

# Nagyhatékonyságú moduláris síkmotorok

Dr. Szabó Loránd<sup>1</sup> – Dobai Jenő Barna<sup>2</sup> – Füleki Miklós<sup>2</sup>

Kolozsvári Műszaki Egyetem

<sup>1</sup>) adjunktus, e-mail: Lorand.Szabo@mae.utcluj.ro

<sup>2</sup>) egyetemi hallgató

## 1. Bevezetés

A haladómozgás (egyenes vonalú vagy lineáris mozgás) gyakori mozgásforma mind ipari, mind laboratóriumi környezetben. Haladó mozgás klasszikusan forgó mozgásból valósítható meg az erre tervezett sajátos gépészeti berendezések segítségével (pl. csigaorsó). Ezek fő hátránya, hogy többlet veszteség forrásai és az egész rendszer dinamikáját lerontják. Lineáris motorok alkalmazásával hatékonyabb villamos hajtásokat lehet megvalósítani. Különösképpen hasznosak azok a típusok, amelyeknél a terhelés közvetlenül a motor mozgó részéhez csatlakozhat.

Nagyszámú haladómozgású motortípus ismeretes a szakirodalomban [1]. E villamos gépek kategóriájába tartoznak a síkmotorok is (angol elnevezésük változó: *surface*, *2D*, *XY* vagy *planar motors*). Összetettebb felépítésük lehetővé teszi a motor mozgó részének a síkban való tetszőleges irányú haladását. Ezeknek is számos konstrukciós típusa ismeretes a szakemberek körében [2, 3].

A síkmotorokat számos ipari és laboratóriumi alkalmazási területen használják előszeretettel, mivel a síkbeli mozgást a legközvetlenebbül, legegyszerűbben, a legnagyobb határfokkal valósíthatják meg. Segítségükkel kitűnően lehet a rájuk helyezett munkadarabokat nagy – akár nanométeres – pontossággal a megadott helyzetbe állítani, ahol valamilyen munkaeszköz (például robotkar) elvégzi rajtuk a szükséges műveleteket. Emiatt gyakran használatosak elektronikai alkatrészek beültetésénél, rugalmas gyártórendszerekben, valamint számos más területen.

A legtöbb esetben a síkmotort két hagyományos felépítésű lineáris motor összekapcsolása révén kapjuk [4]. Vannak kimondottan sík-mozgásra tervezett motor konstrukciók is, mint a már klasszikusnak számító Sawyer-féle motor [4]. Ez utóbbiak sorába tartozik az ismertető nagyhatékonyságú motortípus is. Kiindulási pontja a moduláris felépítésű hibrid lineáris léptetőmotor, amelyik hatékonyan küszöböli ki a széles körben elterjedt hibrid lineáris léptetőmotor számos hátrányát [5, 6].

A moduláris síkmotornak számos előnye van. Rendelkezik a hibrid lineáris motor számtalan hasznosságával, valamint az ezt feljavító moduláris lineáris motor előnyeivel. Tömör felépítésű, mivel a mozgórész egyetlen szerkezeti egységet alkot. A terhet közvetlenül a mozgó armatúrára is helyezhetjük. Mindez azt jelenti, hogy semmilyen pontatlanságot és veszteséget okozó áttételt nem tartalmaz a szerkezeti egysége. Megfelelő vezérléssel a motor nagy pontosságú síkmozgásra képes.

A kísérleti síkmotor szimulációjának eredményeit tanulmányozva világosan látszik, hogy minden szempontból megfelel még a legigényesebb elvárásoknak is, bizonyítandó mind a tervezés, mind a kidolgozott vezérlési stratégia helyességét.

