

Indukciós motorok kalicka hibáit kimutató módszerek összehasonlítása

Comparison of induction motor's squirrel cage faults detection methods

Compararea metodelor de diagnoză a defectelor coliviei motoarelor de inducție

Dr. Tóth Ferenc¹, Dr. Fekete Gábor¹, Dr. Kovács Ernő¹, Dr. Szabó Loránd²

¹ Miskolci Egyetem, Magyarország

² Kolozsvári Műszaki Egyetem, Románia

Abstract: Several methods for diagnosing the rotor bar faults of the squirrel-cage induction motors are cited in the literature. The aim of the paper is to compare these fault diagnosis methods by means of data processing in LabVIEW the results obtained by measurements. It will be emphasized that beside the current signature analysis also the three-phase current vector, the instantaneous torque, respectively the outer magnetic field can be used for diagnosing the rotor faults.

Rezumat: Diverse metode de detectare a barelor rupte în motoarele de inducție sunt citate în literatură. Scopul acestei lucrări este de a realiza o comparație a acestor metode prin procesarea în LabVIEW a datelor obținute experimental. Se va demonstra faptul că pe lângă analiza curentului motorului și alte mărimi (vectorul de curent trifazat, cuplul instantaneu, respectiv câmpul magnetic exterior) pot fi utilizate în diagnoza acestor defecte.

Összefoglaló: A rövidrezárt forgórészű aszinkron motorok pálcatoréseinek kimutatására különböző módszerek ismertek a szakirodalomban. Jelen dolgozat célja, hogy ezen ismert diagnosztikai módszerek között tegyen összehasonlítást, úgy hogy a méréssel kapott eredményeket a LabVIEW szoftver segítségével analizálja. A dolgozathoz kitűnik, hogy a forgórész kalicka hiba a motor áram analizálásán kívül, jól kimutatható a háromfázisú áramvektor, a pillanatnyi nyomaték, valamint a külső mágneses tér érzékelésének segítségével.

Kulcsszavak: indukciós motor, forgórész körüli meghibásodás, diagnosztika, LabVIEW.

1. BEVEZETÉS

Megbízhatóságuk, egyszerű felépítésük és olcsóságuk és miatt a rövidrezárt forgórészű indukciós motorokat széles körben alkalmazzák az energia átalakulások folyamatában. Ezen megbízható motortípusnál is előfordulhatnak meghibásodások. Statisztikai adatok szerint, az indukciós motorok a meghibásodásainál mintegy 10%-ot tesz ki a forgórész hiba, eltekintve a csapágy hibától, amely mintegy 40% körüli [1]. Tipikus forgórész hibának tekinthető, pl. a kalicka rúdában, vagy a villamos vezetés folytonosságát biztosító kötéseknel fellépő szakadás (ellenállás növekedés), a gép légrésének változása (a forgórész excentricitása). Annak érdekében, hogy a gépnél fellépő súlyosabb meghibásodást (esetleges jelentősebb termelés kiesést) elkerüljük, célszerű a hibákat már a kialakulásukat követően minél előbb megszüntetni, ezért különböző diagnosztikai módszereket szokás alkalmazni. A közvetlen forgórész körüli hibák kimutatására a következő módszereket szokás alkalmazni:

- a motor rezgésének érzékelése és frekvenciaanalízise [2, 3]
- a motor primer áramának érzékelése és frekvenciaanalízise [3, 4, 5]
- a motor háromfázisú áramvektorának (Park-vektorának) felvétele [6, 7, 8]

- a motor pillanatnyi nyomatékának érzékelése és frekvenciaanalízise [9, 10]
- a motor külső mágneses térének érzékelése és frekvenciaanalízise [11, 12, 13]

Az 1980-as évektől a villamos gépek hibáinak kiderítésére is a rezgésmérésen alapuló diagnosztikai módszereket alkalmazták. A 1990-es évek közepétől a rezgésen alapuló módszert háttérbe szorította a motor áramát mérő és analizáló módszerek (MCSA – Motor Current Signature Analysis). Ebben a dolgozatban a forgórész pálca törésének kimutatására az egyes módszerek között teszünk összehasonlítást, a mérési és analizálási eredményeket a LabVIEW szoftver alkalmazásával mutatjuk be.

2. FORGÓRÉSZ RUDAZAT HIBÁJÁNAK KÖVETKEZMÉNYE ÉS ENNEK KIMUTATÁSA

A rövidrezárt forgórészű indukciós motorok indításakor rendszerint a névleges áramuk 5-8-szorosát is felveszik, ennek eredményeként a forgórészben a motor indításakor jelentős hő fejlődik. A rudazat hőmérséklete jelentősen emelkedik és ennek következtében az alkatrészek mechanikai igénybevétele is megnő. A motor felfutása után beáll a terhelésnek megfelelő állapot, ezáltal megszűnik az erős hő és mechanikai igénybevétel. Ha a gépet gyakran indítják (vagy régen van üzemben), előfordulhat, hogy a változó mechanikai igénybevétel miatt, a pálcák rögzítése a rövidrezáró gyűrűnél meglazul és a korábbi jónak mondható villamoskötés megszűnik. A hiba miatt megnő a kör villamos ellenállása a forgórész rudazatban, vagy a rövidrezáró gyűrűben, ami megbontja a korábbi szimmetria helyzetet a gép gerjesztésében is.

