

Pannon Egyetem  
Műszaki Informatikai Kar  
Villamosmérnöki és Információs Rendszerek Tanszék  
Villamosmérnöki BSc

## **OTDK DOLGOZAT**

Kisteljesítményű kísérleti szélerőmű  
villamos tervezése és megvalósítása  
állandó mágneses szinkron generátorral

Horváth Sándor Rajmund

Témavezető: Fodor Attila  
2014/2015/1

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton is szeretnék köszönetet mondani szívélyes támogatásáért témavezetőmnek, Fodor Attilának, illetve a Villamosmérnöki és Információs Rendszerek Tanszék mindazon munkatársainak, akik konstruktív meglátásaikkal hozzájárultak a prototípus létrejöttéhez. Köszönöm többek között Agárdi László segítségét a kezdetleges forgórész alapok elkészítésében.

Külön köszönöm Istvánffy Dániel úrnak nélkülözhetetlen tapasztalatát, határtalan jószándékát és türelmét, amellyel az állórész-tekerccselések elkészítésén túlmenően is segítette munkámat.

Szeretnék még köszönetet mondani Szabó Gergely szaktársamnak, akivel a prototípusok fejlesztése közben felmerülő problémák megoldása során gyakran átsegítettük egymást a holtponatokon.

Köszönöm Édesapámnak a rám zúdított megszámlálhatatlan gépészeti tanácsot és kritikát, s Fanninak bátorító szavait.

A dolgozat a TÁMOP-4.2.2.A- 11/1/KONV-2012-0072 projekt keretében Magyarország és az Európai Unió közös támogatásával készült.

# TARTALMI ÖSSZEFOGLALÓ

Dolgozatom tárgya egy olyan szélerőmű modellezése, villamos tervezése és deszkamodell szintű megvalósítása, amely képes a villamos forgógépek oldaláról megvilágítani korunk egyik sokat vitatott energetikai kérdését, a szélenergia hasznosításán alapuló villamosenergia-termelés folyamatát.

Dolgozatom során megvizsgáltam a szélenergia alapú villamosenergia-termelés alapvető természettudományos összefüggéseit, a fizikai jellemzők közötti kapcsolatok feltárásán keresztül megfogalmaztam egy kisteljesítményű kísérleti szélerőmű üzemeltetéséhez és modellezéséhez szükséges feltételeket. A gyakorlati megvalósítás érdekében szempontrendszert dolgoztam ki a felhasználandó villamos forgógép kiválasztására. A gyártói katalógusok áttekintése után arra a következtetésre jutottam, hogy a követelmények teljesítéséhez ilyen alacsony teljesítményszinten egyedi tervezésű villamos forgógépre van szükség.

A szakirodalmat tanulmányozva különböző koncepciók megvalósíthatóságát vizsgáltam, amely a tervezési folyamatok és az alkatrészek beszerzésének iteratív jellege miatt egy összetett műszaki-gazdasági kihívásnak bizonyult. A megvalósított alkalmazás-specifikus kétfázisú állórész-tekerceselés és hozzá illesztett állandó mágneses forgórész felhasználásával egy demonstrálható és működőképes szélenergia-átalakító rendszert állítottam össze.

A generátorhoz egy Funduino Mega 2560 R3 fejlesztőkártyát beépítve mikrokontroller alapú Hall-szenzoros fordulatszám-mérést készítettem, a megjelenítésre TC1602A-01T típusú LCD modult használtam.

A generátor villamos jellemzőit különböző üzemállapotokban vizsgáltam, a mérések eredményeit részletesen dokumentáltam.

A feldolgozott szakirodalom és vizsgálataim alapján MATLAB Simulink környezetben összeállítottam a szélenergia-átalakító rendszer irányítástechnikai modelljét, megteremtve ezzel egy modell alapú szabályozó létrehozásának lehetőségét.

**Kulcsszavak:** kisteljesítményű kísérleti szélerőmű, szélenergia-átalakító rendszer, állandó mágneses szinkron generátor, villamos forgógép-tervezés, egyedi állórész-tekerceselés, egyedi forgórész, Hall-szenzoros fordulatszám-mérés, Arduino, Simulink.

# ABSTRACT

**Title:** Electrical design and implementation of a low-power experimental wind turbine using a permanent magnet synchronous generator.

**Supervisor:** Attila Fodor.

The subject of my Thesis is modeling, electrical designing and implementing the prototype of a wind turbine by enlightening the wind energy based electrical power production in the aspect of rotating electrical machines.

During my work I analyzed the elemental physics of wind energy based electric power production and observed the necessary conditions for modeling and operating a low-power experimental wind turbine. Regarding the implementation I created a system of requirements in order to choose the suitable electric generator. I came to the conclusion that a special, custom designed rotating electrical machine is needed for such a low-power application.

Studying the feasibility of different concepts turned out to be a complex technological and economical challenge because of the iterative being of design processes and component availability. With an application specific two-phase stator winding and a permanent magnet rotor I managed to assemble a demonstrative and operable wind energy conversion system.

With the use of a Funduino Mega 2560 R3 development board and a Hall effect sensor I created a tachometer for the generator. As a display a TC1602A-01T LCD module was applied.

Then I made observations on the generator in different load-states with measurement documentation.

By adapting the existing references and my own observations I created the elemental control engineering model of the wind energy conversion system in MATLAB Simulink environment, which can be used for developing a model-based controller in the future.

**Keywords:** low-power experimental wind turbine, wind energy conversion system, permanent magnet synchronous generator, rotating electrical machine design, custom stator winding, custom rotor, Hall effect sensor tachometer, Arduino, Simulink.

## Tartalomjegyzék

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. A szélérőművek alkalmazásának lehetőségei</b>                 | <b>3</b>  |
| 1.1. A szélenergia szerepe a villamosenergia-termelésben . . . . .  | 3         |
| 1.2. Korai szélérőművek . . . . .                                   | 5         |
| 1.3. Modern szélturbina típusok . . . . .                           | 6         |
| <b>2. A turbina vizsgálata</b>                                      | <b>7</b>  |
| 2.1. Bevezetés . . . . .                                            | 7         |
| 2.2. Elméleti szélteljesítmény . . . . .                            | 7         |
| 2.3. Betz-limit . . . . .                                           | 7         |
| 2.4. Turbinateljesítmény és formatényező . . . . .                  | 8         |
| 2.5. A felhasznált turbina vizsgálata . . . . .                     | 11        |
| <b>3. A villamos forgógép kiválasztása</b>                          | <b>13</b> |
| 3.1. A villamos forgógép, mint energiaátalakító . . . . .           | 13        |
| 3.2. Főbb követelmények a generátorral szemben . . . . .            | 13        |
| 3.3. A szempontrendszer kiértékelése . . . . .                      | 13        |
| 3.4. Egyedi forgógép tervezésének lehetősége . . . . .              | 14        |
| 3.5. Alkatrészek beszerzése . . . . .                               | 14        |
| <b>4. Az állórész-tekerceslés tervezése és megvalósítása</b>        | <b>15</b> |
| 4.1. A villamos forgógépek működési elve . . . . .                  | 15        |
| 4.2. Az eredeti állórész . . . . .                                  | 15        |
| 4.3. Követelmények az állórész tekercselésével szemben . . . . .    | 15        |
| 4.4. A huzalozás méretezése . . . . .                               | 16        |
| 4.5. A tekercselés tervezése . . . . .                              | 16        |
| 4.6. A tervezett és a megvalósított tekercselés eltérései . . . . . | 18        |
| 4.7. A megvalósított állórész-tekerceslés és adatai . . . . .       | 19        |
| <b>5. Az állandó mágneses forgórész tervezése és elkészítése</b>    | <b>20</b> |
| 5.1. Az eredeti forgórész . . . . .                                 | 20        |
| 5.2. Elektromágneses gerjesztési mód alkalmazása . . . . .          | 20        |
| 5.3. Állandó mágneses gerjesztési mód . . . . .                     | 21        |
| 5.4. A permanens mágnes fajtájának kiválasztása . . . . .           | 22        |
| 5.4.1. A NdFeB-ötvözet . . . . .                                    | 22        |
| 5.4.2. Lehetséges állandó mágneses forgórész-változatok . . . . .   | 22        |
| 5.5. Kvázi-kiálló pólusú forgórész megvalósítása . . . . .          | 23        |
| 5.6. Kvázi-hengeres forgórész megvalósítása . . . . .               | 23        |

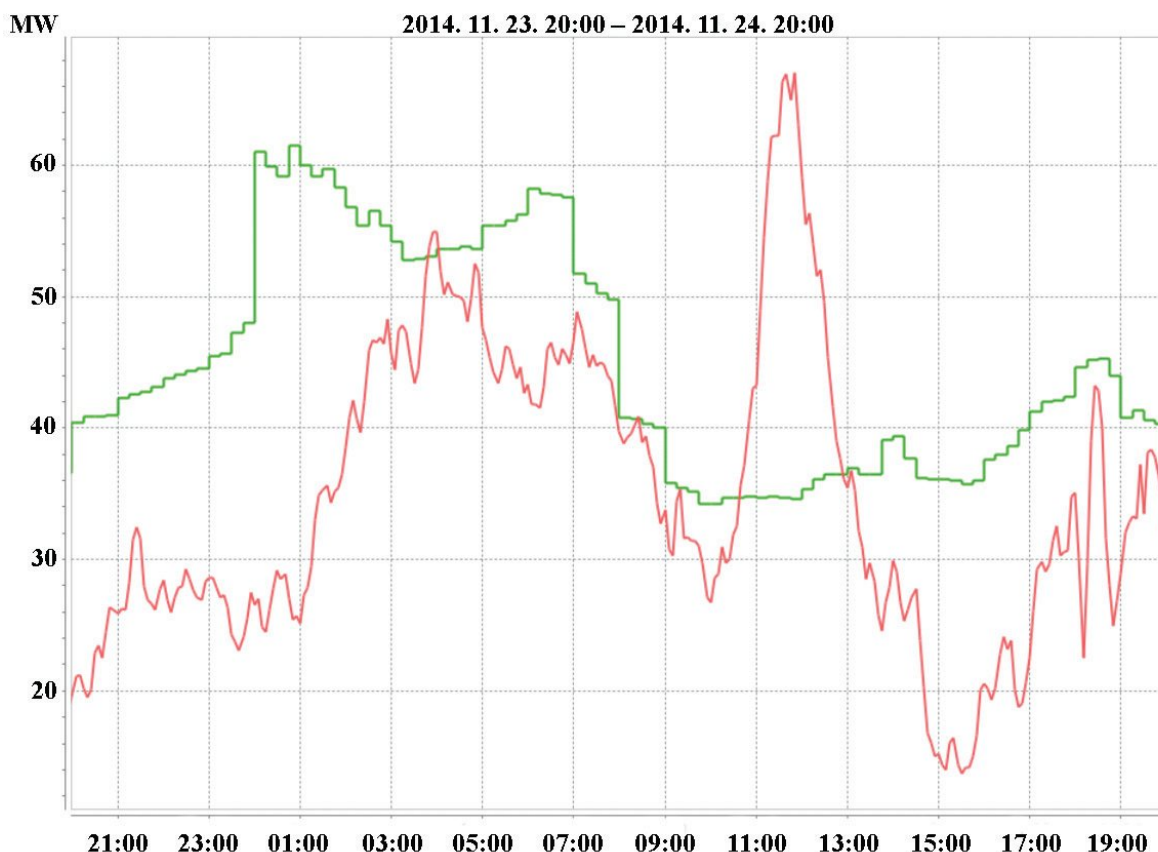
|           |                                                               |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.6.1.    | A felhasznált mágnes típus ismertetése . . . . .              | 23        |
| 5.6.2.    | A megvalósított kvázi-hengeres forgórész és adatai . . . . .  | 25        |
| <b>6.</b> | <b>Fordulatszám mérés megvalósítása</b>                       | <b>26</b> |
| 6.1.      | Érzékelés . . . . .                                           | 26        |
| 6.2.      | Mérés . . . . .                                               | 29        |
| 6.3.      | Megjelenítés . . . . .                                        | 29        |
| 6.4.      | Hitelesítés . . . . .                                         | 30        |
| <b>7.</b> | <b>A szélenergia-átalakító rendszer modellezése</b>           | <b>31</b> |
| 7.1.      | A modellezés feltételeinek rögzítése . . . . .                | 31        |
| 7.1.1.    | A korábbi vizsgálatokból származó feltételek . . . . .        | 31        |
| 7.1.2.    | Feltételek az állandó mágneses szinkron generátorra . . . . . | 31        |
| 7.2.      | A turbina modellezése . . . . .                               | 32        |
| 7.3.      | Az indukált feszültség előállítása . . . . .                  | 33        |
| 7.4.      | Az állórész villamos összefüggései . . . . .                  | 34        |
| 7.5.      | A kapocsfeszültség időfüggvénye . . . . .                     | 35        |
| <b>8.</b> | <b>Tesztmérések</b>                                           | <b>37</b> |
| 8.1.      | Indítás . . . . .                                             | 37        |
| 8.2.      | Rövidre zárás . . . . .                                       | 38        |
| 8.3.      | Üresjárási . . . . .                                          | 38        |
| 8.4.      | Terhelt üzemi állapot . . . . .                               | 40        |
|           | <b>Összefoglalás, eredmények, jövőbeni tervek</b>             | <b>42</b> |
|           | <b>Alkatrészjegyzék</b>                                       | <b>43</b> |

## 1. A szélerőművek alkalmazásának lehetőségei

### 1.1. A szélenergia szerepe a villamosenergia-termelésben

Fosszilis energiahordozóktól függő gazdasági berendezkedésünkben a megújuló energiaforrások, mint alternatív villamosenergia-előállítási lehetőségek korszerű eszközökkel való tanulmányozása meglehetősen időszerű mérnöki feladat. A környezetvédelmi szempontokon túl a megújuló energiák hasznosítása mellett szól, hogy jelenlétükkel diverzifikálják az energiaellátást és lehetőséget teremtenek a közműhálózattól elzárt területek energiaszükségletének fedezésére is.

A villamos energia szempontjából a különböző típusú, decentralizált források hálózatba kapcsolása egy komoly kihívást jelentő interdiszciplináris probléma, ugyanis a termelés és a betáplálás szabályozására a jelenleg üzemelő nagyerőművek mintája nem adaptálható. Ennek fő oka, hogy a megújuló energiaforrások az időjárástól és domborzati viszonyoktól függően változó mennyiségben állnak rendelkezésünkre. Ezt támasztja alá az 1.1. ábrán látható széltermelésre vonatkozó MAVIR adatpublikáció, amely a tervezett és ténylegesen szélenergiából előállított magyarországi villamos teljesítményt ábrázolja egy huszonnégy órás időszakra vetítve.

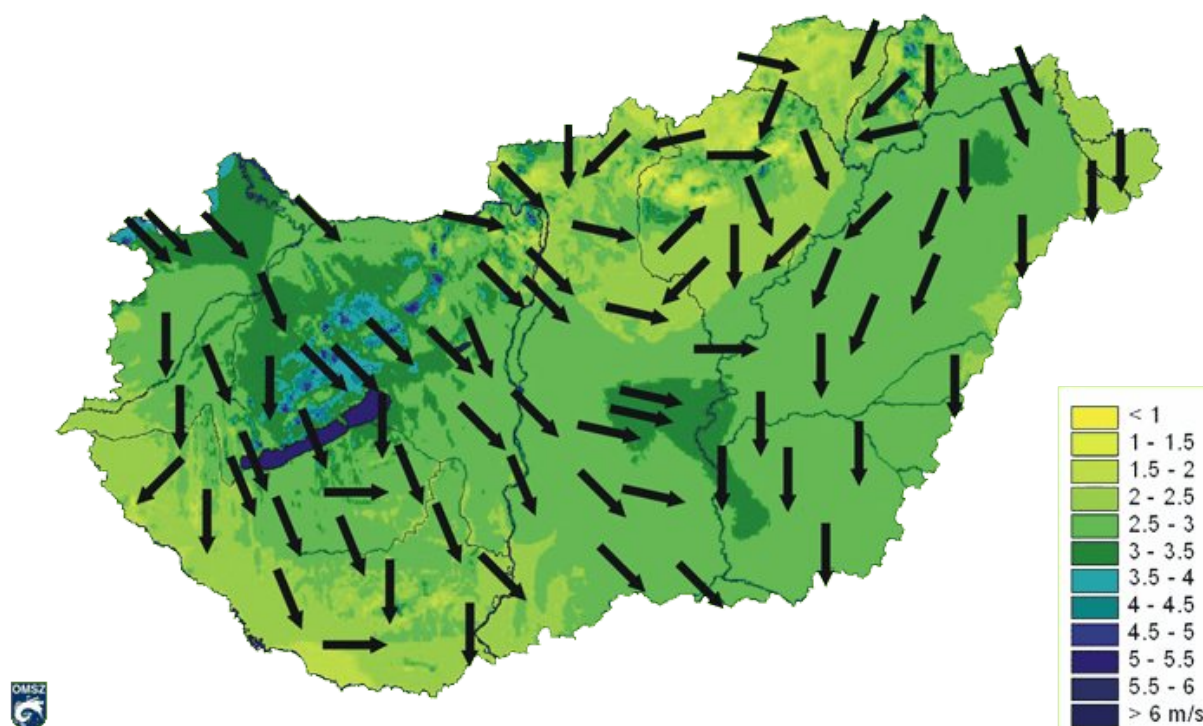


1.1. ábra. Szélerőművek tényleges (—) és tervezett (—) termelése [1]

A villamos energiáról szóló 2007. évi LXXXVI. törvény értelmében a Rendszerirányítónak átvételi kötelezettsége van a megújuló energiaforrásból vagy hulladékból nyert energiával termelt

villamos energiára. Ezt azt jelenti, hogy a meteorológiai előrejelzések alapján elkészített termelési tervezethez képesti többletteljesítmény befogadásáról és továbbításáról is a Rendszerirányítónak kell gondoskodnia. Az előrejelzések pontatlanságából gyakorta előforduló alultermelés esetén a beépített tartalék kapacitásból kell a fogyasztók villamosenergia-igényét fedezni. A villamosenergia szétosztása és elszámolása, mérleg-kör fenntartása szintén a Rendszerirányító feladatkörébe tartozik.

Magyarországon a szélenergia hasznosításával előállítható villamosenergia mennyisége évszakonként változó, az átmeneti időszakok és a tél szelesebb, mint a nyár. Hazánk természeti adottságai és domborzati viszonyai alapján mérsékeltén széles terület. A hagyományos, horizontális tengelyű nagyteljesítményű szélérőművek hatékony üzemeltetéséhez legalább  $5 \text{ m/s}$  évi átlagos szélesebbég szükséges, amely főként a Bakony, Balaton-felvidék környékén és az északnyugati országrészen áll rendelkezésre, ahogy azt az 1.2. ábra mutatja.



