

# Hibás forgórészű aszinkrongépek numerikus módszeren alapuló vizsgálata

## FEM based analysis of squirrel cage induction machines having broken rotor bars

## Analiza mașinii de inducție cu bare rotorice rupte prin metoda elementelor finite

*DOBAI Jenő Barna<sup>1</sup>, dr. SZABÓ Loránd<sup>1</sup>,  
dr. BIRÓ Károly Ágoston<sup>1</sup>, dr. FODOR Dénes<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosgépek Tanszék,  
400020 Kolozsvár, C-tin Daicoviciu 15, e-mail: barna.dobai@mae.utcluj.ro

<sup>2</sup>Veszprémi Egyetem, Műszaki Informatikai- és Villamosmérnöki Kar,  
Automatizálás Tanszék, 8200 Veszprém, Egyetem u. 10., e-mail: fodor@almos.vein.hu

**Abstract:** *Rotating electrical machines play an important role in the world's industry. Hence there is a strong demand on their reliable and safe operation. Their faults and failures can lead to excessive downtimes and generate enormous costs due to reduced output, emergency maintenance and lost revenues. In this paper a FEM model of a three phase squirrel-cage induction machine is presented. It is used to analyze the behaviour of the machine having broken rotor bars.*

**Összefoglaló:** *Ipari környezetben leginkább a háromfázisú hálózatról táplált kalickás forgórészű aszinkronmotorokat használják, tehát ezek meghibásodása nem kívánt termelés kiesést eredményezhet komoly anyagi károkat vonva maga után. A cikkben bemutatott numerikus módszert alkalmazva pontos képet kaphatunk az aszinkrongép forgórész hibáinak a hatásairól, amely felhasználható hatékony diagnosztizáló módszerek kidolgozásában.*

**Rezumat:** *Mașinile de inducție cu rotor în colivie sunt cele mai frecvent utilizate în industrie. Siguranța lor în funcționare, fiabilitatea și eficiența acestora sunt criteriile de interes major pentru utilizatorii industriali, deoarece defectarea mașinilor electrice poate duce la mari pierderi materiale. În acest articol se prezintă un studiu despre efectele ruperii barelor rotorice asupra funcționării mașinii de inducție. Studiul se bazează pe rezultatele obținute în urma analizei numerice de câmp bazată pe metoda elementelor finite. Rezultatele obținute pot fi valorificate în dezvoltarea unor metode eficiente de diagnosticare noi ale mașinilor electrice.*

**Kulcsszavak:** kalickás forgórészű aszinkron gép, forgórész hiba diagnosztika, végelemek numerikus módszere

## 1. BEVEZETÉS

A villamos gépeket általában 30 éves élettartamra tervezik, de nagyrészüik már 5–10 év után meghibásodik. Ez kényszeríti a szakembereket a karbantartás, megelőzés, javítás tökéletes elvégzésére. A megelőzés egyik legjobb módszere a gépek állandó vagy időszakos vizsgálata, amely során észlelhetők a

meghibásodások, akár már kialakulásuk kezdeti fázisában, amikor a keletkezett károk még nem jelentősek. Az ilyen diagnosztikai módszerek kidolgozásában fontos, hogy pontosan ismerjük milyen hatással van a villamos gépek mindegyik meghibásodása a gép működésére, illetve a mért paramétereire.

Mivel ipari környezetben a háromfázisú rövidre zárt (kalickás) forgórészű aszinkrongépek a legelterjedtebbek robusztus felépítésük és megbízhatóságuk miatt, bármilyen meghibásodásaikkal kapcsolatos kutatási eredmény biztos érdeklődésre tarthat számot. Így tehát vizsgálódásaink középpontjában a kalickás aszinkrongépek egyik leggyakoribb, és javíthatatlan meghibásodása állt, a forgórészi kalicka meghibásodása, illetve az ilyen típusú meghibásodások okozta aszimmetriák hatása a gép különböző paramétereire (a fázisáramra, a rudak áramára, stb.).

