. tétele („Szélerőmű 2 MW összteljesítménytől”) alapján hatásvizsgálat-köteles.
- Környezeti nyilatkozatban felmerülhető témák:
 - Helyszín kiválasztása (A beruházónak alá kell tudni támasztania, hogy miért választotta azt a helyet)
 - Vizuális és látkép értékelés (A meglévő látképet le lehet írni, és a javasolt fejlesztés potenciális látképét és vizuális hatását értékelteni lehet). Meg lehet határozni a Vizuális Hatás Zónát, és térképet lehet készíteni, ami megjelöli, hogy a park honnan lesz látható. El kell végezni a fontos és reprezentatív nézőpontok meghatározását, ahonnan a javaslat vizuális hatását értékelni lehet.

9.6.5. Dán példa

Dániában az általánosan használt útmutató szerint minimum 6–8 lapátkerék távolság van a szélerőmű és a legközelebbi ház között.

– Zajbecslés

Az ajánlott távolság a lakónegyed és a park helyszíne között sok tényezőtől függ

- helyi topográfia, helyi háttérzaj szintje és jellege. A háttérzaj jellegéről és szintjéről tanulmányt lehet készíteni.

– Ökológiai értékelés

- A javasolt helyszínen található növény- és állatvilágot időről időre vizsgálni kell az előfordulási hely, a zavaró hatásokra való érzékenységük, és a fontosságuk szempontjából, amit a nemzeti vagy helyi jog határozhat meg.
- *Archeológiai és történelmi értékelés*
Az első fázisban meghatározásra kerül minden jelentős archeológiai vagy történelmi érték a helyen belül, vagy ahhoz közel.
 - *Hidrológiai értékelés*
Értékelni kell a javasolt fejlesztés hatását a vízkészletre, annak minőségére és mennyiségére. Ahol szükséges a forrásvízkészletet is értékelni kell.
 - *Telekommunikációs rendszerekkel való interferencia*
A szélenergia-projektek interferenciát okozhatnak közeli televíziós és mikrohullámú rendszerekben. A kommunikációs rendszerek üzemeltetőivel konzultálni kell.
 - *Biztonsági értékelés*
Biztonsági értékelést kell készíteni, amely tartalmazza a használatra szánt szél-turbinák strukturális integritását. Egyéb megfontolandó szempontok lehetnek pl. az autópálya biztonság, vagy árnyékvibrálás.
 - *Közlekedés menedzsment és konstrukció*
A konstrukció hatását (a bekötő utakat is beleértve) értékelni kell. Minden lényeges fejlesztést megkönnyítő útépitést meg kell vitatni, és engedélyeztetni kell a helyi hatósággal.
 - *Elektromos kapcsolat*
A helyi hálózathoz való kapcsolódás érdekében a helyi elektromos szolgáltatóval kell lefolytatni az egyeztetést, és ezen terveket is egyeztetni kell a helyi hatósággal és földtulajdonosokkal.
 - *Helyi gazdaságra gyakorolt hatás*
A környezeti nyilatkozat tartalmazhat becslést a beruházás következtében keletkező ideiglenes vagy állandó állások számáról, és a helyileg rendelkezésre álló szerződések értékéről.
 - *Globális környezeti hatások*
A Környezeti Nyilatkozat becsléseket tartalmazhat arról, hogy a szélenergia projekt mennyi energiát fog termelni és mennyi szennyezőanyag kibocsátást fog kiváltani.
 - *Turizmus és kikapcsolódási lehetőségek*
A nyilvános utakat a helyszínen belül azonosítani kell, és fel kell tüntetni a térképen. A látogatók lehetőségeit, ha adott, ugyancsak meg kell vitatni a helyi hatósággal, és minden javasolt fejlesztést felül kell vizsgálni a megfelelő értékelésben. Fontos megjegyezni, hogy sok esetben a szélenergia fejlesztések turisztikai látványossággá válnak.
 - *Lebontás*
Az értékelésnek tartalmaznia kell a projekt lehetséges lebontását. A helyreállítási szempontokat mérlegelni kell, ideértve a föld feletti berendezések eltávolítását, tereprendezést, ill. annak meghatározását, hogy mi történik a megmaradó utakkal.
 - *Konzultáció/Párbeszéd*
A beruházónak folyamatos párbeszédet kell fenntartania a szakhatóságokkal és a nyilvánossággal a környezeti értékelési folyamaton keresztül. A résztvevő feleknek rendszeresen meg kell vitatniuk, hogy az eredeti projekt tervhez képest hol vannak változások.

9.6.6. A megvalósíthatósági terv

A megvalósíthatósági tervvel a részletes műszaki, gazdasági és környezeti elemzések el vannak végezve. Ha a helyszín megfelelő, a tervezőnek tervezési beadványt kell készítenie a helyi tervező hatóság számára. A tervezőnek késznek kell lennie, hogy válaszoljon minden alapvető kérdésre, a teljesen megalapozott döntés meghozhatósága érdekében.

Tervezési feltételek és kötelezettségek

A helyi tervező hatóság szabályozhatja a szélenergia fejlesztés konstrukcióját tervezési feltételekkel és kötelezettségekkel. Az összegzett feltételeket és megállapodásokat a tervezőnek és a helyi tervező hatóságnak a lehető legkorábbi stádiumban meg kell vitatnia.

Ahol a javaslatokat a helyi tervező hatóság elfogadja, a fejlesztő által a lehetséges környezeti károk csökkentésére tett további elkötelezettsége segíthet a helyi tervező hatóság és a helyi közösségek megerősítésében, hogy a tervező felelősségteljes módon jár el a leghasználatóbb környezeti megoldás telepítésével. A szélenergia projekt természetétől, méretétől és helyétől függően a tervezési feltételek és kötelezettségek számára megfelelőnek talált kérdések a következők:

1. Zajkibocsátás ellenőrzése.
2. A konstrukció elérhetőségének szabályozása, hogy a közlekedési kockázatok elkerülhetők legyenek.
3. A fejlesztés lebontása az élettartam végén.
4. A túlzott interferencia elkerülése az elektromos közvetítő rendszerekkel.
5. A beruházás megvalósításának ellenőrzése a növény- és állatvilág károsodásának elkerülésére vagy csökkentésére.
6. A szélturbinák látványának és színének ellenőrzése.

9.6.7. Telepítés

A konstrukciós szakaszban folytatódnak a környezeti megfontolások, és a tervezőknek vissza kell tekinteniük a Környezeti Nyilatkozatra, feltételekre és kötelezettségekre, melyek alapján a tervezési engedélyt megadták. A tervezési feltételeknek minden olyan tevékenységet meg kell jelölniük, melyeknek a konstrukciós szakasz alatt jelentősebb hatásuk lehet.

Technikai megfontolások

Szélenergia projektben résztvevő különböző vállalkozók számát tekintve a beruházónak ki kell jelölnie egy személyt, aki a hely irányításáért felel a helyi tervező hatóság felé. Ez a személy minden szempontból a munka felelőse lesz.

Környezeti megfontolások

A projekt terület kis százalékát közvetlenül befolyásolják a konstrukciós tevékenységek. A konstrukciós munkaterületeket ábrázolni kell a helyi tervező hatósággal együttműködve, és méréseket kell végezni az olyan felesleges hatások elkerülésére, mint a meghatározott munkaterületen kívüli járműhasználat. Figyelemmel kell lenni az utak nyilvános jogait használók biztonságára is.

Párbeszéd és konzultáció

A kivitelezőnek meg kell bizonyosodnia arról, hogy a helyszíni és nem helyszíni munkákat is a helyi lakosság lehető legkisebb mértékű megzavarásával végzik. A szélenergia projektek nyilvános érdeklődés tárgyát képezik, ezért a kivitelezőnek tartalékot kell képeznie a munka kezdetétől a látogatók és érdeklődők kezelésére.

A konstrukciós munkákkal kapcsolatos bármilyen megjegyzés vagy panasz esetén a beruházónak/kivitelezőnek, vagy a helyszínért felelős személynek elérhetőnek kell lennie a helyi közösségek számára.

9.6.8. Működtetés

A szélenergia projektek fejlesztőinek, tulajdonosainak és működtetőinek el kell fogadniuk, hogy a projekt megfelelő működéséért való felelősségük a teljes élettartam alatt fennáll, egészen a lebontásig, vagy cseréig. A működtető változását nyilvánosságra kell hozni. A szélenergia projekt működésével semmilyen jelentős környezeti probléma nem merülhet fel, ha a fejlesztő jól választott helyet és jól tervezte meg a projektet ezen irányelveket alapul véve. Azonban ahol lehetséges a tulajdonos/működtető felelőssége kellene, hogy legyen a projekt ellenőrzése minden olyan szempontból, amiről a helyi tervező hatósággal megállapodás született, ill. a helyi emberek informálása az ilyen ellenőrzések eredményeiről és a szélenergia projekt általános teljesítményéről.

Környezeti megfontolások

A tulajdonosnak/működtetőnek formális eljárással kell rendelkeznie a nyilvános problémák kezelésére és nyilvántartására. A tulajdonosnak/működtetőnek minden panaszt ki kell vizsgálnia és a megfelelő hatósággal együttműködve megoldania azokat.

Az állatvilág megzavarása a legvalószínűbb, hogy nyilvánvalóvá válik a tulajdonos/működtető által készített tanulmányok eredményeként. Általában ezek a tanulmányok a fejlesztők által a tervezési folyamat alatt tett vállalások eredményei, bár lehetnek példák, ahol a létesítmény felépítése után személyek által felvetett problémák vezetnek tanulmányok készítéséhez. Ha nyilvánvalóvá válik, hogy jelentős ökológiai hatással kell számolni, a tulajdonosnak/működtetőnek együtt kell működnie a problémát felvető emberrel és a megfelelő természetvédelmi szervekkel, hogy meghatározzák a probléma természetét, és lépéseket tegyenek a megoldás felé.

A projekt kezdeti szakaszában, a működése alatt és utána is végezni kell nyilvános véleménykutatást. Felmérések bizonyítják, hogy a legtöbb ellenállás a projekt megkezdése előtt tapasztalható.

9.6.9. A lebontás

Az engedélyhez kapcsolódó tervezési feltételeknek és a tervezési megállapodásnak tartalmaznia kell a lebontást és a tereprendezést. Azonban amikor a szélenergia projekt már nem termel elektromos áramot, a tulajdonosnak/működtetőnek a gépet el kell távolítania, és a helyet amennyire csak lehet visszaállítani az eredeti állapotába.

A legtöbb energiatermelő projektől eltérően a szélturbinákat könnyen és gyorsan le lehet bontani. Ennek ellenére a fejlesztőknek felelősségteljesen kell kezelniük a lebontás folyamatát. A lebontási munka megkezdése előtt erről értesíteni kell a helyi tervező hatóságot.

9.6.10. EU-tagországok tapasztalatai, a társadalmi elfogadottság

Dániában igen széles körű tapasztalat alakult ki az elmúlt évtizedben a társadalmi elfogadottság terén is. Nagyszámú szélturbinával rendelkező dán önkormányzatnál tartott szavazás eredményeként a szavazatok 77%-a még több szélturbina beiktatását támogatta. A szélenergia társadalmi elfogadottsága befolyásolja a tervezési folyamatokat és ezen keresztül gazdasági kihatása is van. Egy-egy helyi közösség hozzáállása teljességgel változó lehet még ebben az országban is. A beruházás könnyen helyi ellenállást válthat ki a szomszédos lakók bizonytalansága és negatív elvárásai miatt elsődlegesen a szélturbinák vizuális hatása és zajkibocsátása miatt. A vizuális hatás körüli vita különösen erős szokott lenni tájvédelmi korlátozások esetében.

Az Európai Bizottság Fehér Könyve nyilvánvalóan motiválta a tagállamok kormányait, hogy készítsék el az annak megfelelő Zöld (Írország) vagy Fehér Könyveiket (Spanyolország, Olaszország).

A megújuló energia technológiák jelentős növekedést értek el az elmúlt években. Új vagy megalapozottabb nemzeti stratégiák elkészítése és elfogadása valószínűleg további lökést ad a piaci fejlődésnek.

1999-ben indult megújuló energiaforrások kiaknázására irányuló programok: „100 000 Napelemes Háztető program” (Németország), a „CO₂ Csökkentési terv” (Hollandia), a „10 000 Napelemes Háztető” és „Napenergia közösségek” programja (Olaszország), az „Új elektromos áramtermelő technológia beszerzési segélye” (Svédország).

Belgium, Franciaország, Görögország, Írország, Olaszország és Portugália jelzik, hogy a Közösség Strukturális Alapját használják a megújuló energiaforrások népszerűsítési tevékenységeikre. Valójában Görögország és Portugália számára ezek az alapok jelentős pénzügyi eszközök a nemzeti megújuló energiaforrás programjaik megvalósítására; Olaszország esetében regionális szinten játszanak jelentős szerepet.

Ausztriában az összes energiafelhasználás 27 százaléka megújuló energiaforrásból előállított energiából származik. Dániában 2030-ra szeretnék elérni, hogy az energia felhasználás 50% megújuló energiaforrásból legyen.

A működtetési és fenntartási költségek tartalmazzák a szervizt, javítást, biztosítást, adminisztrációt, hely tulajdonlási költségeit. Dán és Német vizsgálatok azt mutatják, hogy a modern 450–500 kW-os szélturbinák éves működési és fenntartási költsége körülbelül 1–1,5 cent/kWh, aminek azonban a fele biztosítási költség (ez egyrésztől tükrözi az ügy jelen társadalmi megítélését is). Más szempont szerint az éves működési és fenntartási költséget gyakran a szélturbinák gyártási költségének 2–3%-ára becsülik.

9.7. A szélenergia magyarországi környezetvédelmi szabályozása

Magyarországon a megújuló energiaforrások aránya az összes energiaforráson belül 3–4%-ra tehető. A hagyományos energiahordozók árának az elmúlt években bekövetkezett igen erőteljes emelkedése miatt a megújuló energiaforrások versenyképességének esélyei javulnak.

Az Európai Unió hosszabb távú elvárásai, Magyarország nemzetközi környezetvédelmi kötelezettségvállalásainak teljesítése is szükségessé teszi, hogy az energiaellátásban a megújuló energiahordozók a jelenlegi részarányt jelentősen (legalább 6–7%) meghaladják. Országos program szükséges az energiatakarékosság és a megújuló erőforrások alkalmazása előnyeinek és eszközeinek megismertetése érdekében. Kiemelt feladat az ifjúság oktatásába az energiatakarékosság és a megújuló energiaforrások használata fontosságának beépítése és annak elfogadtatása. Az energiatakarékossági alapképzést a szakmunkásképzés és a mesterképzés keretei közé is integrálni kell.

Az energiahatékonysági célkitűzésekkel párhuzamosan fel kell mérni az ország megújuló erőforrásainak alkalmazási lehetőségeit, és az átfogó energiatakarékossági program részeként kell ezek felhasználásával számolni.

A magyar gazdaság energiahatékonyságának közelítenie kell az Unió tagállamait jellemző színvonalhoz. A felzárkózás elsősorban a gazdasági fellendülésnek, a termékszerkezet átalakulásának és értéknövelő modernizációjának a függvénye, de kiemelt szerepe van e téren az energiatakarékosságnak is.

Az Európai Unió energiapolitikai alapelvei között kiemelt jelentőségű a megújuló energiahordozók felhasználásának a bővítése. A csatlakozás után – alkalmazkodva az uniós követelményekhez – a megújuló energiahordozók teljes energiafelhasználásunkon belüli részarányának lényegesen meg kell haladnia a jelenlegi mértéket.

1993-ban az Országgyűlés által elfogadott magyar energiapolitika célkitűzései a piaci alapokra helyezett energiagazdaság működési feltételeinek kialakítását, az egyoldalú energia importfüggőség mérséklését, és az Európai Unió integráció megalapozását – jöjjön hazánk EU-ba történő belépésének időpontja még nem volt ismeretes – irányozta elő.