## 2. A moduláris felépítésű síkmotor

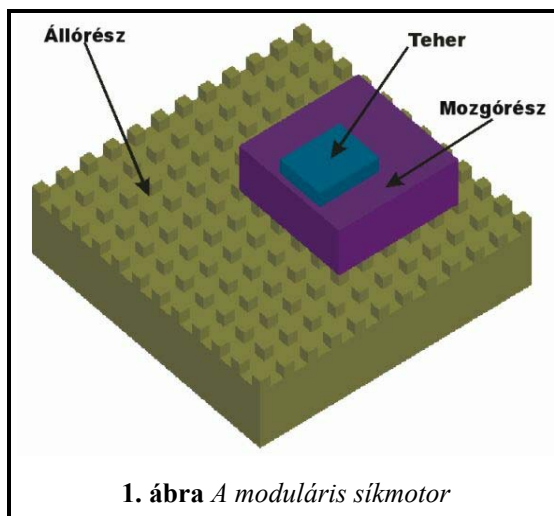
A moduláris felépítésű síkmotor szerkezeti alapelemei (1. ábra) hasonlóak a fentebb említett moduláris hibrid lineáris léptetőmotoréival. Ez a motor is két fő részből, az álló és a mozgó armatúrából áll. A mozgó rész az állórész felett lebeg befűjt sűrített levegővel megvalósított légpárnán. Ezáltal biztosítjuk a szükséges igen kicsiny és állandó légrést, a gyakorlatilag súrlódásmentes mozgást és ellensúlyozzuk a két armatúra között fellépő számottevő vonzási erőt.

A motor állórésze kelő vastagságú hidegen hengerelt acéltömbből készül. A hornyokat hossz- és keresztirányú sáncok bemarásával alakítják ki. A hornyokat ki kell tölteni valamilyen nem vezető anyaggal és a teljes felületet minél simábbra kell megművelni.

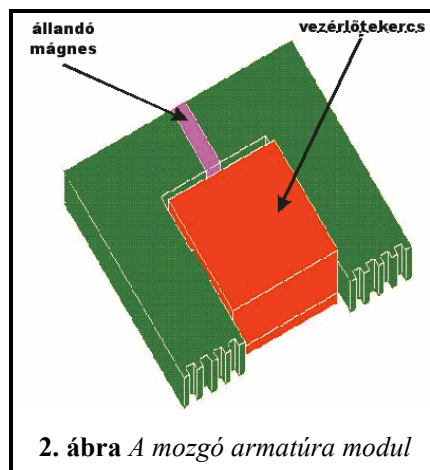
A motor mozgó armatúrája több, az 2. ábrán látható modulból áll. Ezek egyik fele valósítja meg az  $x$ -irányú elmozdulást, a másik fele pedig az  $y$ -irányút. A modulokat olyan módon kell elrendezni, hogy a mozgó rész, amely összeszerelése után egyetlen szerkezeti egységet alkot majd, minél tömörebb legyen. Ezekből a modulokból számtalan szerkezetet lehet megépíteni. A beszerelt modulok száma függ a motor fázisszámától, valamint a megvalósítandó lépéshossztól (pontosságtól). A modulok számát, illetve az egymástól való viszonylagos helyzetüket változtatva a legkülönbözőbb karakterisztikájú síkmotort építhetjük meg.

Egy teljesen szimmetrikus elrendezésű, 36 modul tartalmazó szerkezeti egységet a 3. ábrán láthatunk. Ez egy háromfázisú változat, amelynek nagy előnye, hogy könnyen táplálható az igen elterjedt háromfázisú sztatikus frekvenciaváltókról. Szimmetrikus elrendezése biztosítja, hogy az azonos fázisról táplált modulok nem élesztenek forgatónyomatékokat, ami letéríthetné a motort az ideális pályájáról.