A villamos gépek alapos tanulmányozása jól megalapozott elméleti háttérrel igényel, amely fejlett szimulációs módszerek alkalmazása nélkül manapság már nem végezhető el, mivel a gyakorlat által felvetett feladatok analitikus, zárt formában megadható megoldásának lehetősége azonban igen korlátozott. A gyakorlatban szükséges általános feladatok megoldásához feltétlenül numerikus módszerekre és a számítástechnika eszközeinek alkalmazására van szükség [5].

Ebben a cikkben áttekintjük egy háromfázisú kalickás aszinkrongép numerikus modellje összeállításának lépéseit, illetve a főbb szimulációk eredményeit megvizsgálva, fény derül arra is, hogy milyen elváltozásokat okoznak a különböző meghibásodásai az aszinkrongépeknek, majd összehasonlítjuk ezeket a módosulásokat a hibátlan, teljesen szimmetrikus aszinkrongép paramétereivel.

## 2. AZ ASZINKRON GÉP NUMERIKUS MODELLJE

A numerikus módszerek alkalmazása hasznos lehet az indukciós gépek meghibásodása révén létrejött aszimmetrikus üzemek vizsgálatában is. A villamos gépek numerikus mezőszámításán alapuló módszerek segítségével történő vizsgálatok révén könnyen észlelhetőek a gépek különböző hibái által okozott működési zavarok is, amelyeket így tanulmányozni lehet anélkül is, hogy a vizsgálandó gépet tönkretennénk, vagy költséges laboratóriumi kísérleteket kéne végeznünk a tanulmányozandó villamos géppel.

A villamos gépek legpontosabb matematikai modelljét, akkor kapjuk, ha a mezőszámítást a végeselemek numerikus módszerének (angol nevén *Finite Element Method*) alkalmazásával végezzük el. Emiatt az utóbbi években egyre elterjedtebbé vált a villamos gépek és egyéb elektromágneses berendezések tervezésében és analízisében a végeselem módszer alkalmazása. A szoftverpiacon egyre több olyan termék jelenik meg, amelyik valamilyen módon kapcsolódik e módszerhez. A végeselemek módszere tulajdonképpen a Maxwell mágneses- és elektromos tér egyenletein alapszik [4]:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \text{ és } \nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (1)$$

ahol  $\vec{H}$  a mágneses térerő [A/m],  $\vec{E}$  az elektromos térerő [V/m],  $\vec{J}$  az elektromos áram sűrűség [A/m<sup>2</sup>], és  $\vec{B}$  a mágneses fluxus [T]. Továbbá a mágneses és elektromos tér mennyiségei a következő egyenletek által leírt kapcsolatban állnak az anyag tulajdonságaival:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \text{ és } \vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (2)$$

ahol  $\sigma$  az elektromos vezetőképesség [S/m], és  $\mu$  a mágneses permeabilitás [H/m].

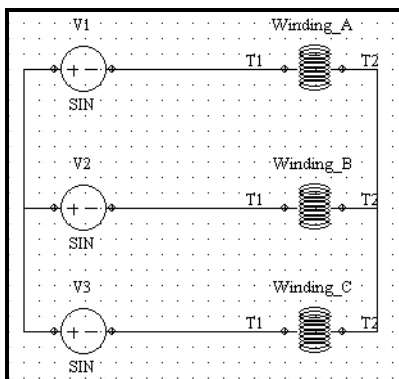
A szimulációk elvégzésére a kanadai-brit Infolytica cég által kifejlesztett *MagNet* szimulációs szoftver 6.10-es verzióját használtuk. A *MagNet* végeselemes CAD (*Computer Aided Design*) szoftver kitűnően alkalmas kétdimenziójú (2D), illetve háromdimenziójú (3D) elektromágneses terek szimulációjára [1]. Ez a program a világon az egyik legelterjedtebb a mérnökök és tervezők körében, ugyanis kiválóan alkalmazható bármilyen elektromágneses eszköz (például villamos motorok és generátorok, transzformátorok, indukciós melegítők, szenzorok, kábelek, szupravezetős alkalmazások stb.) tervezésére, optimalizálására és analízisére.