A magyar energiapolitika végrehajtásának, eredményeinek megmérettetése a csatlakozási kérelmünk vonatkozásában az Európai Bizottság által 1996-ban készített országvélemény volt. Ez megállapítja, hogy a magyar energiapolitika céljai összhangban vannak az EU alapvető célkitűzéseivel. Magyarország az elkövetkező néhány éven belül képes lesz arra, hogy megfeleljen az EU energetikai követelményeinek

A magyar energiapolitika alapelvei a következők:

- a nemzeti sajátosságokat figyelembe vevő, az egységes európai energiapiac részeként működő hatékony hazai energiapiac létrehozása a gazdaság versenyképessége, az energiafogyasztók érdekében;
- az energiaellátás biztonságának megőrzése és növelése;
- a fenntartható fejlődés biztosítása érdekében kiemelten fontos a környezetvédelmi követelmények érvényesítése mind a jövőbeni fejlesztéseknél, mind pedig a meglévő energiatermelő és fogyasztó berendezéseknél;
- nyilvánosság, közösségi tájékoztatás, demokratikus szabályozás, a megmaradó monopóliumok átlátható árszabályozása.

9.7.1. Érvényes magyar szabványok és jogszabályok

Magyarországon kifejezetten a szélenergiával kapcsolatban semmilyen szabványt nem tart nyilván a Magyar Szabványügyi Testület.

Áttételesen a következő szabványoknak kellene megfelelnie egy magyarországi telepítésbe kezdőnek.

1. Magyarországon a szélmotor felállításával kapcsolatosan a 12/1986 (XII. 30.) és a 2/1986 (II. 27.) ÉVM rendeletek alapján kell eljárni.
2. Méretezésre az MSZ 151 szabvány előírásai a mértékadók.
3. A szélmotorok elhelyezkedésére az OÉSZ 48, 51-64§-ok adnak eligazítást, valamint be kell tartani a 11/1984 (VII. 22.) Ipm rendeletben előírtakat.
4. Üzemeltetésre alapvetően az OÉSZ 87, 92, 93, 95-98 § előírásai vonatkoznak.
5. Munkavédelemmel kapcsolatosan a 47/1979 (XI. 30.) MT rendelet az irányadó.

9.7.2. Szélerőművekkel kapcsolatos szabályozás lehetséges magyar direktívái

Az Európai Közösség által összefoglalt „Legjobb gyakorlat” szerinti eljárás legfontosabb eleme a Környezeti hatástanulmány. A környezeti hatástanulmány három fázisban készül el. A kezdeti fázis a helykiválasztás, második fázis a tervezés folyamata, majd a megszületett eredmények alapján készíthető el a részletes értékelése a leendő beruházás környezetre gyakorolt hatásáról.

9.7.3. Környezeti hatástanulmány

A szélerőművek telepítését megelőzően kötelező elkészíteni a környezeti hatástanulmányt, amely tartalmazza a következő pontok elemzését.

Zaj emisszió mértéke:

Zajhatás térképe. A szélerőmű gyártók megadják a keletkező zaj mértékét ill. a terjedési irányát.

Gáz emisszió mértéke:

Nincs üvegházhatást okozó gázkibocsátás (nincs szén-dioxid, nincs kén-dioxid, nincs por és hamu)

A hidraulikafolyadékok környezetbe jutása kizárt.

Ökológiai értékelés:

A helyszínen élő állat és növényvilág elemzése.

Hidrológiai értékelés:

Vízkészletre gyakorolt hatás.

Biztonsági értékelés:

Védőtávolság a lakóövezettől, kívülállóknak számára való hozzáférhetőség. Télen a lehulló jég okozta balesetek elkerülése.

Elektromos kapcsolatok biztonsága. Villámhárítás. Jegesedés.

Légiforgalmi hatás:

A környező polgári és katonai repterekre gyakorolt hatás.

Előírás szerinti nappali és éjszakai jelölések.

Hírközlési értékelés:

Interferencia okozás a hírközlési rendszerekkel.

Elektromos kapcsolat:

Energiaszállítás, földtulajdoni viszonyok.
Föld, ill. légkábel. Transzformátor és az
Átadó állomás elhelyezése.

Vizuális hatás:

Esetleges fényvisszaverő hatás. A szélerőmű árnyékának hatása.
A környezet védettsége. (történelmi, környezetvédelmi)

Társadalmi hatás:

Környező lakosság hozzájárulása. Oktatási, nevelési célok.

Lebontás hatása:

Hulladék felhasználás, tereprendezés.

9.7.4. Szakhatósági engedélyezési eljárás

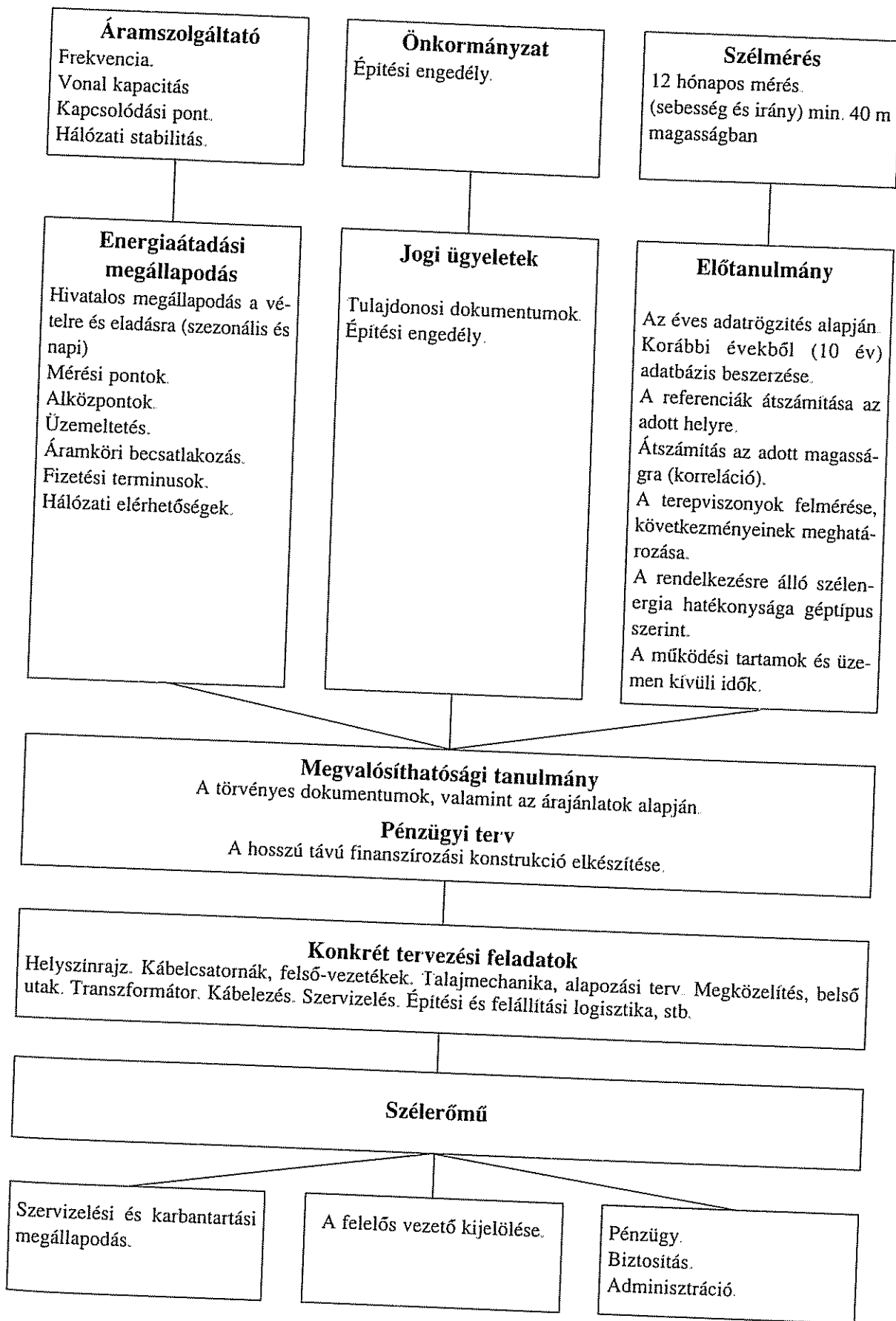
A szélerőmű építésének tervezési szakaszának elején elengedhetetlen a szakhatóságok összehívása egy előzetes egyeztetésre és helyszíni szemlére, ahol a szakhatóságok képviselőivel egyeztetethetők a szükséges előírásoknak megfelelő további tervezési folyamat. (erre kell az előzetes KHV), majd a részletes KHV eredményei alapján lehet az engedélyezési eljárást megkezdeni.

9.7.5. Szakhatóságok

Helyi Önkormányzat,
Területileg illetékes Építésügyi Hatóság,
Légügyi Igazgatóság,
Honvédelmi Minisztérium, Katonai Légügyi Hivatal,
Tűzoltóság,
Regionális Áramszolgáltató Vállalat,
Polgárvédelmi Parancsnokság,
Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat,
Környezetvédelmi Minisztérium,
Regionális Környezetvédelmi Felügyelőség,
Hírközlési Főfelügyelet, Regionális Hírközlési Felügyelet,
Területileg illetékes Távközlési Vállalat,
Országos Műemlékvédelmi Hivatal,
A földterület tulajdonosa,
A szélerőmű gyártó képviselője,
A beruházó képviselője.

9.7.6. Alapvető tennivalók a szélgenerátor-egység tervezéséhez

A beruházóknak fel kell tárnuk a lehetséges állami és EU támogatási lehetőségeket ill. banki forrásokat. A finanszírozási struktúra elkészítése után a tervezési feladat a gyártó által átadott tervrajzok honosításával folytatódik. Az elkészített tervrajzok alapján a szélerőmű építési ügyében szakhatósági állásfoglalást kell beszerezni. A szakhatósági engedélyek beszerzése után kapható meg az építési engedély.



9.7.7. A működés

A szélerőmű működése során jelentős környezeti problémát nem okozhat. A korábbi környezeti hatástanulmány ellenére felmerülő probléma esetén újabb tanulmányt kell készíteni. Ha jelentős ökológiai probléma jelentkezik, akkor a működtetőnek együtt kell működnie a problémát felvetőkkel.

Érdemes a beruházás kezdeti és működési szakaszában is nyilvános véleményfelméréseket végezni. Célszerű az ellenőrzési és termelési adatokat nyilvánosságra hozni.

10. A szélerőmű gyártása

A szélerőművek gyártásánál a lapát igényel speciális gyártástechnológiát. Speciális a cső kivitelű tartóoszlop is, de annál az alkalmazott eljárások közel azonosak a nagy nyomású tartályoknál alkalmazottakkal. A generátorok közül csak a sokpólusú, nagy átmérőjű szinkron generátoré speciális.

10.1. Lapátszerkezetek

A tervezés kiindulópontja minden esetben a lapátkerék anyaga. Ez határozza meg a tervezést és a gyártástechnológiát. A lapát gyártásánál alkalmazott anyagok:

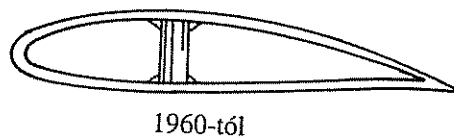
- alumínium,
- acél,
- üveg-, szén- és aramidszál erősítéses műanyagok és
- fa.

A szélkerék lapát gyártástechnológiáját túlnyomórészt a repülőgépiparból vették át. A lapátkialakítások fejlődési sorrendjét a 10.1. ábra szemlélteti.

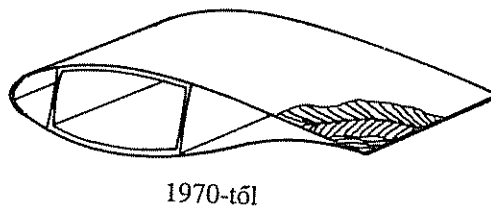
Szegecselt héjalt lapátszerkezet.



Szendvics héjazású lapátszerkezet üveg- és szénzál-erősítéses műanyagból.



Laminált kivitele.



10.1. ábra Az alapvető lapátszerkezetek

A korszerű lapátkerek gyártásánál szóba jöhető szálerősítő anyagok:

- üvegszál,
- szénszál,
- aramidszál (pl. KEVLAR) műanyagok.

Üvegszál-erősítéses műanyag

A legtöbbször alkalmazott szálerősítéses kompozitanyag az üvegszál-erősítéses műanyag. Az üvegszál-erősítéses kompozitanyagok szilárdsága nagy, viszont a rugalmassági modulusuk kevésbé jó. Ez azt jelenti, hogy a szerkezet merevsége nem problémamentes. Ez az egyik oka annak, hogy üvegszál-erősítéses struktúrák csak a kis- és közepes méretű lapátkereknél használatosak.

Szénszál-erősítéses műanyag

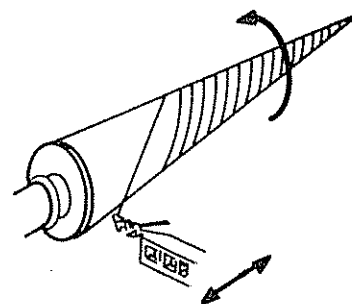
A szénszál rugalmassági modulusa, valamint a szakadási hossza jóval nagyobb az üvegszálénál. A merevsége összehasonlítható az acéllal és a tartós szilárdsága is jó. Az egyetlen hátránya magas előállítási költsége. Ezért ma a szénszálakat üvegszálakkal kombinálva alkalmazzák az erősen igénybevett, nagyméretű szélerőművek lapátszerkezeténél. A szénszál teljesen korrózióálló tulajdonságú. A szénszálerősítéses műanyagból készített lapátszerkezetet különleges óvintézkedésekkel kell ellátni a villámhárítás céljából, mivel a szénszál elektromos vezetőképessége jó.

Aramidszál-erősítéses műanyag

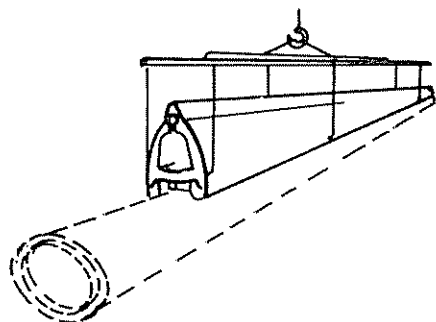
Az aramid tartós-szilárdságára vonatkozó tapasztalatok ma még hiányosak. Napjainkban csak kísérletek folynak felhasználása irányába.

Burkoló technológiával készített lapátszerkezet

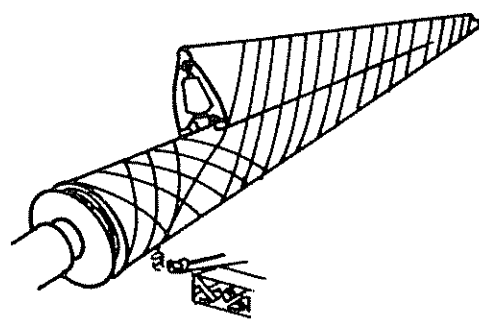
Ezt a technológiai eljárást egy ún. burkológéppel végzik, amely egy esztergagéphez hasonlóan a lapát alapszerkezetét egy tengely körül forgatja, miközben a főgerincet a szállal burkolja. A szálat burkolás előtt egy gyantafürdőben átítatják. Ennek a technológiai eljárásnak a nagy előnye, hogy majdnem teljesen automatizálható. Az eljárás hátránya viszont, hogy a lapát felülete durva minőségű, valamint az ilyen eljárással készült lapátszerkezet nehezebb mint a laminál technológiával készített lapátszerkezet.