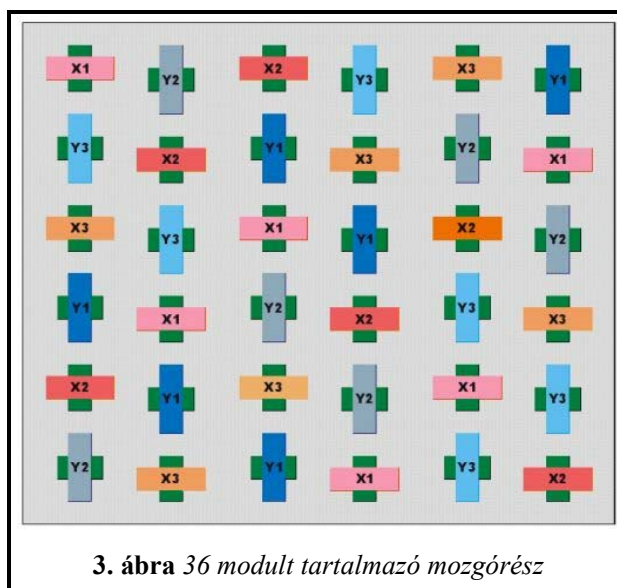
A motornak előnyei mellett hátránya is van: mivel nagyon sok modul tartalmaz (minden irányhoz és fázishoz 6-6 modul tartozik), csak akkor érdemes megépíteni, ha a motornak számottevő húzóerővel kell rendelkeznie.



1. ábra A moduláris síkmotor



2. ábra A mozgó armatúra modul



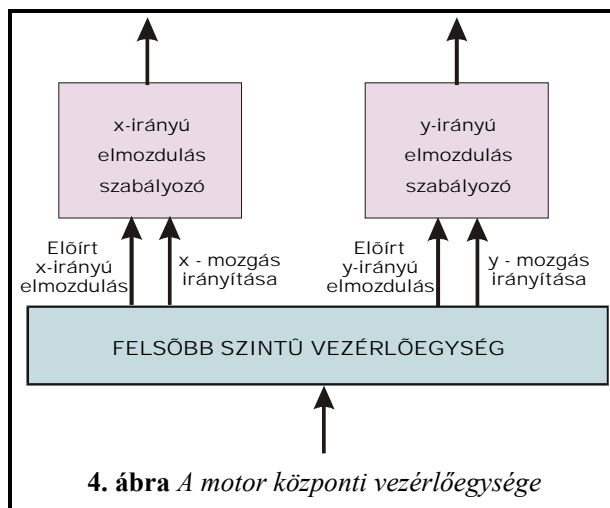
3. ábra 36 modul tartalmazó mozgó rész

### 3. A moduláris síkmotor vezérlése

Mint láthattuk, a moduláris síkmotor gyakorlatilag két egybeépített moduláris felépítésű hibrid lineáris léptetőmotorból áll. Mindkét motorrész egymástól függetlenül működik, emiatt külön vezérlést igényel.

A motor többszintes, intelligens zárthurkú vezérlőrendszerének (4. ábra) biztosítania kell a mozgórész nagyon pontos célba juttatását, illetve egy előírt mozgásforma hű követését. Természetesen a két irányban való elmozdulást is megfelelően össze kell hangolni.

A vezérlőegység kívülről kapja az előírt mozgásformára (trajektóriára) vonatkozó információt. A megszabott trajektóriát felbontja  $x$ -, illetve  $y$ -irányú mozgássá. Kimenő jelei az előírt elmozdulás és mozgásirány mind az  $x$ -, mind az  $y$ -irányú elmozdulás számára. Ezek a jelek vezérlik a két elmozdulás szabályozót.



A két elmozdulás szabályozó irányítja az egy-egy mozgásiránynak megfelelő motor-részt [7]. Főbb alkotóelemei a következők: egy elmozdulás, illetve húzóerő szabályozó áramkör és egy háromfázisú sztatikus frekvenciaváltó. A vezérlőegység "motorja" a háromfázisú sztatikus frekvenciaváltó. Ez egy ipari, széles körben használatos termék, amit könnyű beszerezni. Beépített szabályozóegysége biztosítja a három kimenő fázis számára előírt áramforma minél hűbb követését. Ezáltal könnyen megvalósíthatjuk a motor egy irányú haladását biztosító vezérlő áramimpulzusokat, amelyekkel a három vezérlőtekercset tápláljuk. A három előírt áram és a felbecsült elmozdulás jelét a vezérlőegység "agya", az elmozdulás, illetve húzóerő szabályozó egység szolgáltatja a felsőbb szintű vezérlőegységtől kapott jelek függvényében. Ezek az előírt elmozdulás, a végkapcsolóktól jövő jelek, a nem táplált tekercsekben indukált feszültségek (ezek függvényében számítja ki a szabályozó a mozgórész valós elmozdulását), valamint az váltóirányító kimenetén mért három áram.

