

## MEGFORDÍTHATÓ ÜZEMÜ, SZABADDUGATTYÚS STIRLING-HŐERŐGÉPRE TERVEZETT LINEÁRIS ALTERNÁTOR FEJLESZTÉSE ÉS MEGVALÓSÍTÁSA

### DESIGN AND DEVELOPEMENT OF A RECIPROCATING LINEAR ALTERNATOR FOR FREE PISTON STIRLING ENGINE

Máriás Nimród<sup>1</sup>

<sup>1</sup>SC ARIADNE IMPEX SRL, 520077 Sfântu Gheorghe, jud. Covasna, str. Lt. Păiş David, nr. 12A, tel: 0754-686883, e-mail: mariasnimrod@yahoo.com

#### Abstract

The linear alternator is the energy transformer system of the free piston Stirling engine. The linear motion is generating electricity. However, the alternator has an electric motor operating mode, which is required to start the Stirling engine. The linear alternator is within the Stirling engine pressure vessel, therefore the helium as working gas is well sealed.

**Keywords:** linear alternator, free piston Stirling engine, environmental friendly energy source.

#### Összefoglalás

A lineáris alternátor a szabaddugattyús Stirling-motorok energiaátalakító rendszere, mely vonal menti mozgásból villamos energiát állít elő. Ugyanakkor az alternátor motoros üzemmódban is működik, mely a Stirling-motor indításához szükséges. A lineáris alternátor a Stirling-motor nyomásköpenyén belül helyezkedik el, így elérhető a motor hélium munkagázának jó szigetelése.

**Kulcsszavak:** lineáris alternátor, szabaddugattyús Stirling-motor, környezetbarát energiaforrás.

#### 1. Szabaddugattyús Stirling-motorra épített lineáris alternátor

Napjainkban egyre nagyobb hangsúly kerül a megújuló energiaforrásokat hasznosító berendezések fejlesztésére. A Naprendszer energiaforrása a Nap, melynek sugárzása széles spektrumban érkezik a Föld felületére. Napjaink legjobb energia átalakító berendezése a Stirling-motoros generátor, mely hőenergiát képes átalakítani villamos energiává. A Stirling-generátor meleg hőcserélőjére parabolikus tükrös koncentrátoron keresztül érkezik a Nap hője,

mely a Stirling-generátort működésre készíti. A Stirling-motor pedig egy generátor által villamos áramot szolgáltat. Egy ilyen naperőmű megépítését 2015-ben a XX. FMTÜ alkalmával mutattam be. A lineáris alternátorral ellátott Stirling-motor erre a naperőműre épül, ugyanakkor a megalkotott Stirling-energiaátalakító a rakéta típusú kályhákban is fel lesz használva. A lineáris alternátor tervét a sepsiszentgyörgyi SC ARIADNE IMPEX műhelyében belül valósítottam meg id. Pózna Dávid igazgató úr támogatásával.

## 2. A lineáris alternátor

A lineáris alternátor a szabaddugattyús Stirling-motorok energiaátalakító rendszere. A Stirling-motor nyomásköpenyén belül helyezkedik el, hogy biztosítva legyen a motor nagy nyomású hélium munkagázának a szivárgásmentessége.

A felépítés miatt a beindításhoz szükséges mechanikus beavatkozást csak elektromos árammal tudjuk gyakorolni a motorra, mely az alternátoron keresztül kell megtörténn.

Ezért az alternátor két üzemmódja szükséges: generátoros és motoros üzemmód.

### 1.2. A lineáris alternátor tervezési követelményei

A lineáris alternátor tervezésénél több szempontot is figyelembe kellett vennem:

- olyan berendezés tervezése és megépítése, mely egyszerű felépítése következtében könnyen és olcsón legyártható, és hosszú távú beavatkozásmentes működést biztosít;
- az alternátort úgy kell megtervezni, hogy az optimális mozgórész amplitúdó akkora legyen, mint a munkadugattyú amplitúdója. Ez azért szükséges, mert a szabaddugattyús Stirling-motorok munkadugattyújáról közvetlenül kerül át a vonal menti mozgás a lineáris alternátor mozgórészére. Így csökkenthető a súrlódási veszteség;
- 50Hz üzemfrekvenciára optimalizált alternátor. A szabaddugattyús Stirling-motorok üzemfrekvenciája 40 és 60 Hz között helyezkedik el;
- az alternátor motoros üzemmódban be kell tudjon indítani egy 40 bar héliummal feltöltött 500W-os Stirling-motort.