10.2. ábra. Főgerinc burkolása



10.3. ábra. Hátsó lapátrész felhelyezése

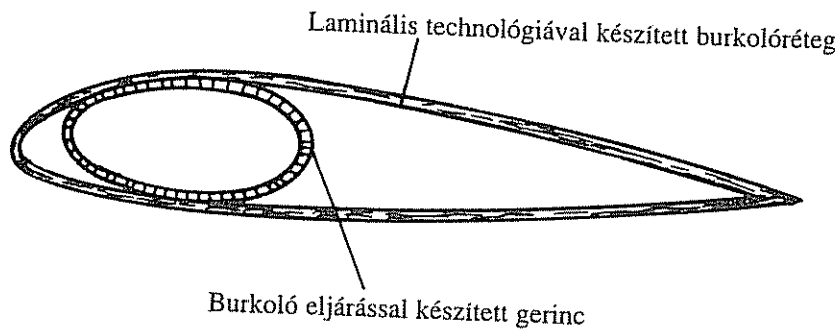


10.4. ábra. Teljes lapát burkolása

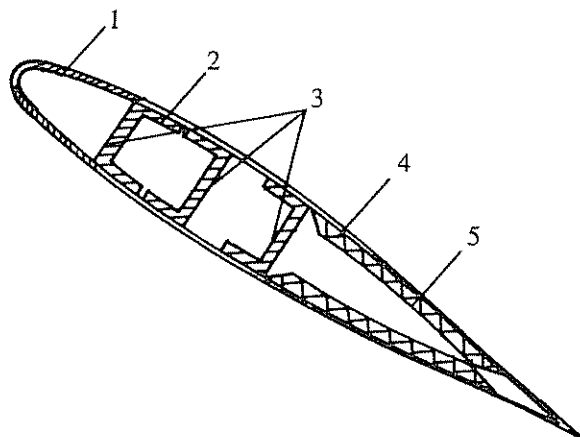
A burkoló technológiával készített lapát gyártása teljesen automatizált (10.2., 10.3. és 10.4. ábrák).

A gyakorlatban a laminált technológiai eljárás és a burkoló eljárás előnyeit egyesítik, vagyis a lapát gerincét burkoló eljárással készítik, a lapát külső burokrétegét viszont laminált technológiával gyártják (10.5.–10.7. ábrák).

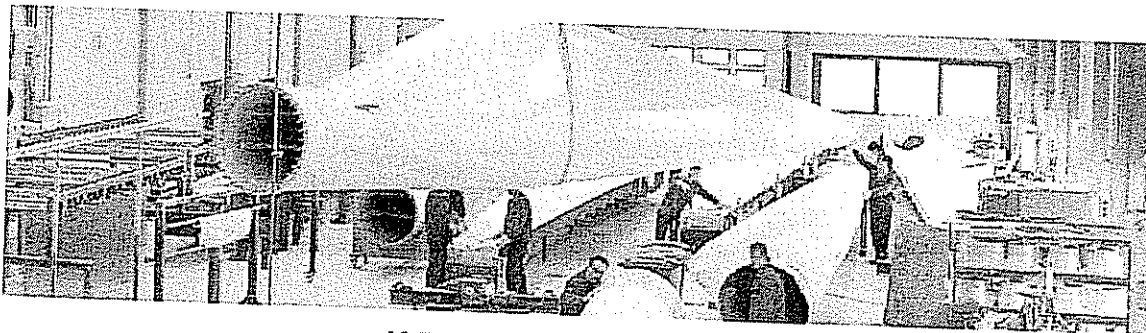
Szükség van olyan összehasonlítási kritérium felállítására a különféle lapát-szerkezetek gyártástechnológiái között, amelynek alapján kiválasztható az adott körülményeknek megfelelő előnyös eljárás. Ilyen összehasonlítási kritérium lehet, amikor a különböző lapátszerkezetek specifikus lapáttömegét (kg/m^2) hasonlítjuk össze a szélkerék átmérő függvényében (10.8. ábra). A lapátszerkezet tömege



10.5. ábra. Laminálás és burkoló eljárás



10.6. ábra. Lapátkeresztmetszet. 1 laminált burkolat (aluminiumbetéttel a homlokrészen; 2 üveg, vagy szénszál-erősítésű műgyanta erősítő burkolat; 3 üvegszál-erősítésű műgyanta váz; 4 merevítéshez kemény PU hab; 5 üvegszál-erősítésű burkolat

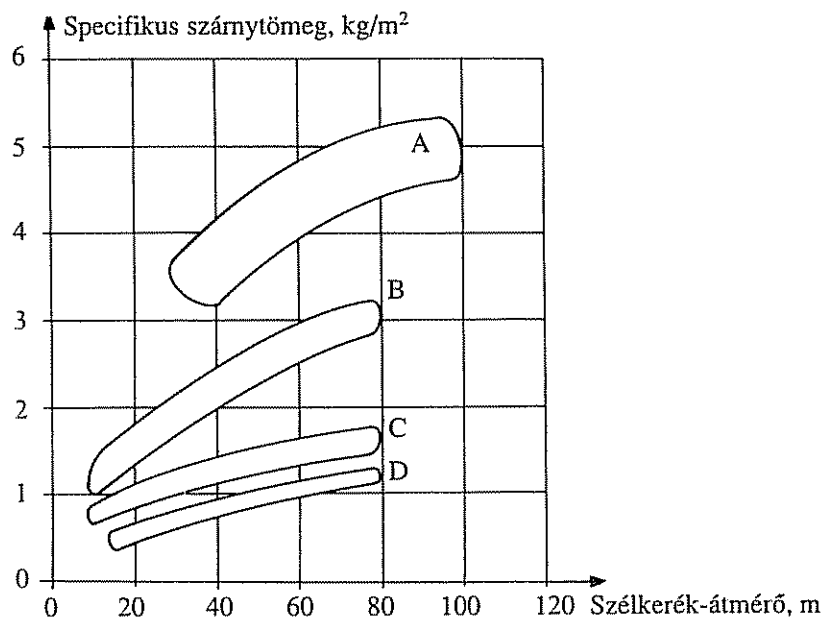


10.7. ábra. A szárnylapát gyártása

egyértelműen meghatározza a szélerőmű más egységeinek (alapozásának, torony típusának) méretezését, ezen felül még a gyártási költséget is nagymértékben befolyásolja (főleg sorozatgyártásnál).

Gyártástechnológiailag összehasonlítva a lapátszerkezeteket négy súlykategóriába csoportosíthatjuk (10.8. ábra):

- A. acéllapát,
- B. üvegszál-erősítéses műanyag lapát,
- C. fa/epoxi lapát,
- D. szénszál-erősítéses műanyag lapát.



10.8. ábra. Lapáttömeg a szélkerékátmérő függvényében

Acéllapát

Az acél lapát tömeg szempontjából a leghátrányosabb. A hegesztett szerkezet tartósszilárdsága éppen ezért nehezen szavatolható. Az extrém nagy tömege és az egyáltalán nem egyszerű gyártástechnológiája miatt a jövőben egyre kevésbé lesz versenyképes a többi technológiával szemben.

Üvegszál-erősítéses műanyag lapát

Az üvegszál-erősítéses műanyag lapát egy burkolt gerincből és a ráragasztott laminált héjszerkezetből áll. Mátrixanyagnak az olcsó poliészter gyantát használják. Ezzel az eljárással kis és nagyméretű szélkerekek jó minőségben gyárthatók.

Fa/epoxi lapát

A fa/epoxi lapát tömeg szempontjából nagyon előnyös tulajdonságú. A modern faszerkezetű lapát konkurenciát jelent az üvegszál-erősítéses műanyag lapáttal szemben, mivel alacsony a specifikus súlya, a kifáradási határ feszültsége nagy, valamint nagy merevséggel rendelkezik.

Szénszál-erősítéses műanyag lapát

Szénszál-erősítéses műanyagból extrém kis tömegű lapátszerkezetet lehet előállítani. A szénszál magas költsége miatt azonban csak különleges esetekben alkalmazzák lapátszerkezet gyártására. A gyakorlatban túlnyomórészt csak a lapát tengelyhez csatlakozó részét készítik szénszál-erősítéses műanyagból, ahol a maximális terhelés lép fel.

Becslések a lapát tömegére

Különböző anyagokból készített lapátszerkezetek specifikus tömegének összehasonlítására egy közelítő (empirikus) becslés áll rendelkezésre, amellyel gyors becslést lehet adni a lapát tömegére [3]. Az egyenletek a háromlapátú szélkerekekre értendők.

$$\text{Acél lapát: } m_{spec} = 2,50 \cdot \left(\frac{D}{25}\right)^{0,6}, \text{ kg/m}^2, \quad (10.1.)$$

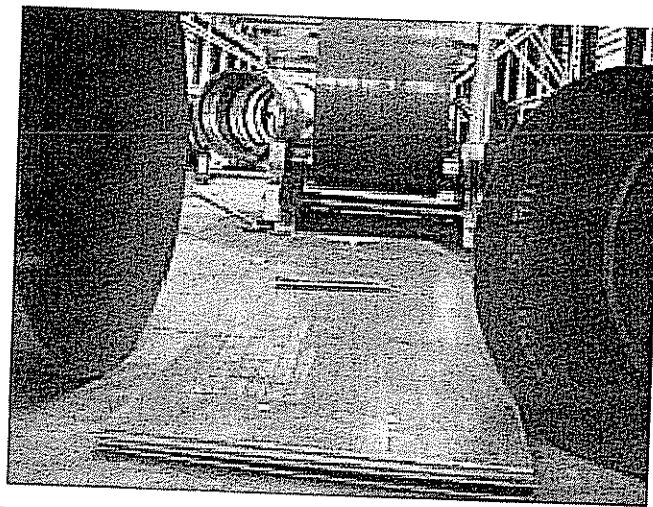
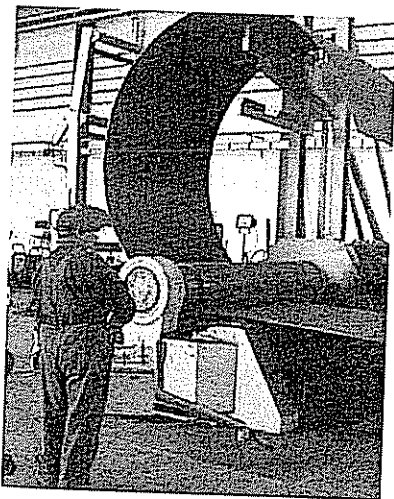
$$\text{Üvegszál erősítéses lapát: } m_{spec} = 0,92 \cdot \left(\frac{D}{25}\right)^{0,6}, \text{ kg/m}^2, \quad (10.2.)$$

$$\text{Fs /epoxi lapát: } m_{spec} = 0,92 \cdot \left(\frac{D}{25}\right)^{0,6}, \text{ kg/m}^2, \quad (10.3.)$$

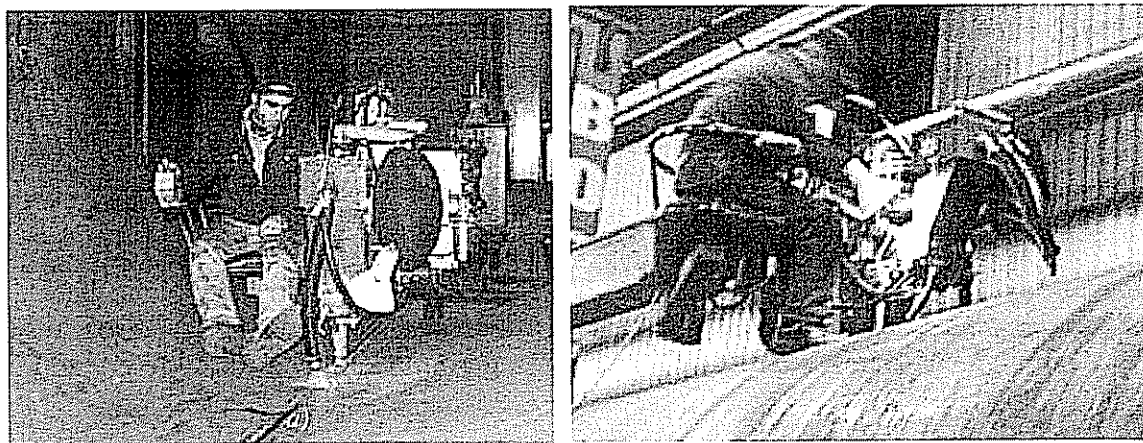
$$\text{Szénszál erősítéses lapát: } m_{spec} = 0,60 \cdot \left(\frac{D}{25}\right)^{0,6}, \text{ kg/m}^2. \quad (10.4.)$$

10.2. Tartóoszlopok

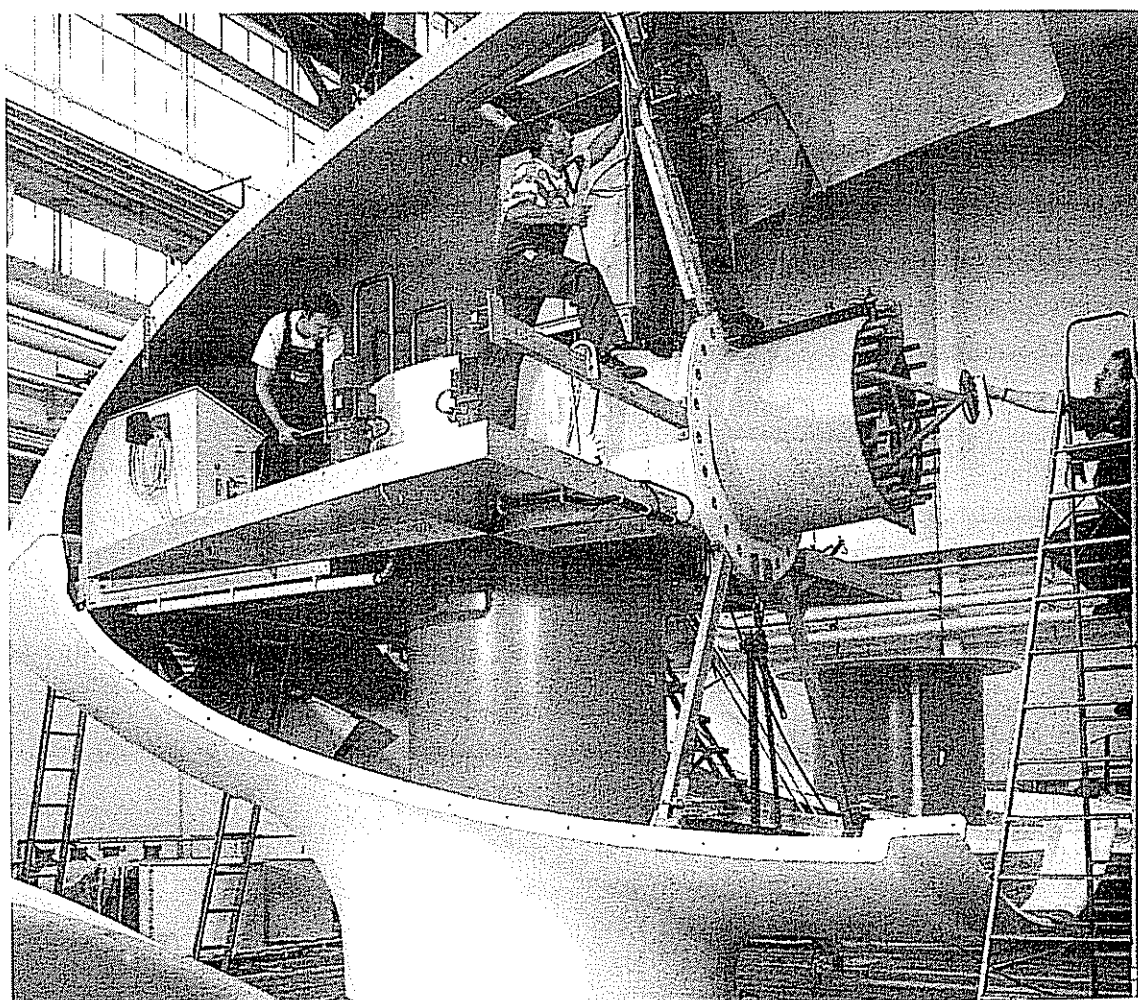
A szélgenerátor tartóoszlopok általában kúpos acéltornyok. A 10.9. ábra az acéllemez hengerlésekor készült. A hengerlés közben hosszirányban hajlítják is az anyagot a kúposág elérése végett. Az oszlopokat végül is a kúpos részekből hegesztik össze (10.10. ábra). A kúpos alak miatt az acéllapok rövid oldalai nem párhuzamosak, a precíz hegesztés miatt a lemezek szabásához lézeres vágó-gépet alkalmaznak.



