

Bendiák István, Dr. Semperger Sándor: Aszinkron motorok mechanikai eredetű hibáinak elemzése áramjelalak-analízis módszerével

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, bendiak.istvan@uni-obuda.hu

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, semperger.sandor@uni-obuda.hu

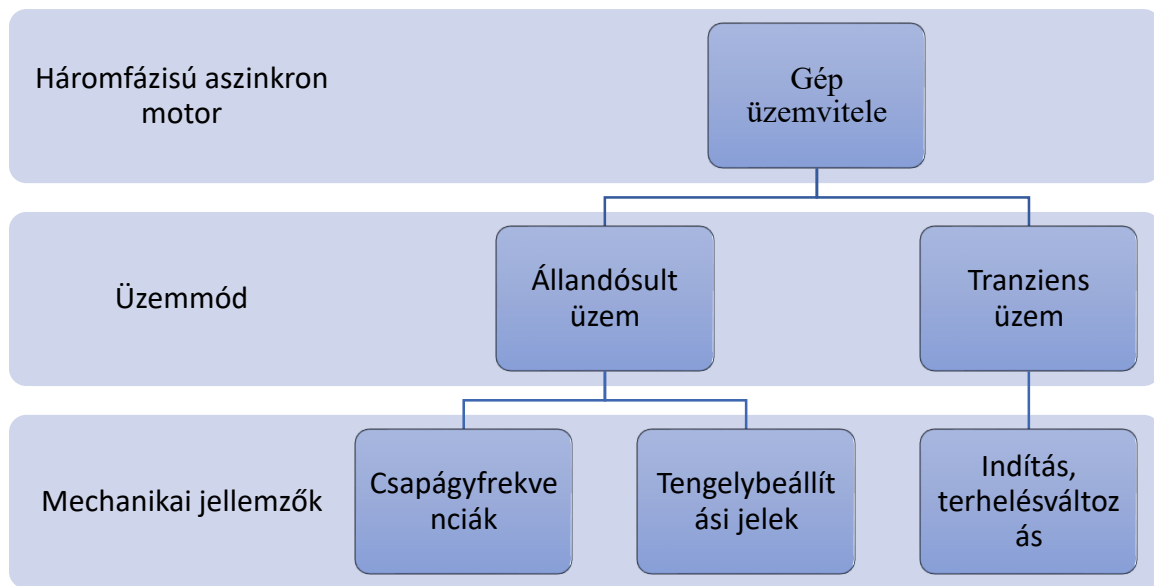
Absztrakt: Napjainkban villamos gépek állapotfelügyeletének a szerepe jelentősen megváltoztatta a forgógépekről kialakult mérési eljárásokat. A számítástechnika ütemes fejlődése és összekapcsolva a mérés technikával korlátlan információ mennyiségek elemzését teszi lehetővé. Feldolgozásról van szó és egy olyan információszerzési eljárásról, amely definiálja a gép aktuális fizikai állapotát és tanulórendszerrel tud képezni. Ennek lehetőségeit vizsgálja a pályamunka és hibametria lehetőséget vetít elő. Számos forgógép van jelen az iparban, együttműködés és ellenőrzés szükséges, folyamatos állapotfigyelés. Itt már nem csupán hibajelek detektálása a cél, hanem ezen túlmutató információforrás kezelése és fejlesztése, elindulva az öntanuló villamos hajtások területe felé. Gépek és rendszerek közös munkája, egymás üzemviteli jellemzőinek elemzése és korrigálása, abból konklúziók levonása

