

A HIBRID LINEÁRIS LÉPTETŐMOTOR HATÉKONYSÁGÁNAK NÖVELÉSI MÓDOZATAIRÓL

Szabó Loránd - Ioan-Adrian Viorel - Józsa János

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamos Gépek Tanszék
3400 Kolozsvár, Pf. 358.
e-mail: Lorand.Szabo@mae.utcluj.ro

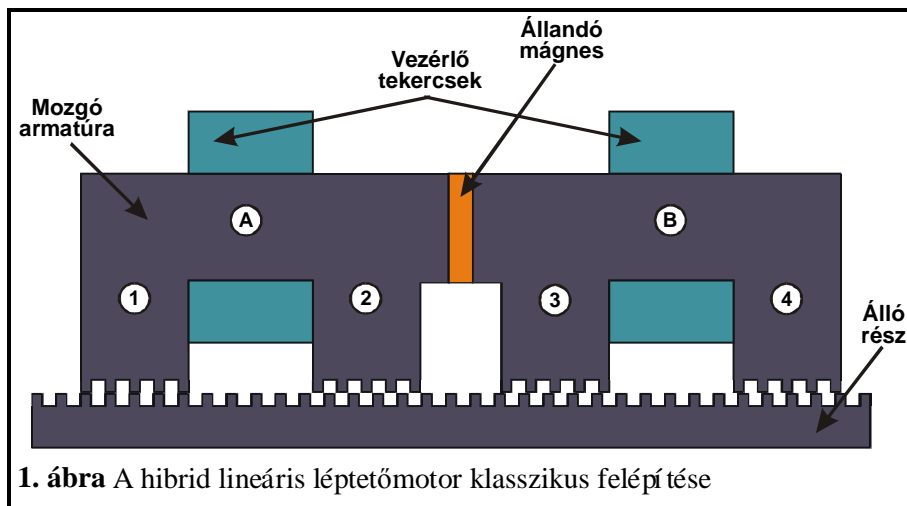
1. BEVEZETŐ

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. Különösen hasznosak azok a típusok, amelyeknél a terhelés közvetlenül a motor mozgó részéhez csatolható [1].

Nagyszámú lineáris motor típus ismeretes a szakirodalomban. Elvileg valamennyi "klasszikus" villamos gép átalakítható haladó mozgásúvá, ha elvágjuk sugár iránt és egy síkra tejtjük ki. Mindezek mellett számos, kimondottan haladómozgásra tervezett motor létezik. Ezek sorába tartozik a hibrid lineáris léptetőmotor is.

A hibrid lineáris léptetőmotor gyakorlatilag egy állandó mágnesű lineáris szinkrongép. A hibrid jelző arra utal, hogy működési elve egyesíti a reluktanciamotorok és az állandó mágnesű villamos gépek működési elvét. Legelterjedtebb felépítése az 1. ábrán látható.



Két fő részből, az álló és a mozgó armatúrából áll. Az állórész egy egyszerű, finom fogazású, hidegen hengerelt acélrúdrúd (sín). Hosszúságának csak előállítási korlátjai vannak. A motor aktív része a mozgó armatúra. Ez két elektromágnesből áll, amelyek közrefogják az állandó mágneset. Az elektromágneseknek két fogazott pólusuk és egy vezérlő tekercsük van. Valamennyi póluson azonos számú fog található. A fogak mérete azonos mindkét armatúrán. A

horonylépés mérete határozza meg a motor lépéstávolságát (e motor lépéshossza a horonylépés egynegyede). A mozgó rész kerekeken halad a sínen. Az igényesebb változatoknál légpárna segítségével biztosítják a nagy húzóerőhöz szükséges állandó és kicsi légrést.

A motor működési elve a következő: a vezérlőtekercsek az állandó mágnes gerjesztette mágneses fluxust valamelyik pólusba összpontosítják. A minimális mágneses energia elvének alapján a mozgó rész abba a helyzetbe fog beállni, amelyben annak a pólusnak a fogazata, amelybe a fluxust összpontosítottuk szemtől szembe kerül az állórész fogazatával (ekkor lesz a legalacsonyabb a légréstben felhalmozott mágneses energia). Az 1. ábrán látható helyzetéből a motor egy lépést fog megtenni jobbra, ha a B elektromágnesen levő vezérlőtekercset úgy tápláljuk, hogy az általa gerjesztett mágneses fluxus az állandó mágnes fluxusát a 4-es pólusba összpontosítsa. Az ezt követő nyugalmi helyzetben a 4-es pólus fogai lesznek szemtől szemben az állórész fogjaival. Megfelelő polaritású és sorrendű vezérlő impulzusok segítségével folyamatos haladómozgást lehet elérni mindkét irányba [2].