### 2.2. A lineáris alternátor felépítése

A villamos gépek működése a mágneses terek kölcsönhatásain alapszik. A gép

két részből tevődik össze: mozgórész és állórész.

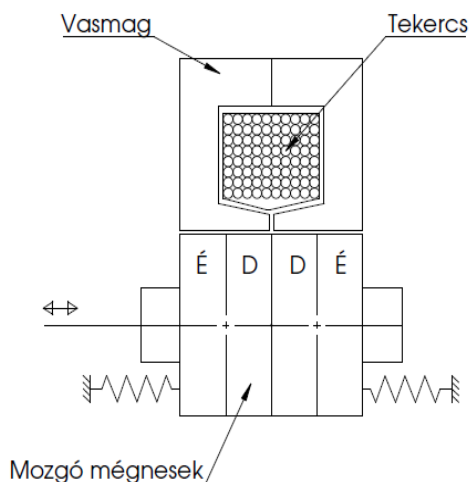
A lineáris alternátor permanens mágne-sekből, és tekercsből épül fel. Az egyszerűbb felépítés végett mozgó mágneses alternátort terveztem. A mozgó mágnesek hatására az állórész vasmagjában fluxus-változás lép fel, mely a tekercsben áramot indukál. Célszerű az állórészt tekercselni, mert így nem szükséges hajlékony kivezetéseket beépíteni a rendszerbe. A hajlékony kivezetések idővel elfáradnának, csökkentve az alternátor élettartamát.

Az alternátor egyszerűsége végett egyetlen tekercset terveztem a rendszerbe, melyet körülölel a lemezel vasmag.

Az elképzelt alternátor egyszerűsített rajza az **1. ábrán** vizsgálható meg.

A mozgórészt a tengelyre erősített két darab Neodímium-mágnes alkotja, melyek tengely menti mozgást végeznek. A mágnesek gyűrű alakúak.

A mozgórész körül a tengelyirányban lemezel állórész vasmagja és tekercse helyezkedik el.



**1. ábra.** A lineáris alternátor egyszerűsített metszete

Az alternátor főbb méreteit az alábbi (1) képlet segítségével határoztam meg:

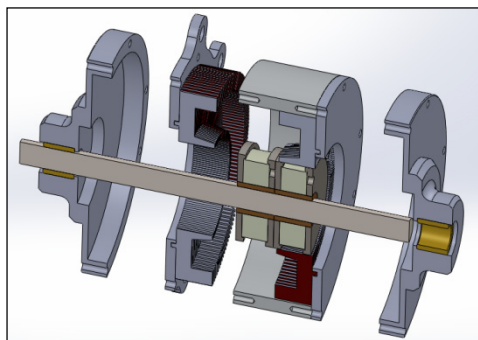
$$P = (4.8 \cdot 10^3) \cdot (\tau \cdot D \cdot f \cdot lm) \cdot B_r^2 \cdot \frac{V}{E} \cdot \left\{1 - \frac{1}{\frac{V}{E}}\right\}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{lm}{lm+g} \cdot \frac{f_1}{\frac{1-S_0}{2} C_f} \quad (1)$$

ahol

- P légrésteljesítmény,  
D vasmag belső átmérője,  
l löket legnagyobb amplitúdója,  
lm mágnesvastagság,  
g légrés sugárirányú mérete,  
Br a mágnesindukció,  
 $\frac{V}{E}$  a megengedett és a gerjesztett feszültség aránya,  
E az indukált feszültség effektív értéke  
E<sub>0</sub> légrés nélkül indukált feszültség effektív értéke.

### 3. A lineáris alternátor megvalósítása

A V1 alternátor megvalósítása 2016. február 9-én kezdődött. A tervek elkészítése két hét alatt történt. Az alternátor tervezésekor két szabadalmaztatott forrást használtam, melyek szabaddugattyús Stirling-generátorok [1] és lineáris alternátor tervezését és megépítését közlik [2], de ezek felépítése jelentősen eltér a tervezett berendezéstől.