1. Bevezető

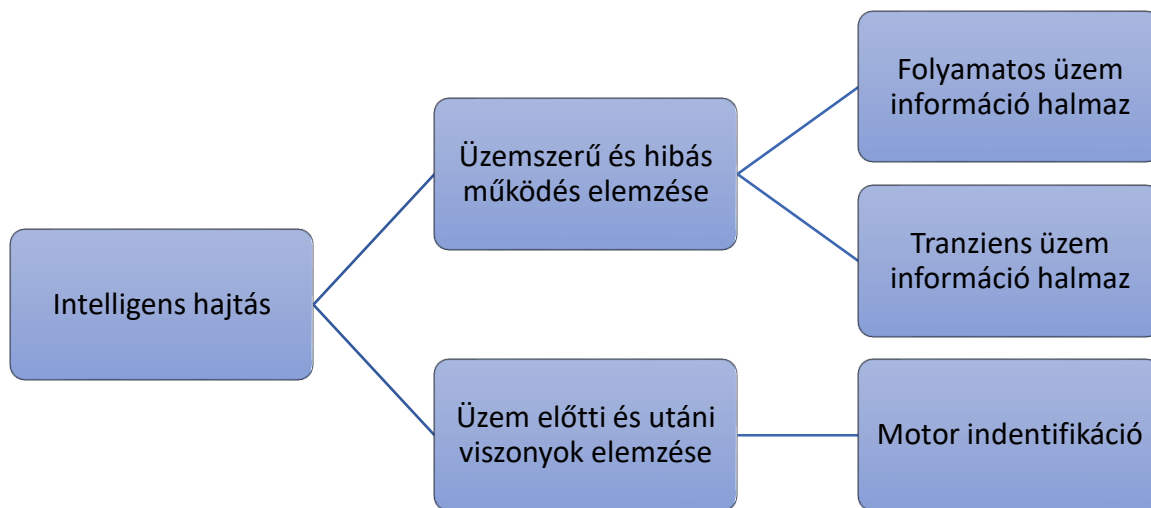
A forgógép diagnosztika szerteágazó szakterület [1-46], ezért jelenleg csak az aszinkron géptípusra fogok koncentrálni. Az áramjelalak-analízis rendkívül széles [1-46] körben alkalmazott módszer, napjainkra már kidolgozott eszközparkkal és mérési eljárásokkal, ennek lehetőségeit vizsgálom ebben a fejezetben. Ennek megfelelően áramjel spektrum diagnosztikai alkalmazása kap elsődleges szerepet. A nemzetközi szakirodalmak [30-46] széleskörben tárgyalják ezen vizsgálatokat, ennek módszernek tanulmányozása a cél. A fejezetek több szemszögű elemzést tartalmaznak, ennek az az oka, hogy minél szélesebb jelfeldolgozási lehetőséget lehessen megismerni. A diagnosztikai vizsgálatoknál idő-frekvencia-amplitúdó jelentős szerepet töltenek az időben változó jelek ábrázolásánál. A spektrumok felvételének kérdése egyrészt a motor táplálási módja (hálózat vagy frekvenciaváltó), illetve összefoglalóan a motorra kapcsolt feszültség és áram kialakuló jelalakja és ezek frekvencia komponensei. Ennek köszönhető a logaritmikus megjelenítés előnyben lett részesítve a motor áram spektrumainak ábrázolásánál [31-46].