1.2. ábra. Évi átlagos szélesebbégek és szélirányok hazánkban (2000-2009) [2]

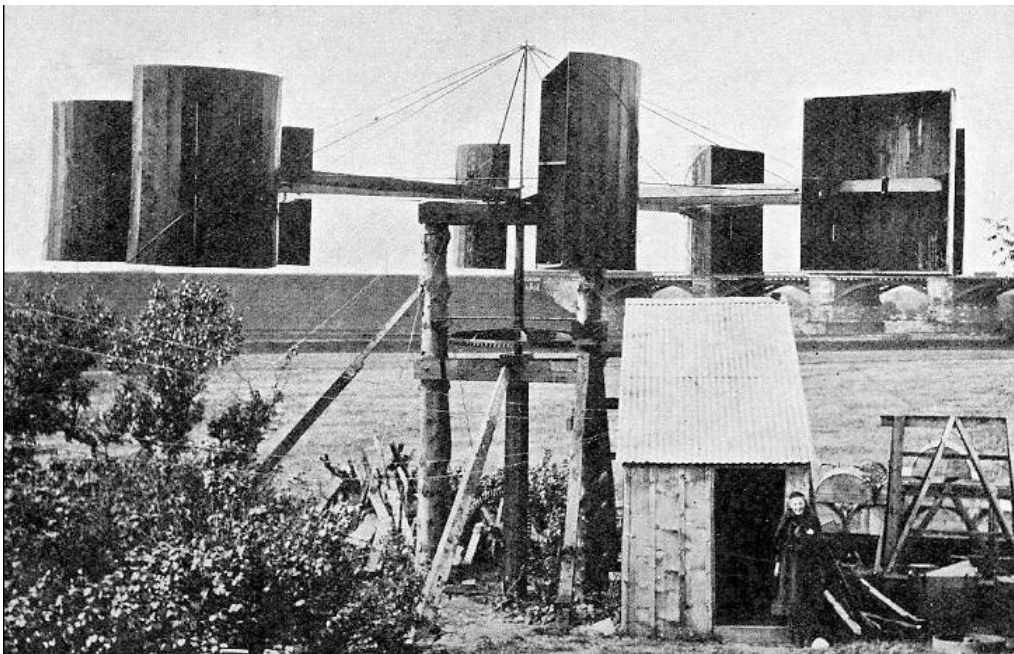
Fontos leszögezni, hogy a megújuló alapú villamosenergia-termelési módok tömeges hálózathoz kapcsolásához nem elég az adott technológiára jellemző telepítési feltételek betartása. Elkerülhetetlen a meteorológiai előrejelző és villamosenergia-átviteli rendszerek korszerűsítése, kellő nagyságú tartalék kapacitása biztosítása a fogyasztói igények megfelelő felmérésére alapozva. Ugyancsak jövőbeli feladat a villamosenergia ipari léptékű tárolási lehetőségeinek kutatása és hálózati tárolókapacitások létesítése. Mai ismereteink szerint a megoldást a tározós vízerőművek vagy a nátrium-kén akkumulátorok jelenthetik. Szélérőművek esetében a tárolók alkalmazása tipikusan az alacsony fogyasztási időszakban jelentkező nagy szélesebbégek esetében lenne előnyös. Ezáltal a felhalmozott villamos energia a nagyobb fogyasztási igényű időszaka-

kokban kedvezőbb áron lenne értékesíthető és várhatóan a nagyerőművek termelési veszteségei is mérséklődnének.

### 1.2. Korai szélérőművek

A légköri áramlások mozgási energiáját már évezredek óta hasznosítják olyan területeken, mint a hajózás, a szellőzőrendszerek és a malomipar. A villamosenergia-termelésben a XIX. század végén jutott szerephez, amikor a második ipari forradalom következtében elkezdődött az elektromos eszközök terjedése.

1887-ben James Blyth, skót villamosmérnök marykirki hétvégi birtokán megépítette az első feljegyzett szélgenerátort (1.3. ábra). A turbinalapátok egy Bürgin-dinamót hajtottak, amely a háztáji elektromos fényforrások ellátását szolgálta, az energia átmeneti tárolása kezdetleges savas ólomakkumulátorokban történt. [3]



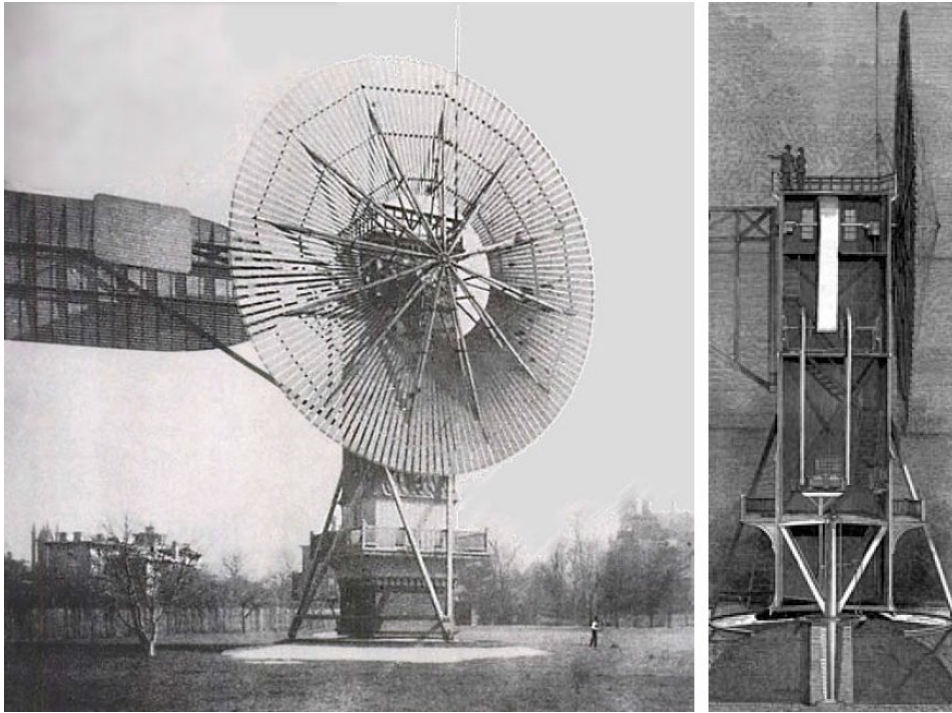
1.3. ábra. James Blyth marykirki szélgenerátora (1891) [4]

A feljegyzések szerint mérsékelt szélben Blyth szerkezete tíz darab 25 V-os izzólámpa egyenáramú táplálásáról gondoskodott. Hiányossága, hogy nem rendelkezett erős szelek ellen beépített mechanikus védelemmel. [4]

Részletesebben dokumentált az amerikai Charles F. Brush clevelandi birtokán, 1888-ban épített szélgenerátor (1.4. ábra), amely már egy kiegészítő lapát segítségével önműködően képes volt kifordulni a légáramlás irányából túl nagy szélsébség esetén. A 17 m lapátátmérőjű szerkezet egy 50:1-es gyorsító áttételen keresztül egy 12 kW-os egyenáramú generátort hajtott, amelynek névleges fordulatszáma  $500 \text{ min}^{-1}$ . Az előállított energia kb. 350 darab korabeli izzólámpa ellátását fedezte. [3]

A technika fejlődésével a fajlagos energiahozam hamarosan a többszörösére nőtt, amihez nemcsak gépészeti, hanem szabályozástechnikai innovációra is szükség volt. Ha a szélérőmű-

vek evolúcióját számokban mérjük, akkor elmondható, hogy napjainkban egy 100 *m* átmérőjű turbinával szerelt berendezés 5 *MW* villamos teljesítmény előállítására is képes megfelelő szélsebesség mellett.



1.4. ábra. Charles F. Brush szélgenerátora Clevelandben (1888) [3]

### 1.3. Modern szélturbina típusok

A szélérőműveket alapvetően az előállítható teljesítmény nagyságrendje és a szélturbina kialakítása szerint csoportosítjuk. A kinyerhető villamos energia mennyisége négyzetesen arányos a turbina átmérőjével, a turbina közvetítésével hasznosítható mechanikai energia pedig annak geometriai jellemzőitől függ. Hogy egy adott környezetben milyen szélturbina típus üzemeltethető gazdaságosan, azt a területre jellemző szélsébség-viszonyok határozzák meg. Általánosan elmondható, hogy a gyakori gyenge szeles, változó szélirányú vidékeken függőleges tengelyű turbina alkalmazandó. Az ilyen szerkezeteknél magasabb hatásfokkal, jobb megbízhatósággal, és a gazdaságos üzemeltetés fenntartásához tágabb bemeneti szélsébség-tartománnyal rendelkeznek a horizontális tengelyű turbinák.

## 2. A turbina vizsgálata

### 2.1. Bevezetés

Dolgozatom során a szélenergia hasznosításának kérdését gyakorlati oldalról közelítem meg, az elméleti vizsgálatok célja a deszkamodell kényszereinek megállapítása a fizikai összefüggések közötti kapcsolatok feltárásával.

A szélenergia-átalakító rendszerek csak többszintű energiakonverzió révén alkalmasak villamosenergia előállítására. Az átalakítási folyamat első fokozata, amikor az áramló légtömeg mozgási energiáját valamilyen erőátviteli szerkezettel közvetítjük a villamos forgógép tengelye felé. Ezt a célt szolgálja a turbina, amelynek kiválasztásakor elengedhetetlen az adott környezetre jellemző szélirány és szélsébség viszonyok ismerete.

### 2.2. Elméleti szélteljesítmény

Állandó szélsébség mellett az áramló légtömegből hasznosítható teljesítményt a közeg mozgási energiájából levezetve a (2.1) egyenlet szerint számíthatjuk:

$$P_w = \frac{dE_{kin}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot v_w^2 \cdot \frac{dm_w}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_p \cdot v_w^3 \quad (2.1)$$

ahol  $P_w$  a turbinalapátok által hasznosítható szélteljesítmény,  $dm/dt = [kg/s]$  a mozgó közeg tömegárama,  $\rho_a = 1,2 kg/m^3$  a levegő sűrűsége szobahőmérsékleten,  $A_p = d_p^2 \pi/4$  a  $d_p = [m]$  átmérőjű propeller által súrolt légfelület,  $v_w = [m/s]$  pedig a pillanatnyi szélsébség.

Az áramlástani jellemzők vizsgálatának egyszerűsítése érdekében a levegő sűrűségének hőmérséklet-és nyomásfüggését tekintjük elhanyagolhatónak.

Látható, hogy a turbina által hasznosítható teljesítmény köbösen függ a mindenkori szélsébségtől és négyzetesen a turbina átmérőjétől, vagyis ezek a szélturbina meghatározó fizikai paraméterei.

### 2.3. Betz-limit

A modern szélenergia-hasznosítás tudományában fontos állomás Albert Betz "Wind Energie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen" című 1929-ben megjelent könyve, amely horizontális és vertikális tengelyű szélturbinákra egyaránt érvényes matematikai összefüggésekkel foglalkozik. A Betz-limit arra ad elméleti választ, hogy egy optimálisan működtetett szélturbina a mozgó légtömeg energiáját milyen arányban képes hasznosítani.

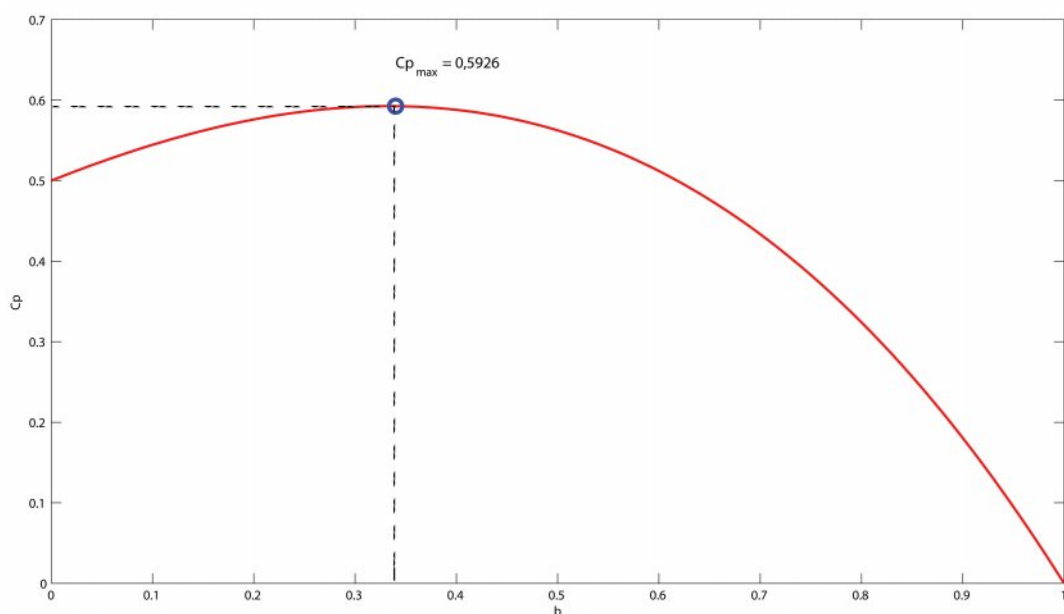
Kiindulásképp vegyük a két szélsőséges esetet. Ha a turbina túl lassan forog, akkor a szél nagy része hasznosítatlanul áramlik a lapátok között. Ellenkező esetben, ha túl gyorsan forog, akkor az egymást átfedő lapátok gyakorlatilag falat állítanak az áramló szél elé. Mindemellett a jó hatásfokú működtetéshez fontos szempont, hogy a forgás közben levegőt hasító lapátok

által keltett turbulencia megszűnjön a következő lapát érkezéséig. Mindebből az következik, hogy a két energiaszint közötti csatolás sosem lehet veszteségmentes, ami a technológia sajátos velejárója.

Betz a turbina maximálisan elérhető hatásfokának ( $\eta_{max}$ ) megállapítását visszavezette a (2.2) egyenletben látható szélsőérték-keresési problémára:

$$\eta_{max} = \frac{1}{2} \cdot (1 - b^2) \cdot (1 + b) \quad (2.2)$$

ahol  $0 < b < 1$ . Ábrázolva az iménti összefüggést azt az eredményt kapjuk, hogy a turbinával legfeljebb az áramló légtömeg energiájának 59,26 %-a hasznosítható. Ezt mutatja be a 2.1. ábra.



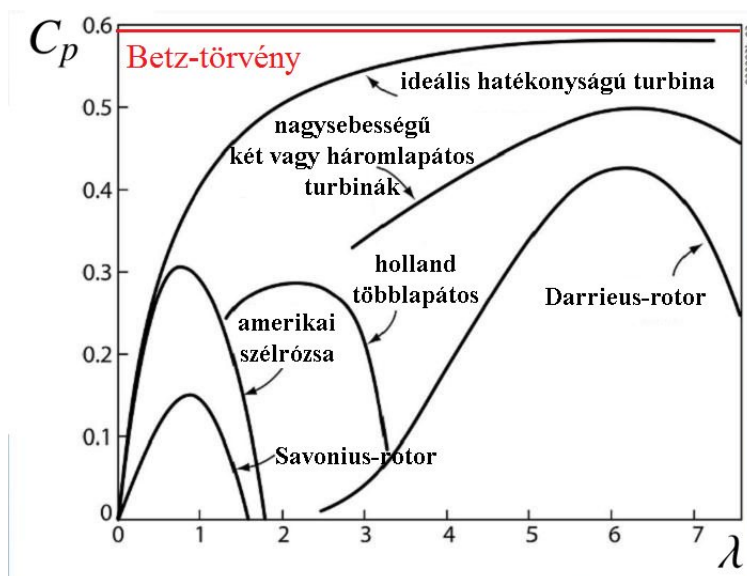
2.1. ábra. A Betz által meghatározott maximális turbina-hatásfok

## 2.4. Turbinateljesítmény és formatényező

A Betz-limit által megadott turbinahatásfok csak egy állandósult bemenet mellett értelmezett elméleti korlát a szélenergia hasznosításának mértékére. A gyakorlatban a turbinalapátok kialakítása is jelentősen befolyásolja a levegő áramlásából hasznosítható energia mennyiségét, ezért a (2.1) egyenletet  $\eta_{max}$  helyett  $C_p$  áramlási ellenállási tényezővel (formatényezővel) kell kiegészítenünk,

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot \frac{d_p^2 \cdot \pi}{4} \cdot v_w^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (2.3)$$

ahol  $\lambda$  a lapátvég-sebesség áttétel (tip speed ratio),  $\beta$  pedig a turbinalapátok állásszöge. A különböző turbinatípusok formatényezőjét a  $\lambda$  lapátvég-sebesség áttétel függvényében a 2.2. ábra



2.2. ábra. A különböző turbinatípusok formatényezője [5]

szemlélteti. Mint látható, az optimális 59,26 % hatásfokot leginkább a két- vagy háromlapátos turbina közelíti meg. Dolgozatom során egy később bemutatásra kerülő horizontális tengelyű, háromlapátos propellert fogok felhasználni, így a továbbiakban csak ezzel az esettel foglalkozom.

