

# Moduláris lineáris gépek hibatűrésének vizsgálata

## Study on the fault tolerance of modular linear machines

### Studiul toleranței la defecte a mașinilor liniare modulare

dr. SZABÓ Loránd<sup>1</sup>, RUBA Mircea<sup>1</sup>, TEREZ Rareș<sup>1</sup>, BENȚIA Ioana<sup>1</sup>, dr. KOVÁCS Ernő<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar, Villamosgépek Tanszék  
RO-400750 Cluj, P.O. Box 358, Románia  
tel.: +40-264-401-827, fax.: +40-264-593-117  
e-mail: Lorand.Szabo@mae.utcluj.ro

<sup>2</sup> Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék  
HU-3515 Miskolc-Egyetemváros  
tel.: +36-(46)-565-111 mellék: 12-16, 12-18, fax : +36-(46)-563-447  
e-mail: elkke@uni-miskolc.hu

#### ABSTRACT

*It is a tendency in advanced industrial automated systems to use fault-tolerant electrical machines which can continuously operate even in the event of fault occurrences. The modular permanent magnet variable reluctance linear machine easily can be built up also in several fault-tolerant variants. In the paper the fault tolerance capability of such a machine variant will be studied by means of simulations.*

#### REZUMAT

*Există o tendință în domeniul sistemelor automatizate industriale avansate de a utiliza mașini electrice tolerante la defecte, care pot asigura acționarea continuă a echipamentului chiar în cazul apariției unor defecte. Mașina liniară modulară cu reluctanță variabilă și magneți permanenți poate fi construit ușor și în variante tolerante la defecte. În această lucrare se va studia prin mijloacele simulării capacitatea de toleranță la defecte a acestor mașini electrice.*

#### ÖSSZEFOGLALÓ

*Napjainkban a fejlett ipari automatizálási berendezések olyan hibatűrő villamos gépeket igényelnek, amelyek meghibásodásuk estén is tovább tudnak működni. A moduláris felépítésű állandó mágneses változó reluktanciájú motorokat könnyen megépíthetjük hibatűrő változatban is. Cikkünkben egy ilyen lineáris gép hibatűrését vizsgáljuk szimulációk segítségével.*

**Kulcsszavak:** hibatűrés, moduláris felépítés, állandó mágneses változó reluktanciájú lineáris motor, szimuláció.

#### 1. BEVEZETÉS

A hibatűrő ipari rendszerek tervezése nehéz mérnöki feladat. A vezérlő rendszernek fel kell ismernie az esetleges hibákat és be kell avatkoznia a rendszerbe oly módon, hogy a hiba káros hatása minél kisebb mértékben befolyásolja a működést. Legegyszerűbb esetben elég egy tartalék alegységet elindítani, amennyiben ilyen rendelkezésre áll. Azonban nagyon költséges megoldás a rendszer gyakorlatilag megduplázása. Ezért olyan alegységeket kifejlesztésén dolgoznak, amelyek egy hiba

előfordulása esetén is működésben tudják tartani a rendszert legalább addig, míg lehetőség nyílik a hibás berendezés kicserélésére [1].

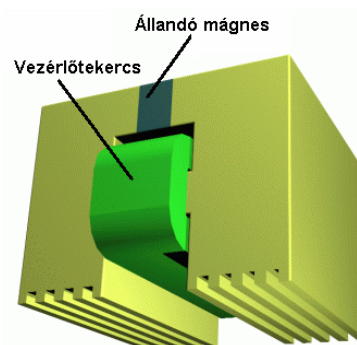
Emiatt a hibatűrő villamos hajtásrendszerek iránt is komoly a szakmai érdeklődés. A hibatűrő villamos gépek szerves részei a fejlett, biztonságos működésű villamos hajtásrendszereknek. Gyakorlatilag kisebb-nagyobb költséggel valamennyi villamos gép alkalmas arra, hogy hibatűrővé alakítsák át [2], [3]. A teljesítményelektronika, valamint a digitális jelfeldolgozás fejlődése utat nyitott a hibatűrő villamos hajtásrendszerek vezérlésének tökéletesítése felé [4].

## 2. A TANULMÁNYOZOTT HIBATŪRÓ MODULÁRIS LINEÁRIS VILLAMOS GÉP

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.