2. Aszinkron motorok mechanikai hibáinak felosztása

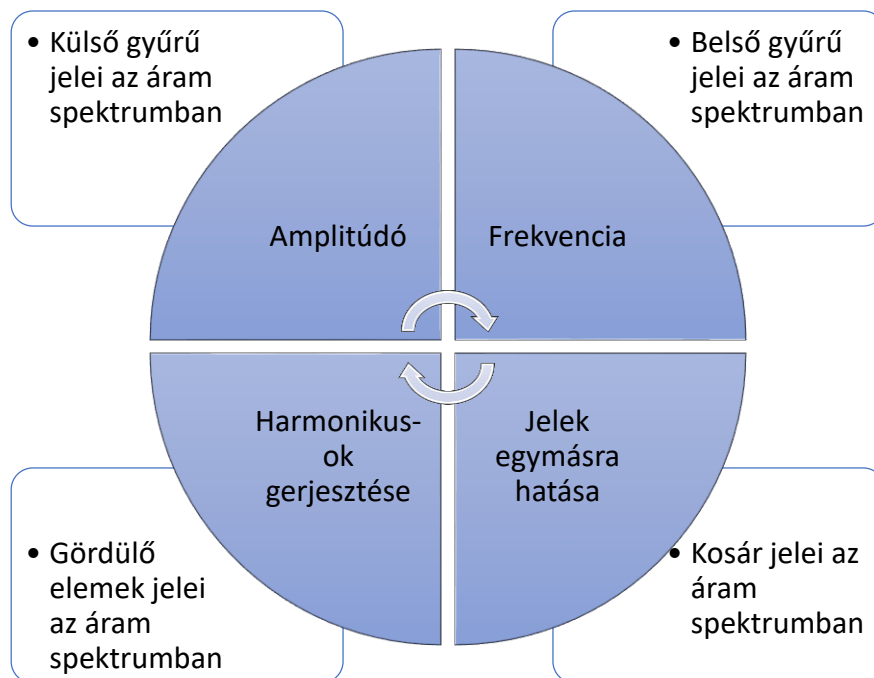
A vizsgált motor háromfázisú rövidrezárt forgórészű kalickás aszinkron gép 3 kW négy pólusú, az EVIG által egykor gyártott „VZ” motorsorozat családjába tartozik. A következő blokkdiagramok mutatják mérési elképzeléseket.



2.1. ábra. Mérési koncepciók kalickás motor esetén.



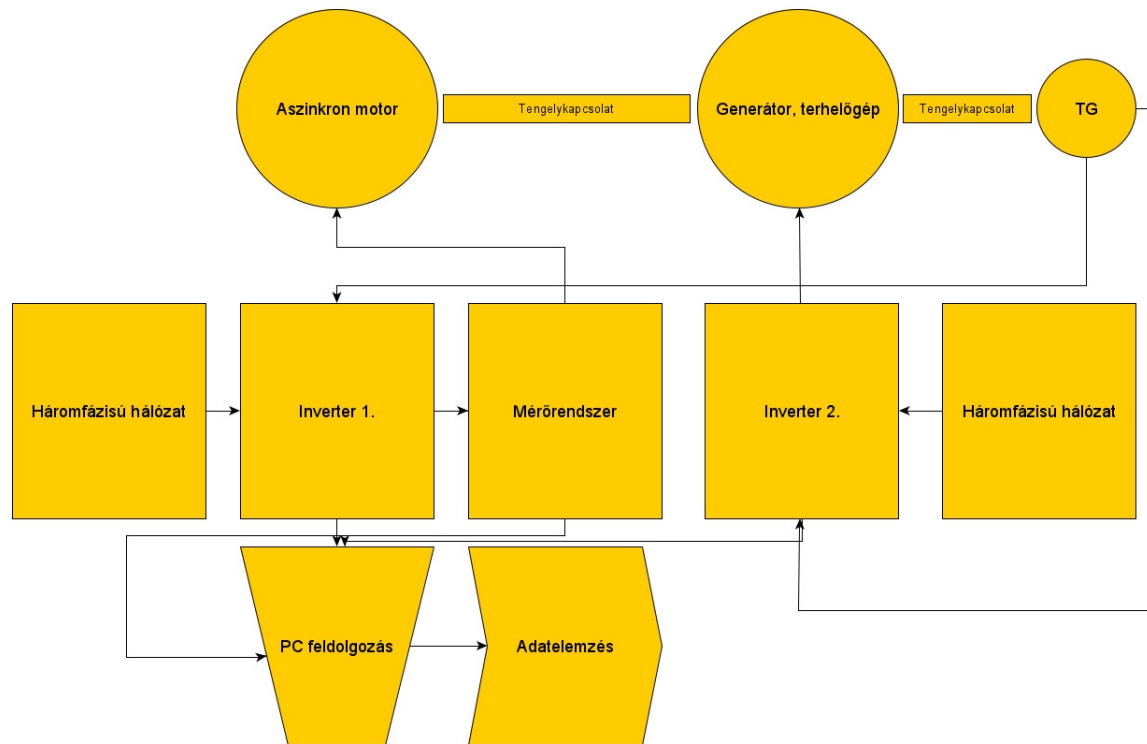
2.2. ábra. Intelligens hajtás diagnosztika elvi vázlata.