A számítási idő csökkentése érdekében a szakirodalomban azt ajánlják, hogy a villamos gépek modelljeit a legkisebb szimmetrikus részére kell felépíteni, ugyanis ezzel nagyban csökken a modell geometriai komplexitása, és nem utolsósorban a végeselemek csomópontjainak száma is jóval kevesebb

lesz [2]. A számítások elvégzése után az adott szimmetria-feltételek ismeretében megkapható a villamos gép egészében a mágneses mező eloszlása. Az aszimmetrikus aszinkrongépek vizsgálata esetén az említett egyszerűsítés sajnos nem alkalmazható, ugyanis az aszimmetrikus mágneses mező esetében a Neuman és a Dirichlet peremfeltételek nem hasonlóak a különböző póluspárok esetében, mint a szimmetrikus mágneses mező esetében. Következésképp a kalickás aszinkrongép modelljét a gép teljes keresztmetszetére kellett megépíteni annak érdekében, hogy a gépek forgórészi, illetve állórészi aszimmetriái estében is a mágneses mező kiszámítható legyen.

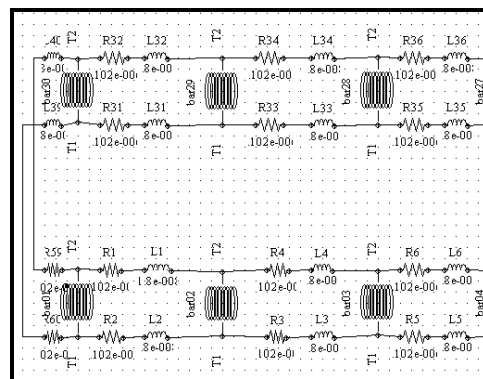
Ahhoz hogy a MagNet szimulációs programban megépíthessünk egy villamosgép modelljét, néhány fő lépést kell végrehajtanunk. Mindenek előtt szükséges a villamos gép geometriai modelljének az elkészítése, majd meg kell határozni valamennyi tartományt, a hozzájuk tartozó anyagjellemzőkkel és áramértékekkel együtt. Ehhez a MagNet programcsomag gazdag anyag-könyvtárát is felhasználhatjuk. A mértani modell megalkotásának utolsó fázisában elő kell írunk a perem- és szimmetria feltételeket. Az aszinkrongép külső peremén (az állórész külső kerületén), illetve a belső peremén (a forgórész belső kerületén), ahol feltételezéseink szerint a mágneses tér erővonalai nulla fokot zárnak be a peremmel, a Neumann-féle peremfeltételt állítottuk be, ahol pedig a mágneses erővonalak merőlegesek a peremekre, mint például a légrésben, ott a Dirichlet típusú peremfeltételt definiáltuk. Ez azt jelenti, hogy gyakorlatilag behatároltuk az elemzett térrészt, mert ez által az erővonalak nem léphetnek ki a gépen kívül (ezáltal elhanyagoljuk a külső, szórási fluxusokat is) [5].

A feladat megfogalmazásának utolsó lépésében össze kell állítanunk az aszinkrongép villamos modelljét. Ehhez a MagNet programcsomag *Circuit* menüjét használjuk. A menü könyvtára tartalmaz egy sor elektronikus alkatrészt (tápforrások, ellenállások, kondenzátorok, kapcsolók, stb.), amelyeket könnyen beszúrhatunk a kapcsolási vázlatunkba. Az áramkörti modell fő alkotóelemei az állórészi tekercsek, illetve a forgórész rúdainak megfelelően tömör tekercsek.



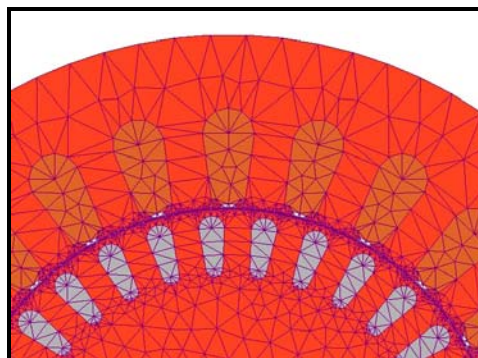
1. ábra

Az állórészi tekercsek áramkörének modellje



2. ábra

A forgórészi kalicka áramkörti modellje



3. ábra

Az aszinkron gép végeelem rácsszerkezetének részlete

A vizsgált aszinkrongép esetében a megfelelően összekapcsolt állórészi tekercseléseket három csillagkapcsolású, ugyanolyan amplitúdójú, szimmetrikus fázisú, sinusan változó, tápfeszültségre kapcsoltuk (1. ábra).