A 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. Kutatócsoportunk több éven át tanulmányozta a hibrid lineáris motorok különböző változatait [5]. A moduláris felépítésű gépek tűntek a legígéretesebbnek, mivel ezeket könnyen lehetett a felhasználási területek konkrét igényeihez alakítani.

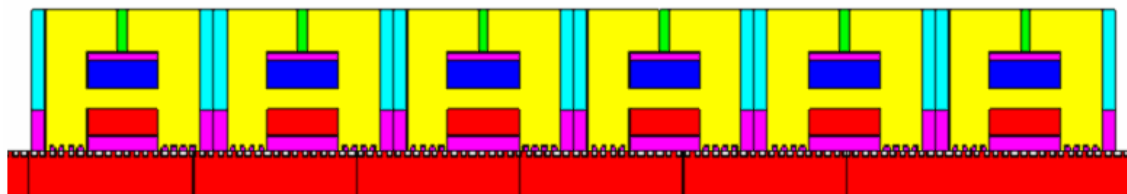
Ezek a lineáris gépek állandó mágneses változó reluktanciájúak és fő alkotóelemük az 1. ábrán látható armatúra modul, amit tetszőleges számban és módon építhetünk egybe. A modulok egyszerű felépítésűek: a két finom fogazású pólus közrefogja az állandó mágneset, amely gerjeszti a modulon és az alatta levő állórészen átfolyó mágneses fluxust. A lineáris gép állórésze hidegen hengerelt acélból készül és keresztirányban fogazott.



1. ábra.  
Egy modul

A moduláris lineáris gépek működési elve egyszerű. Ha a modul nem aktív (a vezérlőtekerccs nincs táplálva) az állandó mágnes gerjesztette fluxus teljes mértékben az állandó mágnes alá, vele párhuzamosan beépített mágneses köri ágban halad át és nem a légrésen át. Ekkor nem keletkezik se vonzó (normális irányú), se tangenciális (húzó) erő. Amennyiben tápláljuk a vezérlőtekerccset az állandó mágnes gerjesztette fluxust gyakorlatilag „kényszerítjük”, hogy a két pólus alatti légrésen át záródjon. Csak ekkor keletkezik a hasznos húzóerő, valamint a lineáris motoroknál sajnos elkerülhetetlenül fellépő vonzóerő. A minimális mágneses energia elvének alapján a mozgó rész abba a helyzetbe fog beállni, amelyben a modul két pólusának fogazata szemtől szembe kerül az állórész fogazatával, mivel ekkor lesz a legalacsonyabb a légrésben felhalmozott mágneses energia.

Az általunk tanulmányozott háromfázisú hibatűrő változat 6 modulból épül fel (lásd a 2. ábrát).



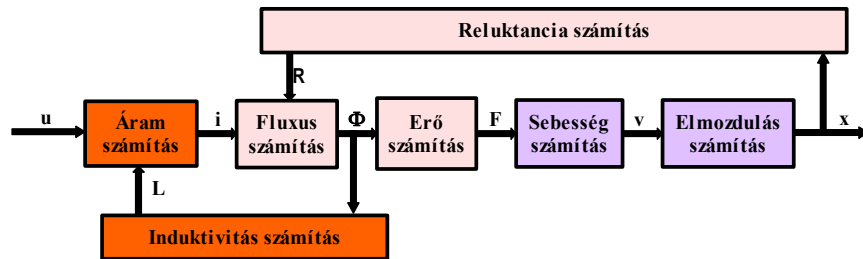
2. ábra.

*A tanulmányozott háromfázisú moduláris lineáris gép*

Két-két, az állórész fogaihoz képest azonos relatív helyzetbe elrendezett modul tekercsei párhuzamosan vannak kötve és egy fázist alkotnak. Tehát egy fázis árama gyakorlatilag két áramúton halad át. A fázisokat egy-egy félhidas áramirányítóról tápláljuk.

### 3. A SZIMULÁCIÓS PROGRAM

A moduláris lineáris motorok szimulációjának alapja egy kombinált áramköri-mezőszámítási matematikai modell [5]. Ennek fő alkotóelemei és a köztük levő kapcsolatok a 3. ábrán láthatók.



3. ábra.