A többszintes intelligens vezérlőrendszer segítségével az előírt mozgásforma nagy pontossággal követhető. További nagy előnye, hogy nélkülöz bármilyen érzékelőt, amelyek drágák és használatukhoz külön feldolgozó egység szükségeltetik. Minimális alkatrészigénye nagy üzemi megbízhatóságot eredményez. A piacon készen kapható alkotóelemek beépítése számottevően csökkenti az egész vezérlőberendezés árát.

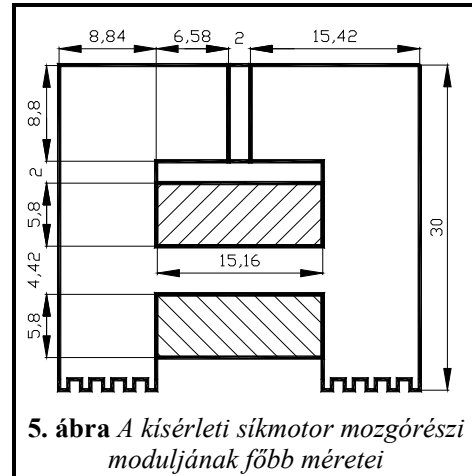
Hatékonyabb vezérlési stratégiájával ugyanabból a motorból nagyobb teljesítmény hozható ki. Emiatt a vezérlőáram fázisváltását az optimális fázisváltás szögénél (helyzeténél) hajtjuk végre. Ez a szög bármilyen háromfázisú moduláris felépítésű léptetőmotor esetében:

$$\alpha_{op} = -17,46^\circ \quad (1)$$

Az optimális fázisváltás alkalmazásával a húzóerő hullámossága több mint 40 százalékkal csökkenthető, ami az erő középértékének 6,67 százalékos növekedését eredményezi [1, 7].

#### 4. A kísérleti moduláris síkmotor

A nagyhatékonyságú moduláris síkmotor tervezési algoritmusának részletes leírása megtalálható az [1] tanulmányban. A motor magas hatékonyságának biztosítása érdekében több alkotóelem méretezését MATLAB számítási környezetben írt programok segítségével optimalizálni kellett. A háromfázisú kísérleti síkmotor húzóerejének csúcserője  $F_{t_{max}} = 300 \text{ N}$ , lépésének hossza pedig  $x_i = 2/3 = 0,66 \text{ mm}$ . A motor állórészének szélessége és hossza egyaránt 4 m. A kísérleti motor mozgórészi moduljának méreteit az 5. ábrán láthatjuk.