2.3. ábra Mechanikai jelek felosztása.

Villamos forgógépek esetén a mechanikai hibajeleket alapvetően a csapágy és tengelybeállítási hibákra lehet felosztani (2.3. ábra). A felsorolás nem teljes, mert jelen munkafolyamat nem tér ki a forgórész rúdszakadás és egyéb forgórész meghibásodások okaira, amelyek kiegyensúlyozási jelenségeként is felléphetnek.

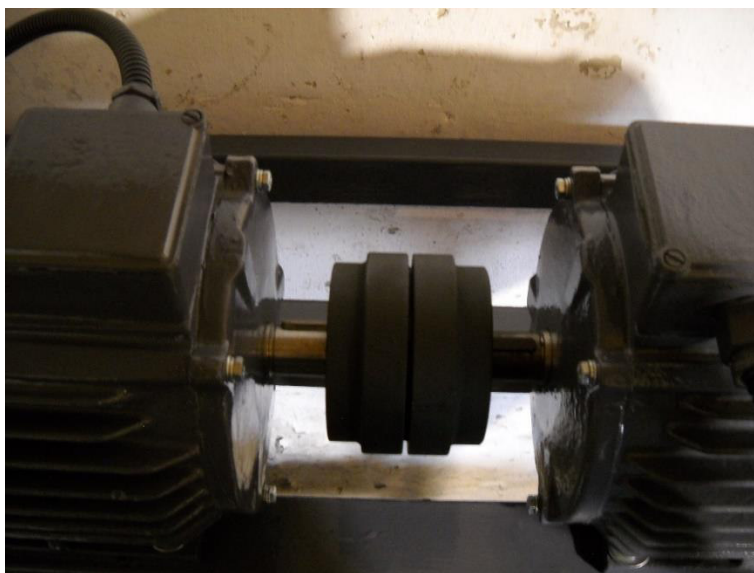
A gépcsoport mérési egyszerűsített mérési blokkvázlata a 2.4. ábrán látható. A mérések frekvenciaváltóról táplált esetet vizsgálnak. A háromfázisú hálózatra csatlakozik a frekvenciaváltó, utána a mérőrendszer összehasonlítva az inverterről kapott értékekkel.



2.4. ábra Egyszerűsített mérési elrendezés blokkvázlata.

A mérőrendszer NI feszültség és árammérő kártyák segítségével mérték a motor jellemző adatait.

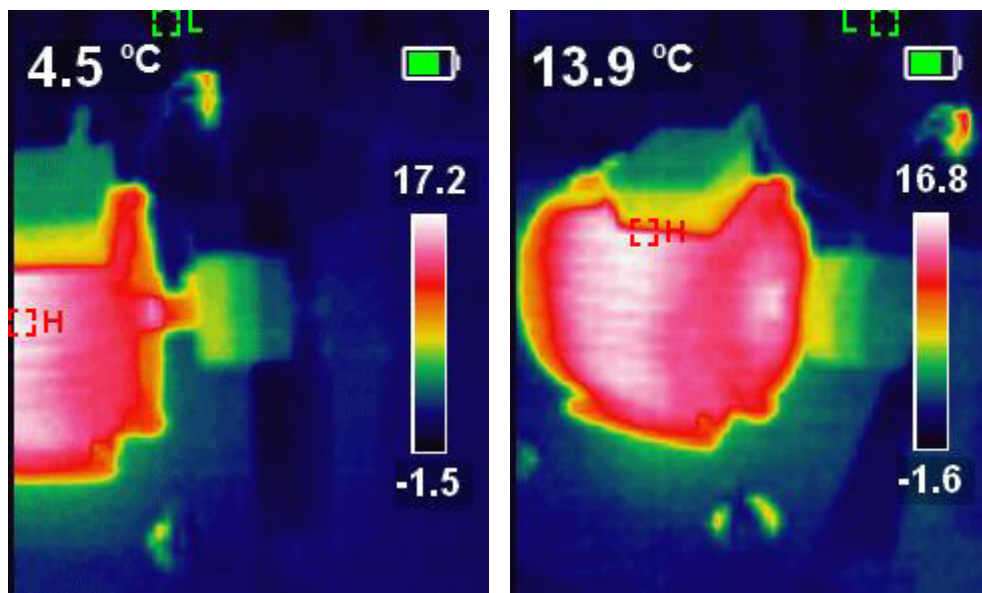
A 2.5. ábra szemléltet egy vizsgált gépkapcsolatot, ahol körmös tengelykapcsolók biztosítják a mechanikai összekötést.