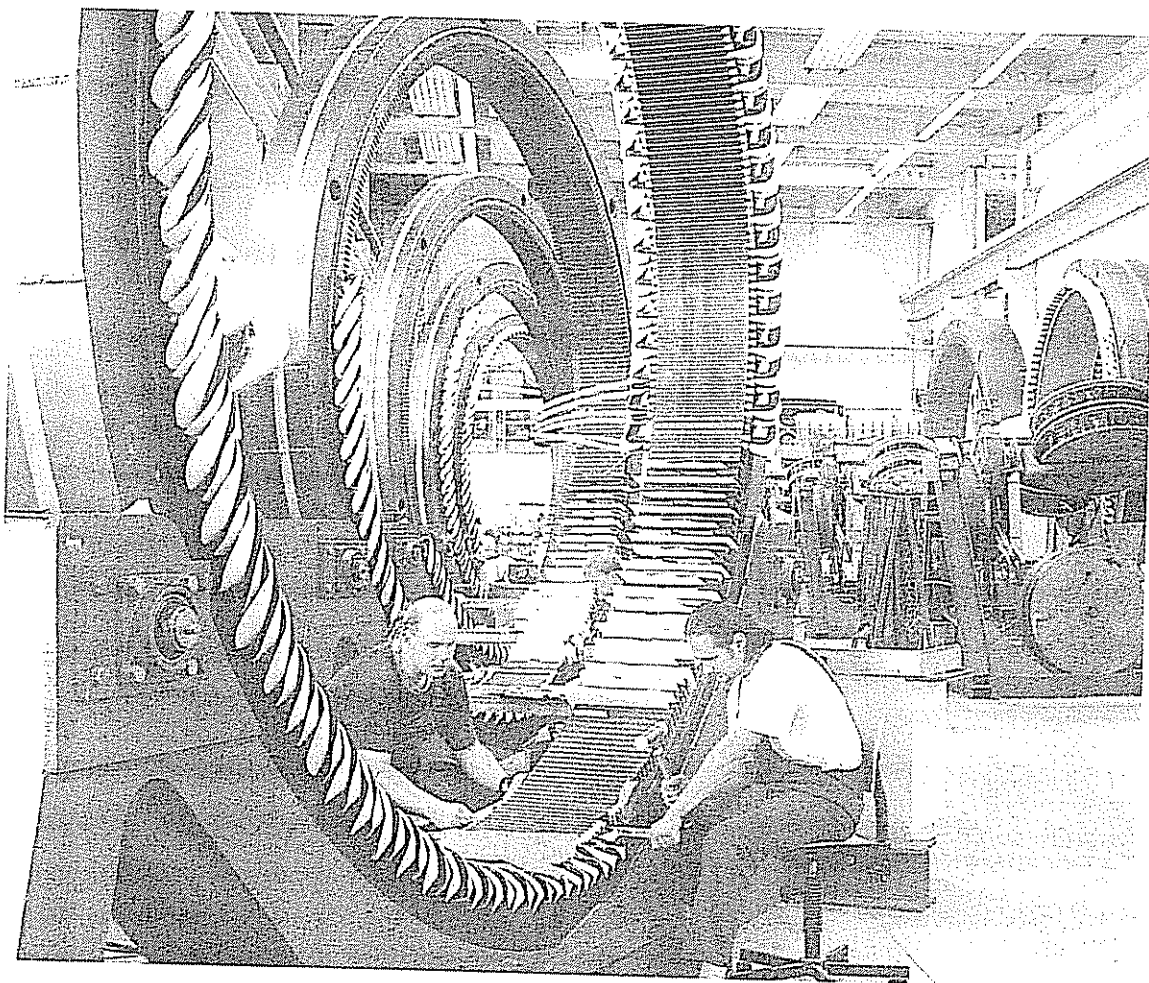
10.9. ábra. A csőoszlop lemezanyagának hajlítása, ill. szabása



10.10. ábra Az oszlopot alkotó hengerelt acéllapok hossz (a) és keresztirányú (b) hegesztése



10.11. ábra. A gépház egyéb szerkezeti elemeinek beszerelése (Enercon)



10.12 ábra A sokpólusú generátor állórészének tekercselése, a tekercsek rögzítése (Enercon)

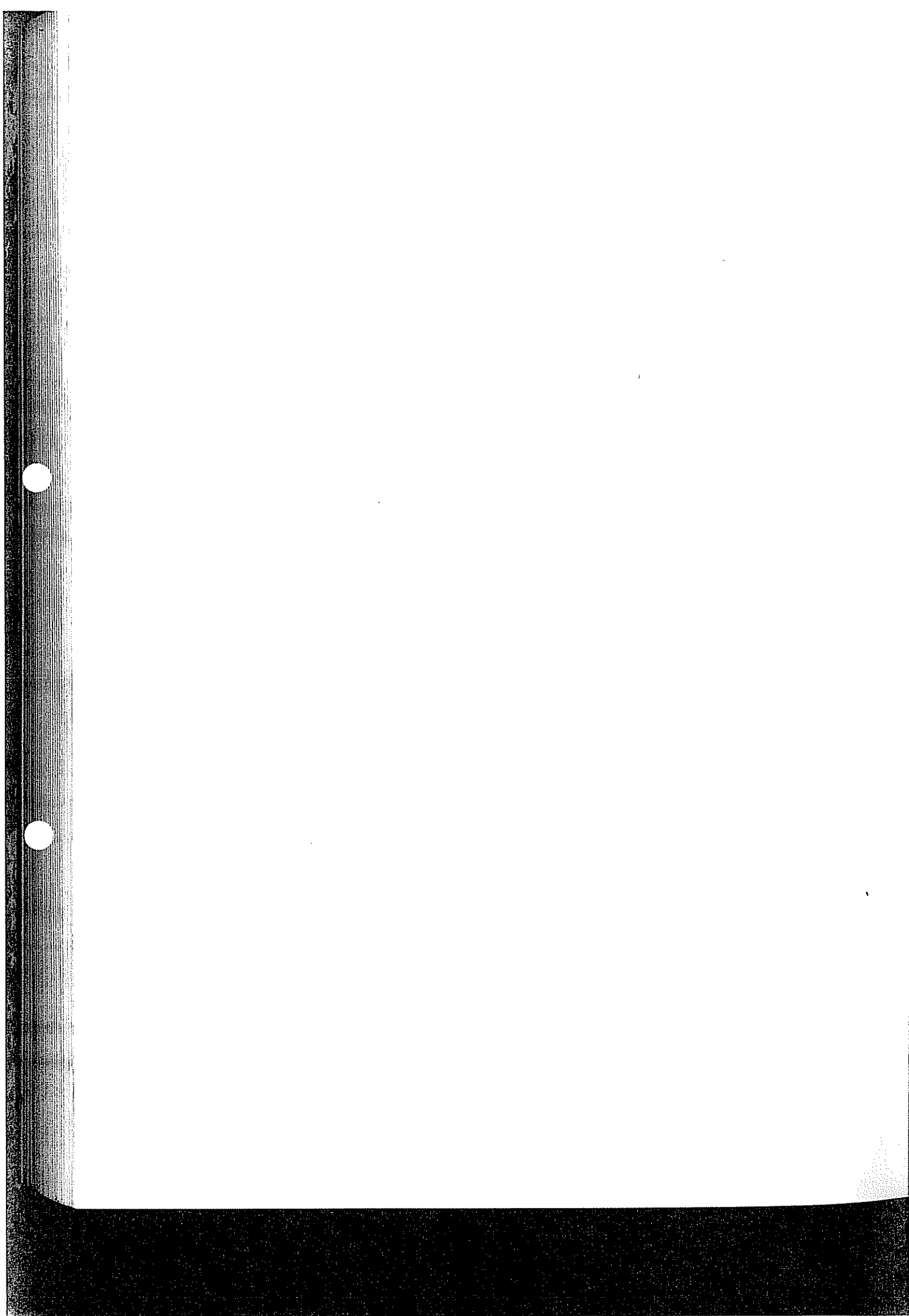
A hosszirányú varratot belülről hegesztik, míg a keresztirányú varrás a kúpos részegységek forgatása közben külsőleg történik. A varratokat ultrahanggal vagy infravörös sugárral ellenőrzik.

A közép- és nagyméretű szélturbinák gyártói 90%-ban európai cégek. Jelenleg mintegy 25 gyártó szolgálja ki az európai piacot. A kis gépek a nagy számukhoz képest viszonylag kicsi gazdasági piacot jelentenek.

Az oszloprészek hossza 20–30 m között változik. A hosszukat a szállítás körülményei szabják meg, attól függően, hogy vonattal vagy közúton szállítják.

Az oszlopokat általában a szélgenerátorokat gyártó cégek tervezik, és komplett gépegységet kell műszakilag bevizsgálni.

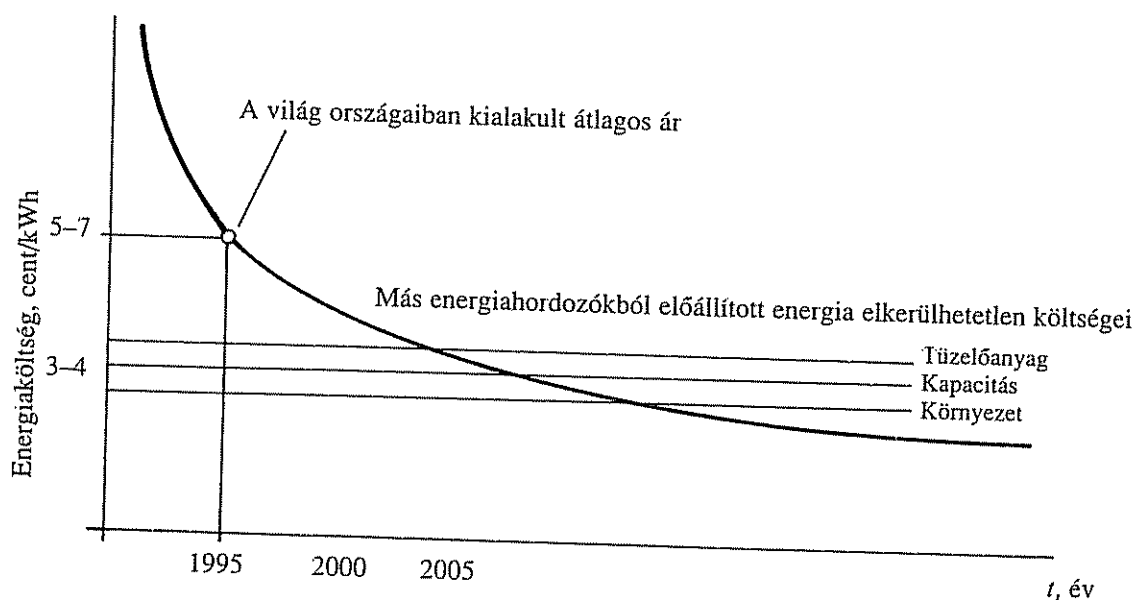
A torony tömege a telepített generátor teljesítmény függvényében az utóbbi öt évben 50%-kal csökkent, de még mindig a legnehezebb része a gépnek, s ezért a szállítási költsége a beruházás jelentős tétele. Nagyobb piacok (parkok építése) esetén, és 1000 km-nél hosszabb távra történő szállításkor már nem kifizetődő a cégek helyi gyártása, a helyi gyártás előnyösebb.



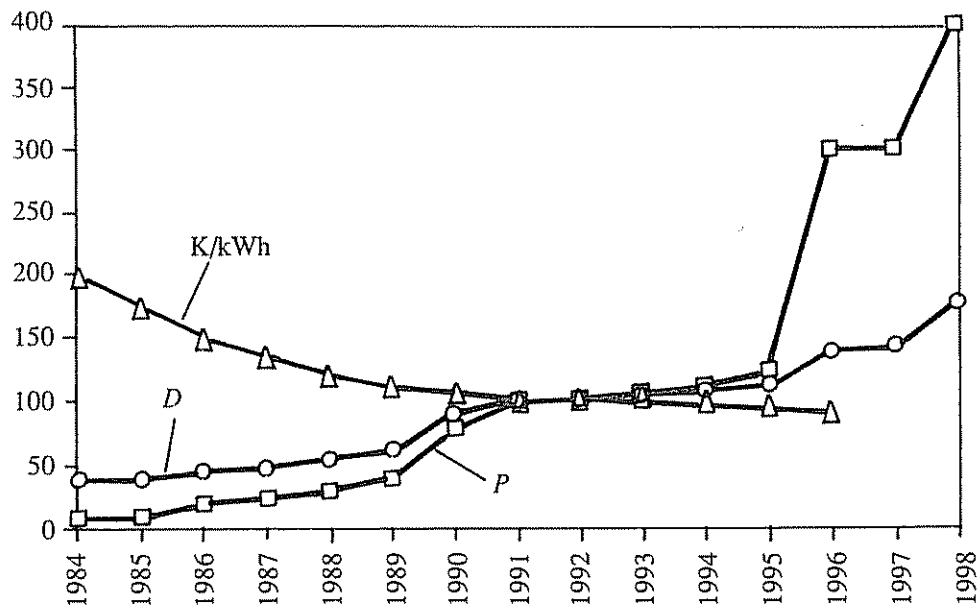
11. A szélenergia gazdaságossága

A szélenergia gazdaságossága alapvetően meghatározza a telepítési volument. Hosszú távon azonban számolni kell azzal, hogy az összes energiaforrás közül a legkisebbnek tekinthető, semmiféle hulladékot nem bocsát ki. Európai országokban a szén-dioxid kibocsátás országonként limitált, e szempontból jelentősen megnő a felhasználhatósága, hiszen a nemzetközi egyezmények alapján telepítése semmiféle korlátok alá sem esik. A nemzetközi szélenergia bizottság által meghatározott trendet a 11.1. ábra szemlélteti (forrás 1997). Az ábrából jól látható, hogy az árak igen jelentős csökkenő trendje van, és 2005 környékén már versenyképes lehet az egyéb energiaforrásokkal is.

A jelenlegi árviszonyok okozta esetleges veszteségek enyhítése miatt a szélenergia szinte a világ minden országában államilag támogatott: vagy a termelt energiát támogatják, vagy a beruházást, azaz a berendezés létesítését. Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy sok országban a szélenergia felvásárlási tarifája megközelíti az egyéb erőművek által előállított energia tarifa értékeit. De általában 20–40%-kal magasabb az energia szolgáltatók által a lakosság irányába eladott energia egységára, mint a szélenergiából nyerhető energia. Ez egyben jelzi, hogy saját célra a szélből energia előállítása ma már szinte minden országban gazdaságos.



11.1. ábra. A szélenergiából nyert villamos energia változási trendje



11.2. ábra. A költségek, az átmérő és teljesítmény alakulása százalékosan (1992 = 100%):
 (P szél erőművek egyenkénti átlagos névleges teljesítménye; D az átlagos lapátkerék-átmérő;
 K/kWh az energia ára az aktuális fizetőeszközben)

Becslések szerint a szélenergia sok országban már versenyképes a fosszilis és az atomenergiával és ez különösen igaz akkor, ha az externális költségeket is figyelembe vesszük. A hálózatba kapcsolt szélenergia gazdaságossága nagyban függ attól, milyen nézőpontból értékeljük. Az első az állami energetikai ellátás szempontja. A gazdaságossági és biztonságos energiaellátási szempontok alapján a szél erőműben megtermelt energia értéke a szélenergia időbeni véletlenszerűségéből kiindulva rendkívül alacsony is lehetne. Az energiatermelés költsége szempontjából rendkívül nagy különbségek is lehetnek, annak megfelelően, hogy a megtermelt energiának mi a szerepe a teljes rendszerben: alapenergia-forrás, vagy időleges terhelési igények kielégítését szolgálja. Azt se feledjük el, hogy az energetikai beruházások megtérülési idejének számításakor eleve 10 évet meghaladó értékkel számolnak (11.2. ábra).