Horizontális tengelyű szélturbinákra vonatkozóan a formatényezőt befolyásoló fizikai jellemzőkre a [6] alapján a következő összefüggések írhatók fel:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,5 \cdot (\Gamma - 0,022\beta^2 - 5,6) \cdot e^{-0,17\Gamma} \quad (2.4)$$

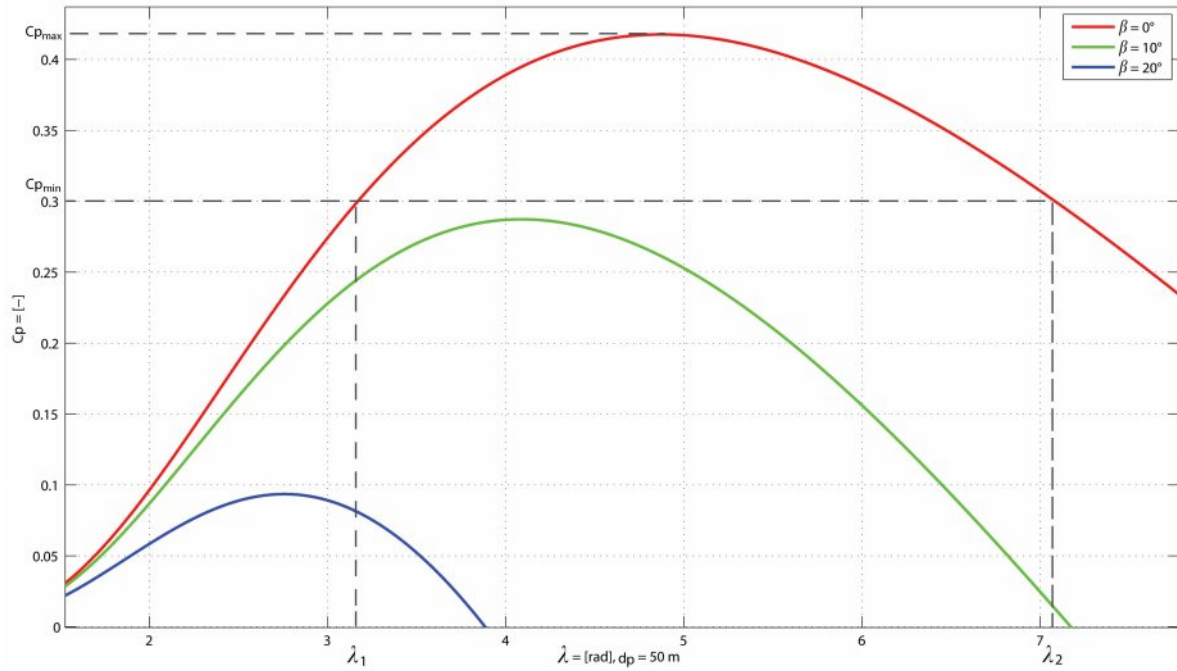
$$\Gamma = \frac{d_p/2}{\lambda} \cdot \frac{3600}{1609}, \quad \lambda = \frac{\omega_p \cdot d_p/2}{v_w} \quad (2.5)$$

ahol  $\omega_p \cdot d_p/2$  a turbinalapátok csúcsának kerületi sebessége. A (2.3) – (2.4) egyenletek által hordozott összefüggések feltárásának érdekében olyan MATLAB szimulációkat végeztem, ahol a turbina állásszöge ( $\beta$ ) és a turbina átmérője ( $d_p$ ) szerint is vizsgálom a turbina formatényezőjét ( $C_p$ ) a lapátvég-sebesség áttétel ( $\lambda$ ) függvényében. Elsőként egy nagyteljesítményű, általában a lakott területen kívül elhelyezett szélgenerátorokra jellemző  $d_p = 50 \text{ m}$  átmérőjű turbinát feltételeztem, ezt mutatja be a 2.3. ábra. Fizikai méret és kivehető villamos teljesítmény szempontjából lényegesen kisebb a másodjára vizsgált, például nyílt területen elhelyezkedő tanyák környezetébe telepíthető  $d_p = 10 \text{ m}$  átmérőjű szélburbina (2.4. ábra).

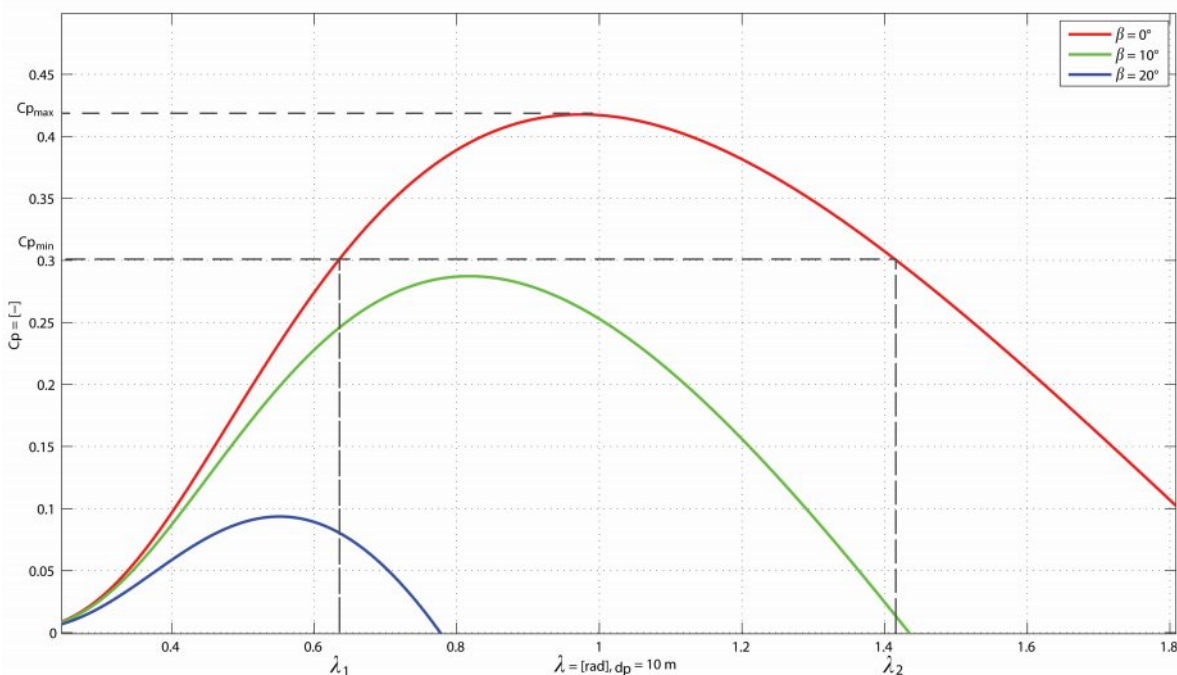
A szimulációk alapján a  $C_p(\lambda, \beta, d_p)$  karakterisztikáról megállapítható:

- egy adott turbina maximális formatényezője  $0^\circ$ -os állásszöggel érhető el,
- a lapátok állásszögének változtatásával (állandósult fordulatszám mellett) a bemeneti szélesebbtartomány kiterjeszthető, de lényegesen rosszabb  $C_p$  mellett,

- a  $C_{p_{max}}$  környezetében értelmezhető egy még elfogadható  $C_{p_{min}}$  alsó korlát, amelyhez tartozó  $[\lambda_1; \lambda_2]$ -szakasz hossza arányos a turbina átmérőjével,
- a turbina megfelelő fordulatszám-szabályozással viszonylag tág szélesség-tartományon is üzemeltethető a választott  $C_{p_{min}}$  és  $C_{p_{max}}$  közé eső hatásfokkal.



2.3. ábra. Formátényező a lapátvég-sebesség áttétel függvényében,  $d_p = 50 \text{ m}$



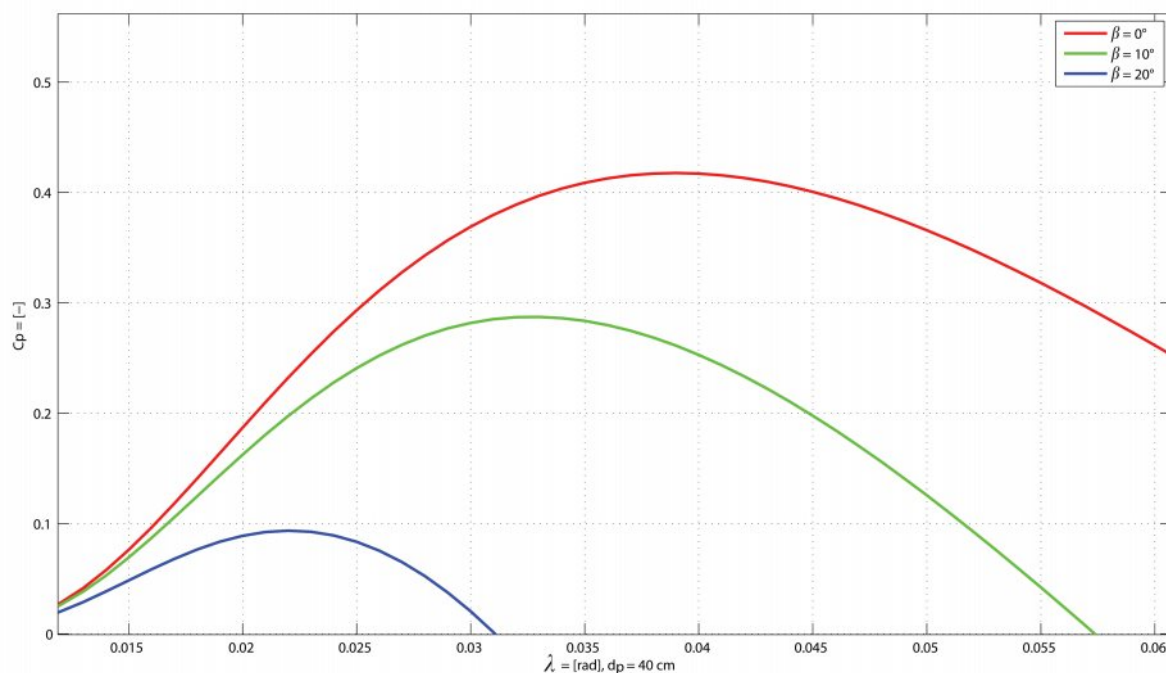
2.4. ábra. Formátényező a lapátvég-sebesség áttétel függvényében,  $d_p = 10 \text{ m}$

## 2.5. A felhasznált turbina vizsgálata

Következő lépésként a deszkamodell megépítéséhez használt, a 2.5. ábrán látható  $d_p = 40\text{ cm}$  átmérőjű turbinára végeztem szimulációt. Az ehhez tartozó  $C_p(\lambda, \beta)$  karakterisztikát a 2.6. ábra szemlélteti. Mivel a lapátok dőlésszöge nem változtatható, ezért a továbbiakban csakis a  $\beta = 0^\circ$  esettel foglalkozom.



2.5. ábra. A felhasznált  $d_p = 40\text{ cm}$  átmérőjű propeller



2.6. ábra. Formátényező a lapátvég-sebesség áttétel függvényében,  $d_p = 40\text{ cm}$

Mint látható, ilyen kis átmérőjű turbina mellett bármely választott  $C_{p_{min}}$  alsó korláthoz rendkívül szűk  $[\lambda_1; \lambda_2]$ -szakasz tartozik. A további vizsgálathoz az egyszerűség kedvéért tekintsük a  $C_{p_{max}}$ -hoz tartozó  $\lambda = 0,04\text{ rad}$  értéket, és a paramétereket behelyettesítve adjuk meg szám-szerűsítve az adott turbina formátényezőjét,  $n = 1\text{ s}^{-1}$  fordulatszámot feltételezve. Ekkor a maximális formátényező a (2.5) egyenlet alapján elméletileg

$$v_w = \frac{\omega_p \cdot d_p / 2}{\lambda} = 31,416 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2.6)$$

szélsébség mellett érhető el. Mivel ilyen nagy szélsébség a kísérleti környezetben biztosan nem lesz előállítható, ezért az optimális formatényező fenntartásához arányosabb kisebb fordulatszámra van szükség, mert egy mechanikai áttétel beépítése a rendszer hatásfokának további csökkenése miatt nem előnyös. A fordulatszám megfelelő megválasztásával (pl.  $0,1 \text{ s}^{-1}$ ) viszont a generátor indukált feszültsége ilyen kis méretben hasznosíthatatlan szintre csökkenne. Ebből kifolyólag kénytelen vagyok eltekinteni a formatényező optimalizálását végző fordulatszám-szabályozás lehetőségétől. A 2.6. ábra alapján az is belátható, hogy az előállítható néhány  $\text{m/s}$ -os szélsébség mellett és szélcsatorna hiányában a turbina az áramló légtömeg mozgási energiájának csak elenyésző hányadát lesz képes hasznosítani.

Az ismertett számítások alapján és a (2.4) egyenlet erőteljes nemlinearitása miatt úgy döntöttem, hogy az áramlástani jellemzők további vizsgálatától eltekintek és a modellezéshez az általam felhasznált turbinára vonatkozóan  $C_p = 0,01$  formatényezőt fogok feltételezni. A turbina modellezésével *A szélergia-átalakító rendszer modellezése* című fejezetben foglalkozom.

### 3. A villamos forgógép kiválasztása

#### 3.1. A villamos forgógép, mint energiaátalakító

A kisteljesítményű szélerőmű megépítéséhez szükségem volt egy olyan elektromechanikai átalakító berendezésre, amely folytonos mozgásával a primer oldali mechanikai energiából szekunder oldali villamos energiát állít elő. Ezt a feladatot – mágneses tér közvetítésével – egy generátorként üzemeltetett villamos forgógép képes ellátni. Első megközelítésben egy kereskedelmi forgalomban kapható (és megfizethető) gép beszerzését terveztem, amelynek kiválasztásához fel kellett állítanom egy szempontrendszer.

#### 3.2. Főbb követelmények a generátorral szemben

1. Biztonsági okokból elsődleges szempont, hogy a gyártmány névleges feszültségei ne haladják meg az érintésvédelmi törpefeszültséget, amely váltakozó áramú hálózatban 50 V, egyenáramú hálózatban pedig 120 V.
2. A gép forgórésze legyen állandó mágneses gerjesztésű a jobb hatásfok érdekében.
3. Az armatúra tekercselése legyen többfázisú, hogy a gép alkalmazható legyen villamos-ságtani alapjelensége vizsgálatára.
4. A motorüzemre megadott névleges feszültséghez tartozó névleges fordulatszámon alkalmas legyen szélgenerátoros felhasználásra, vagyis a gép üzemi fordulatszáma legfeljebb néhány száz  $\text{min}^{-1}$  legyen és ekkor hasznosítható szintű feszültség indukálódjon. (E feltétel teljesüléséhez általában sokpólusú forgórészre van szükség.)
5. A gép tengelyére csatlakoztatható legyen egy turbina.
6. A gép burkolatán legyenek rögzítőpontok, amellyel állványhoz illeszthető.
7. Lehetőség szerint rendelkezzen beépített fordulatszám érzékelővel.

#### 3.3. A szempontrendszer kiértékelése

A gyártói katalógusok hosszas tanulmányozása után a Maxon Motor EC 90 flat család 244879-számú típusvariánsa (3.1. ábra) állt legközelebb az elvárásokhoz, viszont a fentebb tárgyalt követelményeknek ez sem felelt meg maradéktalanul.

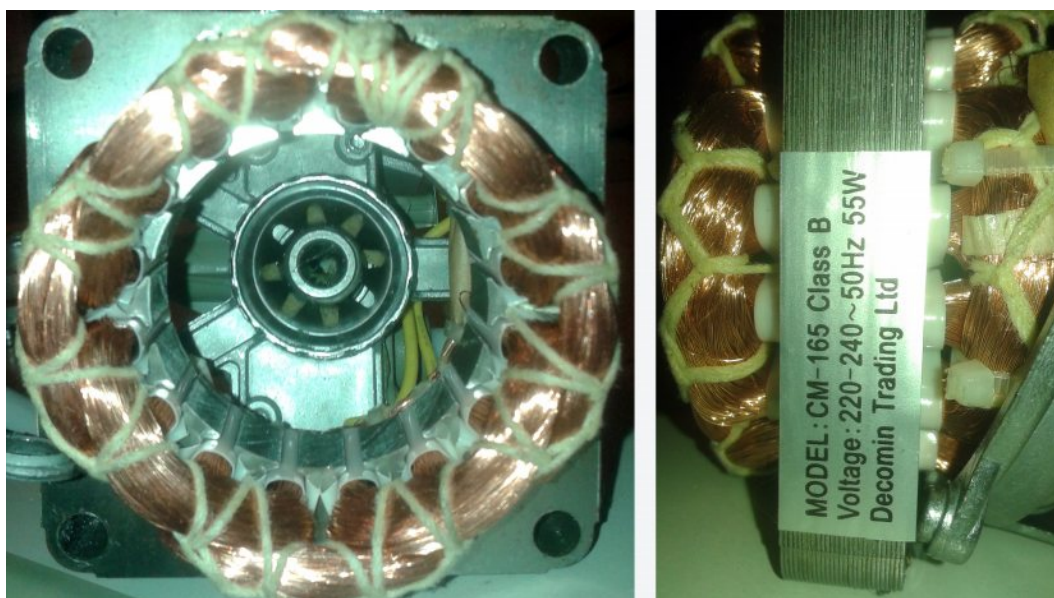
A gyártmány adatlapjáról [7] leolvasható, hogy 48 V névleges feszültséghez  $1610 \text{ min}^{-1}$  fordulatszám tartozik terhelt motoros üzemben. Ennek következtében nem teljesíti a 4. feltételt, amely az alkalmazás szempontjából egy kritikus feltételnek is tekinthető. A problémára elvi szinten megoldást jelentene egy tengelyhez illeszthető gyorsító áttétel beépítése, azonban a feladat kísérleti jellege miatt és a fordulatszám-feszültség karakterisztika hiányában tudtam érdemi számításokat végezni sem a várható feszültségszintre, sem az áttétel veszteségeire vonatkozóan. Másfelől a motor és a nyomaték-váltómű együttes beszerzése túlzott költséget jelentett volna, emellett az áttétel beépítése az elérhető hatásfok csökkenésével is járna.

#### 3.4. Egyedi forgógép tervezésének lehetősége

Miután a gyári generátor beszerzésére irányuló kezdeti elképzelés nem vezetett eredményre, felmerült bennem annak lehetősége, hogy egy meglévő konstrukciót alakítsak át a felhasználási kívánalmaknak megfelelően. Ez az elgondolás magában hordozta az eszköz testeszabhatóságának ígéretes lehetőségét, ugyanakkor még inkább fokozta a megvalósítandó feladat kísérleti jellegét. Mindemellett inspiráló hatással volt rám a kihívás gondolata is, amely egy generátor tervezésével jár.

#### 3.5. Alkatrészek beszerzése

A megfelelő alapanyagot egy hipermarketben vásárolt állóventilátor (3.2. ábra) jelentette, amelyben a villamos forgógép eredetileg egy segédfázissal ellátott, rövidre zárt forgórészű indukciós motor volt.



3.1. ábra. A felhasznált állóventilátor eredeti állórésze és adatlapja

A későbbi fejezetekben dokumentált tervezés után a villamos alkatrészek átalakításra kerültek. A termék egyéb tartozékait (például az állványt, turbinát, tengelyt és csapágyazást) változtatás nélkül használtam fel a kisteljesítményű szélérőmű megépítéséhez, ezzel automatikusan teljesült a 3.2. *alfejezetben* megfogalmazott 5. és 6. követelmény a gyártmánnyal szemben.

Alkatrészek tekintetében permanens mágnesek is felhasználásra kerültek, ezeket az állóventilátortól függetlenül szereztem be. Az állórész tekercselésének kialakítását és a forgórészhez szükséges lágyvas henger esztergálását szakemberek végezték.

A kisteljesítményű szélérőmű megvalósításához felhasznált építőelemek és ezek beszerzési költségeinek tételes listája az *Alkatrészjegyzék* fejezetben található.