A hibrid lineáris léptetőmotor számtalan előnye (egyszerű felépítés, könnyű karbantartás, nagy teljesítmény/térfogat arány, nyíltthurkú vezérléssel is működik, stb.) mellett néhány hátránya is van. A legfontosabb ezek közül onnan ered, hogy a mozgórészt alkotó két elektromágnes mágneses szempontból nem teljesen független. Amikor a fluxust egyik pólusba összpontosítjuk, akkor a másik elektromágnes pólusain keresztül fog a mágneses kör bezárulni. Ezek egyike mindig olyan helyzetben van, hogy a rajta áthaladó fluxus hatására a haladás irányával ellentétes irányú fékezőerő keletkezik. Mindemellett a mozgó rész bármelyik helyzetében a két armatúra között számottevő normális irányú vonzóerő létezik. Ennek mértéke kb. egy nagyságrenddel nagyobb mint a hasznos tangenciális irányú húzóerő. Ez feleslegesen leterheli a mozgórész gépészeti elemeit és alaposan megnöveli a súrlódási erőt [2].

2. A HIBRID LINEÁRIS LÉPTETŐMOTOR HATÉKONYSÁGÁNAK NÖVELÉSE

A hibrid lineáris léptetőmotor hatékonyságát sokféleképpen lehet megnövelni.

A legkézzelfoghatóbb hatékonyságnövelő módokat a tervezési fázisban lehet kiaknázni. Ezek egyike a legjobb minőségű anyagok (állandó mágnes és a két elektromágnes vastestét alkotó dinamólemez) használata. Természetesen ebben az esetben ügyelni kell a beépítendő mágneses anyagok ára is, nehogy a teljesítmény/ár viszony leromoljon.

A hibrid lineáris léptetőmotor tervezésekor nagy hangsúlyt kell helyezni a motor különböző aleggységeinek alakjának és méreteinek optimalizálására. Legfőképpen az állandó mágnes méreteinek helyes megállapítására, mivel ez a legdrágább és legkényesebb alkotóeleme a motornak. Amint [2]-ben rámutattunk, a mágnes mérete szakszerűen csökkenthető anélkül, hogy a motor által kifejtett húzóerő csökkenne. Az állandó mágnes kiválasztásakor és méretezésekor különösen nagy figyelmet kell szentelni a mágnes melegedésének pontos számítására, mivel mágneses tulajdonságai már relatív alacsony hőfokon drasztikusan csökkenhetnek. Az állandó mágnes méreteinek optimalizálásával kettős kedvező hatás érhető el: egyrészt a motor önköltsége alaposan lefaragható, másrészt lecsökkenthető a mozgórész tömege, ami hozzájárul a hajtás dinamikájának növeléséhez.

A motor tömege csökkenthető a mozgó armatúra vastestének optimalizálásával is. Különböző méreteket és alakzatokat próbálhatnak ki a tervezők a motor mágneses terének numerikus analízisének segítségével. Erre többféle, a végelemek módszerén alapuló programcsomag alkalmas (MagNet, ANSYS, Opera, Flux2D, stb.).

Számottevő hatékonyságnövelés érhető el a fogak alakjának és méreteinek megfelelő megválasztásával. Ebben a témakörben számos cikk jelent meg, amelyek tanulságait a motor tervezőinek ajánlott figyelembe venni [3].

A hibrid lineáris léptetőmotor hatékonysága növelésének egy másik fő módozata a motor vezérlési stratégiájának tökéletesítésében rejlik. A motor húzóereje zero minden stabil helyzetben [2]. Amennyiben a következő stabil helyzet elérésekor (egy teljes lépés megtétele után) kapcsoljuk át a vezérlő áramot az egyik tekercsről a másikra, akkor a tangenciális erő hullámossága igen nagy lesz (gyakorlatilag zérótól a maximális értékig változik) és átlagos értéke pedig alacsony. Emiatt tanácsos a vezérlőáram kommutációját hamarabb megejteni, még mielőtt a mozgórész stabil helyzetbe érne. Ekképp a tangenciális húzóerő hullámossága számottevően csökkenthető, ami által átlagos értéke is jelentősen megnövelhető (akár 30 százalékkal is). A kommutációs szög optimális értéke elméletileg kiszámítható [4]. E stratégia csak zárthurkú vezérléssel oldható meg, mivel a vezérlő egységnek szüksége van a mozgórész mindenkori relatív helyzetének ismeretére, amiből meghatározza a kommutáció pillanatát.