Technikai oldalról a szélenergiával történő áramfejlesztés költségét alapvetően az alábbi tényezők határozzák meg:

Teljes befektetési költség, ami tartalmazza:

- a szél turbinák, az állványzat gyártási költségét, a kapcsolódás költségeit, és egyéb járulékos költségeket;
- a projekt/beruházás előkészítés költségét, infrastruktúra stb.

11.1. Működtetési és fenntartási költség

1. A föld állapota, azaz a szél turbinák alapjai és a bekötő utak felépíthetők-e gazdaságosan.
2. Adott helyen uralkodó átlagos szélesség.
3. Megközelíthetőség.
4. Műszaki élettartam.

5. Amortizációs periódus.

6. Reál kamatláb.

A projekt előkészítés költsége nagymértékben függ a helyi körülményektől, szociális megközelítésektől, a helyiek hozzáállásától és egyéb olyan peremfeltételektől, mint a talaj és az utak állapota, elektromos hálózathoz való közelsége.

A működtetési és fenntartási költségek tartalmazzák a szervizt, javítást, biztosítást, adminisztrációt, helytulajdonlás költségeit stb. Egy megközelítés szerint az éves működési és fenntartási költség, a gyártási költség 2–3%-a. A műszaki élettartam átlagosan 20 év. A nagy terhelésnek kitett létfontosságú részeket, mint a főbb csapágyak, fogaskerekek és a generátor a gyakorlati tapasztalatok alapján a tervezett élettartam felénél ajánlatos kicserélni.

A helyszínen uralkodó éves átlagos szélesség döntő fontosságú az energiaköltség szempontjából.

Magyarországon az Ipari Minisztérium (Magyar Közlöny 2002. decemberi száma) rendelete foglalkozik a közcélú villamos művek villamos energia vásárlási árainak megállapításával. E rendelet hatálya kiterjed az átvételi kötelezettség alá eső villamos energiára, annak felvásárlási árának meghatározására. 2003. január 1-jétől a termelt energia átvételi ára csúcs időszakban 24, völgy időszakban 15 Ft/kWh. A területtől függően a csúcs és a völgy aránya 25/75 (jó esetben 35/65).

Az energia eladás feltételeit (a részleteket) mindig külön szerződésben rögzíteni kell.

A rendelet kiegészítése megfogalmazza, hogy az ár kiszámításánál a mindenkori inflációs hatások által befolyásolt árakat kell figyelembe venni.

11.2. Egy szélenergia-befektetés gazdaságossági paraméterei

A beruházás költségeinek megoszlása %-ban:

Szélgenerátor (generátor, szárnylapátok stb.):	70%,
Megvalósíthatósági tanulmányok, tervezés, engedélyezés:	3%,
Szállítás, alapozás, acéltorony, transzformátor stb.:	20%,
Megvalósítás, földterület, közmű, biztosítás:	7%.

Az elméletben elvégzett kalkulációk után levonhatjuk a végső megállapítást a szélenergia hasznosításának gazdaságosságára vonatkozóan. Ez a beruházás nem ítéhető meg kizárólag gazdasági alapon, szem előtt kell tartani, hogy a szél segítségével nyert villamos energia előállítása környezetkímélő módon történik.

A konkrét számításokat egy nemzetközileg is használatos algoritmus bemutatásával szemléltetjük. (Természetesen ez csak egy iránymutatás.)

11.3. Az LPC költségmodell

A kiegyenlített termelési költség (a továbbiakban **LPC**, *Levelised Production Cost*) azaz az egységnyi energia előállításához szükséges ráfordítás, a helyszínrre aktualizált pénzben kifejezve [100.]. A kiegyenlített termelési költség az energia-előállítás költségét fejezi ki a mindenkori kereskedelmi energiatarifa mértékegységében,

amely lehetővé teszi az összehasonlítást a többi energiaköltséggel (árakkal). Az LPC a szélenergia-park egyik fő becslési kritériuma, a meghatározására szolgáló gyakorlati eljárás az IEA (Nemzetközi Energiaügynökség) ajánlásában szerepel.

Az LPC értékének kiszámítására használatos kifejezés:

$$LPC = \frac{\sum_{t=0}^T (C_t \pm R_t)(1+r)^{\pm t}}{\sum_{t=0}^T E_t(1+r)^{\pm t}}, \text{ pl. Ft / kWh,}$$

ahol C_t az összes halmozódó költség t év alatt; R_t az összes halmozódó árbevétel t év alatt; E_t az összes energiatermelés t év alatt kWh; T gazdaságos élettartam, év; r reálkamat-ráta, amelyet a következő módon definiálunk:

$$1+r = \frac{1+i}{1+v},$$

ahol i éves hitelkamatláb; v az éves inflációráta (árindex).

Az LPC értékének számításában a költségek és az energiatermelés hatásai a költséggazdálkodásra, a kamatok és az infláció hatása szerint súlyozottak, a szélenergia park élettartama alatt értelmezve. A szokványos alkalmazandó értékek: 20 év gazdaságos élettartam és 5% reálkamat-ráta.

Az LPC (mint becslési kritérium) erőssége az ökonómiai hatások modellezésének egyszerűségében van. Az egyszerűsítés a bonyolultabb gazdasági és piaci hatásokat is magába foglalja, de nincsenek megjelenítve. Egy adott szélpark tervezése a legkisebb LPC értékre nem szükségszerűen a meghatározó. Az LPC értékét más célokra ill. szűk keresztmetszetekre is súlyozni kell: pl. négyzetkilométerenkénti energiahozam, előre jelezhető energiatermelés és annak kiegyenlítetttsége, valamint a likviditás.

11.4. A jövőbeni pénzügyi helyzet (cash flow) tervezése, becslése

A szélpark energiatermelésének költsége három fő költségcsoportra bontható, tipikus idő szerinti felosztásban. A legnagyobb költséghányad a létesítési (beruházási) ráfordítás a szélpark élettartama kezdetén. A második legnagyobb költséghányad az üzemeltetési és karbantartási (fenntartási) ráfordításokból adódik, amely eloszlik a teljes élettartam idejére. Végül a lebontási (felszámolási) költségek jelentkezők a szélpark leállításakor.

Az ilyen költségfelosztás röviden összefoglalva a következő megfontolásokkal érhető el:

- Az energiatermelés az építési időszak után kezdődik.
- Az éves üzemeltetési és karbantartási (Ü+K azaz O&M) költség állandó (a kereskedelmi energiatarifa mértékegységét használva).
- Az éves energiatermelés állandó.
- Az elbontás (felszámolás) rögtön, az utolsó termelő évet követően megtörténik.

Így az LPC egyenlet:

$$LPC = \frac{C_{ber} + \sum_{i=1}^T C_{\dot{U}+K} (1+r)^{\pm i} + C_L (1+r)^{\pm T}}{\sum_{i=1}^T E_{\dot{e}v} (1+r)^{\pm i}} = \frac{C_{ber}}{aE_{\dot{e}v}} + \frac{C_{\dot{U}+K}}{E_{\dot{e}v}} + \frac{C_L (1+r)^{\pm T}}{aE_{\dot{e}v}},$$

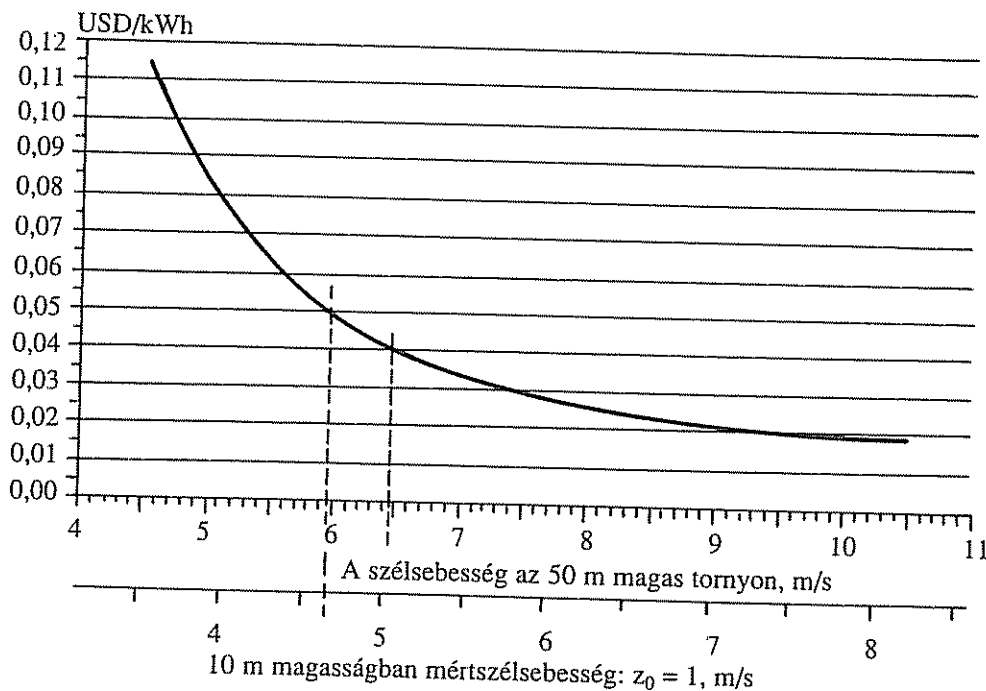
ahol C_{ber} beruházási költség, Ft; C'_{ber} beruházási költség a létesítési időre számított kamattal együtt, Ft; $C_{\dot{U}+K}$ éves üzemeltetési és karbantartási költség, Ft; C_L elbontási (felszámolási) költség Ft; a annuitás-tényező, évi részlet, Ft.

Az utóbbit a következő módon definiálhatjuk:

$$a = \sum_{i=1}^T (1+r)^{\pm i} = \frac{1 \pm \left(\frac{1}{1+r}\right)^T}{r}.$$

Az annuitás-tényező, mint a beruházási költség (befektetés) részköltség-aránya, konstans éves amortizációjú, a kereskedelmi energiaár-tarifák mértékegysége szerint. A beruházási költség (befektetés) nagysága a kamatnak megfelelően emelkedik. A kamat kihatással van az elbontási költségekre. Az üzemeltetési és a karbantartási költségeket a kamat nagysága nem érinti, mert azokat mindig a folyó évi bevételekből kell fizetni.

Szélenergiában kevésbé gazdag területeken igen lényeges helyszín és a tartóoszlop magasságának megállapítása, mivel ezáltal a nyerhető energia mennyisége növelhető. Hatását egy diagrammal szemléltetjük (11.3. ábra).



11.3. ábra. A termelt energia költsége a széleseesség függvényében

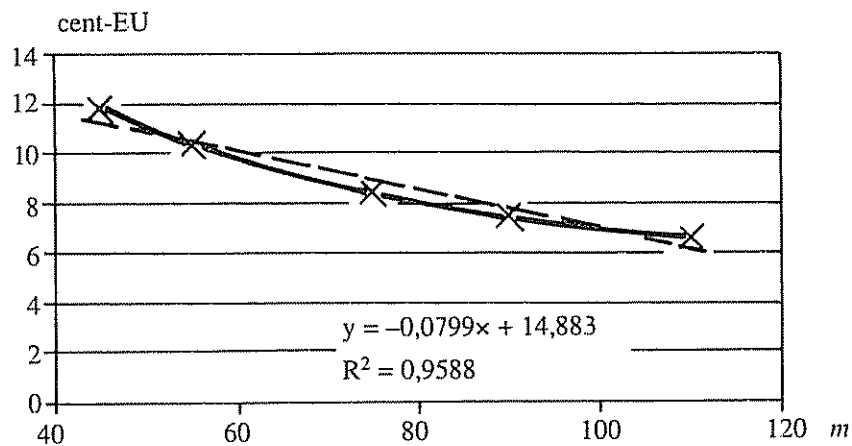
Az ábráról leolvasható, hogy 0,5 m/s-os szélesség növekedés 0,01 USD/kWh (~ 2,5 Ft/kWh) költség csökkenést eredményez, ami 18–20 m-es oszlopmagasság növekedésnek felel meg. Arra is felhívja a figyelmet, hogy a kb. 10 m magasan végzett meteorológiai mérések igen nagy hibát eredményezhetnek.

Ugyanazon a területen kontinentális viszonyok között a toronymagasság növelésével csökken a fajlagos energia (kWh/€ cent) előállítási költsége (11.4. ábra).

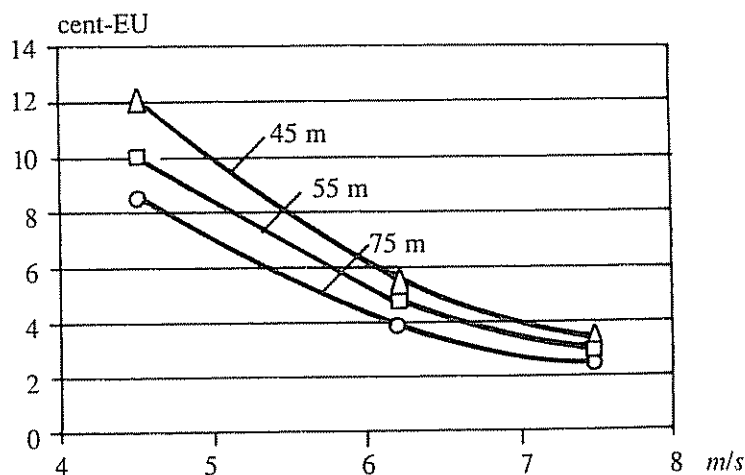
A 11.5 ábra is arra hívja fel a figyelmet, hogy a szárazföldi körülmények között a nagyobb sűrűdások miatti alacsonyabb szélesség a torony magasságának növelésével kompenzálható. A magasabb torony beruházása a kisebb szállítási költségekkel térül meg.

A fajlagos beruházást (kW/Ft) mérséklő legfontosabb tényezők:

- Szélben gazdag terület kiválasztása, magas tartóoszlopok használata.
- Út és villamos elosztóhálózat közelsége.
- Nagyobb egységek létesítése – nagy lapátkerék átmérő, magas oszlop (1,5–2,0 MW/generátor).
- Nagy szélparkok építése (15–30 egység, 20–40 MW).



11.4. ábra. A toronymagasság növelésével csökken a fajlagos energia (kWh/€ cent) előállítási költsége



11.5. ábra. Kisebbszélességeknél a fajlagos energiatermelési költség a torony magasságának növelésével mérsékelhető

12. Kifejezések

Az angol nyelvű könyvekben és cikkekben gyakrabban előforduló szavak és kifejezések magyar jelentése.