Az alkalmazott matematikai modell tömbvázlata

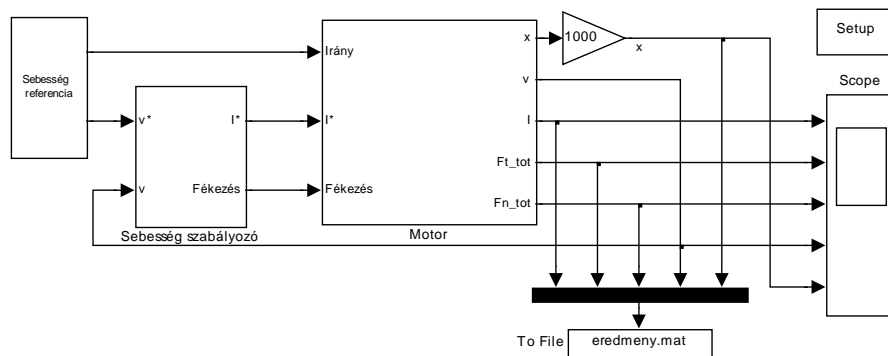
A modell három fő alkotóelemből áll:

1. Az áramköri egység, amelyik kiszámítja a vezérlőtekercsek áramát ( $i$ ) a bemenő feszültség ( $u$ ) alapján, figyelembe véve a tekercsek induktivitásának ( $L$ ) módosulását a rajtuk áthaladó mágneses fluxus változásának hatására.
2. A mezőszámítási egység kiszámítja a motor helyettesítési mágneses áramköréből a motor különböző részein áthaladó mágneses fluxust ( $\Phi$ ) 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 ( $\Phi$ ) 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.

A matematikai modellt MATLAB-Simulink környezetben építettük fel, mivel céljainknak minden szempontból ez a szimulációs platform bizonyult a legmegfelelőbbnek, mivel itt a modellek felépítése igen egyszerű, de ugyanakkor nagyhatékonyságú megoldási algoritmusok segítik a szimulációt.

A program fő képernyője a 4. ábrán látható. Jól megkülönböztethetők a hajtásrendszer egyes alegységei.



4. ábra.

A szimulációs program fő képernyője

A szimuláció eredményeit grafikus formában a többsatornás *Scope*-típusú oszcilloszkópon jelenítettük meg. Ugyanakkor ezeket az eredményeket utólagosan is feldolgozhatjuk, mivel a *To File* tömbök segítségével *mat*-típusú bináris állományokban is elmentettük őket.

## 4. A SZIMULÁCIÓ EREDMÉNYEI

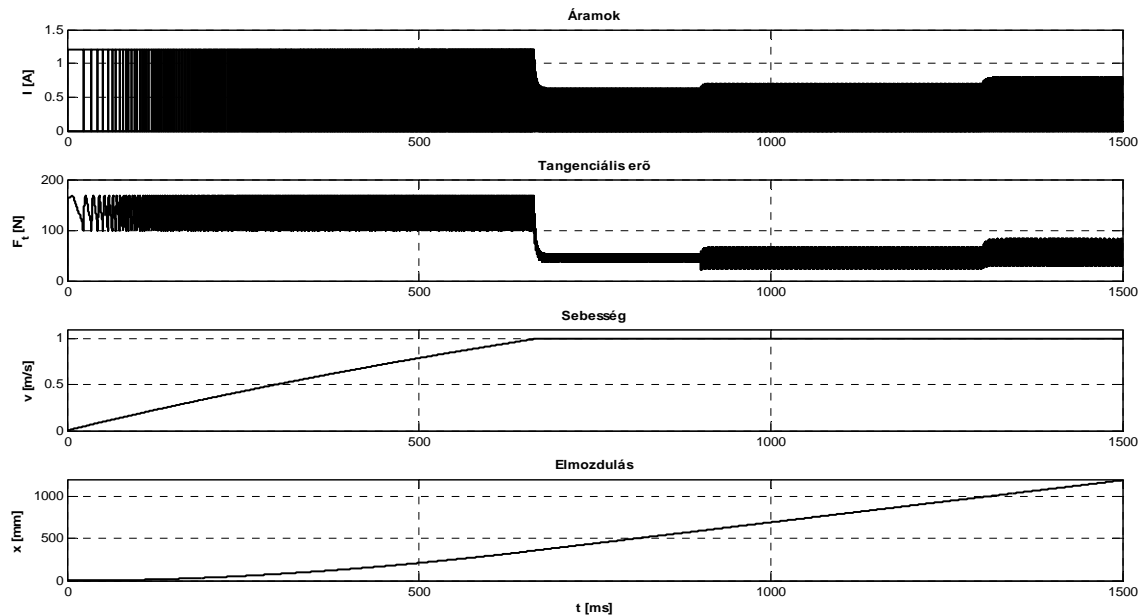
A fentebb ismertetett szimulációs program segítségével a moduláris lineáris gép hibatűrését tanulmányoztuk.