## **4. Az állórész-tekerceslés tervezése és megvalósítása**

### **4.1. A villamos forgógépek működési elve**

Villamos forgógépeink alapjában véve állórészből, forgórészből és e kettő között kialakított légrésből épülnek fel. Mivel az energiaátalakítás a váltakozó irányú mágneses tér és az ebbe elhelyezett tekercselés relatív elmozdulásával jön létre, így váltakozó feszültséget két módon is előállíthatunk: mozoghat a forgórészen kialakított tekercselés az állórész nyugvó pólusrendszeréhez képest, vagy mozoghatnak a forgórész váltakozó pólusai az állórészen rögzített tekercseléshez képest [9]. A kétféle kialakítás elméletben egymással ekvivalens. Azt a részt, ahol az energiaátalakítás során a feszültség indukálódik, armatúrának nevezzük.

Generátorok esetében az utóbbi elrendezést szokták alkalmazni, mert a teljesítményt az állórész, vagyis az armatúra nyugvó kapcsain keresztül egyszerűbb és gazdaságosabb kivezetni, mint csúszógyűrűkön keresztül csatlakozni a forgórész tekercseléséhez. Ezért – és mivel az alkatrészként felhasznált konstrukció más megoldást nem tesz lehetővé – a generátor kivezetéseit én is az állórészhez kapcsolom.

### **4.2. Az eredeti állórész**

Az eredeti állórész-tekerceslés bár nagy menetszámmal rendelkezett, számomra több szempontból sem volt megfelelő. Egyrészt a huzalozás nem vörösréz-ből, hanem egy rossz minőségű alumínium-ötvözetből készült, jelentősen rontva ezzel az elérhető vezetőképességét. Problémát jelentett az is, hogy a lakkozott szigetelőréteg csekély mechanikai szilárdsága miatt utólagos villamos kontaktust nem tudtam kialakítani. Szintén az eredeti tekercselés eltávolítását indokolta, hogy az állóventilátor fordulatszámának vezérlésére és az indításhoz szükséges segédfázis létrehozására kialakított megcsapolásokból és asszimetriából eredően a tekercsrendszer struktúrát mérésekkel nem tudtam bizonyossággal meghatározni.

### **4.3. Követelmények az állórész tekercselésével szemben**

Az állórész tekercselésének tervezésekor nemcsak a meglévő konstrukció fizikai paramétereiből származó korlátokat, hanem a turbina vizsgálatából következő és a kísérleti környezetben való üzemeltetéshez szükséges szempontokat is figyelembe kellett vennem.

1. Elsődleges tervezési szempont, hogy a szélgenerátor a kísérleti környezetben létrehozható minimális légtömeg áramlás mellett is biztonságosan demonstrálható és működőképes legyen, összhangban a (3.2.) alfejezet 1. és 4. követelményével. Ehhez az armatúra 50 V-nál kisebb csúcsértékű indukált feszültségének a szabályozott néhány száz  $\text{min}^{-1}$  fordulatszámon mindenkoron megfelelő nagyságúnak kell lennie, ami egy sokmenetes, sokpólusú állórész tekercselést kíván.

2. A további szempontokat a 3.2. *alfejezet* 3. követelményéből származtatva úgy fogalmazhatjuk meg, hogy a kimeneti feszültséget létrehozó tekercselés legyen többfázisú és szimmetrikus.

#### 4.4. A huzalozás méretezése

A feltételeknek megfelelő tekercselés létrehozásához először meg kellett határoznom, hogy milyen keresztmetszetű huzalt alkalmazzak, és abból hány menet alakítható ki az adott keresztmetszetű horonyban. A számításhoz az eredeti huzal átmérőjéből indultam ki, amely a lakkozással együtt 0,19 mm volt. Ehhez az elérhető lehetőségek közül a zománcszigetelés nélkül 0,25 mm átmérőjű vörösréz huzal állt legközelebb. Ha feltételezzük, hogy a 6 mm átmérőjű horony kör keresztmetszetű, akkor a tiszta réz keresztmetszettel számolva

$$N = \frac{A_{\text{horony}}}{A_{\text{huzal}}} = 576 \text{ menet.} \quad (4.1)$$

adódik. A villamos gépekben alkalmazott zománcbevonatú vörösréz huzalokra a megengedett legnagyobb áramsűrűség ( $J$ ) az üzemi hőmérséklet függvényében általában 2,5 – 3,5 A/mm<sup>2</sup> közé tehető. (Irányadó lehet az "MSZ 2364-523:2002. A kábel és vezetékrendszerek megengedett áramai" c. villamos szabvány is).

Szobahőmérsékleten, nem folytonos üzemeltetést és  $J_{Cu} = 2,5 \text{ A/mm}^2$  áramsűrűséget feltételezve elméletileg

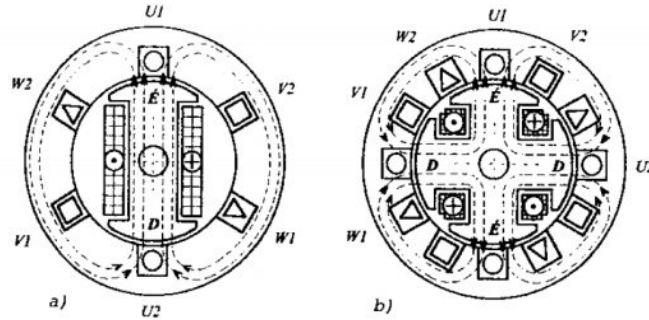
$$I_{\max} = J_{Cu} \cdot A_{\text{huzal}} = 122,7 \text{ mA} \quad (4.2)$$

a maximális áramterhelhetőség, amit még jelentős túlmelegedés nélkül elvisel a szigetelés anyaga. A zománcbevonat feladata kettős: egyrészt villamosan szigeteli a meneteket egymástól és az állórész lemezelt vastestétől, másrészt jól tűri a tekercselés közben jelentkező mechanikai igénybevételeket, védelmet biztosítva ezáltal a huzalozásnak. A (4.1)–(4.2) alapján belátható, hogy kompromisszumot kellett kötnöm a tekercselés menetszámát és áramterhelhetőségét illetően, mivel e két mennyiség között a réz keresztmetszet fordított arányossággal teremt kapcsolatot.

#### 4.5. A tekercselés tervezése

Az eredeti tekercselés eltávolítása után a 16 hornyú állórészhez a (4.3.) alfejezetben ismertetett követelményeknek megfelelően egy új tekercselési konfigurációt terveztem.

Szinkron gépeink alapvetően háromfázisúak, ezért vizsgáljuk először egy ilyen tekercsrendszer kialakításának lehetőségét. Az elemi háromfázisú szinkron gép állórész-tekerceslése által igénybe vett hornyok száma ( $Z$ ) a 4.1. ábrán látható elvi vázlat értelmezése után a (4.3) egyenletben megadott módon számítható.

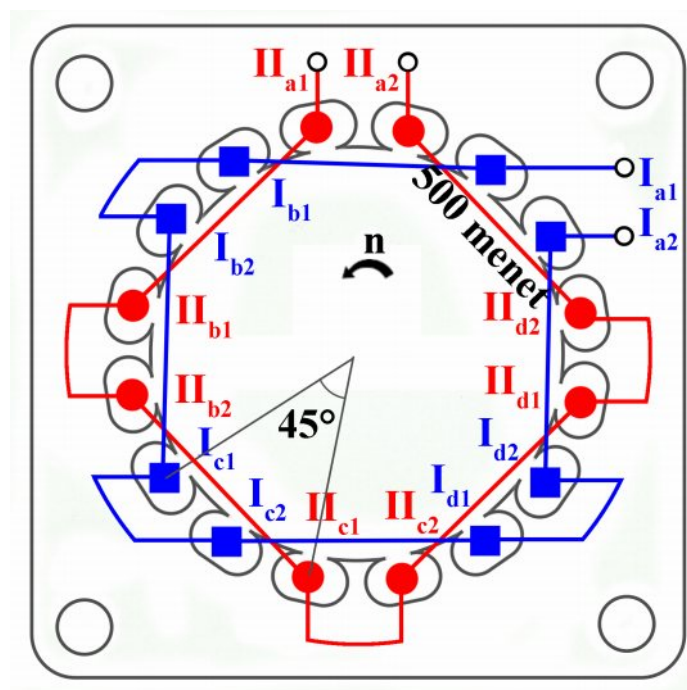


4.1. ábra. 3f. szinkron gép metszete, a) kétpólusú és b) négy-pólusú kivitelben [10]

Négy-pólusú kivitel esetén a háromfázisú szinkron gép hornyainak száma:

$$Z = 2 \cdot m \cdot p \cdot q = 12 \quad (4.3)$$

ahol  $m = 3$  a fázistekercsek száma,  $p = 2$  a póluspárok száma,  $q = 1$  pedig a fázisonként azonos pólus alatt lévő hornyok száma [11]. Belátható, hogy a  $p = 1$  estén tíz, vagy a  $p = 2$  esetén négy horony elhagyását követelő megoldások eredményeként az indukció kerület menti egyenletes eloszlása megszűnne, ami lüktető villamos nyomatókat, ezáltal lüktető indukált feszültséget eredményezne. Emellett nemkívánatos mechanikai igénybevételek is jelentkeznek, ezért a  $p = 1$  és  $p = 2$  konfigurációkat koncepcionális megfontolásból elvettem. Egy  $p = 3$  paraméterű, szimmetrikus és lüktetésmentes háromfázisú tekercselés kialakításához 18 horonyra lenne szükség, amire most értelemszerűen nincs lehetőség. A (4.3.) alfejezet követelményeit kielégítő megoldást a 4.2. ábrán látható kétfázisú hurkos tekercselés jelentette, ahol  $p = 2$ .



4.2. ábra. A megvalósított állórész-tekerceslés vázlata

Ez a tekercselési konfiguráció a (4.3) egyenletben bevezetett jelölések használva az  $m = 2$ ,  $p = 2$ ,  $q = 2$  és

$$\alpha_{vill} = p \cdot \alpha_{geo} = 90^\circ \quad (4.4)$$

paraméterekkel írható le, ahol  $\alpha_{geo} = 45^\circ$  az armatúratekercselés geometriai szöge, míg  $\alpha_{vill} = 90^\circ$  a villamos szög vagy fázistolás. Mivel nincs üresen hagyott horony és a fázistekercselések szimmetrikusak, ezért elméletben lüktetésmentes lesz az indukált feszültség. Tekintve, hogy ez a tekercselés nem háromfázisú, a klasszikus szinkron gépelméletben használatos eljárások – mint például a Park-transzformáció útján előállítható dq-ekvivalens – nem alkalmazhatók a modellalkotáshoz, emiatt az alapvető mágneses összefüggésekből kell majd kiindulnom.

#### 4.6. A tervezett és a megvalósított tekercselés eltérései

A (4.1) képlettel megadott elméleti 576 menet helyett a zománcbevonatú rézhuzalból csak 500 menet volt elhelyezhető a hornyokban, így egy fázistekercs 2000 menetből áll.

Az elkészült tekercselésen méréssel meghatároztam a fázistekercsek ellenállását, ami jó közelítéssel mindkét fázisra nézve  $R_s = 115 \, \Omega$ . A vörösréz fajlagos ellenállásának ismeretében meghatározható a villamos vezetőút hossza ( $l_w$ ):

$$l_s = \frac{R_s \cdot A_{huzal}}{\rho_{Cu}} = 316,57 \, m. \quad (4.5)$$

A fázistekercsek további vizsgálata a modellezés szempontjából nem volt indokolt.

#### 4.7. A megvalósított állórész-tekerceslés és adatai

A későbbi felhasználás céljából táblázatba foglaltam a megvalósított állórész-tekerceslés adatait.

| Paraméter megnevezése                                           | Paraméter értéke              |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Az állórész hornyainak száma ( $Z$ )                            | 16                            |
| Az állórész belső átmérője                                      | 44 mm                         |
| Egy horonyban lévő menetek száma ( $N$ )                        | 500 menet                     |
| Fázisonkénti menetszám ( $N_s$ )                                | 2000 menet                    |
| A felhasznált rézhuzal átmérője (szigetelés nélkül) $d_{huzal}$ | 0,25 mm                       |
| A felhasznált rézhuzal tiszta keresztmetszete ( $A_{huzal}$ )   | 0,049 mm <sup>2</sup>         |
| A vörösréz fajlagos ellenállása ( $\rho_{Cu}$ )                 | $1,78 \cdot 10^{-8} \Omega m$ |
| Egy fázistekercs ellenállása ( $R_s$ )                          | 115 $\Omega$                  |
| Villamos vezetőút hossza fázisonként ( $l_s$ )                  | 316,57 m                      |
| Fázistekercsek száma ( $m$ )                                    | 2                             |
| Póluspárok száma ( $p$ )                                        | 2                             |
| Fázisonként azonos pólus alatt lévő hornyok száma ( $q$ )       | 2                             |
| Geometriai szög ( $\alpha_{geo}$ )                              | 45°                           |
| Villamos szög / Fázistolás ( $\alpha_{vill}$ )                  | 90°                           |
| Becsült maximális áramterhelhetőség fázisonként ( $I_{max}$ )   | 122,7 mA                      |

4.1. táblázat. A megvalósított állórész-tekerceslés adatai



4.3. ábra. A megvalósított állórész-tekerceslés

## 5. Az állandó mágneses forgórész tervezése és elkészítése

### 5.1. Az eredeti forgórész

Az alkatrészként felhasznált állóventilátor indukciós motorjának forgórésze eredeti formájában az én szempontomból alkalmatlan volt a generátoros üzemre, mivel nem rendelkezik a légrésindukció létrehozásához szükséges mágneses térrel. (Elméletileg lehetséges az indukciós motort is generátorként üzemeltetni a szinkron fordulatszám felett, azonban a feladatom egy állandó mágneses szinkron generátor elkészítése, így ezzel a lehetőséggel koncepcionálisan sem foglalkozom.)

Az (5.1.) ábrán megfigyelhető az eredeti, 44 mm átmérőjű rövidre zárt forgórész vezetőfelületén kialakított egyemenetes tekercselés és a lemezelt vastestű felépítés.



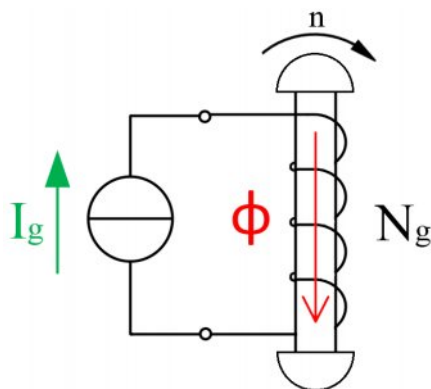
5.1. ábra. Az eredeti 44 mm átmérőjű forgórész

### 5.2. Elektromágneses gerjesztési mód alkalmazása

A forgórész tervezésekor a gondolatmenet teljességének érdekében az elektromágneses gerjesztési módot is megvizsgáltam. A forgórész mágneses terének létrehozásához mérlegelnem kellett, hogy a lehetséges megoldások közül melyik kivitelezhető deszkamodell szintjén a meglévő alkatrészekkel (pajzs, állórész, tengely, csapágyszár) kombinálva.

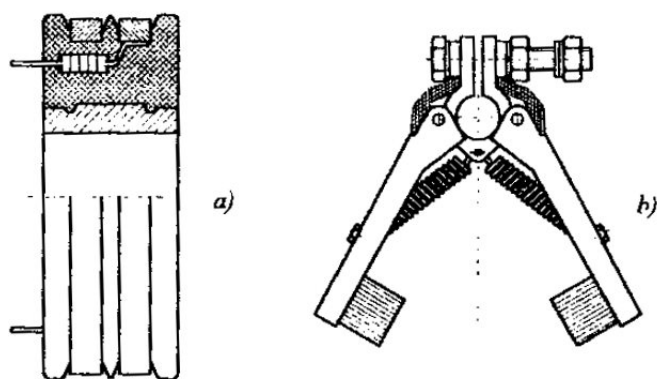
Az elektromágneses gerjesztésű szinkron gépek forgórész-tekercselését általában csúszógyűrűkön keresztül kapcsolják az egyenáramú áramgenerátorra, ezt elvi felépítést láthatjuk a (5.2.) ábrán, ahol  $I_g$  a gerjesztő egyenáram,  $N_g$  a gerjesztőtekercs menetszáma,  $n = [1/s]$  a tengely fordulatszáma,  $\phi = [Wb] = [Vs]$  pedig a létrehozott fluxus. Az ilyen elektromágneses elven gerjesztett forgórészek legfőbb előnye, hogy működés közben az  $I_g$  egyenáram változtatásával befolyásolható a forgórész mágneses terének erőssége.

Beavatkozási lehetőségek tekintetében ugyan előnyös a gerjesztés változtatásának lehetősége,



5.2. ábra. Az elektromágneses gerjesztésű forgórész elvi felépítése

azonban az 5.3. ábrán bemutatott csúszógyűrű és kefetartó utólagos kialakítása egy már meglévő konstrukción még deszkamodell szintjén is indokolatlanul bonyolult gépészeti feladat lenne. Ebből kifolyólag az elektromágneses gerjesztésű forgórész ötletét részletesebben nem vizsgálok.



5.3. ábra. Szinkron gép csúszógyűrűje a) és kefetartója szénkefével b) [10]

### 5.3. Állandó mágneses gerjesztési mód

Kisteljesítményű villamos forgógépeknél – ahol az adott berendezés kialakítása, felhasználási területe miatt nem lehetséges, vagy nem célszerű elektromágneses gerjesztés megvalósítása – gyakorta alkalmaznak a tekercselés helyett permanens mágneseseket. Ekkor elveszítjük a beavatkozási lehetőséget a forgórész gerjesztésébe, ugyanakkor a terheléstől független állandó fluxus miatt a pillanatnyi indukált feszültség (állandó armatúratekercs-menetszám mellett) egyedül a fordulatszámtól függ. Ezenkívül az állandó mágnesek alkalmazása mellett szól, hogy nincs gerjesztési veszteség, kisebb lesz a forgórész tömege, csökken a rézfelhasználás és az üzemeltetési költségek is kevesebbek, valamint az ilyen forgógép kisebb zajterhelést képvisel [10]. A felhasználás szempontjából meghatározó paraméter a  $B_r$  remanens indukció és a  $H_c$  koercitív erő, valamint az üzemi hőmérséklet-tartomány, amely a kereskedelmi forgalomban kapható permanens mágnesek esetében katalógusadat.