ANGOL

MAGYAR

GÉPÉSZET

air brake, braking vane	fékező szárny
air stream, air flow	légáram
air turbine	szélturbina
airscrew	légcsavar
angle of twist	elfordítás szöge
annual output per unit swept area	éves hozam egységnyi súrolt felületre vonatkoztatva
bending stress	hajlító feszültség
bevel wheel	kúpkerék
blade	szárnylapát
buoyancy force	felhajtóerő
cloth sail	szövet vitorla
Coriolis force	Coriolis-erő
cup anemometer	kanalas anemométer
cut-in velocity	bekapcsolási sebesség
cut-off velocity	lekapcsolási sebesség
data logger	adatgyűjtő
downtime	állásidő
drag	ellenállás
driving force	hajtóerő
edgewise	élirány, élével
facing the wind	szél ellen
fantail	szárny, vitorla (szélmalomé)
fatigue	kifáradás
feathering	légcsavar vitorlázó állásba állítása
firmness	tartósság
foot-step bearing	talpcsapágy
Froude number	Froude-szám

furling device	leállási mód (veszélyesen nagy szélesség esetén)
furling velocity	leállási sebesség
installed capacity	beépített teljesítmény
lattice tower	rácsszerkezetű torony
leading edge	vezető/belépő él
maintenance costs	fenntartási költségek
mast	torony
momentum	impulzus
neutral stability	semleges stabilitás
overall efficiency	összes hatásfok
power factor	hatásfok
power spectrum	energia spektrum
rated power	névleges teljesítmény
rated wind speed	névleges szélesség
recorder chart or recorder tape	regisztráló lap vagy szalag
Reynolds number	Reynolds-szám
Rossby number	Rossby-szám
shaft	tengely
shearing force	nyíróerő
specific output (kWh/year/kW)	fajlagos hozam
starting torque	indítási nyomaték
stay wire; guy wire	feszítő huzal
step-up gear	gyorsító meghajtószerkezet
swept area	a rotor által súrolt felület
tailvane	farzászló
tie-rod	húzott rúd
tip-speed ratio, (blade tip speed/free air wind speed)	gyorsjárési tényező (v_k lapát/ $v_{szél}$)
to turn the wheel out of the wind	szélkerék elfordítása a szélirányból
torque or turning moment	forgató nyomaték
trailing edge	hátsó/kilépő él
variable pitch blade	változtatható szögállású lapát
wake	a rotor után kialakuló örvény
water pumping windmill	vízemelő szélmotor
wind -driven machine with with a vertical axis	függőleges tengelyű szélmotor
wind power or wind energy	szélenergia
wind tunnel	szélcsatorna
wind wheel	szélkerék
wind-driven generator	szélgenerátor
windmill	szélmalom
wind-vane, weathercock	szélzászló
wing or sail	szárny, vitorla

METEOROLÓGIA

anabatic

felszálló

average wind speed $v_m = \frac{\int_0^T v dt}{T}$

átlagos szélesség

boundary layer

határréteg

cubic root mean wind speed

$$v_m = \sqrt[3]{\frac{\int_0^T v^3 dt}{T}}$$

átlagos köbös szélesség

depression

légnomás csökkenés

down wind or leeward

szél alatti oldal, az előző ellentéte

eddy

örvény

Ekman layer

Ekman-réteg

geostrophic wind

geosztrofikus szél

gust

széllökés

internal boundary layer

közbenső határréteg

log law

logaritmus-szabály

measuring station

mérőállomás

power law

hatvány-szabály

pressure drop

nyomáscsökkenés, nyomás veszteség

prevailing wind

uralkodó szélirány

root mean square wind speed,

$$v_m = \sqrt{\frac{\int_0^T v^2 dt}{T}}$$

átlagos négyzetes szélesség

roughness length

felszíni egyenetlenség mértéke

temperate latitudes

mérsékelt égöv

to stream - line

folyásirányba, áramvonal mentén

trade winds

passzát-szél

up wind or windward

szélnek kitett, szél feletti oldal

velocity frequency curve

sebesség gyakorisági görbe

wind behaviour

széljárás

wind rose

szélrózsa

A szélenergiával kapcsolatos fontosabb kifejezések leírása

<i>Kifejezés</i>	<i>Leírása</i>
Anemométer	Mérőműszer a szélesebbség mérésére.
Anticiklon	Magasnyomású légköri képződmény, szinoptikus skálájú cirkulációs rendszer, amelyben a helyi függőleges körüli forgás a Föld forgásával ellentétes, azaz felülről nézve az északi féltekén az óramutató járásával megegyező.
Atmoszféra	Légkör, a Földet körülvevő levegőburok.
Beaufort-skála	Hagyományos szélesebbség meghatározó táblázat, tengerészek számára, mely eredetileg a tenger állapotának leírásán alapult.
Bekapcsolási sebesség	Az a szélesebbség, melynél a turbina elkezd működni.
Betz-limit	Az elméleti felső korlátja a szélből kinyerhető energiának. Az értéke 59% körüli.
Ciklon	Alacsony nyomású légköri képződmény; szinoptikus skálájú cirkulációs rendszer, amelyben a helyi függőleges körüli forgás a Föld forgásával megegyező, azaz felülről nézve az északi féltekén az óramutató járásával ellentétes.
Coriolis-erő	A légtömegekre ható látszólagos erő, mely eltéríti azokat eredeti irányukból. Valójában abból adódik, hogy a megfigyelő egy forgómozgást végző viszonyítási rendszerből (ez a Föld) tekinti a mozgásukat.
Coriolis-paraméter	Értéke a Föld forgásának helyi függőleges körüli összetevőjével egyezik meg. $f=2\omega \sin \phi$, ahol ω a Föld forgásának szögsebessége, ϕ a földrajzi szélesség.
Ekman-féle spirál	A talajfelszín felett, a súrlódási rétegben a szél változását, bizonyos elhanyagolásokkal Ekman szerint leíró törvényszerűség, mely szerint felfelé haladva a szél jobbra fordul (az áramlás irányához képest).
Ekman-réteg	A földi határréteg része, melyben a szélirányok spirál formában változnak a magasság függvényében. Átmeneti réteg, az állandó nyírási feszültséggel jellemzett felszíni határréteg, és a szabad légkör között.
Energia spektrum	Azt fejezi ki, hogy az illető függvény teljes varianciájának illetve energiájának mekkora hányada esik egy bizonyos frekvenciasávba.

Felszíni egyenetlenség mértéke	A felszín feletti magasság, ahol a szélesség már nulla. Ezt a felszín jellege, a növényzet, sziklák, stb. határozza meg.
Front	Két különböző termodinamikai tulajdonságú, legtöbbször eltérő hőmérsékletű légtömeg közötti határfelület, amelyen feloszáló légáramlás van.
Froude-szám	Dimenzió nélküli szám, a tehetetlenségi erő és a nehézségi erő hányadosa.
Geosztrofikus szél	A magasabb légrétegekben fújó szél, melyet a légnyomáskülönbségek és a Coriolis-erők határoznak meg.
Határréteg	Az atmoszférának az a rétege, melyre a Föld felszíne közvetlenül hatással van.
Hatvány-szabály	A szélesség növekedésének, a magasság függvényében, leírására szolgáló másik függvény mely szintén a légkör alsó kb. 100 m-ére igaz.
Hozzáférhető erőforrás Instabil atmoszféra	A hasznosítható szélenergia az adott területről. A felszín felmelegedéséből származó felhajtóerők hatására mozgó légtömegek által befolyásolt atmoszféra.
Izobár vonalak	Az azonos légnyomású pontokat összekötő vonalak.
Izovent vonalak	Az azonos légsebességű pontokat összekötő vonalak.
Kármán-állandó	A logaritmusos szélprofil matematikai kifejezésében lévő állandó, $n = 0,41$.
Katabatikus szél	Hegyoldalakon tapasztalható lefelé irányuló szél, mely a levegő lehűlését követő sűrűségváltozásból ered.
Konvekció	Vertikális légmozgások az atmoszférában, melyeket a felhajtóerők okoznak.
Közbenső határréteg	A földi határrétegen belül kialakuló másik határréteg mely a felszín jellegének változása nyomán alakul ki, és a légtömeg haladási irányába vastagszik.
Lekapcsolási sebesség	Az a szélesség, mellynél a turbina befejezi a működését (biztonsági okokból).
Logaritmus-szabály	A szélesség növekedése a magasság függvényében, a légkör alsó kb. 100 m-ében, logaritmusos függvényel leírható.
Névleges szélesség	Az a szélesség, mellynél a turbina eléri a maximális teljesítményét (a gyártó által megadott érték).

Névleges teljesítmény	A szélturbina maximális teljesítménye, melyet a névleges szélessége mellett ad le (a gyártó által megadott érték).
Reynold-szám	Dimenzió nélküli szám, az áramlási mezőben a tehetetlenségi erő és a dinamikai viszkozitás hányadosa. A hidrodinamikai instabilitás, és a turbulencia eredetét jellemző mennyiség.
Rossby-szám	Dimenzió nélküli szám, forgó fluidum áramlási mezejében a tehetetlenségi erő és a Coriolis-erő hányadosa.
Semleges stabilitás	A légkör olyan állapota, mikor a légtömegekre a felhajtó erők hatása elhanyagolható, csak a felszíni súrlódásból származó nyíróerők a meghatározók.
Szélrózsa	Diagram, mely a szélességek szélirányokra eső eloszlását mutatja.
Szélturbina	A szél energiájából elektromos áramot előállító berendezés.
Szinoptikus	Nagyméretű mozgások az atmoszférában, melyeket egyszerre nagy területeken lehetséges megfigyelni (1000–2500 km).
Troposzféra	Adiabatikus, vagy konvektív régió. A légkör legalsó, változó magasságú rétege (10–15 km), amelyben a hőmérséklet a magassággal csaknem szabályosan csökken.
Turbulencia	Véletlenszerű, kaotikus mozgás a levegőben, mely a keveredését okozza.
Turbulencia intenzitás	Az áramlás turbulenciájában rejlő mozgási energia nagyságát leíró jellemző.

IRODALOM

- [1.] ANTAL E.–JENEY CS.–URBÁN L. (1980): Meteorológiai műszertan, Gödöllő pp. 65–69.
- [2.] BALOGH E.–HOMOLA V. (1997): A szélérőművek jövője, Energiagazdálkodás XXXVIII. évf. 1997. 11. szám
- [3.] BARÓTFI I. (szerk.) (1994): Energiafelhasználói kézikönyv, Környezet–technika Szolgáltató Kft., Bp. pp. 927–933.
- [4.] BARTHOLY I.–RADICS K. (1999): A szélenergiahasznosítás lehetőségei a Kárpát-medencében KLTE Meteorológiai Füzetek, 14.
- [5.] BITÓ J.–SINKA J. (1973): Jövők kulcsa az energia, Kossuth Könyvkiadó, Budapest
- [6.] BETZ A.: (1951): Windenergie und ihre Netzung durch Windmühlen, Verlag Claudia Lorenz, Grebenstein, 150 p.
- [7.] BOHOCZKY F. (2001): Megújuló energiaforrások és az energiapolitika Magyar Szélenergia Társaság Kiadványai. No. 1. 5-8 p
- [8.] BOSSANYI E. A. (1997): Bladed for Windows Theory Manual. Bristol: Garrad Hassan and Partners Limited,
- [9.] Cets-Energy Engineering Board (1991) Assessment of Research Needs for Wind Turbine Rotor, Materials Technology, National Academy Press; ISBN 0309044790
- [10.] CHADWICK H. (1998): Wind energy training course. De Monfort University Publication,
- [11.] CLARK, R. N.–SCHNEIDER, A. D. (1980): Irrigation pumping with wind energy Transactions of ASAE 850–853p.
- [12.] CORBUS D., LINK H., BUTTERFIELD S., STORK C. (1999): Certification Testing for Small Wind Turbines. Burlington, Vermont : Windpower '99,
- [13.] CZELNAI R. (1980): A meteorológia eszközei és módszerei (kézirat), Bp. pp. 115–120.
- [14.] CSIZMADIA B., NÁNDORI E. (1999): Szilárdságtan. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó,
- [15.] DAVENPORT W. (1960): Rationale for determining design wind velocities. ASCE,
- [16.] DAVID A. (1994): Wind Turbine Technology: Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering, Amer Society of Mechanical Engineers; ISBN: 0791812057
- [17.] DAVID M (1987). Wind Turbine Engineering Design, Eggleston, Forrest S. Stoddard, Van Nostrand Reinhold; ISBN: 0442221959
- [18.] DEN HARTOG (1956): Mechanical vibration. New York: McGraw Hill Book,
- [19.] DETREKÓI Á.–SZABÓ GY. (1995): Bevezetés a térinformatikába, Nemzeti Tankönyvkiadó, Bp.
- [20.] DÉVÉNYI–GULYÁS (1988): Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában, Tankönyvkiadó, Bp. pp. 137.
- [21.] DIAMANTARAS K.: (1996), Proceedings Wind Energy R&d Contractors Meeting East Kilbride 8 to 10 Feb 1995, Bernan Assoc; ISBN: 9282767310
- [22.] DOBESCH, H.–TRAN, H. V. (2001): Objective interpretation of wind measurements MSZTE Konferencia előadásai, Gödöllő, 16–20p
- [23.] DÖRNER H. (1997): Freifahrende Turbinen Windenergie. Fakultat Luft und Raumfahrttechnik, Universitat Stuttgart,

- [24.] DURST F. (1960): Wind speeds over short periods of time. *Meteorol.*
- [25.] EUROPEAN COMMISSION, (1996) Directorate-General Science, Research and Development: European wind turbine standards. Bruxelles : EC,
- [26.] EUROPEAN COMMUNITIES (1994), Construction of a 150 Kw Wind Turbine With a Rotor Diameter of 20 Metres Es/En : Final Report, ISBN:9282669564
- [27.] EUROPEAN COMMUNITIES (1996.) Non-Nuclear Energy-Joule II European Wind Turbine Standards Project, ISBN: 9282779483
- [28.] EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION (1999) (EWEA): Wind Energy, The Facts. Brussels: European Communities,
- [29.] GASCH, R. (1991): Windkraftanlagen. B.G. Teubner Stuttgart,
- [30.] GOSWAMI D.Y. (1986): Alternative Energy in Agriculture. Vol. II. CRC Press, Boca Raton,
- [31.] GOURIÉRÉS (1982): Wind Power Plants, Pergamon Press, New York, U.S.A.
- [32.] GRÜBER J, BLAHÓ M. (1971): Folyadékok mechanikája. Budapest: Tankönyvkiadó,
- [33.] SALEH I. A. (1995): Design and testing of small mixed airfoil wind turbine blades. Pergamon Press: Renewable Energy, Vol. 6., No 2.,
- [34.] HAMMEL, L. (1924): Die Ausnutzung der Windkrafte Verlagebuchhandlung Paul Parey, Berlin
- [35.] HAYES D. (1982): Átmenet a kőolaj utáni korszakba, Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Bp. pp. 226–234.
- [36.] HEIER, S. (1994): Windkraftanlagen im Netzbetrieb. Stuttgart: B.G. Teubner,
- [37.] HEIER, S. (1998): Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons;
- [38.] HORVÁTH G.–TÓTH L.–TÓTH G. (2000): A szélgenerátor oszlop dinamikai elemzése végeelem módszerrel. Gödöllő: MTA AMB K+F Tanácskozás,
- [39.] HORVÁTH G.–TÓTH L. (2001): New methods in wind turbine tower design *Wind Engineering*, Vol.25. No. 3. 171-178p.
- [40.] HORVÁTH G. (2001): Szélgenerátor-oszlop jellemzőinek összefüggései Doktori értekezés, Gödöllő,
- [41.] HORVÁTH G., TÓTH L. (1999): A computer aided frequency analysis of a wind turbine. Cambridge: British Wind Energy Association Annual Conference,
- [42.] HÖLZEL G., LANGER W. (1986): Irányelvek a magas, karcsú tartószerkezetek szél által gerjesztett keresztirányú lengéseiből származó igénybevételek számítására és szerkezeti kialakítására Budapest: Kogépterv,
- [43.] HUTTE (1993): A mérnöki tudományok kézikönyve. Budapest: Springer, Irodalomjegyzék
- [44.] JANSEN, W. A.–SMULDERS, P. T. (1977): Rotor design for horizontal axis windmills Amersfort, Steering Committee,
- [45.] JOHANSSON T.B. et al. (1994): Renewable Energy. Sources for Fuels and Electricity Island Press. Washington,
- [46.] JOHNSON G. L. (1985): Wind Energy Systems. New Jersey: Prentice-Hall Inc,
- [47.] KACZ K.–NEMÉNYI M.: (2000.) Megújuló energiaforrások Agrárműszaki Kiskönyvtár 1. Mg. Szaktudás Kiadó, Bp.
- [48.] KAISER K. (1997): Where Comes the Damping From? Dublin: Proceedings European Wind Energy Conference,
- [49.] KAPLAN H. (1984) Boundary Layer Structure : Modeling and Application to Air Pollution and Wind Energy D Reidel Pub Co; ISBN: 9027718776
- [50.] KASSAI F. (témafelelős)–ETE (1989): Irányelvek szélmotorok tervezéséhez..., MTESZ Házinyomda, Bp. pp. 6, 16–19.
- [51.] KOLLÁR L. (1979): A szél dinamikus hatása a magasépítményekre. Budapest: Műszaki Könyvkiadó,
- [52.] LANDBERG L. (1998): A Mathematical Look at a Physical Power Prediction Model, *Wind Energy* 1, 23–28
- [53.] LEDÁCS KIS A. (1963): A szélenergia hasznosítása, Műszaki Könyvkiadó, Budapest,
- [54.] LIPOVSZKY GY., SÓLYOMVÁRI K., VARGA G. (1981): Gépek rezgésvizsgálata és a karbantartása. Budapest: Műszaki Könyvkiadó,