2.1. A rudazattörés kimutatása a primer áram amplitúdó spektrumában

Ismert, hogy ha a háromfázisú szimmetrikus kialakítású aszinkron gép állórészének tekercseit egy szimmetrikus háromfázisú, f_1 frekvenciájú hálózatra kapcsoljuk, akkor a gépben egy forgó mágneses tér jön létre. A forgó mágneses mező a forgórészben is egy áramot létesít, de ennek a frekvenciája $f_2 = s f_1$, ahol s a slip. Amennyiben a szimmetria vagy a gépben, vagy a táplálásban megbomlik a gépben a pozitív sorrendű forgó mágneses tér mellett egy negatív sorrendű forgó mágneses tér is létrejön. A forgórész rudazatban bekövetkező meghibásodás megbontja a forgórész tekercselés szimmetriáját, így a pozitív sorrendű forgó mágneses mező mellett egy negatív sorrendű mágneses mező is fellép, amely visszahat az állórész primer áramára. Az állórészben indukált feszültség frekvenciáinak megállapításánál egy fázistekercs $\omega_1 = 2\pi f_1$ lüktető mezejéből indulhatunk ki, amelyet felbontunk egy a forgórészszel együttforgó és a forgórészszel szemben forgó mezőre. Az állórész forgó mezeje, az ω szögsebességgel forgórészben $\omega_1 - \omega$ ill. $\omega_1 + \omega$ körfeszültséget fognak indukálni. Mind az, $(f_1 - f)$ mind az $(f_1 + f)$ frekvenciájú forgórész áram összetevő lüktető mezőt létesít. Az előreforgó a forgórészhez képest az $\omega_1 - \omega$ szögsebességű mező, $\omega_1 - \omega + \omega = \omega_1$ az alap harmonikus állórész mezővel együtt forgó és hálózati frekvenciájú feszültséget indukál az állórész tekercsben, míg az ellene forgó $\omega_1 + \omega + \omega = \omega_1 + 2\omega$ szögsebességgel forgó és abban $f_1 + 2f$ frekvenciájú feszültséget indukál [14]. A felharmónikusok hasonlóan leírható frekvenciákat hoznak létre, így végeredményben a forgórész pálca törése miatt a primer áramban spektrumában a következő frekvenciával rendelkező amplitúdók jelennek meg:

$$f_b = f_1(1 \pm 2ks), \quad (1)$$

ahol $k = 1, 2, 3, \dots$

Az (1) által meghatározott frekvencián fellépő áramkomponens amplitúdója is megbecsülhető. A [4] irodalom szerint az alacsonyabb frekvenciájú oldalsáv amplitúdójának mértéke:

$$R_s \approx \frac{\sin \alpha}{2p(2\pi - \alpha)}, \quad (2)$$

ahol

$$\alpha = \frac{2\pi n p}{R} \quad (3)$$

és n a törött pólusok száma; p pólus párok száma, illetve R a forgórész hornyainak a száma.

2.2. A rudazattörés kimutatása a motor rezgés amplitúdó spektrumában

A villamos forgógépekben a nyomaték az álló- és forgó rész mágneses terének kölcsönhatásának eredményeként jön létre. Az álló és forgórész szimmetrikus kialakításával (páros számú hornyokkal és egyenletes légréssel készülnek az indukciós gépek) érik el azt, hogy a gépekben fellépő radiális (rezgést keltő) erők kiegyensúlyozzák egymást. Ha egy vagy több pólus eltörik, akkor a korábban egyensúlyban lévő erők közötti kiegyensúlyozó kapcsolat megszűnik és a gépben kiegyensúlyozatlan erőhatások lépnek fel, amelyek a gép jelentős rezgését okozhatják. Ezek a rezgések megfelelő érzékelők alkalmazásával mérhetők, ill. analizálhatók. A rezgés mérés eredményének kiértékeléséhez szükséges bizonyos ezen a területen használatos fogalmak bevezetésére, ezek a következők:

- forgásfrekvencia: $f_f = \frac{n}{60} \text{ Hz}$; (4)

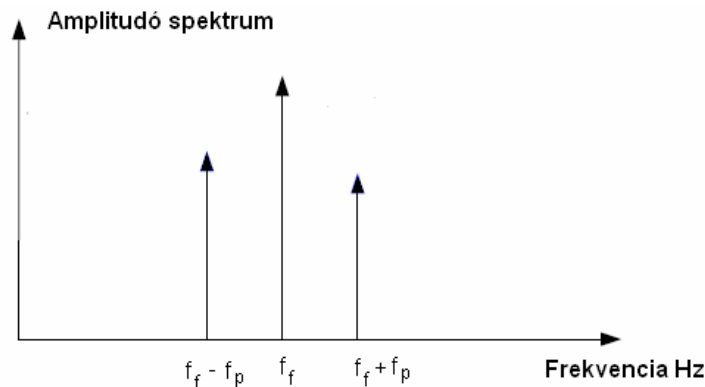
- slipfrekvencia: $f_{slip} = \frac{n_0 - n}{60} = \frac{f_1}{p} s$; (5)

- pólusfrekvencia (pole pass frequency): $f_p = 2p \cdot f_{slip}$ (6)

Az (5)÷(6) következik, hogy a pólusfrekvencia:

$$f_p = 2 \cdot s \cdot f_1 \quad (7)$$

A motorrezgés amplitúdó spektrumának ábrázolását a frekvencia függvényében mutatja az 1. ábra.