2. ábra. A lineáris alternátor testmodellje

A tervezést követően elindult az alkatrészek legyártása. A vasmag lemezeit egy AMADA LCG3015AJ lézervágón gyártot-

tam le. A vasmag 1 mm vastagságú acéllemezről készült. Darabszámuk 364. Az állórész tekercseit 1,4 mm átmérőjű lakkozott rézhuzalból készítettem el, melynek menetszáma 92. A tekercset poliészter gyantával itattam át a jó villamos szigetelés és a mechanikai szilárdságnövelés érdekében.

Egy ilyen alternátor megépítésében a legigényesebb szerelés a vasmag lemezeinek a beszerelése a vasmagtartóba. Ezeket a darabokat egyenként be kell helyezni a tartóba, ügyelve arra, hogy a két fedőlaptól galvanikusan el legyenek szigetelve. Az állórész vasmagjait csillag alakban szereltem össze, melyek két oldalról burkolják a tekercset. A kialakított vasmagfeleket (mint a tekercset is) poliészter gyantával töltöttem fel, mely megnövelte a vasmag szilárdságát. A megszilárdulás után a vasmagok belső átmérőjét belső palástköszörüléssel munkáltattam meg.

A mágneses légrés mérete köszörüléssel állítható be. A légrés mérete jelentősen befolyásolja az alternátor hatásfokát.

A mozgórész kialakítására olyan mágneseket kellett választanom, melyek a kereskedelemben könnyen beszerezhetők, és sorozatgyártás esetén gond nélkül pótolhatók.

Az első alternátor változat esetében – melyet a XXI FMTÜ alkalmával közöltem [3] – a mozgórész rögzítését planár rugók segítségével valósítottam meg. Végül az 1. számú kísérlet után rájöttem, hogy a mozgórész rögzítését előnyösebb bronzperselyek segítségével kivitelezni. A bronzperselyek segítségével lecsökkent az egytengelyeségi eltérés, pontosabb lett a légrés. A jó mágneses hatásfok érdekében a mozgórész és az állórész közti légrést minimálisra terveztem. A megépített változatban a légrés 0,5 mm.

Továbbá a mágneses pólusirányító tárcsák méreteit is megváltoztattam a V1 alternátor felépítésében. Erre azért volt szükség, mert a túl mély tárcsák miatt a

gyűrűmágnesek erővonalai inkább a tárcsák között, mint a mozgórész és az állórész vasmagjai között záródtak. A beavatkozás jelentős teljesítménynövekedést eredményezett.

**1. táblázat.** Felhasználható mágnes típusok

Típus	Fluxus-sűrűség Br [mT]	Koercitív erő H <sub>cj</sub> [kOe]	Energia kJ/m <sup>3</sup>	T °C
N42	1280	≥11,5	318	80
N45	1320	≥11,6	342	80
N48	1380	≥11,6	366	80
SmCo YX24	960	9,7	175	20 0

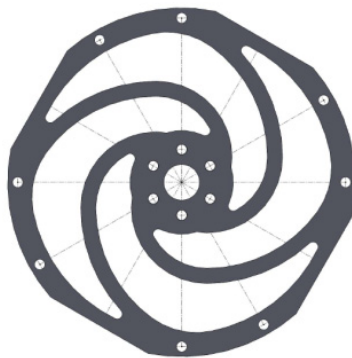
A választás egy 50 mm külső és 20 mm belső átmérőjű és 13,3 mm vastagságú neodímium mágnesgyűrűre esett. A mágnes anyaga N48, amely 80 °C fokon még megtartja az előírt mágneses tulajdonságait. A remanens fluxussűrűség N48 esetén 1400 mT.

A mágnesezési irány tengely menti, ezért szükséges volt a pólusirányítók használata, ami visszafordítja a pólusokat a mágnesek palástfelületére. A mágnesek egy 14 mm átmérőjű krómozott acéltengelyen helyezkednek el azonos pólussal szembe fordítva. Két oldalról egy-egy szorítógyűrű tartja össze a két gyűrű mágneset, melyek összeszorított állapotban egymást 820N-al taszítják. A szorítógyűrűkre két planár rugó illeszkedett csavarkötéssel.