- [55.] LOVRO I. (1969): Aerodinamika. Nyíregyháza: Technikusképző,
- [56.] LUDVIG GY. (1973): A gépek dinamikája. Budapest: Műszaki Könyvkiadó,
- [57.] LUNDSAGER P., ASKEGARD V., BJERREGARD E. (1978): Measurements of performance and structural response of the Danish 200 kW Gedser windmill. Second international symposium on wind energy systems,
- [58.] LYSEN E. H. (1982): Introduction to Wind Energy, S.W.D. Amersfoort pp. 16–51.
- [59.] MARTIN H.C., CAREY G. F. (1976): Bevezetés a végeelem analízisbe, Budapest: Műszaki Könyvkiadó,
- [60.] MELZER, C. (2001): Wind measurement for energy prognosis MSZTE Konferencia előadásai, Gödöllő, 21–27p
- [61.] MILBORROW D.J. (1986): Towards lighter wind turbines. Mechanical Engineering Publications, Proceedings of the 8th British Wind Energy Association Conference,
- [62.] MORTENSEN, N. G. et. al (1993): Wind Atlas Analysis and Application Program Risø National Laboratory, Roskilde,
- [63.] MURAKAMI S. (1993): Computational wind engineering I. Amsterdam: Elsevier Science,
- [64.] NEW ENERGY (2000): Installed wind power capacity. Bundesverband Windenergie, 3.
- [65.] NORDEX (1999): Borsig Energy katalógus,
- [66.] PALOTÁS L. (1984): Mérnöki kézikönyv. Budapest: Műszaki Könyvkiadó,
- [67.] PATAY I. (1984): A szélenergia alkalmazási lehetőségei drénezett területeken Tessedik S. Tiszántúli Tudományos Napok kiadványa, Szarvas, 28–34p.
- [68.] PATAY I. (1985): Lassújárású szélmotorok üzemi jellemzői Járművek, Mg. Gépek, 3. 89–96p.
- [69.] PATAY I. (1986): Lassújárású szélmotorok rugalmassága Járművek, Mg. Gépek, 6. 230–234p.
- [70.] PATAY I. (1987): Optimális energetikai határfokú mezőgazdasági szélmotorok üzemi jellemzőinek meghatározása. Kandidátusi értekezés, Szarvas,
- [71.] PATAY I. (1992): A szélenergiahasznosítás lehetőségei és korlátai MTA AMB Tanácskozás kiadványa, Gödöllő,
- [72.] PATAY I. (1997): Összefüggések a szélmotorok és szélgenerátorok telepítésének tervezéséhez. Gödöllő: Mezőgazdasági Technika,
- [73.] PATAY I. (1998): Alternatív energiagazdálkodás – lehetőségek és korlátok – Szolnoki Tudományos Közlemények, 24–28.p
- [74.] PETERSEN E. L. (1998): Wind Power Meteorology, Wind Energy 1, 2–22
- [75.] PLATE E. J. (1998): Wind tunnel modelling of effects in engineering.
- [76.] PRETLOVE A. J., MAYER R. (1994): Rotor size and mass – the dilemma for designers of wind turbine generating systems. Wind Engineering, Vol. 18 No 6,
- [77.] RADICS K. (2001): Eredmények a szélenergia hasznosítás területéről: mérések, szélklíma és modellezés. MSZTE Konferencia előadásai, Gödöllő, 35–39p
- [78.] RAUSCH, E. (1968): Maschinenfundamente und andere Dynamische Beanspruchte Baukonstruktionen.
- [79.] SASSY L. (1993): Áramlástan mérés. Gödöllő: Egyetemi Nyomda,
- [80.] SELIG M.S., MAUGHMER M.D. (1992): Generalized Multipoint Inverse Airfoil Design. AIAA Journal, Vol. 30, No. 11,
- [81.] SHARPE D.J. (1986): Layman's guide to the aerodynamics of wind turbines. Cambridge: Mechanical Engineering Publications, Proceedings of the 8th British Wind Energy Association Conference,
- [82.] SMITH, D. R. (1982): Optimum rotor diameter for horizontal axis wind turbines Wind Engineering, No. 6. 12–18p.
- [83.] SMITH, D. R. (1987): The wind farms of the Altamont Pass Annual Review of Energy, 12. 163p.
- [84.] STELCZER B. (2001): Szélerőmű telepítése és áramszolgáltatói hálózatba integrálása MSZTE Konferencia kiadványa, Gödöllő, 48–53p.
- [85.] SUTHERLAND H. J., KELLEY N. D. (1995): Fatigue damage estimate comparisons for northern European and U.S. wind farm loading environments. Washington, D.C.: Proceedings of WindPower 95,

- [86.] SZABÓ Gy. (2001): Kisteljesítményű szélmotorok gyártása Magyarországon MSZTE Konferencia kiadványa, Gödöllő, 60–63p.
- [87.] SZLIVKA F. (1999): Áramlástan. Gödöllő: Egyetemi Nyomda,
- [88.] TANGLER, J. et al. (1991): SERI advanced wind turbine blades SERI, Golden, Colorado,
- [89.] TAR K. (2001): Kísérlet a szélenergia statisztikai becslésére MSZTE Konferencia előadásai, Gödöllő, 28–34p
- [90.] TÓTH G.–HORVÁTH G.–TÓTH L. (2001): Energetikai célú szélmérés és széltérkép készítés MSZTE Konferencia előadásai, Gödöllő, 6-10p
- [91.] TÓTH L.–HONTI V. (1983): Szélenergia hasznosítás az állattartásban Nemzetközi Mg. Szemle, 6. Sz. 39–42p.
- [92.] TÓTH L.–HORVÁTH G.–TÓTH G. (1998): A szélenergia hasznosítása I–II Mezőgazdasági Technika melléklete,
- [93.] TÓTH L. HONTI V. (1987): Környezetkímélő energiaforrás a szélmotor. Budapest: Mezőgazdasági Könyvkiadó Vállalat,
- [94.] TÓTH L.–HORVÁTH G.–TÓTH G.–BERENCSEI B. (2000.): A hazai energia célú széltérkép elkészítésének feltételei, SZIE GMK AEET, Gödöllő
- [95.] Tóth L.–Horváth G.–Tóth G (1998): A szélenergia hasznosítása, Mezőgazdasági technika 78., 83. Sz.
- [96.] TROEN–PETERSEN: (1989): European Wind Atlas, Risoe National Lab., Denmark pp. 30–33., 56–58.
- [97.] VEERS P. S., LAIRD D. L., CARNE T. G., SAGARTZ M. J. (1998): Estimation of uncertain material parameters using modal test data. American Institute of Aeronautics and Astronautics,
- [98.] VEERS, P. S., WINTERSTEIN, S. R. (1997): Application of measured loads to wind turbine fatigue and reliability analysis. Reno: ASME Wind Energy Symposium,
- [99.] VERONESI, G.–ZUCCHINI, A. (1981): Energia dal Vento Edagricola, Bologna,
- [100.] Wind Energy, 2002–2003 BWE-Service GmGH, ISBN 3 9808 236 4 4, Osnabrück, Germany, 180 p.
- [101.] WOOTTON–SCRUTON (1971): Aerodynamic stability. The modern design of wind sensitive structure. London: CIRIA,
- [102.] ZELDOVICH Y. B., YAGLOM I. M. (1987): Higher Math for beginners. Moscow: Mir Publishers
- [103.] ZURANSKI J. A. (1986): A szél hatása a magasépítményekre. Budapest: Műszaki Könyvkiadó,

Tárgymutató

- A**
adatgyűjtő 96
aerodinamikus erő 223
aerodinamikus karcsúság 229, 230
aerodinamikus terhelés 278
akusztikus szélmérő 100
alaki tényező 241
alaphálózat 285
alapozás 247
állandómágneses szinkrongép 167
állásszög 132
állórészáram 199
anemométer 99, 120
aramidszál 356
áraminverter 160
áramirányító 170, 205
áramirányítós szinkrongép 213
áramlás leválása 86
áramlási kép 86, 118
áramlási tér 128
áramlástan modellek 269
áramszabályozás 201
árnyékszóna 298
aszinkron generátor 163, 165, 187, 188, 193
aszinkron gép 154, 194, 200
átlagolási idő 99
átlagos szélesség 77, 82, 94, 111
átlagos teljesítmény 106
áttétel nélküli szinkron generátor 210
- B**
befektetési költség 364
Bernoulli-egyenlet 126, 131
Betz-maximum 91
biztonsági rendszer 71
bontási költség 332
- C**
CO₂ kibocsátás 324
Coriolis erők 278
csatlakoztatás jogi feltétele 290
csavarónyomaték 227
csomópontok 267
csoportos telepítés 295, 298
- D**
Darieus 45
dinamikus igénybevétel 231
dinamikus nyomás 224
dinamikus rezgésamplitúdó 249
dízelmotoros hibrid 55
domborzati adatok 120
domborzati modell 120
dugattyúrúd 51
- E**
elektromágneses zavarás 330
elektromechanikai átalakító 163
ellenállási tényező 240, 241
ellenállás-tényező 132
elosztóhálózat 283
energiaegyenlet 92, 112, 113
energiaveszteség 193
Európai Szélenergia Egyesület 338
European Wind Turbine Standards 342
- F**
fajlagos energiatermelési költség 368
fajlagos szélpotenciál 102
farvitorla 178
farvitorla-felület 178
Fehér Könyv 338
fékezés 65

felhajtóerő 137
felhajtóerő-tényező 132
felharmonika 272
felkínált teljesítmény 291
felszálló szél 87
felszíni réteg 81
felszíni sűrűlődés 76
felszíni szél 76
fenntartási költség 364
feszültségjellemző 291
feszültségdeformáció 264
feszültséginverter 160
fizikai modell 119
fizikai modellezés 117
fordulatszám-szabályozás 216
fordulatszám-rugalmasság 173
forgórész 167
forgórész-fordulatszám 156
forgórészáram 199
fosszilis tüzelőanyag 326
főcsapágy 69
földelés 63
frekvenciaváltoztatás 159
frekvenciatartomány 245
frekvenciaváltó 159, 169, 188, 203, 208,
211, 285
függőleges légmozgás 83

G

gazdaságosság 363
generátor-hatásfok 191
generátoros üzem 156
geometria-hálózás 267
geometriai modell 265
gépkihhasználás 113
gépoldal 205
gépoldali áramirányító 203, 204
gerjesztett rezgés 249
gerjesztőáram 165
gerjesztőtekerccs 195, 196
Giromil 45
gyorsjárás 135, 136
gyorsjárás tényező 135, 140
gyorsulásérzékelő 245

H

hagyományos szint 329
hagyományos tüzelőanyag-készlet 326
hajlítónyomaték 227

hajlítórengés 252
hallható hanghatás 330
hálós telepítés 299
hálózati áramirányító 169, 213, 216
hálózati frekvencia 164, 187, 292
hálózati teljesítménytényező 200
hálózati üzem 281
hálózatoldali áramirányító 204
hálózatra csatlakozás 284
hálózatról szinkronozott 216
háromdimenzió 267
hasonlósági kritériumok 254
hasznos keresztmetszet 141
hasznos rotorkeresztmetszet 139
hasznos teljesítmény 147
hatástanulmány 351
havi szélsősebesség 107
hegyi szél 87
hengeres oszlop 247
holt zóna 230

I

időjárás front 77
impulzustétel 134
indítási nyomaték 144
indítónyomaték 173
indulási sebesség 314
indulási szélsősebesség 144
infrahangnyomás 330
instabil határréteg 83
interferencia 333
invertes hajtás 184

J

jelleggörbe 142

K

kanalas anemométer 95, 107
Kármán-féle örvény 238
kaszád kapcsolás 214
kereskedelmi szerződés 292
kétdimenziós modell 266
kétdimenziós generátoros 59
kiálló pólusú gép 167
kiegyensúlyozatlanság 277
kimenő teljesítmény 309
kontinuitási törvény 128
környezeti hatásfelmérés 334
közélcélú elosztóhálózat 283

közelítő polinomok 263
kritikus szélesség 249
különálló turbinák 55
külső gerjesztés 249

L

lamináris határréteg 239
lapátkeresztmetszet 357
lapátprofil 148
lapátrács 138
lapátrezgés 244
lapátszög 138, 148, 149
lapátszög-szabályozás 182, 196
lapátszög-szabályozó 190
lapátszög-változtatás 181
lapáttengely 51
lassújárás 136
lassújárású rotor 137
lebontás 348
légcirkuláció 75
leválasztó transzformátor 285
leváló örvény 236
logaritmikus szélprofil 83
lokális szelek 74

M

maximális fordulatszám 145
maximális nyomaték 140
maximális teljesítmény 126, 146
meddő teljesítmény 285
megfűvás szöge 133
megvalósíthatósági terv 342
mérési időtartam 102
mérési magasság 80, 112
merevségegyenlet 264
mérőműszer 97
modellezés 258
modellkísérletek 255
motoroldali áramirányító 215
motoros hajtózűzem 156
munkapont 143

N

nagyfeszültség 285
névleges nyomaték 136
névleges teljesítmény 135
numerikus modell 117

Ny

nyomáseloszlás 269
nyomatékátviteli függvény 206
nyomatékegyenlet 142
nyomaték-szögsebesség jelleggörbék 217
nyomatéktényező 141
nyomatékváltó 70

O

optimális lapátszög 151
optimális telephely 91
optimális telepítési hely 114
„Opti Slip” 202
oszlop 247

Ö

öngerjesztett rezgés 231
önrezgésszám 198
örvényleválás 239, 240, 241
összetett terhelés 277

P

pénzügyi helyzet 366
pillanatnyi szélesség 82
Pitch-mechanizmus 67
Pitch-rendszer 320
pólusátkapcsolás 195
póluspár 209
pólusszám 156
pozíciósabályozás 184
propelleres anemométer 95

R

Rayleigh-eloszlás 78, 105
Rayleigh-féle eloszlásfüggvény 101
referenciamagasság 79
relatív szélirány 94
relatív szélesség 94
rétegcseré 297
rezgésamplitúdó 249
rezgéstani modell 266
rezonancia 237, 249
rezonanciajelenség 243
rotor 137
rotorkeresztmetszet 129
rotor mögötti áramlás 295, 296
rotorszárnyhossz 135

S

saját frekvencia 242, 250, 267, 271
sajátfrekvencia-számítás 251
sajátfrekvencia-változás 276
sajátlengés 244, 272
sajátrezgés 239
sajátrezgésszám 231
Savonius 45
segédrotor 179
segédvitorla 220
siklószám 132
speciális szárnyprofil 187
Stall-rendszer 66
„stall-control” 181, 186
statikus nyomaték 143
sugárelmélet 125

Sz

szabad áramlás 76
szabályozási megoldás 219
szabályozó rendszer 57
szárnylapát 64
szárnymetszet 136
szárnyprofil 130
szárnyrács 130
szárnyrács-elmélet 130
szélatlasz 119
szélcsatorna 253
szélcsatornamérés 256
szélenergia 91
szélenergia-program 89
szélenergia-potenciál 88, 98, 116
szélerő 73
szélerőgép 43
szélerőgép dinamikus egyenlete 174
szélerőmű 43
szélerőművek leszerelése 337
szélgenerátor 43
szélgenerátor-teljesítmény 106
szélirány 94, 97
széliránykövetés 176
széliránykövető 71
széljárás 73, 77, 90
széllökés 231, 233
széllökés frekvenciája 234
szélmotor 43
szélnyomás 98
szélprofil 81

szélsebesség 93
szélsebességadatsor 106
szélsebességosztály 103
szélsebesség-gyakoriságok 78
szélteher 228, 242
szélturbina 43
szénszál 356
szennyezőanyag-kibocsátás 325
szerkezetkilengés 274
szerkezetönlgés 276
szigetüzem 281
szinkronfordulatszám 193
szinkrongenerátor 170, 195
szinkrongép 165, 168, 212
szinkronszögsebesség 164, 198
szivattyús kivétel 50
szlip 157, 165

T

tangenciális sebesség 131
tartóoszlop 359
tartószerkezet 69
tehetetlenségi nyomaték 184
tekercsveszteség 192
telepítési hely 88
teljesítménykorlátozás 185
teljesítményszabályozás 201
teljesítményegyenlet 175
teljesítménygörbe 309
teljesítménytényező 128, 136, 182,
208, 313
tengelyrendezés 44, 45
tengeri szél 87
terepegyenetlenség 81
termelési költség 365
torlónyomás 223
többlapátos 48
túláram 193
turbinatelesítmény 92
turbulencia 76, 83, 86
turbulens viszony 93

Ü

üresjárat állapot 140
üvegszál 356
üvegszál-as poliészter 67
üzemi fordulatszám 145
üzemi szélsebesség 145

V
váltakozó áramú szaggató 194
végelemháló 265, 267
végelem-modellezés 261
végelemmódszer 274
ventilátorüzem 175
vezérlés 71
viharvédelem 220
villamos hálózat 283, 288
villámcsapás 62
virtuális elmozdulás 262
vízátemelő 49

vízűző 49
vizuális hatás 327, 328
vonalas telepítés 299

W
WAsP 119, 120
Weibull-eloszlás 77, 105

Z
zajhatás 329
zajszint 332



ISBN 963-955-303-4



356 417



Oktatási
Minisztérium

Nyomdai előkészítés:
Partners-Grafika stúdió
1101 Budapest, Monori u. 1-3
Telefon: 431-8368, 431-8381



Készült a Grafika Press Nyomdában
1101 Budapest, Monori u. 1-3
Telefon: 261-5680, 261-3633, 262-5747
Felelős vezető Farkas Tamás vezérigazgató

Partnereink teljes körű kiszolgálását, tájékoztatását, megrendeléseik pontos teljesítését az ISO 9002 minőségirányítási, környezettudatos szemléletünket pedig az ISO 14001 környezetirányítási tanúsításunk igazolja.