1. ábra

A motor rezgés amplitúdó spektruma

2.3. A rudazattörés kimutatása a háromfázisú áramvektor ábrázolásával

Ismert, hogy egy szimmetrikus kialakítású háromfázisú aszinkron gép állórész tekercselése által létrehozott gerjesztés a következő egyenlettel írható fel:

$$\Theta_s(\vartheta, t) = \frac{2}{\pi} \frac{\xi_s \cdot N_1}{p} \left[i_{sa}(t) \cos \vartheta + i_{sb}(t) \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_{sc}(t) \cos \left(\vartheta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (8)$$

A komplex vektor bevezetésével ($\bar{a} = e^{j2\pi/3}$) a (8) egyenlet az alábbi módon alakul:

$$\Theta_s(\vartheta, t) = \frac{3}{\pi} \frac{\xi_s \cdot N_1}{p} \operatorname{Re} \left\{ \frac{2}{3} \left[i_{sa}(t) + \bar{a} \cdot i_{sb}(t) + \bar{a}^2 i_{sc}(t) \right] e^{-j\vartheta} \right\}, \quad (9)$$

ahol

$$\bar{i}_s(t) = \frac{2}{3} \left[i_{sa}(t) + \bar{a} \cdot i_{sb}(t) + \bar{a}^2 i_{sc}(t) \right] \quad (10)$$

az un. háromfázisú áramvektor vagy térfázor (*Park vector*, vagy *space vector*). Ha i_s szinuszosan változik pl. $i_{sa}(t) = \hat{I}_s \cos(\omega t + \varphi_i)$, akkor a háromfázisú áramvektort leíró összefüggés az alábbi formátumra egyszerűsíthető:

$$\bar{i}_s(t) = \hat{I}_s e^{j(\omega t + \varphi_i)}, \quad (11)$$

ahol \hat{I}_s a fázistekercsekben folyó áram csúcserőssége.

A (11) kifejezést az mutatja, hogy a szimmetrikus háromfázisú tekercselés és a benne időben szinuszosan folyó szimmetrikus háromfázisú áram egy állandó amplitúdóval ω szögsebességgel forgó vektort ad. Amennyiben a (10)-ben az áram pillanatértékei, az egyes fázistekercsekben nem állandók, akkor ez a változás jelentkezik a háromfázisú vektor (11) egyenletében is és, ekkor a korábbi szabályos köralak torzul (elliptikus jellegűt). A szabályos körtől való eltérés „mértéke” egyúttal a hiba mértékére is utal.

Amennyiben a háromfázisú áramvektor felbontjuk egy valós és egy képzetes komponensre azaz:

$$i_x = \text{Re}\{\bar{i}_s\} = \frac{2}{3} \cdot i_{sa} - \frac{1}{3}(i_{sb} + i_{sc}) \quad (12)$$

$$i_y = \text{Im}\{\bar{i}_s\} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{sb} - i_{sc}), \quad (13)$$

akkor az i_x és az i_y arányos feszültség jelek megjeleníthetők.

2.4. A rudazattörés kimutatása a motor pillanatnyi nyomatékának ábrázolásában (a motor felfutásakor)

Hasonlóan a háromfázisú áramvektorhoz a háromfázisú tekercs-fluxus vektora is kifejezhető [14]:

$$\bar{\Psi}_s = \frac{2}{3} (\Psi_a + \bar{a} \cdot \Psi_b + \bar{a}^2 \Psi_c) \quad (14)$$

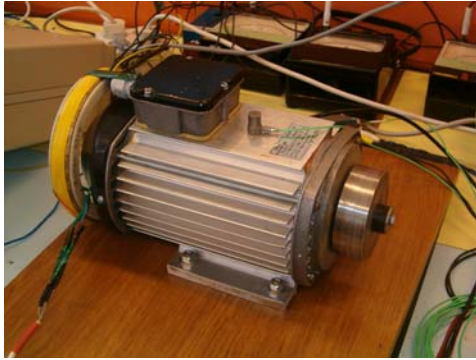
A fluxus vektor és a háromfázisú áramvektor ismeretében a pillanatnyi nyomaték [15]:

$$m = \frac{3}{2} \text{Im}\{\bar{\Psi}_s^* \cdot \bar{i}_s\} \quad (15)$$

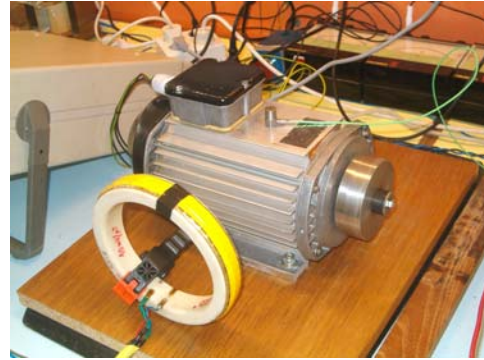
Aszimmetrikus esetben a fluxus- és az áramvektor pozitív sorrendű és negatív sorrendű összetevőkből, a pillanatnyi nyomaték a pozitív és a negatív sorrendű átlagnyomatékok összegéből, és egy zérus középértékű, kétszeres frekvenciájú –zajt és rezgést okozó – lengő nyomaték összetevőből tevődik össze [14].

2.5. A rudazattörés kimutatása a motor külső mágneses mezejének érzékelésével

A motor külső mágneses terét, rendszerint az indukció elvének alkalmazásával érzékelik, ami legegyszerűbb esetben egy nagy menetszámú tekercs. A tekercset lehet a motor csapágyapajzsához közel elhelyezni 2.a ábra (axiális irányú külső fluxus), és lehet a motorra radiális irányban 2.b ábra elhelyezni (radiális irányú külső fluxus). Az érzékelő tekercsben indukálódó feszültség nagysága függ a tekercs motor testtől való távolságtól, de a mérhető jeleket, a távolság tapasztalatunk szerint nem befolyásolja.



a,

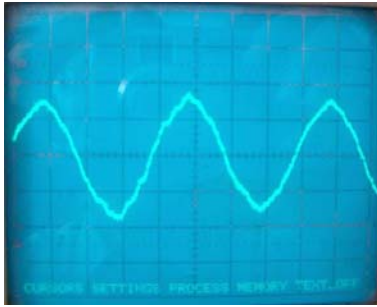


b,

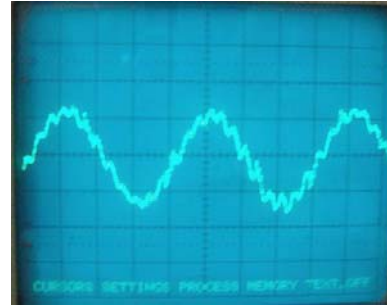
2. ábra

A motor külső fluxusának mérése

A motor körüli mágneses tér jelenlétét az indokolja, hogy az állórész és a forgórész gerjesztése nem áll tökéletes egyensúlyban még jól működő motor esetén sem, így hibás forgórészű motornál a forgórész hibájára utaló felharmónikus fluxusok jelennek meg a motort körülfogláló térben. A motor radiális irányú külső fluxusok által indukált feszültségeket mutatja a 3. ábra, amikor a gép terheletlen (üresjárás) állapotban volt.



a,



b,

3. ábra

A motor külső, radiális fluxusa által indukált feszültség: jó forgórészű motornál (a), hibás forgórészű motornál (b)

3. A MINTAVÉTELEZETT ÉRTÉKEK

A méréseket a következő adatokkal rendelkező motoron végeztük: $P_n=1.5$ kW, $U_n=400/230$ V (Y/ Δ), $f_i=50$ Hz, $I_n=4.2/7.3$ A, $n=1361$ 1/min, $\cos\varphi_n=0.69$. Horony számok $Z_s=24$, $Z_r=18$. A motor kifűzött állórészét mutatja 4.a ábra, a jó és hibás forgórészek pedig a 4.b ábrán láthatók. A 4.b. ábra jobb oldalán látható a hibás forgórész.