A hibrid lineáris léptetőmotor fenn említett tervezési és vezérlési optimalizálásával bizonyítottan elérhető hatékonyságának javítása, de mindezek nem jelentenek az előző fejezet végén említett alapvető hátrányokra megoldást. Kiküszöbölésük jelentené igazán e motorúpus teljesítményének radikális növelését. Emiatt a szerzők egy új motor konstrukciót dolgoztak ki, amelyik alaposan különbözik az 1. ábrán bemutatott motortól.

3. A MODULÁRIS FELÉPÍTÉSŰ HIBRID LINEÁRIS LÉPTETŐMOTOR

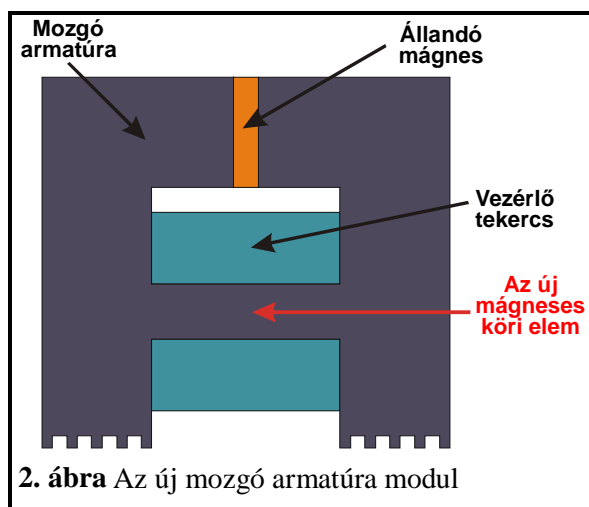
Az új motor fő alkotóeleme egy mozgó armatúra modul (2. ábra), amit tetszőleges számban építhetünk egybe. A modulok száma a teljes rendszer húzóerejét, míg a modulok egymástól való távolsága a motor lépéshosszát határozza meg. Az állórész azonos a már bemutatott motoréval [5].

Az új típusú szerkezet kulcsa az állandó mágnes alá, vele párhuzamosan beépített mágneses körű ágban rejlik. Erre helyezik el a modul vezérlőtekercsét. Az új mágneses körű elemet úgy kell méretezni, hogy amennyiben a modul nem aktív (a vezérlőtekercs nincs táplálva), az állandó mágnes gerjesztette fluxus teljes mértékben ezen haladjon át és záródjon be.

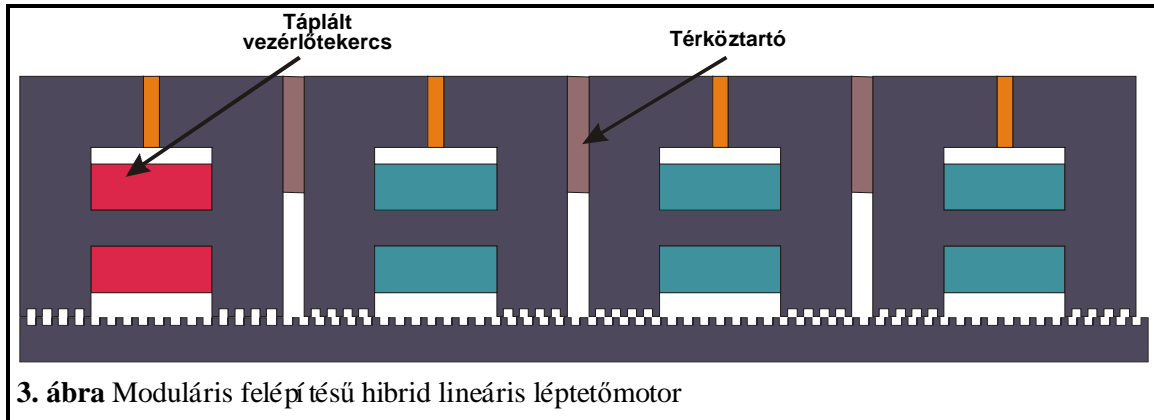
Ezáltal az inaktív modul légrésén nem halad át a fluxus és természetesen nem keletkezik se normális, se tangenciális erő. Tehát nincs se fékezőerő, se vonzóerő a két armatúra között mindaddig, míg a vezérlőtekercsen nem halad át áram.