#### 5.4. A permanens mágnes fajtájának kiválasztása

A villamos gépekben hagyományosan felhasznált kemény-ferrit és AlNiCo ötvözeteket egyre inkább felváltják a lényegesen jobb mágneses tulajdonságokkal rendelkező ritkaföldfém alapú állandó mágnesek, amelyek közül főként a szintereléssel készült neodímium-vas-bór ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) és a szamárium-kobalt ( $SmCo_5$ ,  $Sm_2Co_{17}$ ) ötvözetek terjedtek el. Mivel a szamárium-kobalt mágnesek előállítása rendkívül költséges, ezért csak olyan esetekben alkalmazzák, ahol a magas üzemi hőmérséklet miatt ( $80^\circ\text{C}$  felett) nem helyettesíthető neodímium-alapú ötvözetekkel. Esetemben ilyen magas hőmérséklettűrésre nincs szükség, ezért a továbbiakban csak a neodímium-alapú permanens mágnesekkel foglalkozom. [12]

##### 5.4.1. A NdFeB-ötvözet

A porkohászati eljárás útján létrehozott anyag önmagában könnyen oxidálódik és meglehetősen törékeny, ezért a szinterelést követően legtöbbször valamilyen nikkal-alapú bevonattal látják el, amely a korrózióvédelmen túl egyben a felület mechanikai ellenálló képességet is javítja. Egyésgnyi tömegre vonatkoztatva előállítása ugyan költségesebb, mint a hagyományos kemény-ferrit és AlNiCo ötvözeteké, viszont a nagy mennyiségű tárolt mágneses energia következtében egységnyi fluxus létrehozásához NdFeB-ötvözetet felhasználva lényegesen kevesebb mágnes-tömegre van szükség. Az ilyen típusú mágnesek alkalmazhatóságának a maximális üzemi hőmérséklet szab határt, amely általában  $80 - 120^\circ\text{C}$ . Különböző eljárásokkal lehetséges jobb hőmérséklettűrésű NdFeB-ötvözetek előállítása, ám ez együtt jár a maximálisan elérhető fluxus-sűrűség csökkenésével. [12]

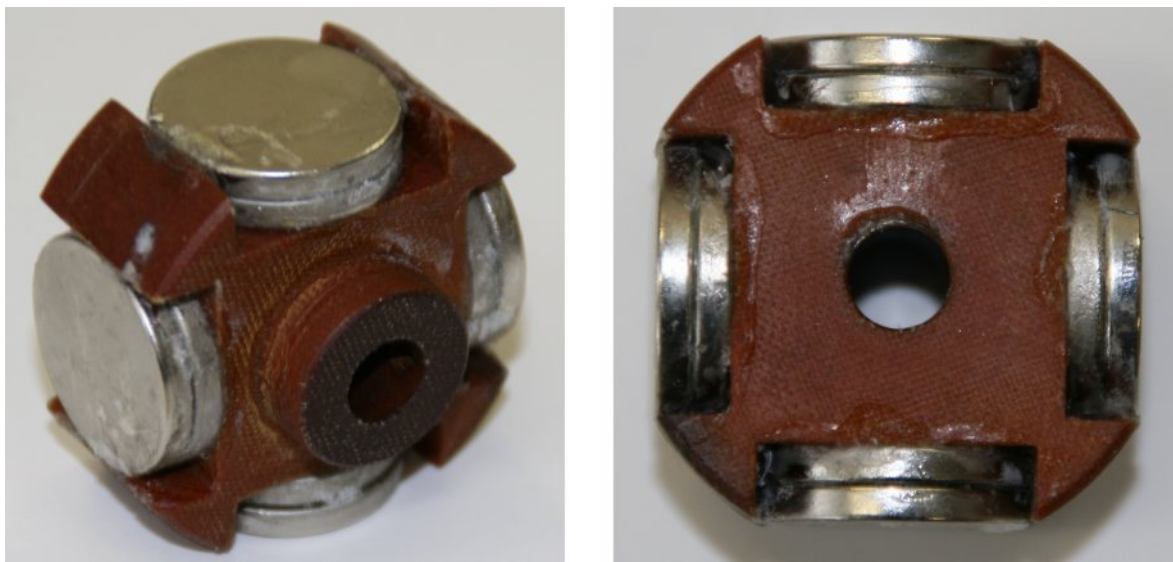
##### 5.4.2. Lehetséges állandó mágneses forgórész-változatok

A forgórész mágneses terének kialakításához tanulmányoznom kellett az alapvető forgórész-típusokat. Mindkét változat esetében szinuszosan váltakozó légrésindukció kialakítására törekednek. A kiálló pólusú forgórésznél ezt állandó gerjesztéssel és a kerület mentén változó nagyságú légréssel érik el, míg a hengeres forgórésznél a légrés az állandó és a gerjesztés nagysága váltakozik a kerület mentén. Deszkamodell szintjén ezek közül egyik típust sem tudtam tökéletesen megvalósítani, mivel vagy változó geometriájú, vagy különböző térerősségű egyedi mágnesszegmensek gyártására lett volna szükség a szinuszosan váltakozó légrésindukció létrehozásához. A katalógusok és az árajánlatok áttekintése után anyagi megfontolásból úgy döntöttem, hogy az egyedi mágnesek gyártásnak lehetőségét elvetem. Ennek következtében szinuszosan váltakozó indukált feszültség előállítására a beszerezhető permanens mágnesekkel nem volt módom.

A koncepciók megvalósítását beszerezhetőségi problémák hátráltatták. A fő tervezési szempont az volt, hogy a forgórésznek az állórész-tekerccseléssel összhangban két póluspárszámúnak kell lennie [11], illetve az elkészítendő forgórész külső átmérője legfeljebb  $44\text{ mm}$  lehet.

### 5.5. Kvázi-kiálló pólusú forgórész megvalósítása

Első megközelítésben egy kiálló pólusú elrendezést imitáló forgórészt valósítottam meg, mivel az ehhez szükséges lapos mágnesek viszonylag nagy választékban beszerezhetők. A mágneseket egy esztergált bakelit törzshöz ragasztottam fel, két póluspárszámú forgórész lévén az egyes pólusokat a kerület mentén felváltva helyeztem el. Az elkészült alkatrész az 5.4. ábrán látható.



5.4. ábra. Az elkészített kvázi-kiálló pólusú forgórész

Először pólusonként egy darab mágneszt rögzítettem a bakelit törzshöz, ekkor azonban olyan nagy volt a légrés mérete, hogy a kapcsolokon mérhető trapezoid jelalak csúcstól csúcsig mért értéke  $400 \text{ min}^{-1}$  fordulatszámon  $5 \text{ V}$  körül alakult. Ez a feszültség szint ilyen magas fordulatszámon számomra nem volt megfelelő, ezért beragasztottam a második sor mágnesét is. Ezzel a módosítással elméletileg növelhető a kapcsolófeszültség amplitúdója a légrés csökkenése miatt. Azonban ez a megoldás a gyakorlatban nem vált be, mert a ritkaföldfém mágnesek nagy remanens indukciója miatt az állórész vastestével záródó mágneses tér sokszorosára növelte indítónyomatékot. Szintén problémának bizonyult, hogy forgás közben a gép egyenetlenül járt, óhatatlanul megnövelve ezzel a tengely és csapágyazás igénybevételét.

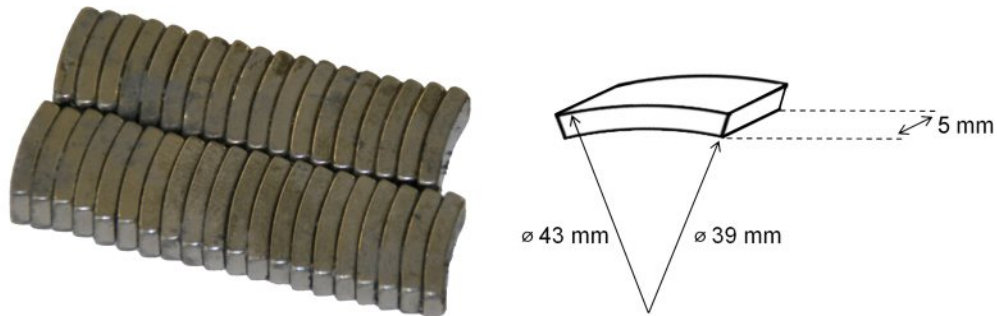
### 5.6. Kvázi-hengeres forgórész megvalósítása

A hengeres forgórészt elkészítéséhez szükséges különböző térerősségű mágnesszegmenseket nem tudtam beszerezni, így egy állandó nagyságú, a kerület mentén diszkrétan váltakozó gerjesztésű forgórészt valósítottam meg, amelyet beépítve a légrés nagysága is állandó lesz.

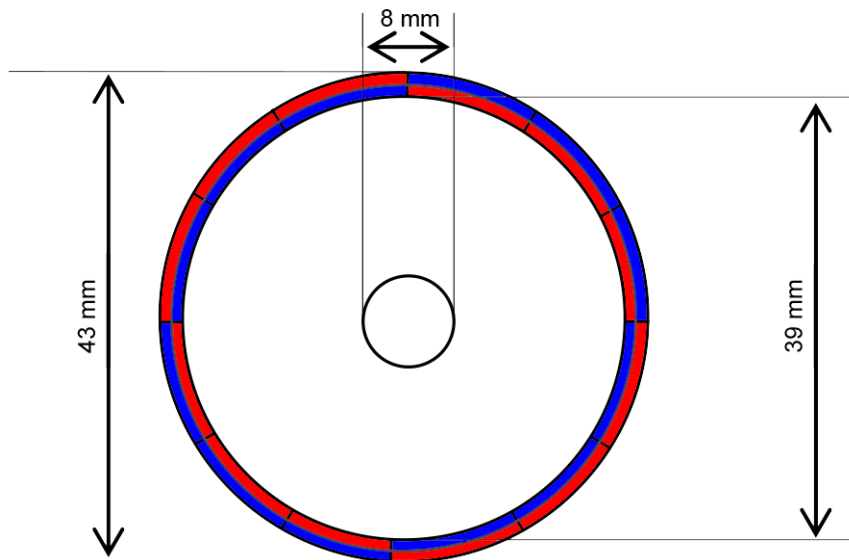
#### 5.6.1. A felhasznált mágnes típus ismertetése

A kvázi-hengeres forgórész elkészítéséhez radiálisan, váltakozó polaritással mágnesezett N45H-típusú mágneseket használtam (5.5. ábra). A szegmensekből tizenkét darab összeilleszt-

ve egy  $39\text{ mm}$  belső és  $43\text{ mm}$  külső átmérőjű kört alkot, ennek alapján megterveztem az 5.6. ábrán látható forgórészt.



5.5. ábra. A felhasznált radiális mágnesezettségű szegmens szett



5.6. ábra. A tervezett kvázi-hengeres forgórész

A szegmensekből az esztergáltatott  $39\text{ mm}$  külső átmérőjű lágyvas hengerre kétkomponensű fémragasztó segítségével három sávot alakítottam ki. Az így előállított mezőgörbével az *A szélenergia-átalakító rendszer modellezése* című fejezetben foglalkozom részletesebben.

### 5.6.2. A megvalósított kvázi-hengeres forgórész és adatai

A későbbi felhasználás céljából az 5.1. táblázatban összefoglaltam a megvalósított forgórész adatait. Az 5.7. ábrán a szegmensek felragasztásának egyik fázisa és az elkészült forgórész látható. Mint ahogy azt a *Tesztmérések* fejezetben látni fogjuk, ez a forgórész-változat megfelelőnek bizonyult, így ez került beépítésre.

| Paraméter megnevezése                                      | Paraméter értéke |
|------------------------------------------------------------|------------------|
| A forgórész átmérője ( $d_r$ )                             | 43 mm            |
| A felhasznált NdFeB-alapú mágnes típusa                    | N45H             |
| Póluspárok száma ( $p$ )                                   | 2                |
| Összes szegmens száma                                      | 12 db            |
| Az egy pólustörzsre jutó szegmensek száma                  | 3 db             |
| N45H-típusra megadott névleges remanens indukció ( $B_r$ ) | 1,36 T           |
| N45H-típusra megadott névleges koercitív erő ( $H_c$ )     | 1050 kA/m        |

5.1. táblázat. A beépített állandó mágneses forgórész adatai



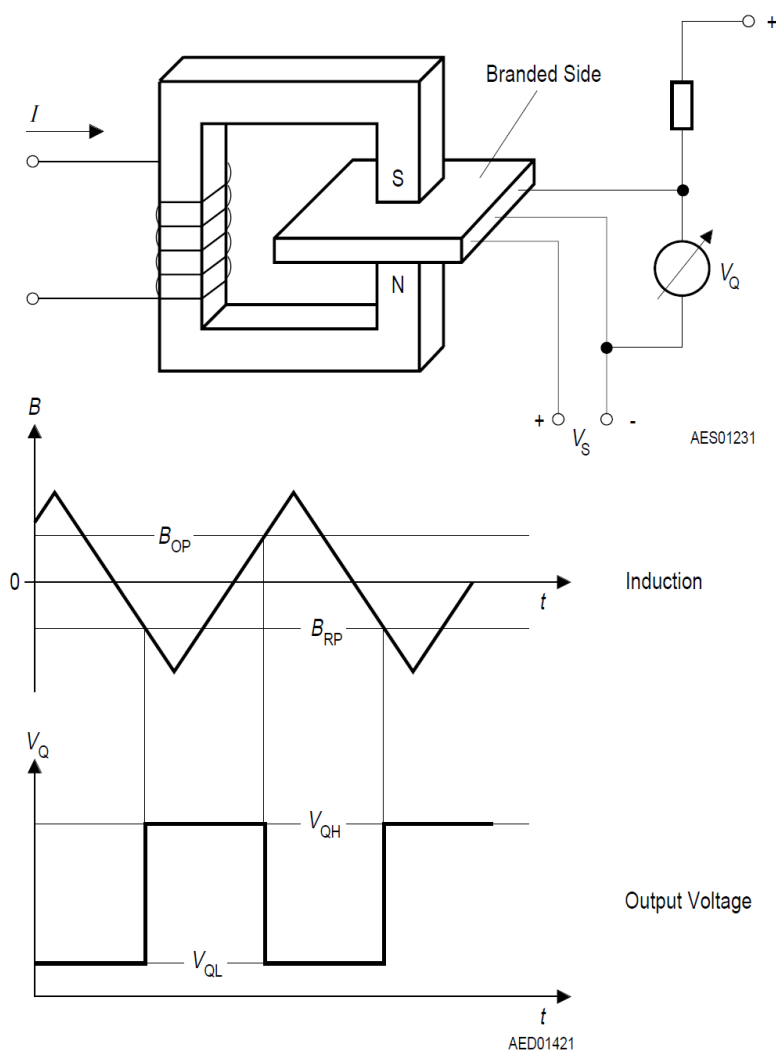
5.7. ábra. Az elkészített kvázi-hengeres forgórész

## 6. Fordulatszámérés megvalósítása

### 6.1. Érzékelés

A generátor működésének megfelelő jellemzéséhez elengedhetetlen a pillanatnyi fordulatszám ismerete. Mivel a lézeres fordulatszámérés biztonságosan nem volt kivitelezhető és nem is lett volna célszerű, ezért a fordulatszámérés megvalósítására egy integrált Hall-szenzort használtam. Választásom azért erre a megoldásra esett, mert így a fordulatszámérés viszonylag egyszerűen automatizálható és felhasználhattam a forgórész elkészítése után megmaradt mágnesszegmenseket.

A fordulatszám érzékelés megvalósításához TLE4945L típusú, kapcsoló kimenetű bipoláris Hall-szenzor IC-t használtam. Az integrált áramkör működésének vázlata a 6.1. ábrán látható. Amikor a Hall-szenzor jelölt oldala pozitív mágneses térbe kerül, akkor a  $B_{OP}$  nagyságú bekap-

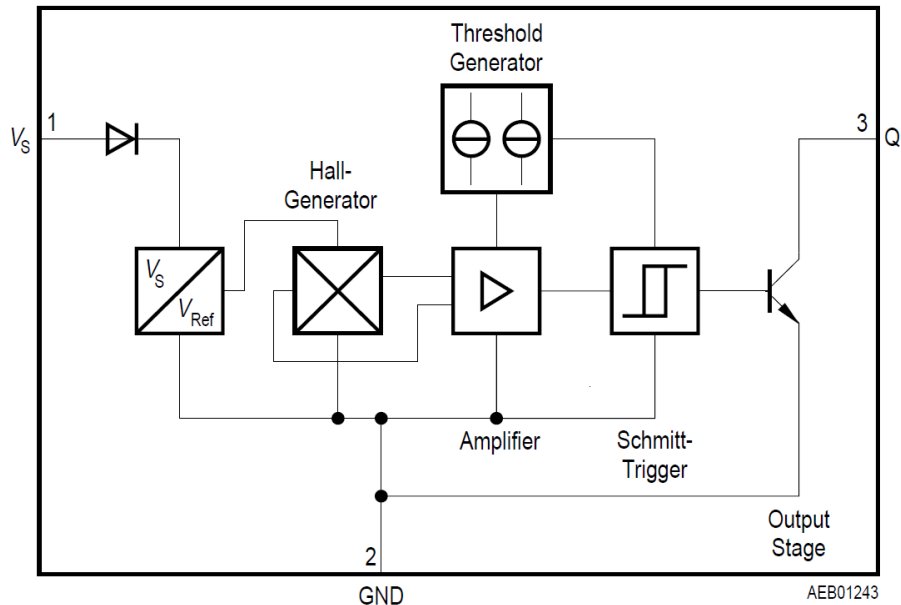


6.1. ábra. A felhasznált bipoláris Hall-szenzor működésének vázlata [13]

csolási indukció elérésekor a kimenet vezetni fog. Ellentétes polaritású mágneses tér hatására a

vezetés megszűnik.

Az eszköz adatlapjából [13] kiolvasható, hogy a szenzor működéshez  $3,8 - 24\text{ V}$  tápfeszültség szükséges és rendelkezik fordított polaritás elleni védelemmel. A 6.1. ábrán látható jelalakot 6.2. ábrán bemutatott áramkör állítja elő. Lényege, hogy a Hall-elemben indukálódó feszültség az erősítést követően egy Schmitt-triggerrel kapcsol, ami egy nyitott-kollektoros tranzisztort vezérel.



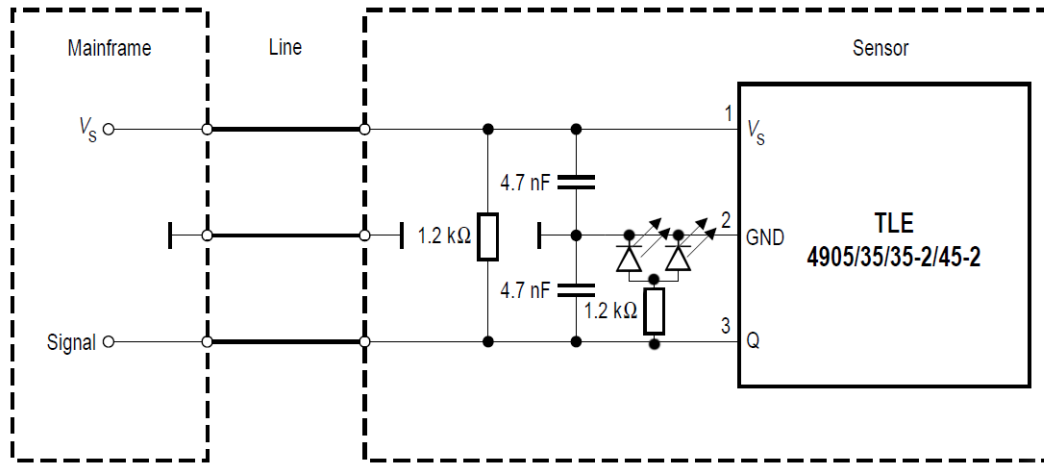
6.2. ábra. A felhasznált bipoláris Hall-szenzor áramköri vázlata [13]

A forgórész elkészítéséhez is használt N45H permanens mágnesek nagy remanens indukciója miatt a Hall-szenzor elhelyezését illetően elegendő volt arról gondoskodni, hogy kellően közel kerüljön a váltakozó polaritású mágneses térhez. Ezt a mágneses teret a generátor tengelyére illesztett,  $39\text{ mm}$  külső átmérőjű fakorongra ragasztott mágnesszegmensekkel hoztam létre, amely a 6.3. ábrán látható.