a,



b,

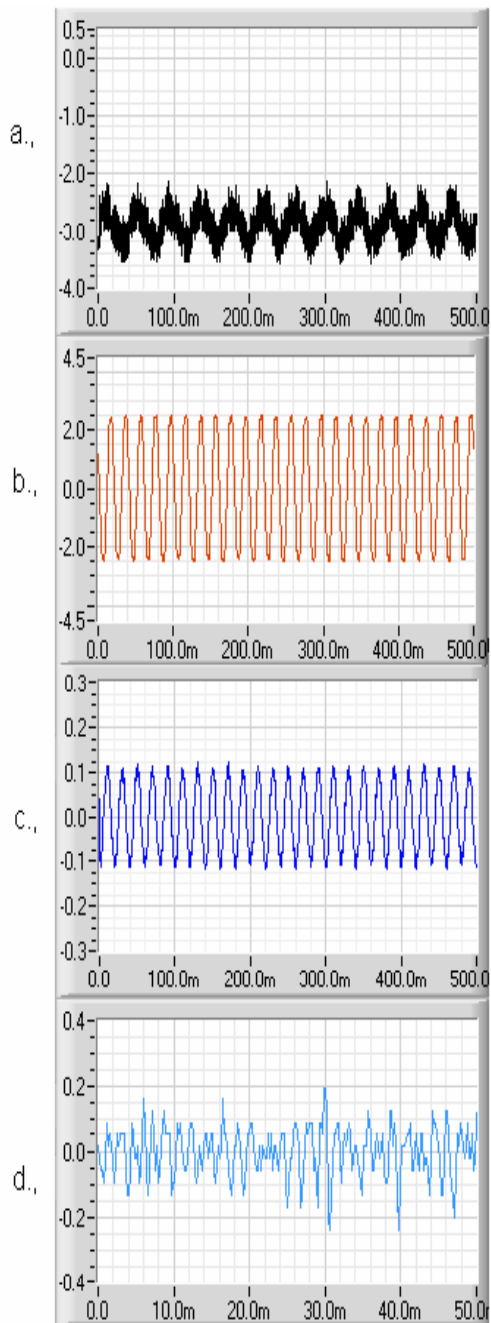
4. ábra

A vizsgált motor álló és forgórésze

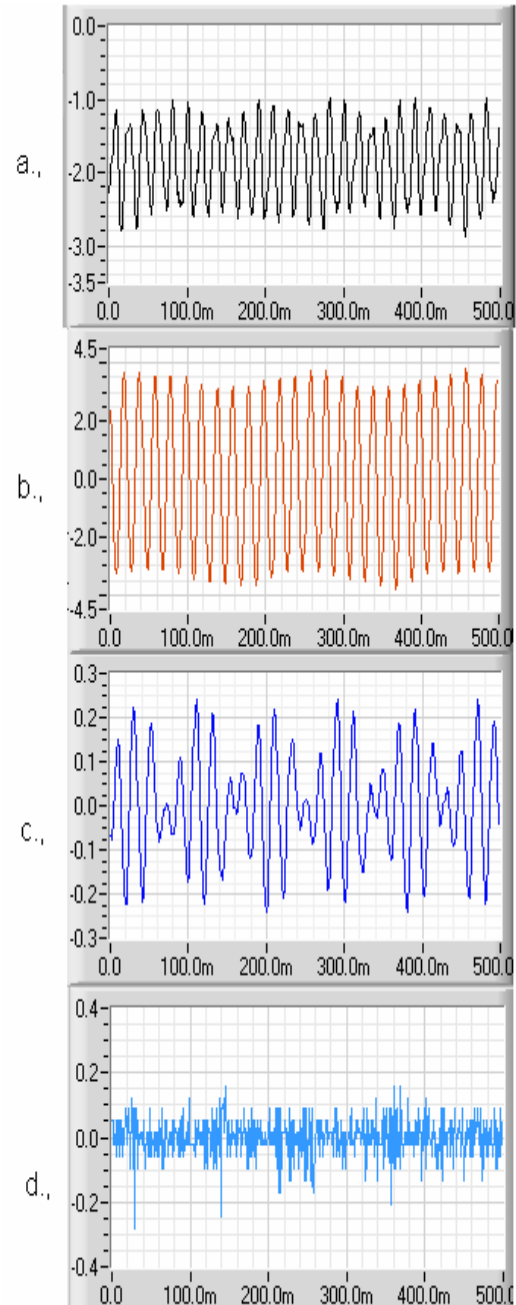
3.1. A mintavételezett értékek időfüggvényei

A LabVIEW programmal rögzített mintavételezett értékek időfüggvények láthatók az 5. és 6. ábrákon. Az 5. ábrán a jó forgórészű, a 6. ábrán a rossz forgórészű motor adatai látható, az:

- a., ábrákon a pillanatnyi nyomaték;
- b., ábrákon a pillanatnyi fázisára;
- c., ábrákon a külső radiális fluxus által indukált feszültség;
- d., ábrákon a motoron elhelyezett rezgésmérő jele láthatók.