A 2. ábrán látható a forgórész kapcsolási vázlaton a kalickarudaknak megfelelő tömör tekercsek párhuzamosan kapcsolódnak egymáshoz. Két szomszédos rúd közé kapcsolt soros ellenállás és tekercse pedig a forgórész rövidrezáró gyűrűinek a két szomszédos rúd közötti rész ellenállásának és induktivitásának felelnek meg.

Az így elkészített geometria modellre a MagNet automatikusan legenerálja a végeelem rácsszerkezetet (3. ábra), amelyet a pontosabb számítások érdekében ajánlott a felhasználó által manuálisan finomítani olyan kiemelt érdekeltsgű részeken, mint a légrés, az állórésztekercsek vagy a forgórész rudak környékén.

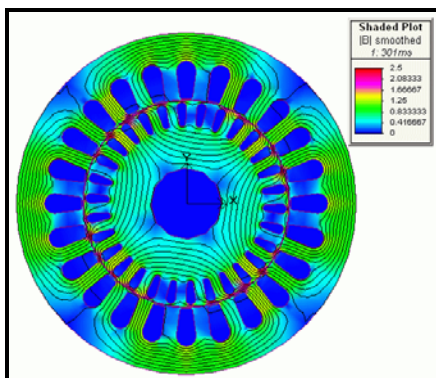
### 3. A SZIMULÁCIÓK EREDMÉNYEI

Mivel az aszinkrongép dinamikus szimulálását volt szándékunkban elvégezni a számítási algoritmus tranziens paramétereit kellett meghatározni, ami tulajdonképpen részünkről csak a számítási időlépés beállítását jelenti, megtartva a többi paraméter alapértékeit. Így az általunk meghatározott időpillanatokban a program elvégzi a mezőszámítást, kiszámítja a gép nyomatókát, és ennek megfelelően elforgatja a forgórészt. Tehát a szimulációt mindkét esetben (szimmetrikus, illetve aszimmetrikus aszinkrongép) 350 ms-os szimulálási idő (0,5 ms-os lépéssel) és a névleges terheléshez közeli, 10 Nm-es állandó terhelés, illetve 1 Nm / 1500 ford/perc együtthatójú a sebességtől függő terhelési feltételek mellett hajtottuk végre.

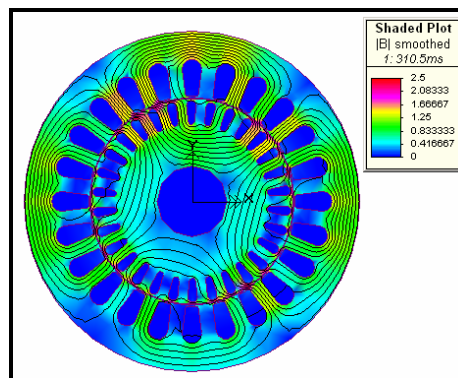
Ahhoz hogy forgórészi hibát vigyünk a villamos gép végeelem modelljébe, meg kell változtatnunk a forgórész kapcsolási vázlatát sorba kapcsolva a megszakítottnak tekintett rudak komponensével egy-egy ellenállást, melynek értéke legalább százszorosa legyen a rudak ellenállásához képest [4].

A következőkben a legérdekesebb eredmények közül mutatunk be néhányat. Valamennyi esetben azokat az eredményeket mutatjuk be, amelyek a tanulmányozott aszinkrongép 5 teljes fordulatának megtételének pillanatában kaptunk (301 ms a szimmetrikus gép esetében és 310,5 ms az aszimmetrikus gépnél).