A siker partnereinké, mi csak jól nyomtatunk!



Szélerőművek telepítése és üzemeltetése



WINFO Kft.

2458 Kulcs, Deák F. u. 7. • Tel.: 25/ 506-670 • Fax: 25/ 506-671
Email: info@winfo.hu • Web: www.winfo.hu



BOREAS®

Magyarország Kft.

Cím: 6060 Tiszakécske, Liszt F. u. 6.

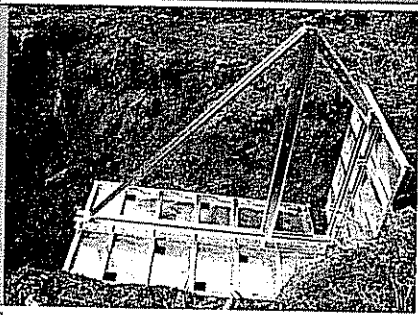
Tel.: 76/540-267, 76/540-268

Fax: 76/540-269

E-mail: boreas@enternet.hu

Url: www.boreas.com

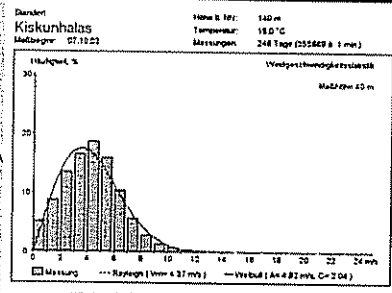
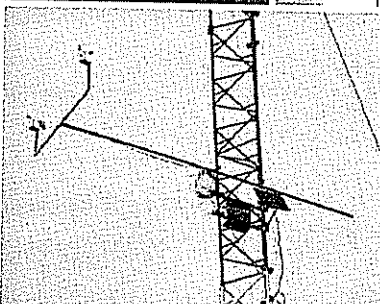
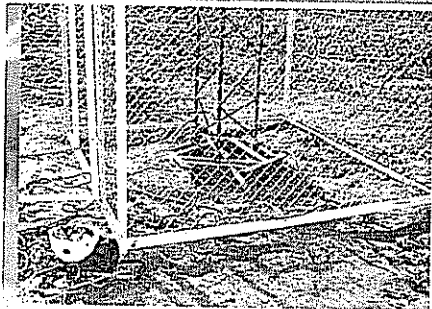
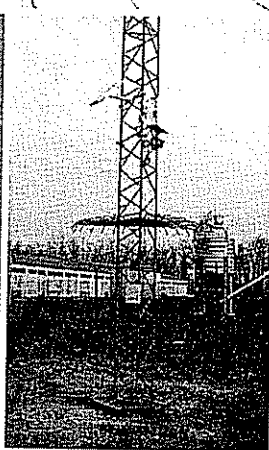
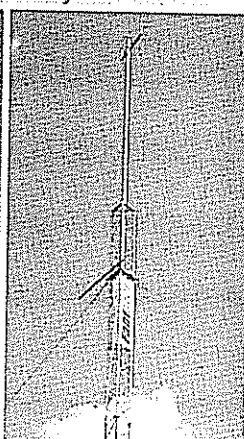
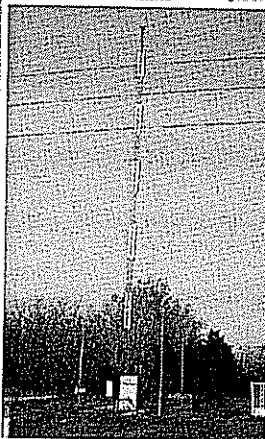
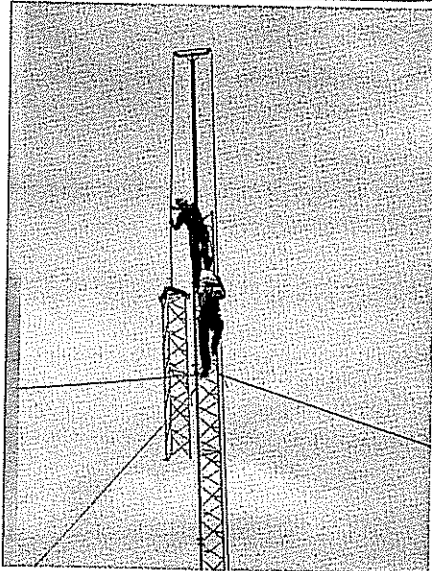
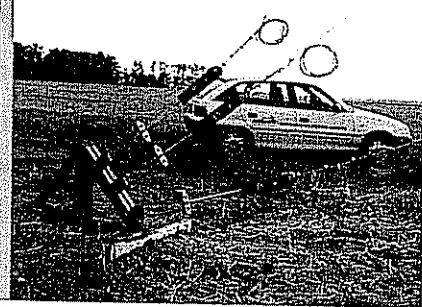
Természet féktelen erejét tiszta energiává szeljük át, az emberek és a környezet javára, hogy a jövő nemzedéke is élhessen a tiszta vizeknek és a zúgó erdőknek.



A **Fábiszter** Kft. saját fejlesztésű
 könnyűszerkezetes kikötött tornya a legtapasztaltabb
 magyar toronytervezők közreműködésével készült.

20.0%

- acél rácsszerkezetű, speciális torony
- könnyű, olcsó szerkezeti kialakítás
- gyors, egyszerű telepíthetőség
- bármely terepen pár nap alatt kézi erővel telepíthető
- gazdaságos szerkezeti kialakítása mászható
- 30-100 m-es magasságig telepíthető



Fábiszter

IPARI, KERESKEDELMI ÉS SZOLGÁLTATÓ KFT
 2000 SZENTENDRE, RÓZSA U. 23., www.fabiszer.hu, fabi@fabiszer.hu

**Magyar Szélergia Tudományos Egyesület
közreműködése
A HAZAI SZÉLERGIA HASZNOSÍTÁSBAN**

Adott területen a szélből nyerhető energia meghatározása, azaz energia célú szélmérés, a beruházást megalapozó környezeti hatástanulmány összeállítása, szaktanácsadás.

1. A mérés helyszínének kijelölése (helyszini bejárás).
2. A mérés 1, ill. 1-év (min 25 és 40 m magasságban szélesebbégmérők és széliránymérők szerelés és az adatgyűjtő felprogramozása).
3. A méréshez használt műszerek (TÜV ellenőrzött kivitelek).
4. Adatok gyűjtése (1 Hz, 10 s átlag, kívánság szerint napi, heti, havi átlagolás).
5. Átlagos szélesebbégek, súrlódás, szélprofil, turbulencia, és szélirányok, ill. szélirányok szerinti átlagos szélesebbégek meghatározása (a széljárásra vonatkozó legfontosabb információk a szélesebbég eloszlási statisztikákból nyerhetők ki).
6. A helyi szélergia-potenciál meghatározása (a statisztika tartalmazza az átlag és a maximum értékeket, eloszlást, szélcsendre vonatkozó analízist, napi elosztásban a közepes szélesebbéget, stb.).
7. A digitális térkép feldolgozása (a mérési pont egy 20x20 km-es terület középpontjában helyezkedik el, a domborzat jellemzői digitális szintvonalakkal).
8. A helyi szélergia-térkép elkészítése (a digitális domborzati térkép, a szélmérési adatok és helyi szélárnyékok figyelembevételével.)
9. A szélpark optimális helyének meghatározása (a helyi szélergia-térkép, a rendelkezésre álló terület elhelyezkedése, a terület geo-mechanikai adottságai, az energia elszállítása stb. függvényében elemelve).
10. A várható energiahozam számítása a kívánt szélérőmű típusra.

*A fentebbi munkákhoz az MSZTE munkatársai
szívesen állnak rendelkezésre*



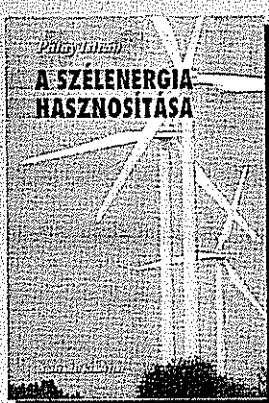
MSZTE

**Magyar Szélergia Tudományos
Egyesület Székhelye:**

Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Agrárenergetika
Tanszék, 2103 Gödöllő, Páter K. u. 1 Tel: + 36-28 420 200
Fax: + 36-28 420 997, E-mail.: toth.aet@mgk.gau.hu

A SZAKTUDÁS MEGHOZZA GYÜMÖLCSÉT!

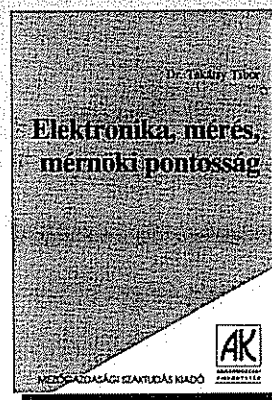
Mezőgazdasági és gépészeti könyvek minden témában, szakemberek útmutatásával, olcsó áron.
Kérje katalógusunkat és rendeljen közvetlenül a Kiadótól,
vagy keresse kiadványainkat a kereskedelmi láncoknál, a könyvesboltokban!



Dr. Patay István:
**A szélenergia
hasznosítása**

Mint ismeretes, az Európai Unió célkitűzése az, hogy 2010-re az összes energiafogyasztásnak legalább 12%-át megújuló energiaforrásból kell fedezni. A nagy telepítési magasságú (60-100 m) szél-erőművek hazánkban is perspektivikusak, ugyanakkor bizonyítottan van létjogosultságuk a kisebb teljesítményű szél-erőgépeknek is. Minden lehetséges igényt figyelembe véve készült a könyv a szélenergia-hasznosítás technikájáról és technológiájáról, alapos elméleti ismereteket és gyakorlati megvalósítási tudnivalókat egyaránt összefoglalva.

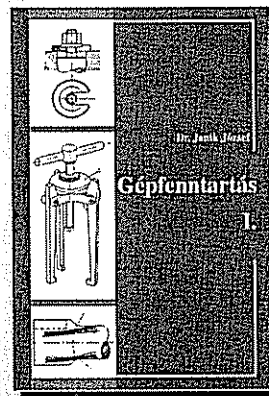
Méret: B/5 keménytáblás Terjedelem: 112 oldal
ISBN: 963 942 292 4 **Ár: 2300 Ft***



Dr. Takátsy Tibor:
**Elektronika, mérés,
mérnöki pontosság**

A könyv a precíziós méréstechnika alapelveit, lehetőségeit és jelenlegi megoldásait tárgyalja. Szót ejt az elektronikus irányított talajművelésről, az anyagkijuttatásról, a precíziós termesztésről, a precíziós irrigáció technikai részéről, a precíziós műtrágyázásról és fedélzeti számítógépes irányításról a mezőgazdaságban.

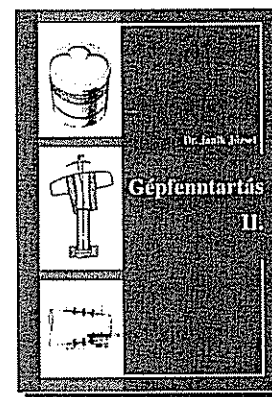
digitális térkép hasznosításáról a mezőgazdaságban.
Méret: B/5 keménytáblás Terjedelem: 150 oldal
ISBN: 963 356 296 1 **Ár: 2475 Ft***



Dr. Janik József:
Gépfenntartás I-II.

A gépek, berendezések folyamatosan növekvő bonyolultsága, automatizáltsága mind nagyobb következményt támaszt a tervezés és gyártás mellett a gépfenntartással foglalkozó gyakorlati szakemberekkel szemben. Erre utalnak azok a világjelenségek is, melyek azt jelzik,

hogy egyre több termelő vállalat ismeri fel a karbantartás, a gépjavítás jelentőségét a termelési folyamatok biztosítása és költségek csökkentése vonatkozásában. Alapvető jellemzője a könyvnek, hogy nem meghatározott típusú gépek, berendezések fenntartási technológiáinak ismertetéséről



gijának ismertetéséről lalkozik, hanem gépekkel szembeni hibaelhárításra orientált tárgyalja a zetes hibákat és a lehetséges javítástechnológiákat. A könyv elsősorban az autós, gépjármű- és vasúti gépek és vasúti járművek fenntartásához ad átfogó gyakorlati és elméleti ismereteket, így ajánlható mind a gyakorlatban dolgozó szakembereknek, akik a termelésben konkrét feladatokat látnak el, továbbá a gépfenntartás szervezésével illetve irányításával foglalkozó részét mindazoknak, akik akár gyakorlati, akár elméleti ismereteik gyarapítására törekcszenek.

Méret: B/5 keménytáblás Terjedelem: 208 ill. 310 oldal
ISBN: 963 942 279 7 **Ár: 2600 ill. 5100 Ft***

Szaktudás Kiadó Ház Rt.
1142 Bp., Erzsébet királyné útja 36/b
Telefon: (1) 252-4772
Fax: (1) 363-2017, 252-6738
E-mail: info@szaktudas.hu

Mezőgazdasági Könyvesbolt
Libri Könyvhálózat
1054 Budapest,
Vécsey u. 5.
Tel.: 311-0282

Szakkönyvárúhá
Lira & Lant Könyvhálózat
1065 Budapest,
Nagymező u. 43.
Tel.: 373-0500

*Az árváltoztatás joga fenntartva.

az-
cit
tu-
ni-
ve-
pe-
al-
ze-
epi
an

lal
[x

og-
kre
eg-
esi
ges
ale
la-
oz-
agi
vek
ya-
te
dk-
zo
vi-
rac
as
le-

dal

[x



Az E.ON Hungaria Európa legnagyobb magántulajdonú energia-
szolgáltató csoportjának tagja. Magyarországon leányvállalatainkon
keresztül több mint két és fél millió fogyasztót látunk el villamos
energiával és vezetékes gázzal. Legfőbb célunk a minőségi szolgáltatás
biztosítása, valamint a környezet védelme, a megújuló energiák
felhasználásának támogatásával.

www.eon-hungaria.com
www.eon.com

e-on
Új energia