A planár rugók feladata volt, hogy a mozgórészt nyugalmi helyzetben tengelyirányban középállásban tartsák.

A planár rugókat 2 mm vastag rugóacélból gyártottam le a lézervágón galaxis spirál alakúra.

A mozgórész kialakításának köszönhetően a lineáris alternátor amplitúdója 20 mm lett. Így felhasználható egy szabad-dugattyús Stirling-motor alternátoraként.



**3. ábra.** Planár rugó testmodellje

#### 4. Kísérleti elemzés

A lineáris alternátor jelleggörbéinek a meghatározására egy forgattyús tengellyel ellátott villamos motort használok. A forgattyús tengely úgy készült, hogy az excentricitás mértékét szabadon lehessen változtatni. A változtatás mértéke 0-20 mm-ig végezhető.

A forgattyús tengelyről a mozgást egy karral továbbítottam a lineáris alternátor tengelyére.

A kísérlet során az alternátor két különböző típusú válaszanak a meghatározása volt a cél:

- az optimális kimeneti villamos terhelés meghatározása;
- a kimeneti teljesítmény változása a löket-hossz függvényében.

Mivel a kísérlet során a meghajtó motor fordulatszáma 2815 1/min, a ciklusidő 21ms. A frekvencia a hajtómotor fordulatszámából adódott, ami 46,91 Hz. Ez elég jól megközelíti a hálózati 50 Hz frekvenciát.

Az alternátor löketének a növelésével két tényező változik a rendszer működtetésében:

- megváltozik a mágneses erővonalak alakja és indukciója a mágneses légrésben;
- megnő a mozgórész sebessége.

2. táblázat. Lineáris alternátor válasza különböző lökethosszra.

Amplitúdó [mm]	$I_{ki}$ [A]	$U_{ki}$ [V]	$P_{ki}$ [W]	$R_t$ [Ω]
9,2	5,57	7,4	41,2	1,32
13	7,7	14	107,8	1,81
14	8,35	17	141,9	2,03
16	8,63	18,1	156,2	2,09
18,6	8,8	19,7	173,3	2,23

A kísérlet további szakaszában a kedvező kimeneti  $R_t$  villamos terhelés értékének a meghatározása volt a cél. A terhelés rezisztív jellegű, így a reaktív teljesítmény elenyésző. A kísérleti eredményeket az alábbi táblázatban közlöm:

3. táblázat. Lineáris alternátor válasza különböző lökethosszra és villamos terhelésre

Amplitúdó [mm]	$I_{ki}$ [A]	$U_{ki}$ [V]	$R_t$ [Ω]	$P_{ki}$ [W]
23	8,6	20,7	2,4	178,2
23	6,67	28	4,19	186,7
22,1	4	34,5	8,62	138
16	8,6	18	2,09	154,8
16	9,1	11,6	1,27	105,5
16	6	25,7	4,28	154,2
16	5,62	26,9	4,78	151,1
19	5,9	28,4	4,74	170,1
19	6,3	26,9	4,2	170,3
19	9,66	12,5	1,29	120,7

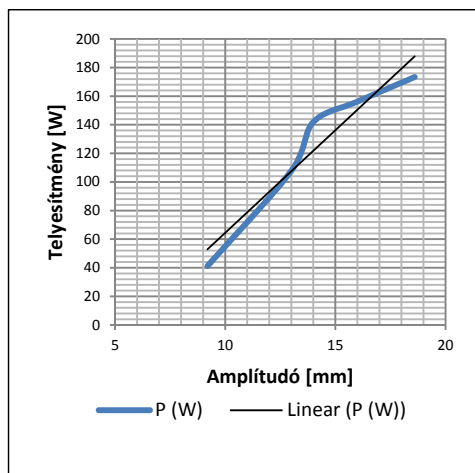
A táblázatban megjelöltem a kiemelten jó üzemi értékeket. Megfigyelhető, hogy a lineáris alternátor 23 mm-es lökethossznál 4 Ω-os  $R_t$  terhelés esetén adja a legnagyobb  $P_{ki}$  villamos kimenő teljesítményt, ami 186,7W. 2 Ω-os terhelésnél megnő az alternátor tekercsellenállásának a hatása a terhelő áramkörben.