A következő működési feltételeket szimuláltuk:

1. normál, hibamentes üzem
2. egy megszakadt áramút,
3. egy megszakadt fázis,
4. két különböző fázishoz tartozó áramút megszakadása.

A következőkben két szimuláció eredményét mutatjuk be. Mindkét esetben a hajtásrendszernek referenciaként egy 1 m/s-os lépcsőjelet írtunk elő.

Az első esetben 900 ms-nál megszakítottuk az egyik fázis egyik áramútvját, majd 1300 ms-nál egy másik áramutat egy másik fázisból. Ekkor gyakorlatilag a gép egyetlen teljesen ép fázissal működött tovább. Az első szimuláció főbb eredményeit az 5. ábrán láthatjuk.



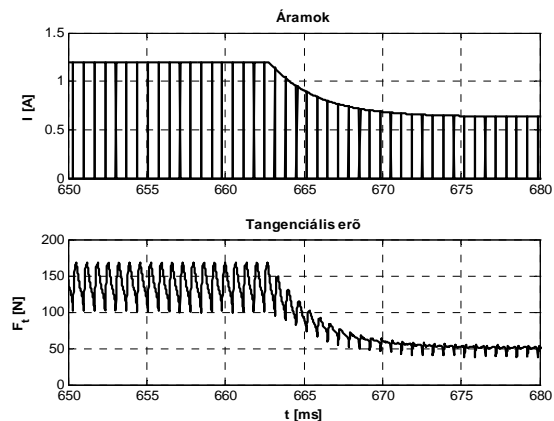
5. ábra.

*Az első szimuláció eredményei*

Az ábrán tanulmányozhatók a vezérlőáramok, a teljes tangenciális (húzó) erő, a sebesség, valamint az elmozdulás változása az idő függvényében.

Tisztán kitűnik a négy különböző működési fázis. Körülbelül 663 ms-nál a lineáris gép eléri a referenciasebességet. Addig az áramimpulzusok amplitúdója maximális (1,25 A) és a motor nagy húzóerővel gyorsítja fel a mozgó armatúrát. A referenciasebesség elérése után a gép 50 N körüli tangenciális átlagerő mellett képes tartani az elért sebességét. A 6. ábrán láthatók az ennek a fázisváltásnak megfelelő áramimpulzusok. Tisztán látszik, hogy állandó sebességű mozgás mellett a húzóerő lüktetése igen alacsony.

900 ms-nál megszakad az egyik fázis egyik áramútja. Ahhoz, hogy a gép sebessége ne változzon a megmaradt áramútban valamivel nagyobb vezérlőáram fog folyni. A hibás fázisú

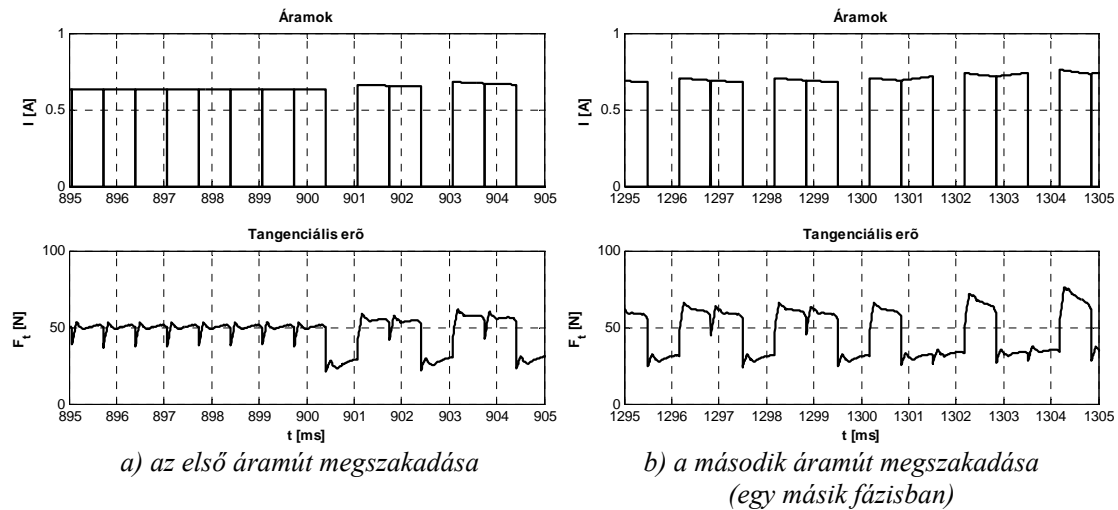


6. ábra.