5. ábra
Mintavételezett értékek a
jó forgórészű motornál

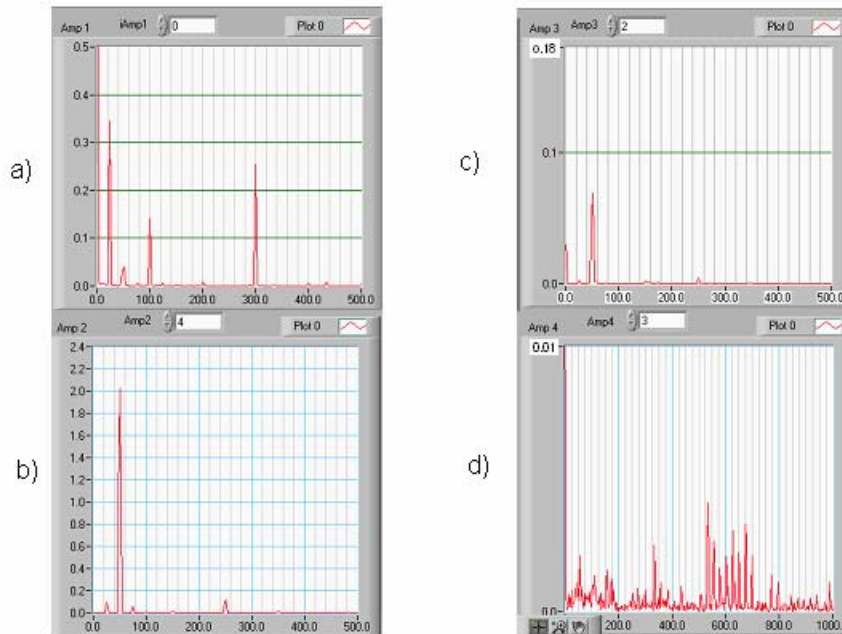


6. ábra
Mintavételezett értékek a
rossz forgórészű motornál

3.2. A mintavételezett értékek amplitúdó spektruma

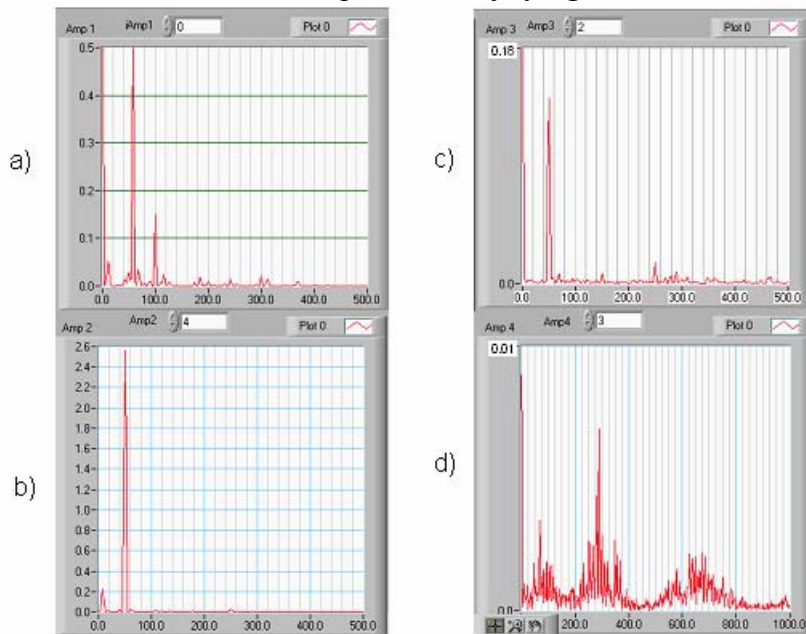
A LabVIEW programmal készített 5. és 6. ábrákon látható időfüggvények Fourier-spektrumát mutatja a 7. és 8. ábra. Az 7. ábrán a jó forgórészű, a 8. ábrán a rossz forgórészű motor mintavételezett értékeiből alkotott Fourier-spektrumok értékei az:

- a., ábrákon a pillanatnyi nyomaték;
- b., ábrákon a pillanatnyi fázisára;
- c., ábrákon a külső radiális fluxus által indukált feszültség;
- d., ábrákon a motoron elhelyezett rezgésmérő jelei Fourier-spektruma látható.