Mindig azt a modult kell aktiválni, amelyik fogait szeretnénk szembeállítani az állórész fogaival. Ekkor a vezérlőtekercsen átfolyó áram által generált mágneses fluxus a mágnes fluxusát erősíti és a légrésén átirányítja. Ekképp nagy húzóerő érhető el.

Mivel mindig csak egy modul aktív a motorban, nem keletkezik a hatékonyságot lerontó fékezőerő, valamint csak egyetlen modul esetében lép fel vonzóerő az álló- és mozgórész között.



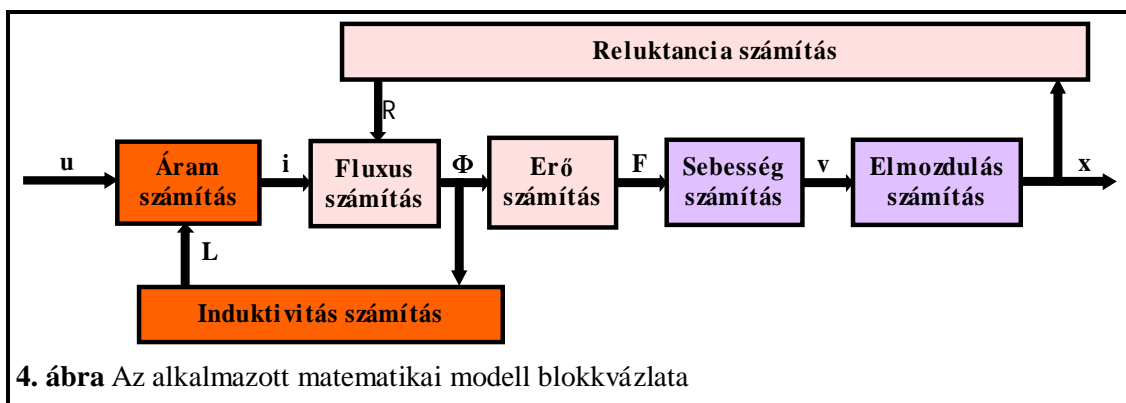
A 2. ábrán bemutatott modulból tetszőleges húzóerejű és lépésszámú motor szerelhető össze [5]. A motor egy négymodulú változata a 3. ábrán látható. Az első modul vezérlőtekercse táplálása nyomán jutott a motor az ábrán látható helyzetbe.



A bemutatott motor szimulált karakterisztikáit fogjuk összehasonlítani a klasszikus felépítésű hibrid lineáris léptető motoréival annak érdekében, hogy megállapíthassuk az új motorú pus hatékonysága növekedésének mértékét.

4. A HIBRID LINEÁRIS LÉPTETŐMOTOROK SZIMULÁCIÓJA

A hibrid lineáris léptetőmotorok szimulációjának alapja egy kombinált áramköri-mezőszámítási matematikai modell [6]. Ennek fő alkotóelemei és a köztük levő kapcsolatok a 4. ábrán láthatók.



A modell három fő alkotóelemből áll:

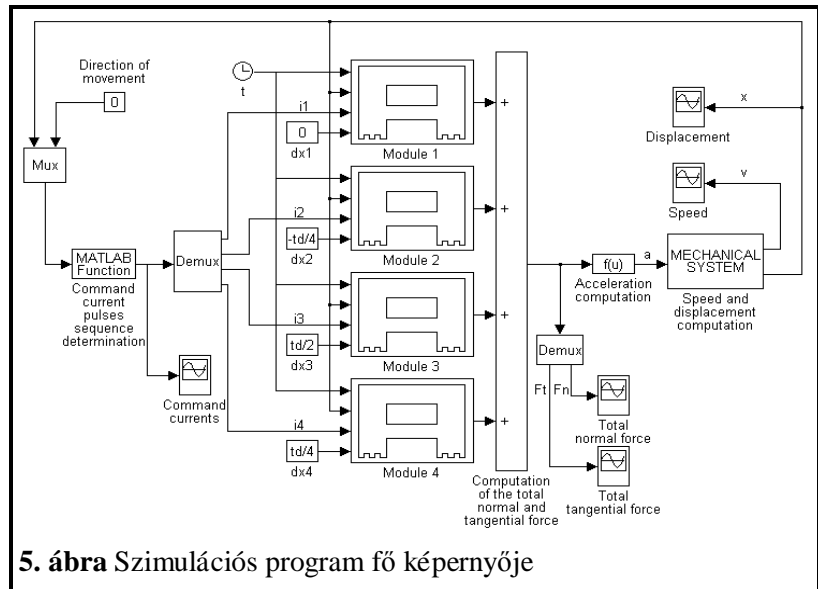
1. Az áramköri egység, amelyik kiszámítja a vezérlőtekercsek áramát (i) a bemenő feszültség (u) alapján, figyelembe véve a tekercsek inductívitásának (L) módosulását a rajtuk átfolyó mágneses fluxus változásának hatására.
2. A mezőszámítási egység kiszámítja a motor ekvivalens mágneses áramköréből a motor különböző részein áthaladó mágneses fluxust (Φ) a tekercsek árama alapján (i), figyelembe véve a pólusok alatti légrés mágneses reluktanciájának (R) változását a mozgórész relatív helyzetével (x).

3. A mozgásegyenletet megoldó egység kiszámítja a mágneses fluxusokból (Φ) a kifejtett elektromágneses erő (F) normális és tangenciális irányú összetevőjét, majd ezek alapján megadja a mozgórész sebességét (v) és relatív elmozdulását (x) az állórészhez képest.

A fenti rendszert kis időintervallumoknak megfelelő lépések sorozatára kell megoldani természetesen számítógép segítségével.

Az ismertett matematikai modell csak egy egyszerűsített változat, annak ellenére, hogy figyelembe veszi az állandó mágnes munkapontjának változását és a ferromágneses anyagok nemlineáris jellegét is. A motorok különböző részein áthaladó mágneses fluxust jóval pontosabban lehet meghatározni numerikus analízissel. Azonban ez a módszer nagyon időigényes, és a dinamikus szimuláció estében, amikor nagyszámú lépésben kell újra és újra kiszámítani a motor jellemzőit, gyakorlatilag nem alkalmazható. Az előbbieken ismertett modell tehát egy kompromisszumos megoldás, ami azért tűrhetően pontos és meglehetősen gyors. Segítségével a legkülönbözőbb felépítésű motorok dinamikus viselkedése tanulmányozható, vagy különböző vezérlési stratégia hatékonysága mérhető le.

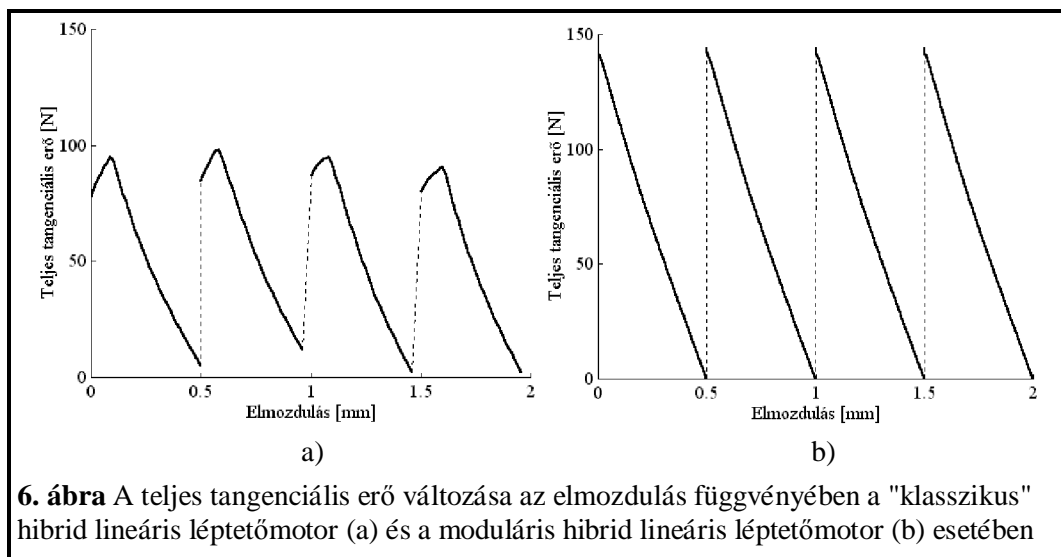
Az ismertett modell alapján egy MATLAB-SIMULINK® programcsomagot állítottunk össze, amely segítségével az ismertett két hibrid lineáris léptetőmotor dinamikus jellemzőit össze lehet hasonlítani. Ez a szimulációs platform bizonyult céljainknak minden szempontból megfelelőnek, mivel itt a modellek felépítése igen egyszerű, de ugyanakkor nagyhatékonyságú megoldási algoritmusok segítik a szimulációt [7]. Mindemellett lehetőség nyílik kihasználni a MATLAB nyújtotta számítási és grafikus ábrázolási lehetőségeket is. A programcsomagból [8] itt csak a moduláris felépítésű hibrid lineáris léptetőmotor dinamikus szimulációjára szolgáló program angol nyelvű fő képernyőjét mutatjuk be az 5. ábrán.