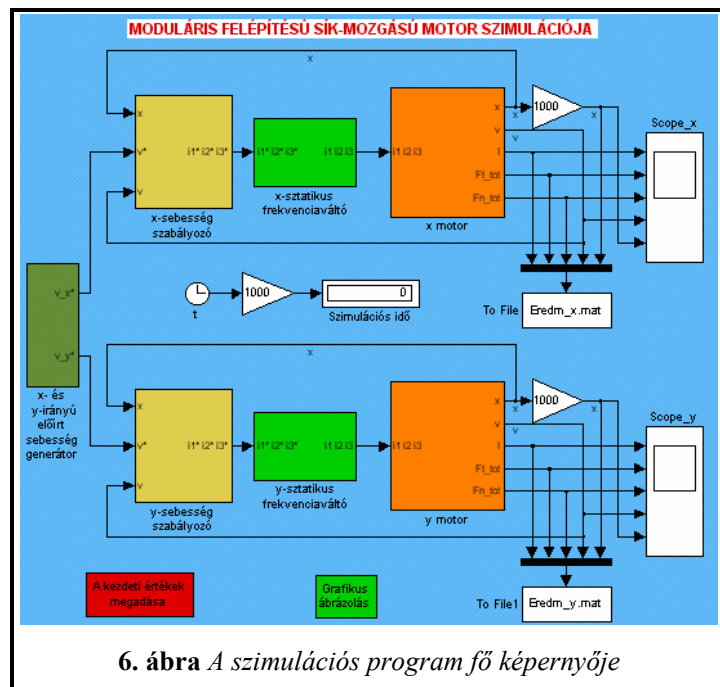


5. ábra A kísérleti síkmotor mozgórészi moduljának főbb méretei

#### 5. A kísérleti moduláris síkmotor szimulálása

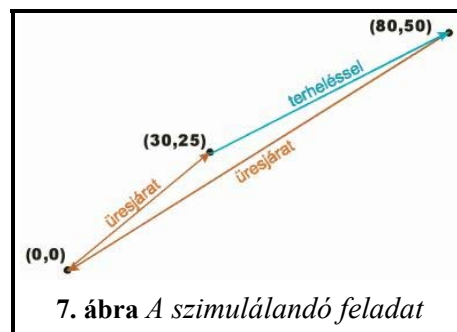
A kísérleti síkmotor működését szimuláció segítségével fogjuk vizsgálni. Ennek alapja a motor kombinált áramkör-mezőszámítási matematikai modellje, amelyik egyszerűsége ellenére figyelembe veszi az állandó mágnes munka-pontjának változását, valamint a ferromágneses anyagok nemlineáris jellegét is [4].

A matematikai modell alapján egy MATLAB-SIMULINK® [8] programcsomagot állítottunk össze, amely segítségével a síkmotor dinamikus működését könnyen vizsgálni lehet. A főprogram központi, az egész szimulációt irányító fő képernyője a 6. ábrán látható.



6. ábra A szimulációs program fő képernyője

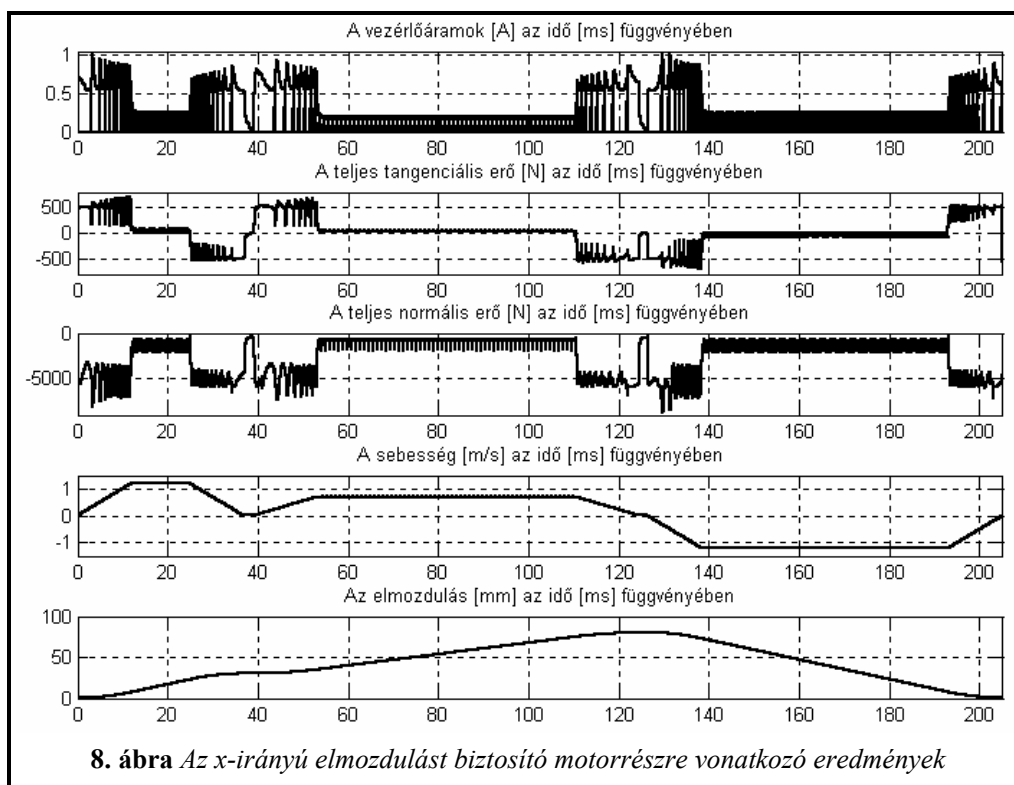
A szimulációs programunkkal példaként egy egyszerű, *pick & place* típusú feladat elvégését szimuláltuk (7. ábra). A motor kezdeti helyzetéből, a (0, 0) koordinátájú pontból, üresjáratban a (30, 25) koordinátájú pontba vezéreltük, ahol 2 milliszekundumot állt (ezalatt rákerült az 5 Kg-os terhelés), majd a terhet a (80, 50) koordinátájú pontba vitte, ahol azt leveszik róla. Itt is 2 milliszekundumot áll a motor, majd üresjáratban visszakerül az eredeti kiindulási pontba.