7. ábra

Mintavételezett értékek spektruma a jó forgórészű motornál



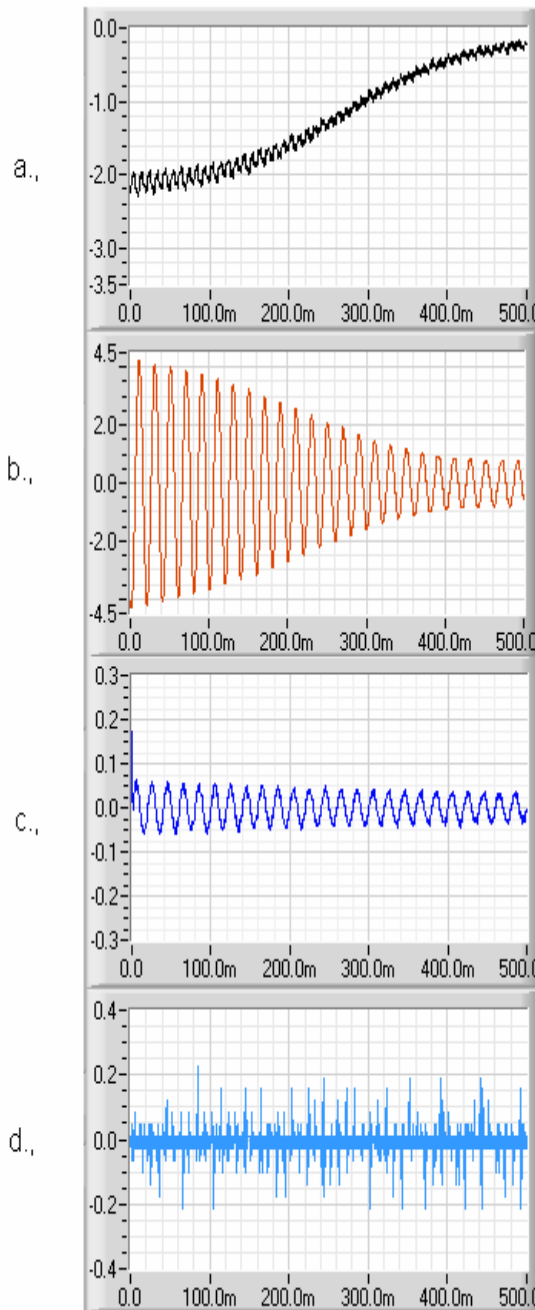
8. ábra

Mintavételezett értékek spektruma a rossz forgórészű motornál

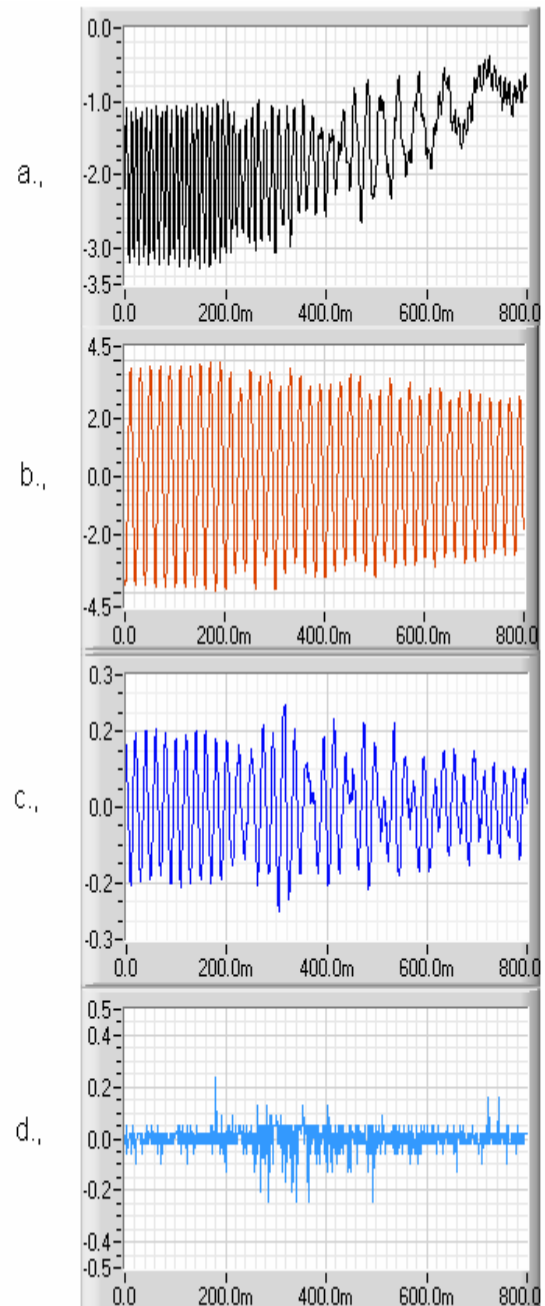
3.3. A mintavételezett értékek időfüggvénye a motor felfutásakor

A motor felfutásakor különösen jól érzékelhetők a különbségek a jó és a hibás forgórészrel rendelkező motor között mindegyik mért értéknél. Ez a különbséget szemlélteti a 9. és a 10. ábra. Az:

- a., ábrákon a pillanatnyi nyomatékok;
- b., ábrákon a pillanatnyi fázisáramok;
- c., ábrákon a külső radiális fluxus által indukált feszültségek;
- d., ábrákon a motoron elhelyezett rezgésmérő jelei láthatók.



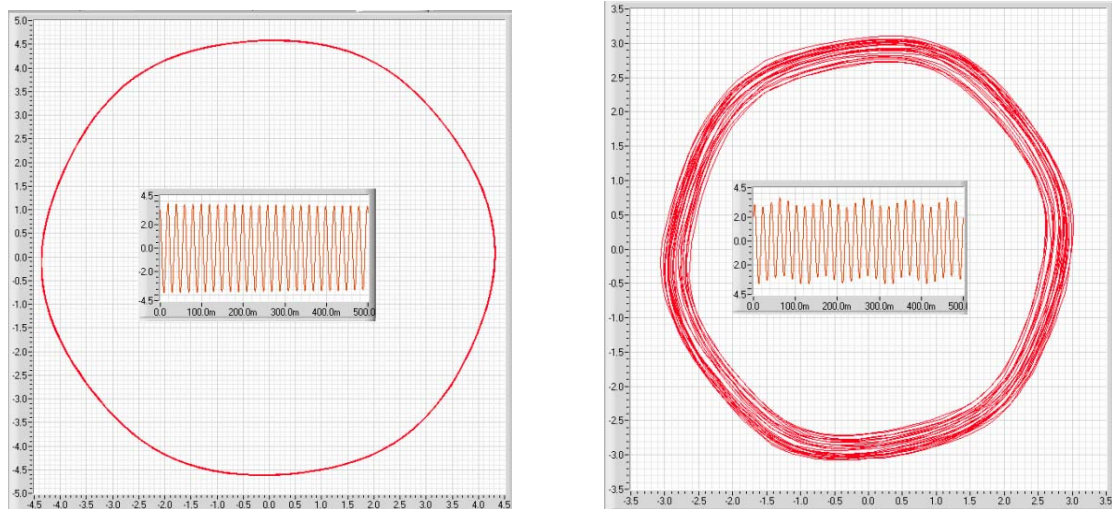
9. ábra
Mintavételezett értékek a jó
forgórészű motor felfutásánál