*Szimmetrikus gép*



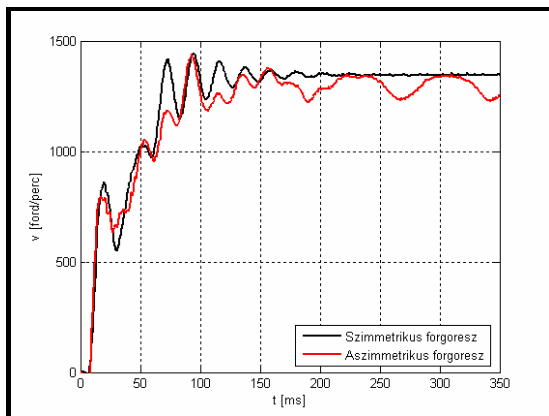
*Aszimmetrikus gép (3 eltört kalickarúd)*



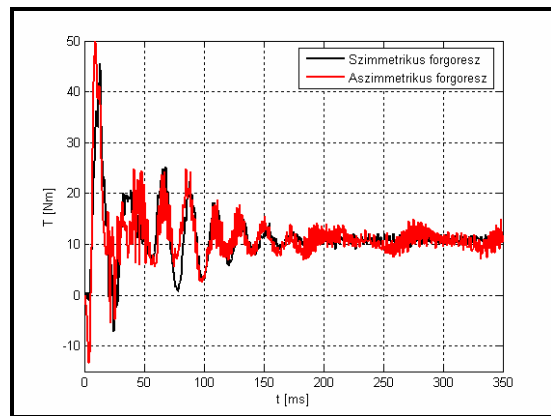
4. ábra

*A mágneses indukció abszolút értékének ( $|B|$ ) szintérképes ábrázolása*

A 4. ábrát értelmezve könnyen megfigyelhető az eltört kalickarudak hatása az aszinkrongép mágneses mezőjének eloszlására. Közelükben felborul az erővonalak szimmetriája, egyes fogakon több,



a) sebesség



b) nyomaték

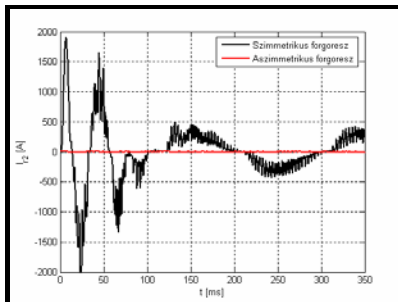
5. ábra

Az aszinkrongép főbb jellemzőinek az időbeni változása

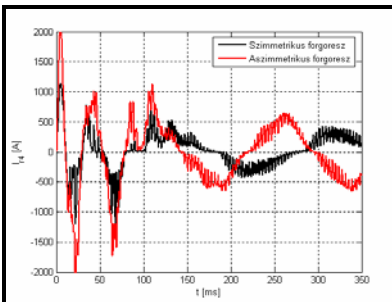
másokon kevesebb erővonat halad át. Ennek következtében természetesen egyes fogak telítődnek, különösen a sarkuk.

Az 5. ábrán látható a tanulmányozott aszinkrongép főbb jellemzőinek az időbeni változását. Mindegyik esetben közösen ábrázoltuk az aszimmetrikus, illetve a szimmetrikus gép esetén kapott eredményeket, mert így összehasonlításuk sokkal könnyebb.

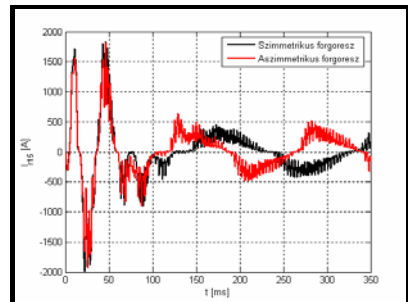
A továbbiakban bemutatjuk néhány kalickarúdon átfolyó áram időbeni változását. Először a középső eltört kalickarúd (a 2-es számú) árama látható a 6.a ábrán. Látható, hogy az eltört rúdban megszakadt az



a) a 2-es kalickarúd árama



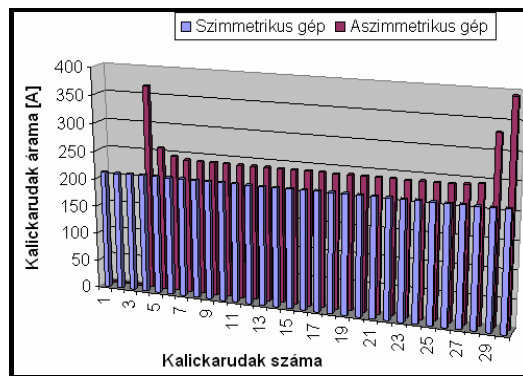
b) a 4-es kalickarúd árama



c) a 15-ös kalickarúd árama

6. ábra

Az aszinkrongép kalickarúdjai áramának az időbeni változása



7. ábra A kalickarúdjai áramerősségének effektív értéke a két tanulmányozott esetben

áram. A 6.b ábrán az eltört rudak szomszédságában lévő ép kalickarúd (4. kalickarúd) árama, a 6.c ábrán pedig eltört rudaktól távol levő 15. kalickarúd áramának az időbeni változása figyelhető meg.