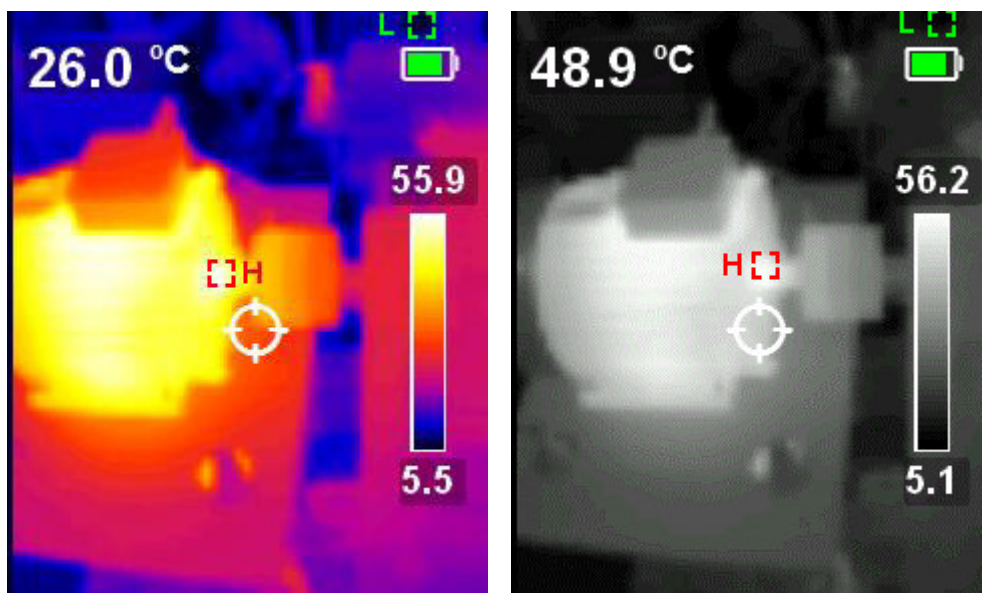
2.5. ábra Aszinkron motor-generátor gépcsoport, tengelybeállítási hibaelemzés.

A pályamunka készítése alatt kontrolmérésre mindig felhasználásra kerül a termográfiai mérések, amelyeken jól végig követhető a motor és tengelykapcsoló aszimmetrikus melegedése (2.6-9. ábrák).

A hőkamera felvételek jól látható, ahogyan a kamera követi leghidegebb és legmelegebb pontokat. Kezdeti szakaszban a motorházra fókuszál, majd a terhelési állapot előre haladtával csapágyfészek irányába.



2.6. ábra Aszinkron motor tengelykapcsolójának aszimmetrikus melegedés folyamata.