5. ábra Szimulációs program fő képernyője

A továbbiakban az ismertett két motorkonstrukciót fogunk összehasonlítani. A két motor esetében az állandó mágnesek teljes térfogata, a felhasznált elektromágneses anyagok minősége, a lépéshossz, a légrés és a vezérlő áram megegyezik. Összehasonlítás alapul a két elemzett motorú pus ún. sztatikus karakterisztikáját (a kifejtett erő az elmozdulás függvényében) fogjuk venni.

Az itt bemutatott moduláris hibrid lineáris léptetőmotor esetében észlelhető legszembetűnőbb minőségi javulást a kifejtett teljes tangenciális erő változása az elmozdulás függvényében mutatja (lásd a 6. ábrát). Ennek 144 N-os maximális értéke számottevően meghaladja a klasszikus motor 98 N-os csúcsertékét. Természetesen az új motor által kifejtett húzóerő átlagértéke (68,4 N) is nagyobb a "klasszikus" változat hasonló mértékénél (51,8 N). Mindemellett a húzóerő változása közel lineáris, ami megkönnyíti az optimális vezérlési stratégia kidolgozását.



Amint az [5]-ben is rámutattunk, hasonló javulás észlelhető a kifejtett teljes erő normális összetevőjének vizsgálatakor is. Az ebben a cikkben ismertetett motor esetében nemcsak a két armatúra közötti vonzóerő mértéke csökkent jelentősen, hanem ennek hullámossága is. A kisebb mértékű és közel állandó vonzóerő leküzdése megkönnyíti a tervezőmérnökök feladatát.

Mindezek híven tükrözik a moduláris felépítésű hibrid lineáris léptetőmotor megnövelt teljesítményét az eredeti felépítésű hibrid lineáris léptetőmotoréval szemben. Energiahatékonyágának köszönhetően számtalan alkalmazása előtt nyílik lehetőség, még olyan területeken is, ahol "klasszikus" változatát eddig lekörözték más típusú haladómozgást végző villamos gépek vagy egyéb hagyományos lineáris villamos vezérlések.

5. IRODALOMJEGYZÉK

1. Wavre N. - Vaucher J-M.: **Motion Control with High Performance Direct Drives**, AMD&C Magazine, vol. 3., 2000, pp. 40-43.
2. Viorel I.A. - Szabó L.: **Hybrid Linear Stepper Motors**, Mediamira Könyvkiadó, Kolozsvár, 1998.
3. Szabó L.: **On the Optimal Teeth Geometry of a Hybrid Linear Stepper Motor**, Analele Universităţii din Oradea, 1998, Fascicula Electrotehnică, Session A, pp. 109-114.
4. Viorel I.A. - Szabó L.: **Permanent-magnet variable-reluctance linear motor control**, Electromotion, vol. 1., nr. 1. (1994), pp. 31-38.
5. Szabó L. - Viorel I.A. - Chişu I. - 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. Viorel I.A. - Kovács Z. - Szabó L.: **Sawyer Type Linear Motor Modelling**, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines (ICEM), Manchester, 1992, vol. 2., pp. 697-701.
7. Ong C.M.: **Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink**, Prentice Hall PTR, Upper Saddle, 1998.
8. Szabó L. - Viorel I.A. - Józsa J.: **Dynamic Simulation of a Novel Hybrid Linear Stepper Motor by Means of Matlab/Simulink®**, Proceedings of the 6th Conference on Engineering of Modern Electric Systems, EMES '2000, Félix Fürdő, nyomtatásban.