Összehasonlítva a 6. ábrán látható eredményeket megállapítható, hogy a szimmetrikus aszinkrongép esetében nincs számottevő áramerősség különbség a három ábrázolt kalickarúd-áram között. Teljesen más helyzet áll elő az eltört kalickarudú aszinkrongép esetében. Míg az eltört rudaktól távol levő rudakban csak kevésbé nő meg az áram a bekövetkezett kalickarúd szakadások miatt, addig a szomszédos rudakban ez az áramerősség növekedés sokkal hangsúlyozottabb. Az áramerősség növekedés annál nagyobb, minél közelebb van az adott kalickarúd az eltört rudakhoz képest, amint a 7. ábrán is látható.

## 4. KÖVETKEZTETÉSEK

A legmodernebb szimulációs technikák immár lehetővé teszik a tranziens üzemek szimulációját a végeelem módszerre alapozott numerikus mezőszámítást felhasználva. A cikkben bemutatott végeelem numerikus módszer alkalmazása kiválóan alkalmas a gépek különböző hibái által okozott működési zavarok vizsgálatára a villamos gép tönkretétele nélkül. A szimuláció útján kapott eredmények vizsgálatakor megállapítottuk, hogy forgórészi hiba esetén erősen felborul a gép mágneses mezejének eloszlása, és hogy az eltört kalickarudakkal szomszédos rudakban megnő az áram, annál jobban, minél közelebb vannak az eltört kalickarudakhoz. Az eltört rudaktól távol már az áramok kiegyenlítődnek.

Mindezek alapján állíthatjuk, hogy a vizsgált elméleti és gyakorlati módszerek alkalmazása útján nyert következtetések nagy segítséget jelentenek az aszinkrongépek diagnosztikájában, illetve állapot-felügyeletében. Mindez arra jogosítja fel a kutatókat, hogy ezt a kutatómunkát érdemes tovább folytatni, más elemzési módszerek alkalmazását is tanulmányozni, annak érdekében, hogy az aszinkrongépek hibáit és az általuk okozott aszimmetrikus üzemeket még pontosabban behatárolni lehessen.

## 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a publikáció a Sapientia Alapítvány Kutatási Programok Intézete kutatási ösztöndíjával támogatott "**Indukciós gépek meghibásodása révén létrejött aszimmetrikus üzemek elméleti és gyakorlati vizsgálata**" című tanulmány alapján készült.

A szerzők ezennel is köszönetet mondanak az Alapítványnak a kutatói ösztöndíj folyósításáért.

## 6. IRODALOMJEGYZÉK

1. Cundev, M., Petkovska, L., Popnikolova-Radevska, M.: **FEM modelling of electrical machines synchronous type**. Proceedings of the 19<sup>th</sup> Convention of Electrical and Electronics Engineering in Israel, Jerusalem (Izrael), pp. 72-75, 1996.
2. Fišer, R., Ambrožič, V., Leskovec, R., **Modelling of dynamic and steady-state performance of induction motor having rotor asymmetry**, Conference Record of the IEEE SDEMPED '2001, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Grado (Olaszország), pp. 127-132, 2001.
3. Pöyhönen, S., Negrea, M., Jover, P., Arkkio, A., Hyötyniemi, H.: **Numerical magnetic field analysis and signal processing for fault diagnostics of electrical machines**. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 22, no. 4, pp. 969-981, 2003.
4. Sturgess, J.P., Preston, T.W.: **Damper cage design using the finite-element method**. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Drives, Oxford (UK), pp 457-462, 1993.
5. Szabó L., **Elektromágneses mező számítógépes analízise**, Magyar nyelvű szakelőadások (Terminológia) a 2000–2001-es tanévben, Villamosmérnöki Kar, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, pp. 93-107, 2001.