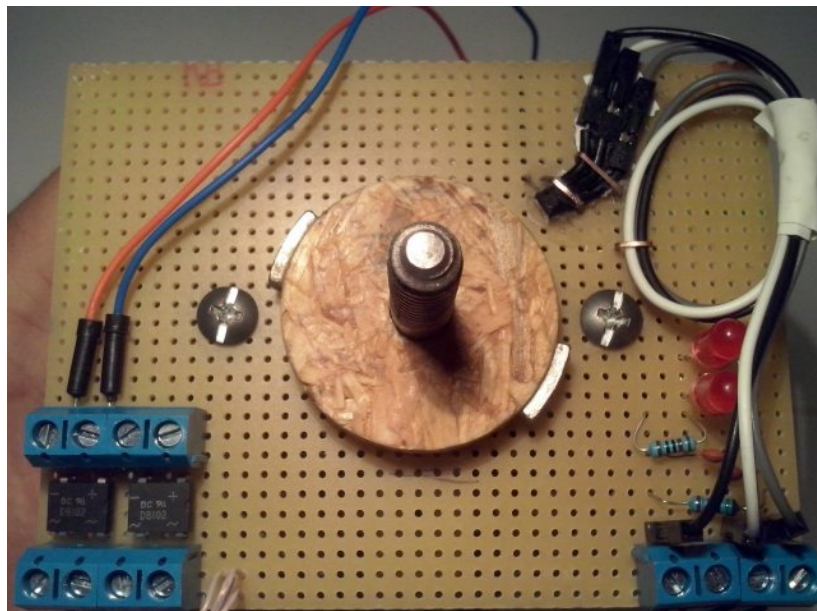
6.3. ábra. Az elkészített mágneses jeladó

Ezután a Hall-szenzor működtetéséhez szükséges áramkör összeállítása következett, amelynek alapjául az eszköz adatlapjában [13] szereplő kapcsolás szolgált. Ezt kiegészítettem a szenzor  $Q$  jelkimenetére nyitóirányban kapcsolt két darab led-del, hogy a szenzor esetleges meghibásodása egyszerűen detektálható legyen.



6.4. ábra. A fordulatszám érzékelésre felhasznált áramkör

A 6.4. ábrán a megvalósítandó áramkör mellett a Hall-szenzor kimeneti jelalakjának feldolgozásához szükséges elrendezés is látható. Az áramkört egy  $75 \times 100 \text{ mm}$  méretű forrszemes próba NYÁK-ra készítettem el, a rögzítésére a gép pajzsán eredetileg is meglévő furatokat használtam. A forrasztási oldalt gumialátétekkel szigeteltem el a generátor fémtestétől.

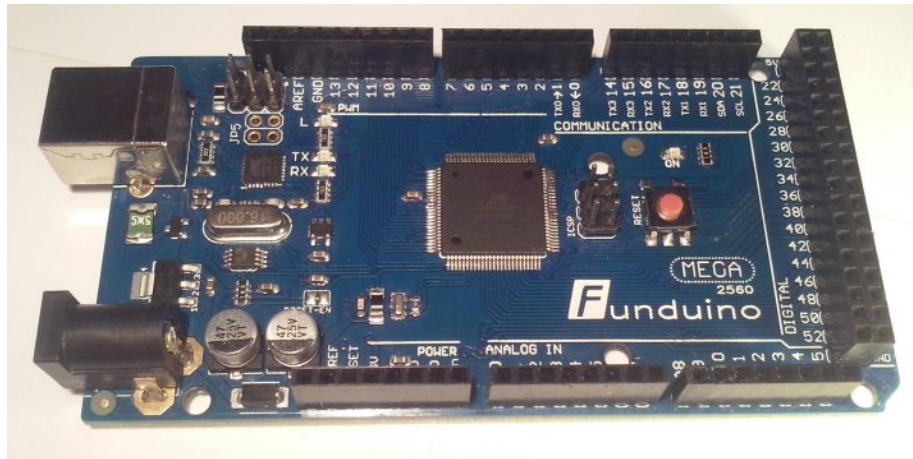


6.5. ábra. A fordulatszám érzékelést és egyenirányítás megvalósító áramkör [13]

A 6.5. ábrán látható áramkörön a fordulatszám érzékelést végző kapcsoláson kívül fázisonként egy-egy integrált egyenirányító diódahidat is elhelyeztem. A villamos kontaktusok kialakítására menetes sorkapcsokat használtam.

## 6.2. Mérés

A Hall-szenzor kimeneti jelalakjának feldolgozáshoz és a fordulatszámérés megvalósításához a 6.6. ábrán látható Funduino Mega 2560 R3 fejlesztőkártyát használtam, amelyen egy Atmel ATmega2560 mikrokontroller található. A fejlesztőkártya a mikrokontroller számára szükséges összes segédberendezést tartalmazza, elősegítve a gyors és forrasztásmentes prototípus fejlesztést. A lehetőségek tanulmányozása után arra a következtetésre jutottam, hogy az Arduino platform jelenti a megfizethető és kompatibilitási problémákkal kevésbé küszködő alternatívát a mikrokontrolleres alkalmazások területén.



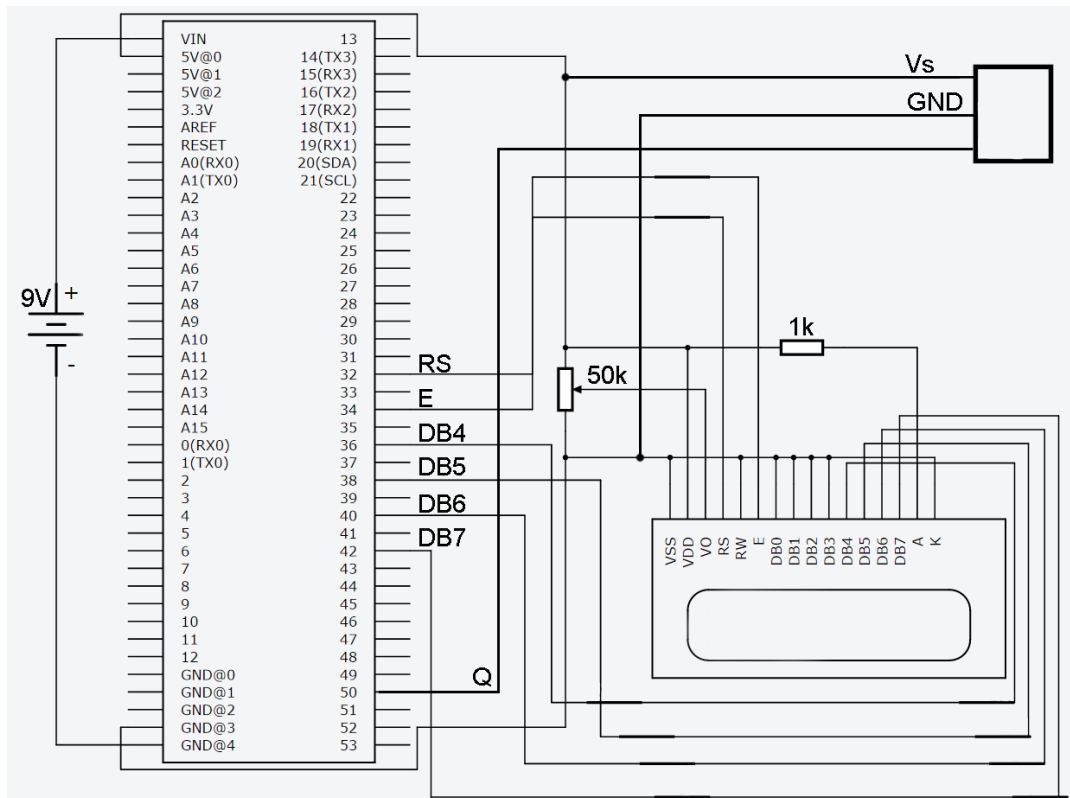
6.6. ábra. A méréshez használt Funduino Mega 2560 R3 fejlesztőkártya

A fejlesztőkártya tápfeszültsége 7 – 12V tartományon tetszőlegesen választható, amelyet én a beépített DC-csatlakozón keresztül egy 6F22/6LR61 9V alkáli elemről biztosítottam. A fordulatszámérést végző programot az Arduino IDE 1.0.5-r2 verziójával készítettem.

Az algoritmus lényege, hogy egy beépített függvény segítségével mérem azt az időtartamot, ami a Hall-szenzor kimenetének megfelelő logikai érték változásáig eltelik. Ez az időtartam  $1/2$  geometriai periódusidőnek felel meg. Ezután a gép fordulatszáma és a villamos frekvencia egyszerű összefüggések alapján számítható, a forráskód megtalálható a CD-mellékleten.

## 6.3. Megjelenítés

A továbbiakban a mennyiségek vizuális megjelenítéséről is gondoskodnom kellett, amelyhez egy TC1602A-01T típusú LCD modult használtam. A kijelző 16x2 karakter megjelenítésére képes, háttérvilágítással és változtatható kontraszttal rendelkezik. Tápfeszültsége 5V, ami a fejlesztőkártya megfelelő kivezetésén rendelkezésre áll. A pontos bekötés vázlatát a 6.7. ábra szemlélteti. A kijelzőt négy bites üzemmódban vezéltem, ezért a  $D_{B0} - D_{B3}$  lábakra nem volt szükségem és azokat földpotenciálra kapcsoltam. A kontraszt beállítására egy 50 k $\Omega$ -os lineáris potenciométert alkalmaztam. A háttérvilágítás anódjára egy soros 1 k $\Omega$ -os ellenálláson keresztül kapcsoltam a tápfeszültséget. A Hall-szenzor  $Q$  kimenetét a fejlesztőkártya 50-es lábára kapcsoltam.

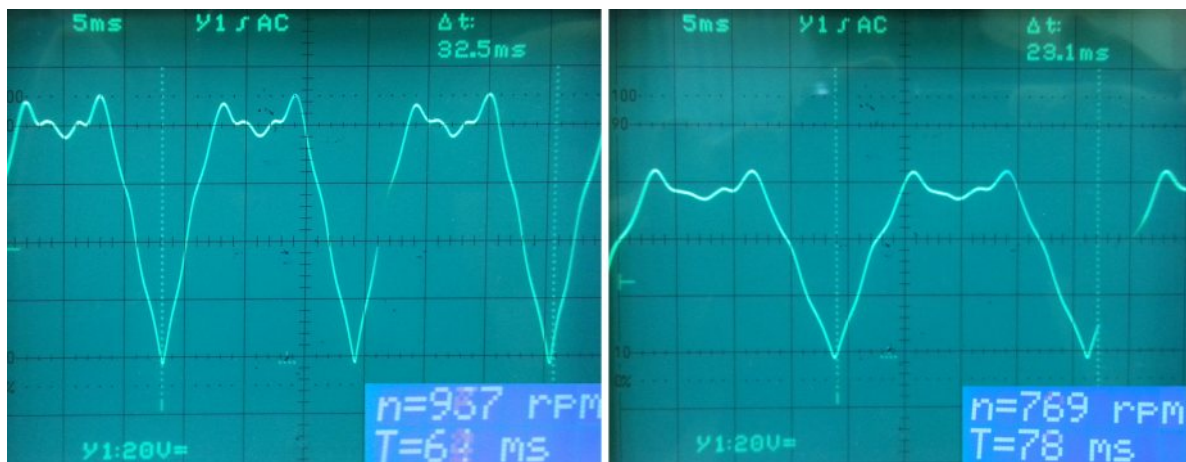


6.7. ábra. A fordulatszámérést végző áramkör vázlata

#### 6.4. Hitelesítés

A fordulatszámérő berendezés ellenőrzéséhez különböző fordulatszámokon vizsgáltam az egyenirányított kapocsfeszültség periódusidejét. Az LCD-kijelzőn látható értékek:  $n = [\text{min}^{-1}]$  a generátor fordulatszáma és  $T = [\text{ms}]$  a geometriai periódusidő. A mérési hibák nem nagyságrendiek és betudhatók az oszcilloszkóp mérővonalak pontatlan beállításának. A mérések a 6.8. ábrán láthatók.

Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a fordulatszámérő helyesen működik.

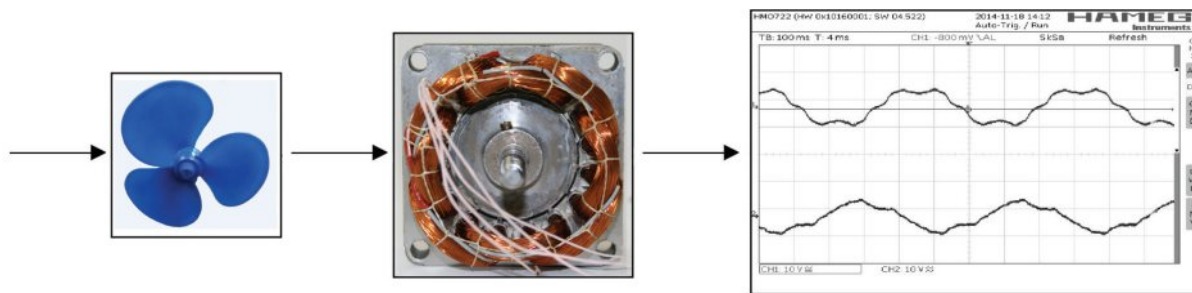


6.8. ábra. A fordulatszámérés hitelesítése különböző fordulatszámokon

## 7. A szélenergia-átalakító rendszer modellezése

### 7.1. A modellezés feltételeinek rögzítése

A szélenergia-átalakító rendszer többszintű energiakonverziót valósít meg, a folyamat vázlatosan a 7.1. ábrán látható. Az áramló légtömeg kinetikai energiáját a szélturbina alakítja át mechanikai energiává, amit mágneses tér közvetítésével egy villamos forgógép alakít át villamos energiává.



7.1. ábra. A modellezendő szélenergia-átalakító rendszer vázlata

A folyamat teljes leírása összetett interdiszciplináris feladat, ezért a modellezésem célja nem a rendszer pontos jellemzése, hanem egy modell alapú szabályozó elkészítéséhez szükséges alapvető összefüggések és eddigi megállapításaim formális kifejezése, rendszerezése. A szélenergia-átalakító rendszer elkészítését az alábbi feltételek és megkötések mellett végeztem.

#### 7.1.1. A korábbi vizsgálatokból származó feltételek

A *turbina vizsgálata* című fejezetben tett megállapításaim alapján a turbinára vonatkozóan feltételezem, hogy

- a turbinát hajtó szél iránya időben állandó és a lapátok fősíkjára merőleges,
- a széllokések hatása elhanyagolható, turbulencia nem jelentkezik,
- a levegő sűrűségének hőmérséklet-és nyomásfüggése elhanyagolható,
- az optimális fordulatszám-tartomány csak a villamos gép jellemzőitől függ,
- a lapátok állásszöge rögzített, azaz a turbina geometriája időben állandó,
- a turbina formatényezője szélesebségtől független 0,01 értékű konstans,
- a turbina tengelyének mechanikai veszteségei elhanyagolhatók.

#### 7.1.2. Feltételek az állandó mágneses szinkron generátorra

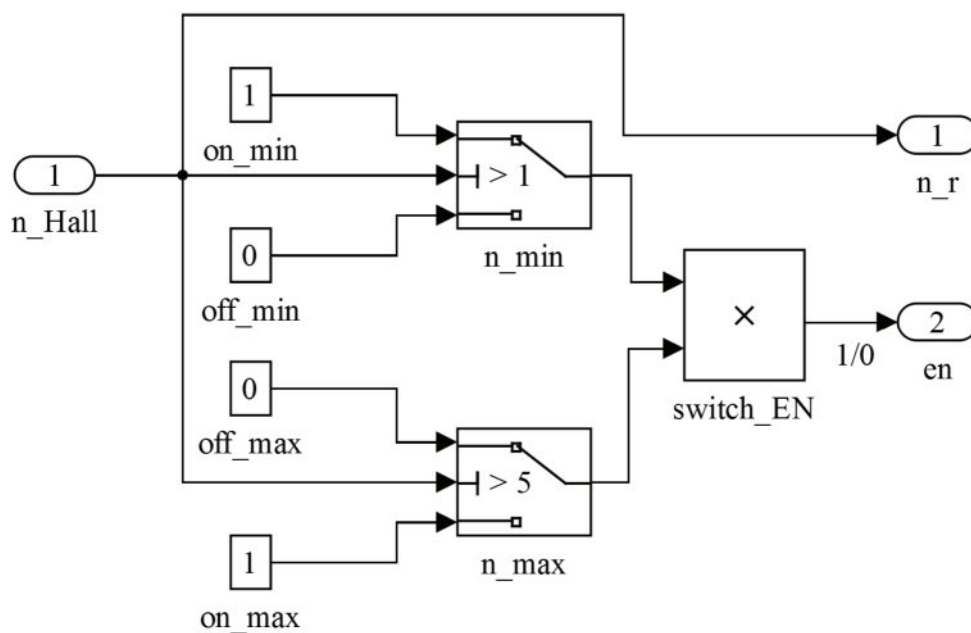
A megépített generátor ismert paraméterei alapján és az elméleti működés közelítésének érdekében feltételezem, hogy

- az állórész tekercselése és a forgórész mágneses tere szimmetrikus,

- az állórész és a forgórész póluspárjainak száma 2,
- a forgórész gerjesztése időben állandó,
- a forgórész egy pólus alatt lévő szegmensei között a mágneses tér homogén és folytonos,
- a forgórész és az állórész mágneses tere teljes csatolásban van,
- az állórész permeabilitása végtelen, vastelítés nem alakul ki,
- a villamos és mechanikai csatlakozások veszteségei elhanyagolhatók.