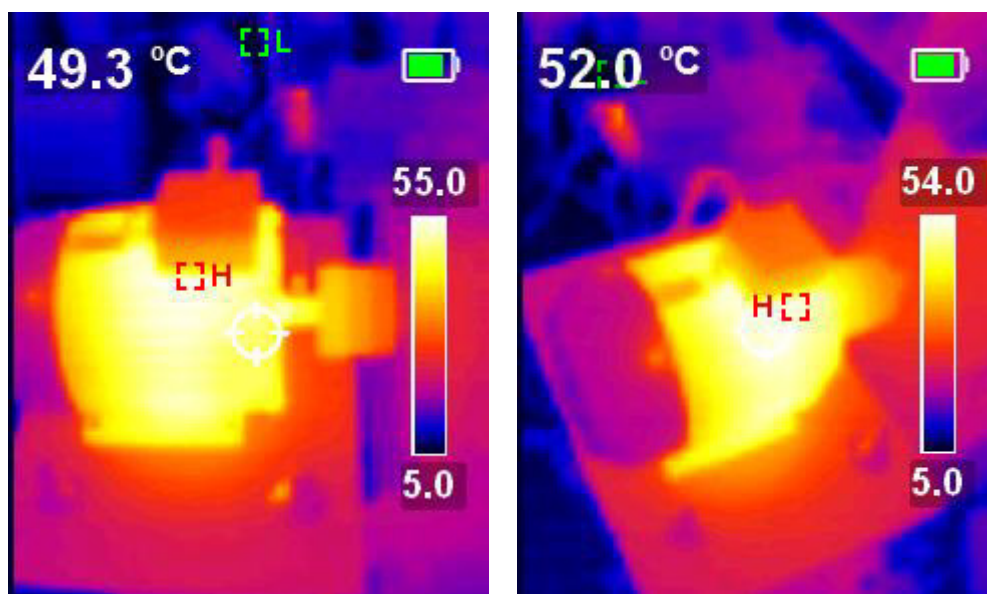


2.7. ábra Aszinkron motor tengelykapcsolójának aszimmetrikus melegedés folyamata.

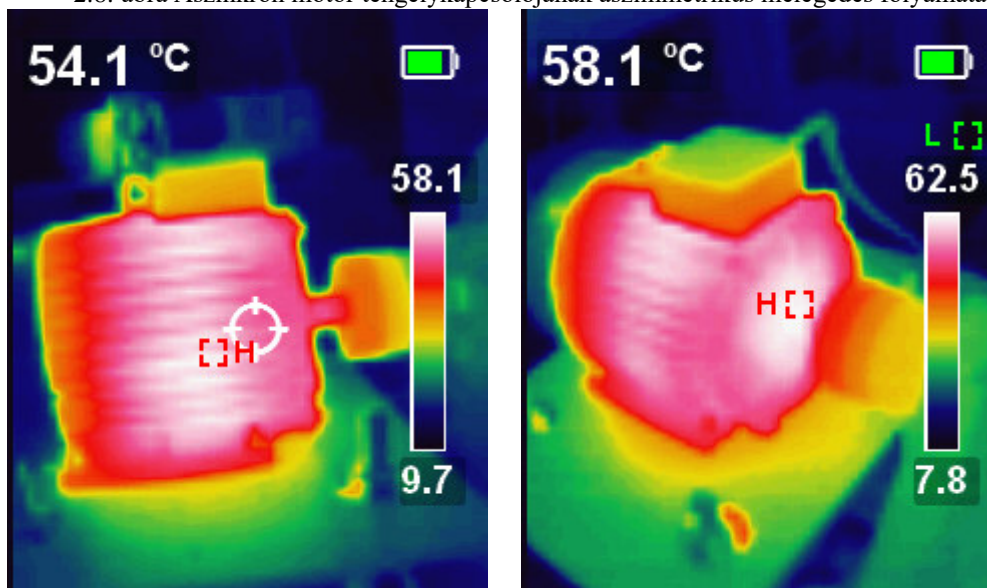
A motoron körmös tengelykapcsoló van és betétkopás, hőmérsékletváltozás, tengelybeállítási hiba jelentkezik. Ez folyamat hosszabb üzemóra alatt.

A 2.8-9. ábrák már tartós üzemi állapotot mutatnak, ahol kamera már a csapágy külső gyűrűre összpontosít, azt érzékeli legmelegebb pontnak.