*Az első szimuláció eredményei (nagyítás)*

modul csak fele nagyságú tangenciális erő kifejtésére képes, ami a 7a. ábrán is jól látszik. A meghibásodás hatására a húzóerő lüktetése számottevően megnő.

Egy másik fázis egyik áramútjának 1300 ms-nál történő megszakadásának hatása jól látható a 7b. ábrán. Immár két arimpulzusnak megfelelő tangenciális erő feleződik meg. Az előírt sebességet a hajtásrendszer már csak úgy tudja tartani, ha a vezérlőáramok amplitúdóját tovább növeli.



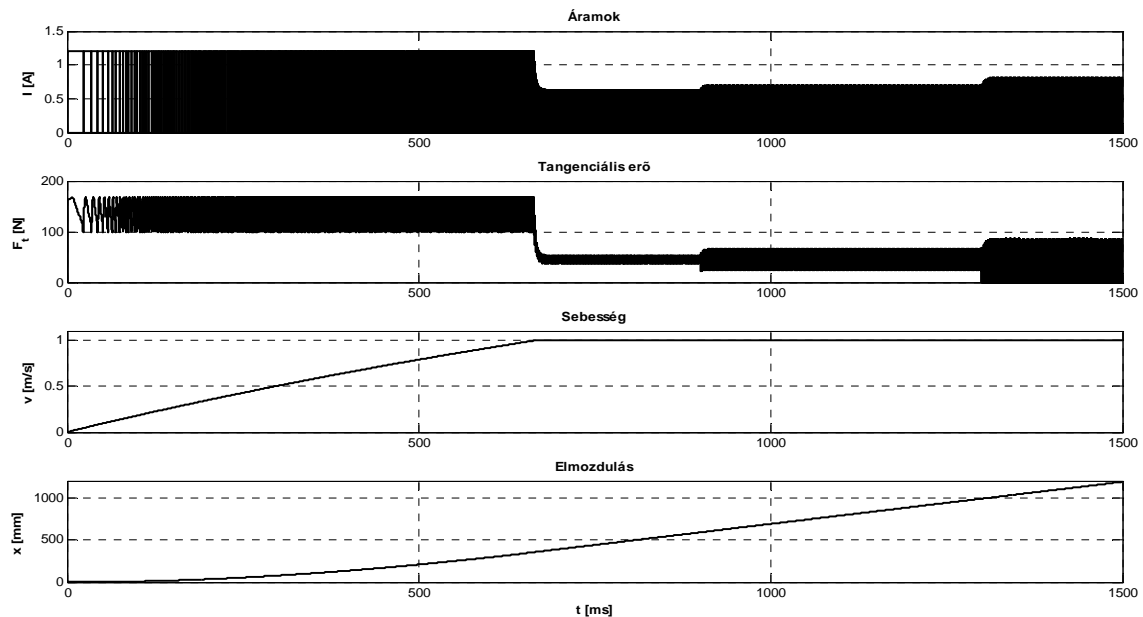
a) az első áramút megszakadása

b) a második áramút megszakadása (egy másik fázisban)

7. ábra.

Az első szimuláció eredményei (nagyítás)