10. ábra
Mintavételezett értékek a rossz
forgórészű motor felfutásánál

3.4. A mintavételezett fázis áramainak időfüggvényei és a háromfázisú vektorok

A rövidrezárt forgórészű aszinkron motornál a forgórészen történő meghibásodás az állórész áram háromfázisú áramvektorának oszcillografálásával is megjeleníthető. Erre mutatna példát a 11. ábra. A 11a. ábrán a jó forgórészű háromfázisú áramvektor és egy fázis pillanatnyi árama látható. A 11b. ábra a hibás forgórészű motor háromfázisú áramvektorát és egy fázisáramának időfüggvényét szemlélteti. Amint ezen a 11b. ábrából is jól látható a hibás forgórészű motor fázisáramának lüktetése jól megjelenik a háromfázisú vektor megjelenítésekor.



a,

b,

11. ábra

A fázis áram időbeni változása és a háromfázisú áramvektor ábrázolása: a., jó forgórészű motornál, b., rossz forgórészű motornál.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A rövidrezárt forgórészű motor pálcá törése a fentiekben ismertetett módszerek mindegyikével kimutatható. Az utóbbi időben egyszerűségén fogva leginkább a motor állórész fázisáramában (MCSA) megjelenő felharmónikusok jelenlétéből következtetnek a meghibásodásra. Feltehető, hogy a jövőben a motor külső mágneses terének analizálásával egyszerűbb és olcsóbb monitoring módszerek kerülnek alkalmazásra.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a publikáció részben a „Magyar-román kormányközi TÉT együttműködés 2006-2007” részét képező „Lineáris és forgó gépes villamos hajtások állapot-felügyelete fejlett adatfeldolgozó eszközök segítségével” című RO-12/2005 számú kutatási projekt keretében elvégzett kutatómunka eredményei alapján készült.

A szerzők ez úton mondanak köszönetet a munka finanszírozásáért.

6. IRODALOM.

- [1] Tian Han, Bo-Suk Yang, Won-Ho Choi and Jae-Sik Kim, "Fault Diagnosis System of Induction Motor Based on Neutral Network and Genetic Algorithm Using Stator Current Signal", *International Journal of Rotating Machinery*, Volume 2006, pp. 1-13.
- [2] Mori D., Ishikawa T., Force and vibration analysis of induction motors", *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 41, no. 5 (May 2005), pp. 1948-1951.

- [3] Weidong Li: "Detection of Induction Motor Faults: A Comparison of Stator Current, Vibration and Acoustic Methods," *Journal of Vibration and Control*, Vol. 12, No. 2, pp. 165-188 (2006).
- [4] Ming Xu, Tom Alfod, "Motor current analysis and its applications in induction motor fault diagnostics", *ENTERACT*, 98, pp. 1-21.
- [5] Mark Fenger, Blake A., "Case histories of current signature analysis to detect fault in induction motor drives", *Electric Machines and Drives Conference, IEMD '2003*, vol.3, pp. 1459-1465.
- [6] Cruz S. M. A.; Cardoso A.J.M., "Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach", *Electric Machines and Power Systems*, Volume 28, Number 4, pp. 289-299.
- [7] M. Arkan, H. Calis, M.E. Taguk "Bearing and misalignment fault detection in induction motors by using the space vector angular fluctuation signal", *Electrical Engineering* (2005), no. 87, pp. 197-206.
- [8] Izzet y Önel, K Burak Dalci and Ibrahim Senol, "Detection of bearing defects in three- phase induction motors using Park's transform and radial basis function neural networks", *Sadhana*, Vol. 31, Part 3, pp. 235-244.
- [9] Rastko Fiser, Stanislav Ferkolj, "Development of Steady-State Mathematical Model of Induction Motor with Rotor Cage Faults", *Proceedings of the ICEM '1998*, Vol. 3, pp. 2188-2191.
- [10] P. Bajec, R. Fiser, J. Nastran, "Detection of Induction Motor Squirrel Cage Asymmetry Using Run-Up Test", *Proceedings of the ICEM '2004*, pp. 837-838.
- [11] Voitto Kokko, "*Condition Monitoring of Squirrel-Cage Motors by Axial Magnetic Flux Measurements*", Dissertation, Oulu, 2003.
- [12] R. Romary, R Corton, D. Thailly, and J.F. Brudny, "Induction machine fault diagnosis using an external radial flux sensor", *The European Physical Journal, Applied Physics*, 32 (2005), pp. 125-132.
- [13] Negrea, M.D. "*Electromagnetic flux monitoring for detecting fault in electrical machines*", TKK Dissertations 51, Espoo, 2006.
- [14] K. P. Kovács, "*Symmetrische Komponenten in Wechselstrommaschinen*", Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart, 1962.
- [15] Dr. Retter Gyula: "*Villamosenergia átalakítók*" 2. kötet, MK, Bp.1987.