7. ábra A szimulálandó feladat

A szimulálás megkezdése előtt meg kellett határozni a feladat pontos teljesítéséhez szükséges két előírt sebességprofil [1].

A következőkben a szimuláció eredményeinek egy részét mutatjuk be. A 8. ábrán az  $x$ -irányú elmozdulást biztosító motorrészre vonatkozó eredményeket láthatjuk.

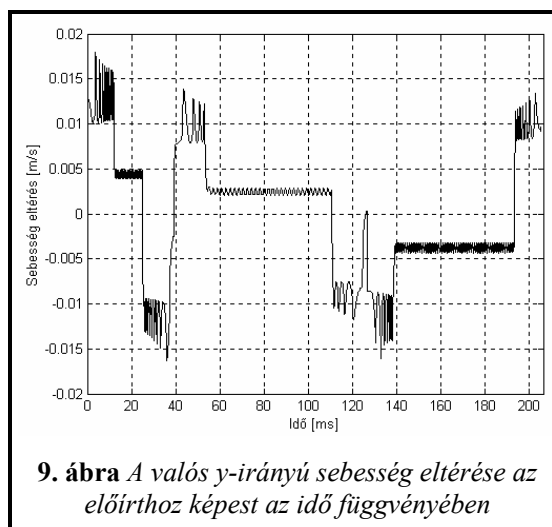


Az ábrán tanulmányozhatók a vezérlőáramok, a teljes tangenciális és normális erő, a sebesség, valamint az elmozdulás változása az idő függvényében. Tisztán kitűnik, hogy nagyobb vezérlőáramok (és ennek megfelelően nagyobb húzó-, illetve fékezőerők) a gyorsítási, illetve a fékezési fázisban vannak. A motorrész felgyorsítása után már kisebb vezérlőáramok is biztosítani tudják az állandó sebesség megtartását.

Az  $y$ -irányú elmozdulást biztosító motorrészre vonatkozó eredmények hasonlóak, lényegében csak az előírt sebességprofilok adatai különböznek.

Az eredmények alapján nyilvánvalóan állíthatjuk, hogy a kitzűött feladatot a moduláris felépítésű sík-mozgású motor teljes mértékben és nagy pontossággal teljesítette. E kijelentés alátámasztásául vizsgáljunk meg az  $y$ -irányú sebesség hibáját (9. ábra). Azonnal észrevehető, hogy a hiba a feladat teljes megvalósítása alatt viszonylag alacsony maradt (a hiba abszolút értékének átlaga csupán 0.0058 m/s!).