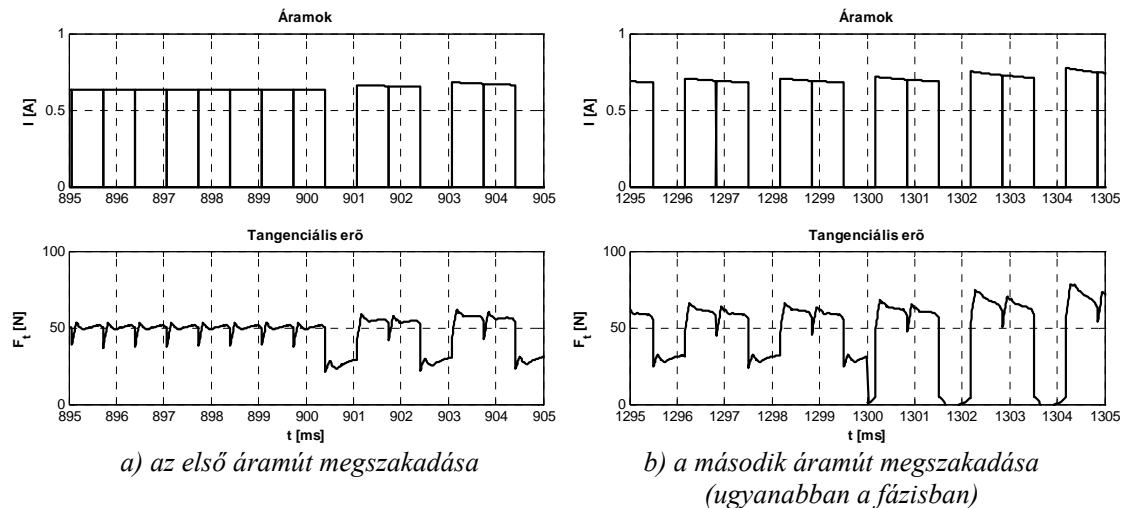
A második szimuláció hasonló az elsőhöz, azzal a különbséggel, hogy ebben az esetben a második megszakított áramút ugyanabból a fázisból való, mint az első. Tehát gyakorlatilag egy teljes fázist szakítottunk meg a szimuláció utolsó fázisában. Ennek a szimulációnak a főbb eredményeit a 8. ábrán láthatjuk.



8. ábra.

A második szimuláció eredményei

A moduláris lineáris gép állapotainak változását a hibák megjelenésével a 9 ábrán láthatjuk.



9. ábra.

A második szimuláció eredményei (nagyítás)

Az alapvető különbség az előző esethez képest, az hogy egy teljes fázis megszakadása megkétszerezi a tangenciális erő lüktetését (gyakorlatilag a húzóerő minden harmadik periódusban zéróra esik). Ebben az esetben a mozgó armatúrát csak a tehetetlensége viszi át az adott lépésen.

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK

A javasolt háromfázisú moduláris felépítésű állandó mágneses változó reluktanciájú motor hibátűrője jó. Képes továbbhaladni és sebességét tartani bármely két áramút meghibásodása esetén is. Természetesen a hibás működés a tangenciális erő számottevő lüktetését eredményezi.

A tanulmányozott gép kitűnően alkalmazható olyan kritikus ipari berendezésekben, ahol bármely alegység meghibásodása nyomán történő be nem tervezett leállás komoly fennakadásokat okoz vagy nagy kárral jár (autóipar, vegyipar, stb.).

A továbbiakban kutatásunkat kiterjesztjük a gép egyéb meghibásodásaira, illetve a teljesítményelektronikája hibáinak tanulmányozására is.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a publikáció részben a "Magyar-román kormányközi T&T együttműködés 2008-2009" részét képező "Ipari automatizálási rendszerekben alkalmazott forgó és lineáris elektromechanikus aktuátorok fejlett irányítási, állapot-felügyeleti és diagnosztikai módszereinek kutatása" című (szerződésszám 27/09.06.2008) projekt keretében elvégzett kutatómunka eredményei alapján készült. A szerzők ez úton mondanak köszönetet a téma finanszírozásáért.

## IRODALOM

- [1] Blanke, M., "Diagnosis and Fault-Tolerant Control," Springer Verlag, 2006.
- [2] Szabó L., Bíró K.Á., Fodor D., Ruba, M.: "Hibatűrő villamos hajtásrendszerek," SzámOkt – ENELKO' 2007, az Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság Számítástechnikai, Energetikai és Elektrotechnikai Konferenciája, Nagyvárad, 2007, pp. 157-160.
- [3] Ruba, M., Szabó L., Fodorean, D. "On the Fault Tolerant Switched Reluctance Machines," *Proceedings of the International Scientific Conference MicroCAD '2008*, Miskolc, Section J (Electrotehnics and Electronics), 2008, pp. 73-78.
- [4] Heimerdinger, W., Weinstock, C., "A Conceptual Framework for System Fault Tolerance," Technical Report CMU/SEI-92-TR-033, Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute, Pittsburgh (USA), 1992.
- [5] Viorel, I.A., Szabó, L., "Hybrid Linear Stepper Motors," Mediamira Könyvkiadó, Kolozsvár, 1998.