A lineáris alternátor tömege 7 kg, amiből meghatározható a teljesítmény-tömeg arány. A V1.1 alternátor tömeg-teljesítmény aránya 37,4g/W, ami elég jó eredmény egy lineáris villamos gép esetében.

A löketteljesítmény jelleggörbén 9,2-13 mm-es löket közötti szakasz mentén

meredeken nő a kimenő villamos teljesítmény. Ezen a szakaszon kezd a váltakozó indukció és a mozgórész sebességnövekedése jelentős hatással bírni a kimenő teljesítményre.

A jelleggörbén megfigyelhető a 13 és 14 mm közötti szakaszon egy teljesítményugrás. Ezen a szakaszon az indukció a legnagyobb. 14 mm-nél nagyobb löket esetén a mozgórész vasmagja annyira kileng, hogy az indukció a jelleggörbének az inflexiós pontján túl helyezkedik el. 15 mm-nél nagyobb lökethossznál a mozgórész sebességnövekedése még pozitív hatással bír a teljesítményre, de ennek növekedése kisebb meredekséget okoz a teljesítményjelleggörbén. Tehát kisebb mértékű a teljesítménynövekedés a löket növekedésének függvényében.

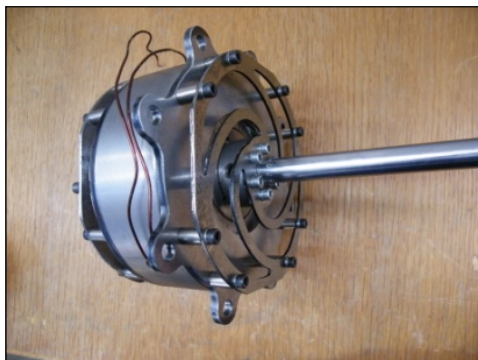


4. ábra. Az alternátor amplitúdó-teljesítmény jelleggörbéje

## 5. Következtetések

A V1.1 alternátor felépítésében teljesen elhanyagolható a planár rugók használata, mert a mozgó- és állórész közötti mágneses kölcsönhatás bizonyos korlátok között úgy viselkedik, mint egy mágneses rugó. Ezáltal lecsökken a gyártási költség.

Az egyszerű felépítés lehetővé teszi a nagyobb teljesítményű alternátorok építését, mert egy közös tengelyre több V1.1 típusú alternátor is elhelyezhető. Így akár többfázisú is lehet a megépített villamos gép, ami szintén növeli a rendszer hatásfokát.



5. ábra. A megvalósított lineáris alternátor

Az alternátor hosszú ideig is képes motoros üzemmódban működni, ami lehetővé teszi a Stirling típusú hőszivattyúk működtetését cryo-hűtőberendezésekben.



6. ábra. Sunpower által gyártott cryostatikai Stirling hőszivattyú [5]

## 6. Fejlesztések a jövőben

A lineáris alternátorral elért jó eredmények következtében folyamatban van egy 500W-os változat építése, melynek motoros teljesítménye 860W. A felépítés abban különbözik, hogy három darab alternátor helyezkedik el egy közös alternátorházban közös tengelyre szerelve.

Ez a változat egy szabaddugattyús Stirling-motor beindítását fogja biztosítani, és a motor által termelt mechanikai energiát villamos energiává fogja alakítani.

Tervben van egy hőszivattyú gyártása, ahol a lineáris alternátor a Stirling-hőerőgép működését biztosítja.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] George R. Dochat: *Design Study of a 15 kW Free-piston Stirling Engine-linear Alternator for Dispersed Solar Electric Power*, DOE/NASA/0056-79/1 NASA CR-1 59587 MTI 79TR47
- [2] *Preliminary Design of Linear Alternator Dynamometer for Free Piston Stirling Engines*, U.S. Department of energy, ORNL/Sub/84-05907/1
- [3] Máriás Nimród: *Szabaddugattyús Stirling motorral üzemelő lineáris alternátor fejlesztése és megvalósítása*, XXI. Fialat Műszakiak Tudományos Ülésszaka, 2016. Kolozsvár, 261–264
- [4] <http://sunpowerinc.com/cryocoolers/>