Biztos állíthatjuk, hogy a motor bármilyen más mozgásformát (amelyik megtétele nem feltételezi a motor maximális képességének meghaladását) hasonló pontossággal teljesíteni tud.



## 6. Következtetések

A moduláris felépítésű hibrid lineáris léptetőmotoroknál használt mozgórészi modulok segítségével síkmotorok is összeszerelhetők. Ezek a nagyhatékonyságú motorok rendelkeznek a hibrid lineáris motor számtalan hasznosságával, valamint az ezt feljavító moduláris lineáris motor előnyeivel. Például a terhet közvetlenül, semmilyen pontatlanságot és veszteséget okozó áttétel nélkül a masszív mozgó armatúrára lehet helyezni. A beszerelendő modulok száma függ a motor fázisszámától, valamint a megvalósítandó lépéshossztól (a motor pontosságától). A modulok számát, illetve az egymástól való helyzetüket változtatva a legkülönbözőbb karakterisztikájú síkmotort építhetjük meg.

Egy dupla zárthurkú vezérlőrendszer biztosítja a motor pontos célba juttatását, illetve bármilyen előírt mozgásforma hű követését. Célszerű a motor a háromfázisú variánsait használni, mert ekkor a vezérlőegységbe két, széles körben használatos, olcsó háromfázisú sztatikus frekvenciaváltót építhetünk bele.

A szimuláció eredményeit kielemezve megállapíthatjuk, hogy a tanulmányozott moduláris síkmotor minden szempontból megfelel még a legigényesebb elvárásoknak is, bizonyítandó mind a tervezés, mind a kidolgozott vezérlési stratégia helyességét.

## 7. Köszönetnyilvánítás

Ez a publikáció a "Sapientia" Alapítvány támogatja "**Moduláris felépítésű sík-mozgású motor tervezése és szimulációja**" című kutatási tanulmány alapján készült. A szerzők ezennel is köszönetet mondanak az Alapítványnak a kutatói ösztöndíj folyósításáért.

## 8. Irodalomjegyzék

- [1] Szabó L. – Dobai J.B. – Füleki M.: **Moduláris felépítésű sík-mozgású motor tervezése és szimulációja**, kutatási tanulmány, Sapientia Alapítvány, Kolozsvár, 2001.
- [2] Melkote, H. – Khorrami, F.: **Closed-loop control of a base XY stage with rotational degree-of-freedom for a high-speed ultra-accurate manufacturing system**, Proceedings of the 1999 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 1812-1817.
- [3] Yoshiyuki, T. – Koyanagawa, Y.: **Study on a Surface-Motor Driven Precise Positioning System**, Transactions of the ASME in the Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, vol.117 (1995). nr. 3.
- [4] Viorel, I.A. – Szabó L.: **Hybrid Linear Stepper Motors**, Mediamira Könyvkiadó, Kolozsvár, 1998.
- [5] Szabó L. – Viorel I.A. – Chişu Ioana – Kovács Z.: **A Novel Double Salient Permanent Magnet Linear Motor**, Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Drives and Motion (PCIM), Nürnberg, 1999, vol. Intelligent Motion, pp. 285-290.
- [6] Szabó L. – Viorel I.A. – Józsa J.: **A hibrid lineáris léptetőmotor hatékonyságának növelési módzatairól**, ENELKO '2000, Az Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság Energetikai és Elektrotechnikai Konferenciája, Kolozsvár, 2000, pp. 50-56.
- [7] Viorel, I.A. – Szabó L.: **On a Three-Phase Modular Double Salient Linear Motor's Optimal Control**, Proceedings of the 9<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications EPE '2000, Graz, (CD-ROM-on).
- [8] \*\*\*: **Using Simulink Version 4**, The MathWorks Inc., Natick, 2000.