## 7.2. A turbina modellezése

Tekintve, hogy az általam felhasznált géptípus egy állandó mágneses szinkron generátor, kijelenthetjük, hogy a modellezendő rendszer közvetlen bemenete a pillanatnyi szélesség. A valóságban minden szélturbina esetében megadható egy üzemi szélesség-tartomány, amelynek alsó határa a gazdaságos, felső határa a biztonságos működést hivatott biztosítani. A szélesség mérése helyett a Hall-szenzoros fordulatszámérő felhasználásával a modellezett rendszer bemenetének pillanatnyi fordulatszámot tekintem. Az üzemi tartományt  $1 - 5 \text{ s}^{-1}$  közé választottam, amelynek jelentősége egyelőre csak koncepcionális, de összhangban van az üzemi szélesség-tartomány elvével. Ez alapján összeállítottam a termelést engedélyező logikát, melyet a 7.2. ábra mutat. A modellezés során „r” alsó indexszel jelölöm a forgórész, míg „w”



7.2. ábra. A termelést engedélyező logika

alsó indexszel az állórész, „p” alsó indexszel pedig a turbina mennyiségeit.

Első megközelítésben a fordulatszámot, mint bemenetet egy konstans értéként vettem figyelembe. A bemenet után elhelyezett kapcsolás feladata, hogy csak a meghatározott fordulatszám-tartományban engedélyezze a termelést, vagyis esetünkben a terhelés rákapcsolását az állórész kivezetéseire, ahogy ez a megadott feltételek szerint a 7.3. ábrán is látható.

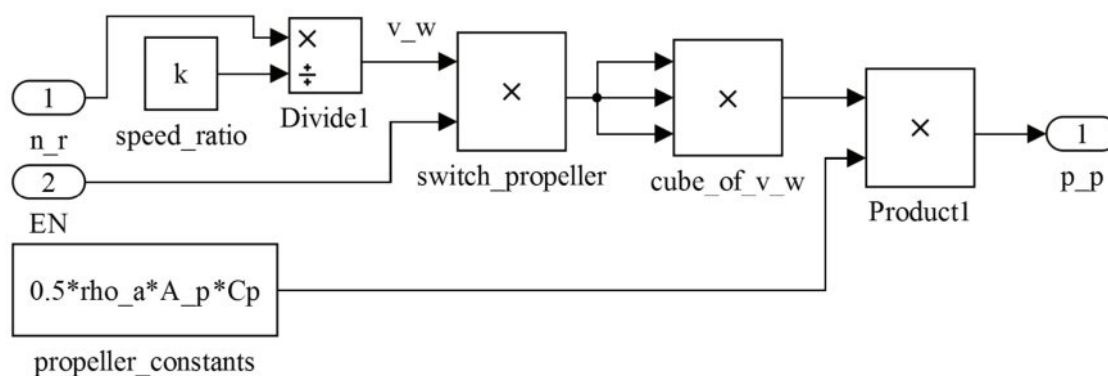


7.3. ábra. A termelést engedélyező logikai működése (—) és a fordulatszám (—)

A megadott fordulatszám-tartományon kívül a gép üresjárásban forog.

A valóságban a minimális szélssebesség érték alatt a tengelyt fékezik vagy terheletlenül járatják. A maximális érték felett általában a turbinalapátokat mechanikusan kifordítják a szél irányából, vagy rövidre zárják a gépet. Ez utóbbi szélsőséges esettel a gépészeti vonatkozások miatt a továbbiakban nem foglalkozom.

A korábban tárgyalt összefüggések alapján összeállítottam az elméleti turbinateljesítményt számító blokkot (7.4. ábra), ahol  $k$ -val jelöltem a mért fordulatszám és a tényleges szélssebesség hányadosát, értékét 1-nek vettem.

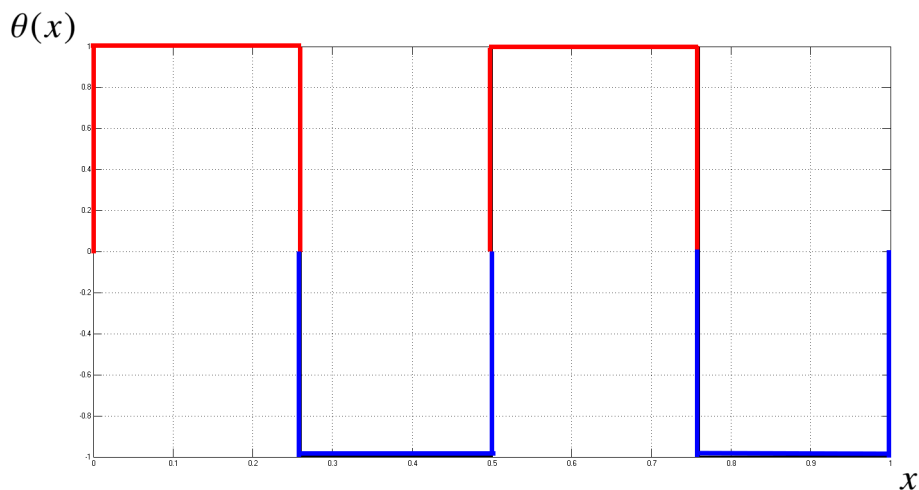


7.4. ábra. Az elméleti turbinateljesítmény számítása

### 7.3. Az indukált feszültség előállítás

A gép tengelyére illesztett forgórész feladata generátorok esetében az, hogy külső forgatónyomaték hatására létrehozza a kerület mentén, az idő függvényében váltakozó mágneses teret,

amely majd az armatúrában váltakozó feszültséget indukál. [9] Az elkészített állandó mágneses forgórész kvázi-hengeres kialakítású, azaz a légrés nagysága állandó, de a pólusgerjesztés nincs elosztva a pólustörzs mentén, mint ahogy az a klasszikus hengeres forgórészek esetén lenni szokott. Amennyiben feltételezzük, hogy a forgórész egy pólus alatt lévő szegmensei között a mágneses tér homogén és folytonos, úgy a  $\theta(x)$  gerjesztési görbe egy periódusra nézve a 7.5. ábrán látható módon alakul.



7.5. ábra. Az egységnyi amplitúdójú gerjesztési görbe egységnyi kerületre vetítve

Ha feltételezzük, hogy a forgórész és az állórész mágneses tere teljes csatolásban van, akkor az indukcióeloszlási görbe a gerjesztési görbével megegyező alakú, azaz  $b(x) = \theta(x)$ .

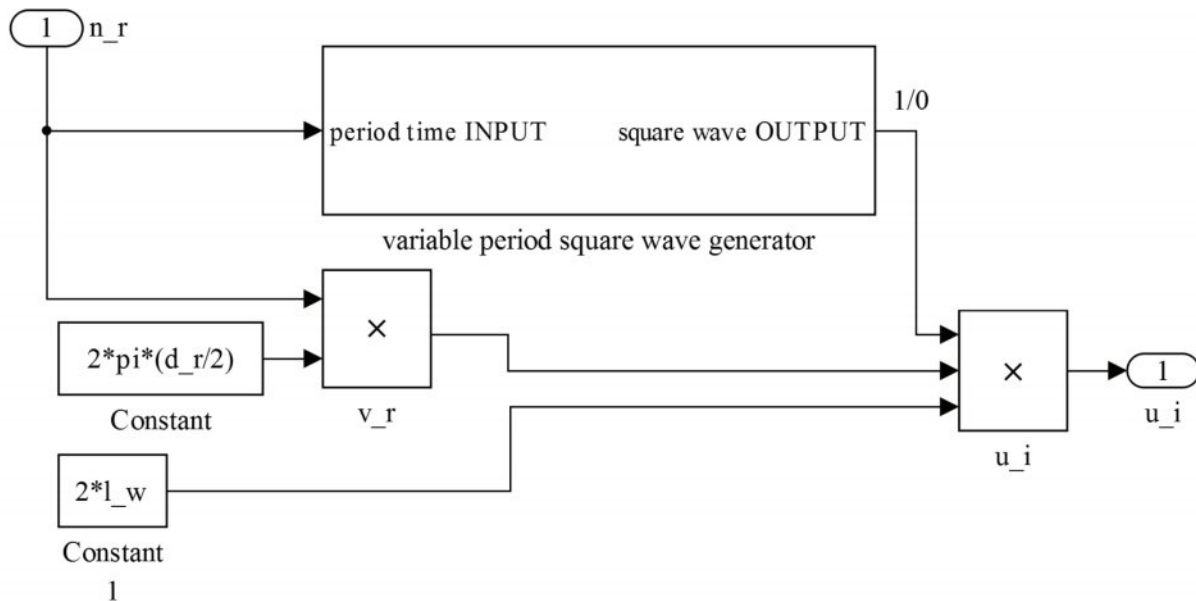
#### 7.4. Az állórész villamos összefüggései

A forgórész váltakozó irányú mágneses tere az állórész nyugvó tekercsrendszerében váltakozó feszültséget indukál: [9]

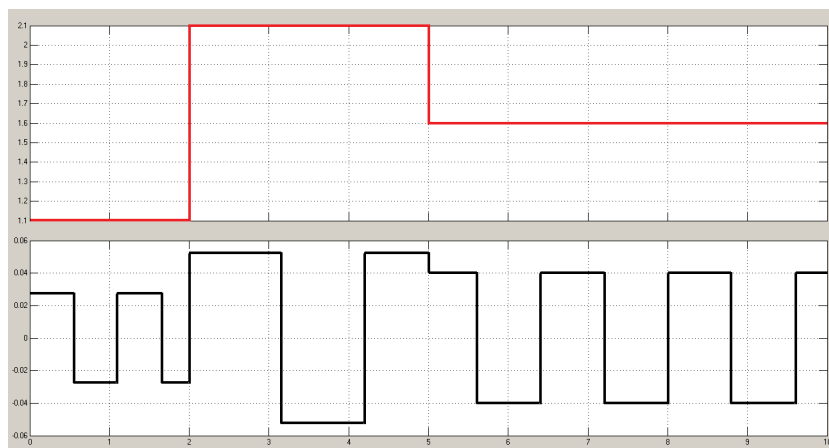
$$u_i(t) = 2 \cdot l_w \cdot v_r \cdot b(x) \quad (7.1)$$

ahol  $v_r$  a forgórész kerületi sebessége  $l_w$  pedig az állórésztekercs hatásos hosszúságú vezetője, amiről feltételezem, hogy megegyezik a fázistekercselés hosszával. Az  $u_i(t)$  időfüggvény jellegét az adott modellezési feltételek mellett a 7.5. ábrán látható gerjesztési (indukcióeloszlási) görbe jellege határozza meg. Az indukált feszültség létrehozásának menetét a (7.6.) ábra szemlélteti. Hogy ne csak egy adott állandósult fordulatszámra működjön a modell, ezért létrehoztam egy változtatható periódusidejű négyszögjel-generáló blokkot.

Ezután szimuláltam az indukált feszültség előállítását. Ahogy a 7.7. ábrán látható, a jel periódusideje a pillanatnyi fordulatszám függvényében változik.



7.6. ábra. Az indukált feszültség előállítására szolgáló blokk



7.7. ábra. Szimulált indukált feszültség (—) a fordulatszám (—) függvényében

### 7.5. A kapcsolófeszültség időfüggvénye

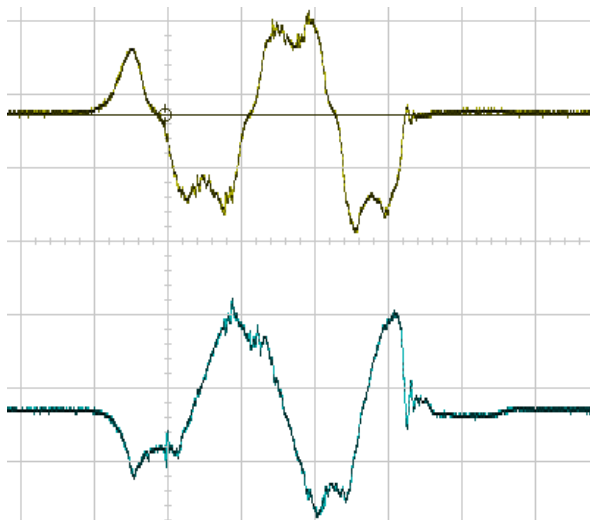
Mivel az állórész-tekerceslés tekercsfejei nincsenek külön-külön kivezetve, az indukált feszültség közvetlen vizsgálatára nem volt lehetőségem. Az összeszerelt generátoron üresjárási méréseket végrehajtva azt tapasztaltam, hogy a kapcsolófeszültség és a modellezett indukált feszültség között jellegbeli eltérés van. A valóságos kapcsolófeszültséget szemléltető ábrák a 8.3. alfejezetben találhatók.

A generátor működésének részletesebb modellezéséhez szükség lenne a forgórész mágneses terének műszeres vizsgálatára, amire nincs lehetőségem. Feltételezem, hogy a mágneses tér látható torzulása miatt jelentkezik a kapcsolófeszültség hullámossága. Ha ez így van, akkor a forgórész egy pólus alatt lévő szegmensei között a mágneses tér nem homogén, vagyis ez a modellezési feltétel nem teljesül.

## 8. Tesztmérések

### 8.1. Indítás

Rövid ideig tartó, egységugrás-szerű szelet irányítva a turbinára azt tapasztaltam, hogy a generátor forgásba hozásához nagy indítónyomaték szükséges. A bemenetet lekapcsolva a lég-tömegáramlás megszűnése miatt az állandó mágneses tér fékező hatására a generátor néhány fordulaton belül leáll, ahogy ez a 8.1. ábrán is látható.



8.1. ábra. Indítási tranziens és lecsengése

A 8.2. ábrán bemutatott jelenet a 2014-es ITDK-n készült a Pannon Egyetem Műszaki Informatikai Karán. Mint látható, a gép indításához szükséges nyomatékot a turbinák alacsony hatásfoka miatt szinte csak teljes csatolás esetén lehet üzemszerűen előállítani. A meghajtásra egy másik állóventilátor turbináját és egy hálózatról működtetett,  $2700 \text{ min}^{-1}$  üresjáratú fordulatszámú fűrógépet használtam.



8.2. ábra. Az indítás pillanatai, PE-MIK ITDK 2014 [14]

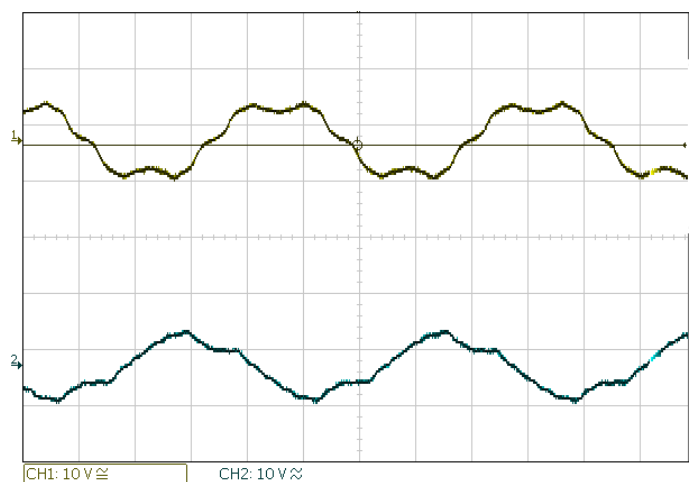
Az indításhoz a fúrógépet a maximális fordulatszám közelében kell járatni néhány másodpercig. A csatolás mértéke egy speciálisan szélhasznosításra tervezett turbinával vagy szélcsatornával lenne javítható. A bemutatott meghajtási mód másik hátránya, hogy az állandósult fordulatszám fenntartása meglehetősen körülményes. A kísérleti szél előállítását célszerűbb és biztonságosabb lenne egy rögzített berendezésről végezni. Egy mérhető fordulatszámú meghajtóeszközzel a turbina hatásfoka is becsülhető lenne, ami pontosabb modellezést tenné lehetővé.

## 8.2. Rövidre zárás

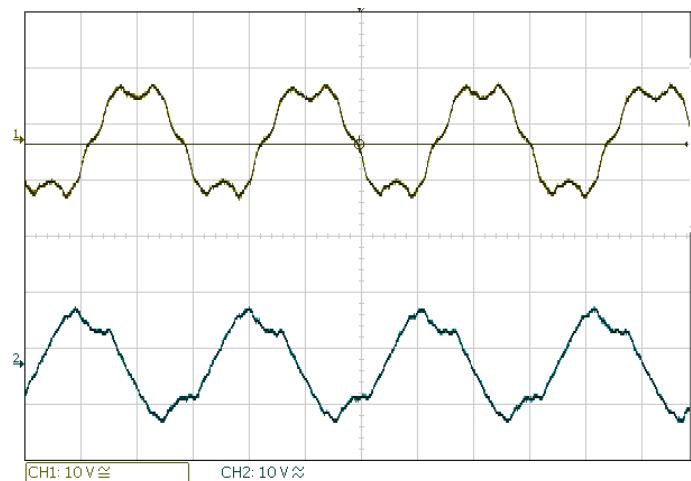
A generátor kapcsait rövidre zárva az indítónyomaték oly mértékben megnő, hogy a turbina felől nem, csak közvetlen tengelyhajtással hozható forgásba a gép. Az üresjárásban indított gépet alacsony fordulaton rövidre zárva szikrázást és jelentős fékezőhatást tapasztaltam. Egy megfelelő szabályozókörről kialakításával a gazdaságos üzemeltetési tartomány alá eső szélsősebesség esetén a nem forgásban lévő gépet rövidre zárva megvalósítható lenne a fékezés. A rövidzárási üzemiállapotot érintésvédelmi okokból a továbbiakban nem vizsgáltam.

## 8.3. Üresjárás

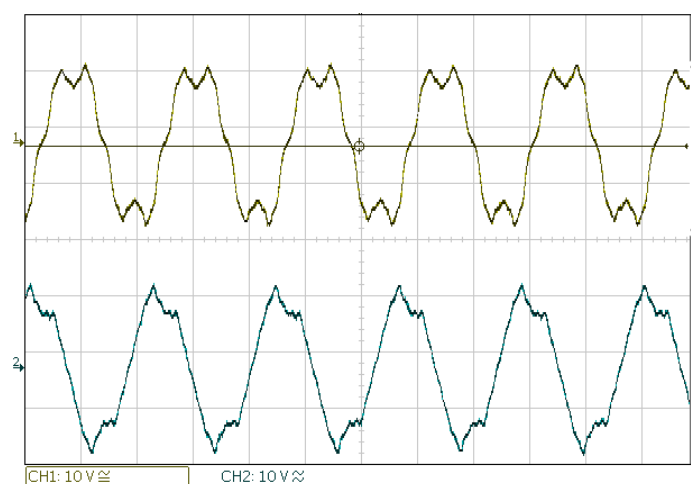
A terheletlen generátor kapocsfeszültségét különböző fordulatszámokon vizsgáltam. A mérések során megfigyeltem, hogy a PMSM és BLDC gépek kapocsfeszültségére hasonlító trapezoid jelalak amplitúdója az állandó mágneses gerjesztésből kifolyólag csakis a pillanatnyi fordulatszámtól függ. Az üresjárási vizsgálatok a hozzájuk tartozó fordulatszámmal a 8.2. – 8.7. ábrákon láthatók.



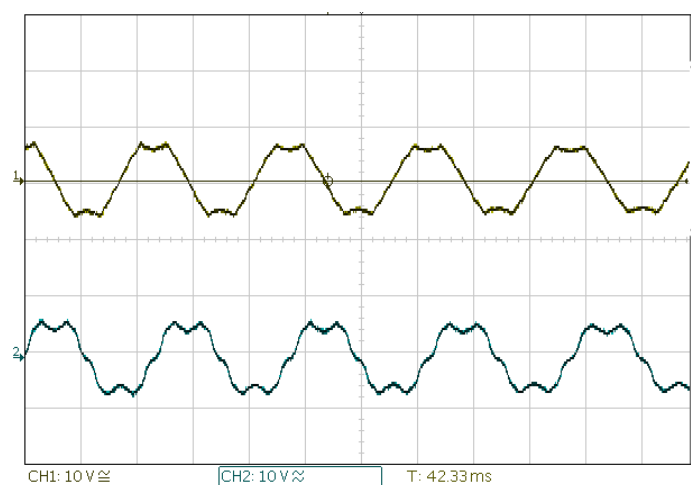
8.3. ábra. A generátor kapocsfeszültsége üresjárásban ( $100 \text{ min}^{-1}$ )



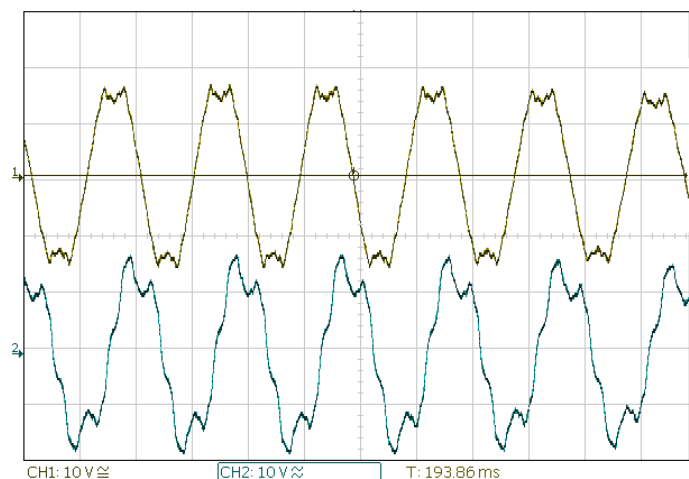
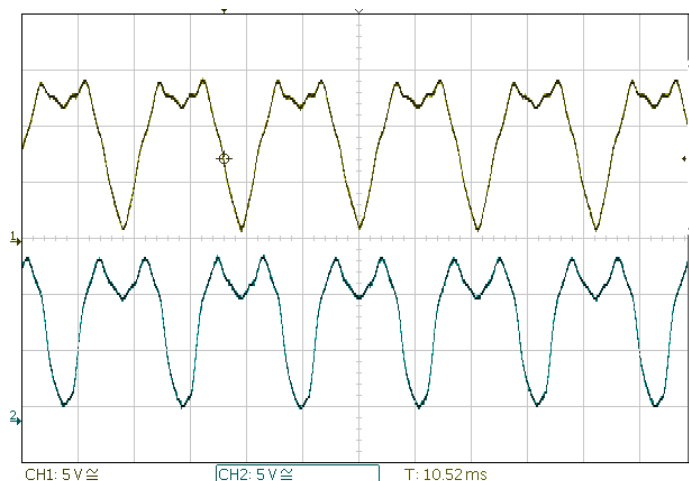
8.4. ábra. A generátor kapocsfeszültsége üresjárásban ( $200 \text{ min}^{-1}$ )



8.5. ábra. A generátor kapocsfeszültsége üresjárásban ( $400 \text{ min}^{-1}$ )



8.6. ábra. A generátor kapocsfeszültsége üresjárásban ( $700 \text{ min}^{-1}$ , 1/10)

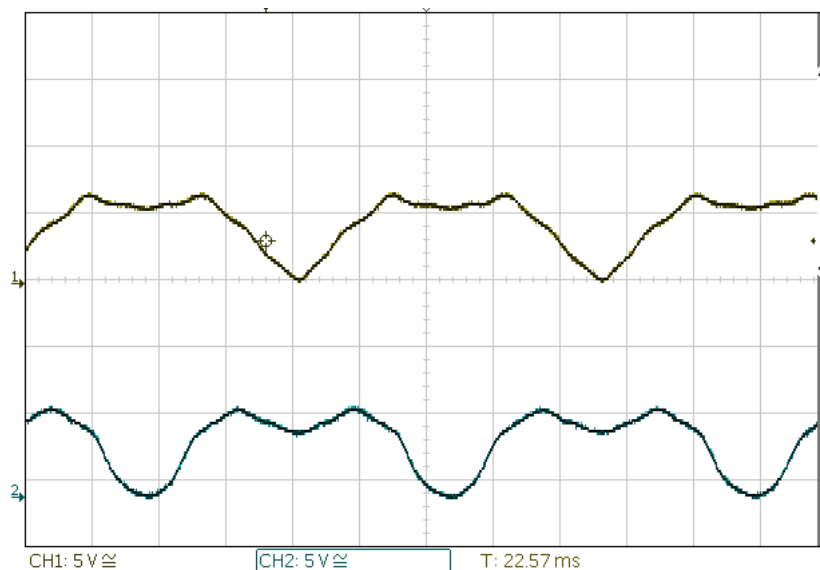
8.7. ábra. A generátor kapocsfeszültsége üresjárásban ( $1500 \text{ min}^{-1}$ , 1/10)8.8. ábra. Egyenirányított kapocsfeszültségek üresjárásban ( $200 \text{ min}^{-1}$ )

#### 8.4. Terhelt üzemállapot

Míg nem állt rendelkezésemre fordulatszám-mérő berendezés, addig a generátor terhelés alatti vizsgálatát csakis izzólámpák segítségével végeztem. A terhelés rákapcsolásával a tekercsekben meginduló áram hatására mezőgyengítés jön létre, amely csökkenti az indukált feszültség amplitúdóját. A mérések szerint ez a kapocsfeszültség hullámosságának csökkenését eredményezi.

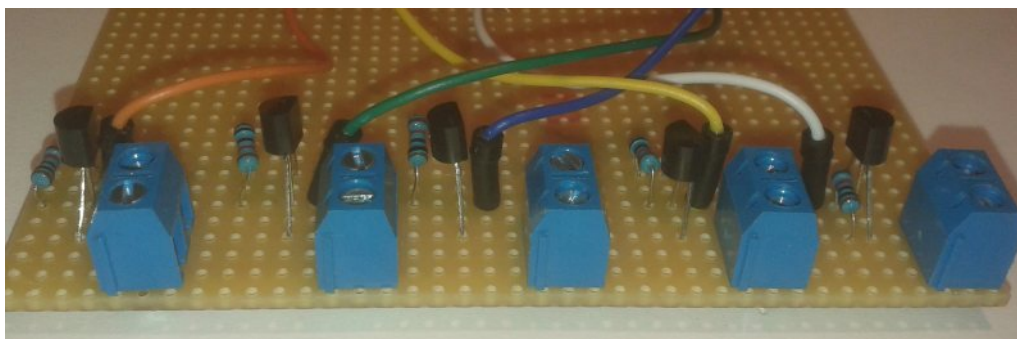
A 8.9. ábrán látható jelalakokat fázisonként egy-egy 12V 1,2W műszerfalizzó segítségével állítottam elő, az izzókat az egyenirányító hidak kimenetére kötöttem. A terhelés rákapcsolásakor a gép fordulatszáma és kapocsfeszültsége lecsökkent, majd a bemenet változatlansága mellett a fordulatszám állandósult. További fogyasztók rákapcsolásával a gép könnyedén túlterhelhetővé vált. Próbaképp egy 230V 60W izzólámpával is vizsgáltam rövid ideig a gép viselkedését. A fűrógép maximális fordulatszámának közelében, a terhelést egy kétállású kapcsolóval ráadva a lámpa felizzott és érezhetően melegedett, a fordulatszám jelentősen csökkent.

Az eddigi vizsgálatok alapján az állapítottam meg, hogy előre kapcsolt terhelésekkel a gép



8.9. ábra. Egyenirányított kapocsfeszültségek a terhelés rákapcsolása után

nem indítható. A fordulatszámérő elkészítése után egy olyan vezérelhető áramkört terveztem, amellyel indításkor a gép terheletlen, a fordulatszámától függően pedig négy darab sorba kötött 12V 1,2W műszerfalizzó kapcsolható az egyik fázis kapcsaira. A vezérlés megvalósításához a korábban bemutatott Funduino Mega 2560 R3 fejlesztőkártyát használtam. A 8.10. ábrán a vezérlést végző áramkör látható összeszerelés előtt.



8.10. ábra. A fordulatszám arányos terhelést vezérlő áramkör

A mikrokontrollerre töltött programmal öt darab n-csatornás, növekményes módú mosfet-et vezérlek. Ezek közül az egyik a termelést engedélyezi, egy második fet-tel pedig bekapcsolható a megfelelő számú izzólámpa.

Az elkészített áramkör a fordulatszámmérővel, kijelzővel, fejlesztőkártyával és annak tartozékaival együtt került beépítésre a 8.11. ábrán látható dobozba.



8.11. ábra. Az összeszerelt elektronika, fogyasztókkal és kijelzővel

| Bekapcsolt izzók száma | Fordulatszám [ $\text{min}^{-1}$ ] | Becsült teljesítmény [W] |
|------------------------|------------------------------------|--------------------------|
| 0                      | $n < 20$                           | 0 W                      |
| 1                      | $100 < n < 200$                    | max. 1, 2 W              |
| 2                      | $200 < n < 400$                    | max. 2, 4 W              |
| 3                      | $400 < n < 500$                    | max. 3, 6 W              |
| 4                      | $500 < n < 650$                    | max. 4, 8 W              |

8.1. táblázat. A terhelés-automatikával végzett mérések eredményei

A kapcsolási fordulatszámokat több lépésben határoztam meg az izzók fényereje alapján. A 8.1. táblázatban megadott kapcsolási szintekkel az izzók közel teljes fényerősséggel világítanak az egyes fokozatokban, vagyis a névleges teljesítményük közelében vannak üzemeltetve.

A bemutatott mérések alapján összességében elmondható, hogy a generátor teljesíti a kitűzött célokat. További tesztmérés tárgya lehet például a fázisok szimmetrikus terhelésének esete.

## Összefoglalás, eredmények, jövőbeni tervek

A szélenergia hasznosításán alapuló villamosenergia-termelés a téma korszerűsége és összetettsége miatt számomra ideális kutatási terület volt. A deszkamodell elkészítése során számos tapasztalatra tettem szert, főként a villamos forgógépek témakörében.

A természettudományos összefüggéseket megismerve feltártam egy kisteljesítményű kísérleti szélerőmű üzemeltetésének és modellezésének feltételeit. Ezek alapján egyedi villamos forgógépet terveztem és valósítottam meg, amelynek felhasználásával létrehoztam egy szélenergia-átalakító rendszer deszkamodelljét. A generátorhoz egy Funduino Mega 2560 R3 fejlesztőkártya segítségével mikrokontroller alapú Hall-szenzoros fordulatszám-mérést készítettem, megjelenítési funkciót is beépítve. A feldolgozott szakirodalom és vizsgálataim alapján MATLAB Simulink környezetben összeállítottam a szélenergia-átalakító rendszer irányítástechnikai modelljét, megteremtve ezzel egy modell alapú szabályozó létrehozásának lehetőségét. A generátor villamos jellemzőit különböző üzemállapotokban vizsgáltam. A mérésekkel a gép működésén túl a továbbfejlesztési lehetőségeket is feltártam.

A mérések alapján kijelenthető, hogy az elkészített szélenergia-átalakító rendszer teljesíti a kitűzött célokat, számos kiaknázatlan fejlesztési lehetőséget rejt magában, amelyekre a dolgozatom megfelelő pontjain javaslatokat tettem.

A deszkamodell szinten megvalósított szélenergia-átalakító rendszer korábbi változatával a PE-MIK ITDK 2014 Informatika Tudományi Szekciójában harmadik díjat nyertem, és továbbjutottam az országos fordulóba. Jövőbeli terveim között egy terhelés-optimalizálást végző szabályozókör elkészítése szerepel.

A pályamunka lezárásának dátuma: 2014. december 25.



8.12. ábra. A megvalósított kisteljesítményű kísérleti szélerőmű

## Alkatrészjegyzék

A deszkamodell és a segédberendezések elkészítéséhez a 8.2. táblázatban szereplő alkatrészeket használtam fel.

| Termék megnevezése                               | Egységár          | Mennyiség |
|--------------------------------------------------|-------------------|-----------|
| TS PF1614W állóventilátor (CM-165 Class B)       | 4.290,-Ft         | 1 db      |
| Állórész-tekerceselés (anyagköltség és munkadíj) | nem ismert        | 1 db      |
| 39 mm lágyvas henger (anyagköltség és munkadíj)  | 2.000,-Ft         | 1 db      |
| MMOT433905 forgórész mágnes-szegmensek           | 2.720,-Ft         | 4 szett   |
| Loctite 3450 Epoxi kétkomponensű fémragasztó     | 3.850,-Ft         | 1 db      |
| H25 PR 75x100mm forrszemes próba NYÁK            | 411,-Ft           | 1 db      |
| DG-306 menetes sorkapocs                         | 39,-Ft            | 11 db     |
| DB-102 egyenirányító diódahíd                    | 41,-Ft            | 2 db      |
| TLE4945L bipoláris Hall-szenzor                  | 331,-Ft           | 1 db      |
| Fakorong a jeladó mágnesek rögzítéséhez          | sk.               | 1 db      |
| Dupont kábel (apa-anya végek)                    | 633,-Ft           | 1 szett   |
| H25 PR 160x100mm forrszemes próba NYÁK           | 1.150,-Ft         | 1 db      |
| Funduino Mega 2560 R3 fejlesztőkártya            | 6.700,-Ft         | 1 db      |
| TC1602A-01T LCD-kijelző                          | 553,-Ft           | 1 db      |
| Próbapanel kábelek (apa-apa végek)               | 468,-Ft           | 1 szett   |
| STS-20P-K kétoldalú tűskesor                     | 200,-Ft           | 1 db      |
| Kétállású billenőkapcsoló                        | 220,-Ft           | 1 db      |
| GE műszerfalizzó (12V 1,2W)                      | 170,-Ft           | 4 db      |
| BS 170 FET                                       | 37                | 5 db      |
| TOM 0,5 RD vezeték                               | 65,-Ft            | 1 db      |
| TOM 0,5 BK vezeték                               | 65,-Ft            | 1 db      |
| 2,1 x 5,5 x 9 DC csatlakozó 1m kábellel          | 168,-Ft           | 1 db      |
| 6F22 / 6LR61 9V alkáli elem                      | 380,-Ft           | 1 db      |
| Elemcsatlakozó klipsz vezetékkel                 | 100,-Ft           | 1 db      |
| Egyéb passzív mikroelektronikai alkatrészek      | kb. 500,-Ft       | –         |
| <b>Összesen</b>                                  | <b>34.340,-Ft</b> |           |

8.2. táblázat. A felhasznált alkatrészek adatai

Az elkészült termék pontos reprodukálási költségeinek megállapításához árajánlat kérése szükséges az állórész tekerceselésének elkészítésére vonatkozóan. A felhasznált alkatrészek többsége a magyarországi elektronikai áruházak kínálatában az általam megadottaknál magasabb áron szerezhető be. A 8.2. táblázatban nem tüntettem fel a be nem épített egyéb alkatrészek, prototípus-változatok költségeit, ahogyan az alkatrészek beszerzése közben felmerült egyéb járulékos költségeket (pl. szállítási díj, útiköltség) sem.

## Irodalomjegyzék

- [1] Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság (MAVIR ZRt.),  
Széltermelési adatpublikáció  
<http://mavir.hu/web/mavir/szeltermeles>  
(szabadon hozzáférhető, nem letölthető adatbázis)
- [2] Országos Meteorológiai Szolgálat,  
Magyarország szél viszonyai  
[http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag\\_eghajlata/altalanos\\_eghajlati\\_jellemzes/szel/](http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/szel/)  
(letöltés dátuma: 2014. december 11.)
- [3] M. Ragheb,  
*Historical Wind Generators Machines*
- [4] Wikipedia,  
James Blyth (engineer)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Blyth\\_%28engineer%29](http://en.wikipedia.org/wiki/James_Blyth_%28engineer%29)  
(letöltés dátuma: 2014. december 11.)
- [5] mcensustainableenergy,  
Wind Turbine Design, Rotor Configuration  
<http://mcensustainableenergy.pbworks.com/ff/Picture2.jpg>  
(letöltés dátuma: 2014. december 11.)
- [6] Junji Tamura,  
*Calculation Method of Losses and Efficiency of Wind Generators*  
Springer, 2012.  
ISBN: 978-1-4471-2200-5
- [7] Maxon Motor Ag,  
EC 90 flat 244879 adatlap  
[http://www.maxonmotor.com/medias/sys\\_master/8813854916638/14-237-EN-Jun.pdf](http://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8813854916638/14-237-EN-Jun.pdf)  
(letöltés dátuma: 2014. november 2.)

- [8] Maxon Motor Ag,  
EC 90 flat 244879  
<http://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/motor/ecmotor/ecflat/ecflat90/244879>  
(letöltés dátuma: 2014. december 11.)
- [9] Dr. Retter Gyula,  
*Az egységes villamosgépelmélet*  
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976,  
ISBN: 963 10 0879 7.
- [10] Farkas András – Gemeter Jenő – dr. Nagy Lóránt,  
*Villamos gépek*  
BMF KKVFK-1176, 2006.
- [11] Dr. Jamniczky Árpád,  
*Villamos gépek üzemtana*  
VE 83/1984, 8/2012.
- [12] Magcraft ® – Advanced Magnetic Materials,  
*Permanent Magnet Selection and Design Handbook*  
National Imports LLC, 2007.
- [13] Infineon technologies,  
*Uni- and Bipolar Hall IC Switches for Magnetic Field Applications*
- [14] Pannon Egyetem Műszaki Informatikai Kar,  
ITDK 2014 Képgaléria  
<http://mik.uni-pannon.hu/hu/elet-a-mik-en/fotogaleriak/kepgaleria-2014/1181-tdk-konf-osz>