A hiba eredetét nem egyszerű megállapítani. Nem jelenhető még egyértelműen, hogy a „rossz” tengelybeállítás okozza a jelenséget, mert gépek egyébként sem melegednek „szimmetrikusan”. A vizsgálat eredménye hasznos és szükséges, de nem elégséges feltétele a hibaterület szűkítésének.



2.8. ábra Aszinkron motor tengelykapcsolójának aszimmetrikus melegedés folyamata.



2.9. ábra Aszinkron motor tengelykapcsolójának aszimmetrikus melegedés folyamata.

A forgógép diagnosztika ma már nélkülözhetetlen eleme villamos jelanalízisen történő mérés és számítás. Ennek részletezése a harmadik fejezetben történik.

3. Gépspecifikus spektrumok elemzése

A következő feladatban fel kell állítani egy gépspecifikus adatrendszert, ami a motorról minél optimálisabb képet ad. Alapvető értelmezési eljárás az áramjelből képzett különböző transzformáció szerint történik.

Az ipari gyakorlatban jelentős zajkészlettel (hatással) is meg kell küzdeni. A gépek üzemelési körülményei jelentős kihívás elé állítják mérőendszert. Következő lépés a csapágyfrekvenciák áramjelben történő megjelenési frekvenciáinak keresése. A módszer arra az esetre igaz, ha nincs információ gép csapágyairól, nem vagyunk benne biztosak, hogy pontosan milyen hibafrekvenciákat kell keresni. Ebben az esetben a spektrumelemzése modell vagy modellek segítségével lehetséges, ami vonatkozhat csak a csapágyra és/vagy forgórészre, más alkatrészekre. A gyártó katalógusokban szerepel csapágy adatokat, amelyek nem feltétlenül egyeznek meg a gyártott motorokban lévővel, aminek oka lehet, mechanikai követelményváltozás. A spektrumban követni kell az összes kiugró értéket. Lehetséges pl.: forgási frekvencia többszöröseihez, oldalsávjaihoz rendelni értéket és a tápfrekvencia is megjelenik a spektrumban, illetve az alapharmonikus és oldalsávjai.

3.1. Mérések matematikai készletei¹

Az FFT (Fast Fourier Transform) jól ismerjük, ezzel összhangban kitekintés STFT-ban kapcsolatban.

A rövid idejű Fourier-transzformáció (STFT, Short-Time Fourier Transform) arra szolgál, hogy elemezze, hogyan változik a nemstacionárius jel frekvenciatartalma az idő múlásával. Egy jel STFT-jét úgy számítjuk ki, hogy egy M hosszúságú elemzési ablakot készítünk a jelhez és kiszámítjuk az ablakos adatok diszkrét Fourier-transzformációját. Az ablak az eredeti jel fölé tevődik R minta időközönként. A legtöbb ablakfunkció elkeskenyedik a széleken, hogy elkerülje a spektrális összetalapulást. Ha nem nulla átfedési hosszt adunk meg (L), akkor az ablakos szegmensek átfedése kompenzálja a jelgyengülést az ablak szélein. Az egyes ablakos szegmensek DFT-je hozzáadódik egy mátrixhoz, amely tartalmazza az egyes idő- és frekvenciapontok nagyságát és fázisát. Az STFT-mátrixban a sorok száma megegyezik a DFT-pontok számával, az oszlopok számát pedig:

$$k = \left\lfloor \frac{N_x - L}{M - L} \right\rfloor$$

¹ Mitra, Sanjit K. Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach. 2nd Ed. New York: McGraw-Hill, 2001. Sharpe, Bruce. Invertibility of Overlap-Add Processing. <https://gauss256.github.io/blog/cola.html>, accessed July 2019. Smith, Julius Orion. Spectral Audio Signal Processing. <https://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp/>, online book, 2011 edition, accessed Nov 2018.

Ahol: N az eredeti jel hossza $x(n)$, és a $[\]$ szimbólumok a „padló” függvényt jelölik.

Az STFT mátrixot a $X(f) = [X_1(f) X_2(f) X_3(f) \dots X_k(f)]$

$$X_m(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)g(n - mR)^{-j2\pi fn}$$

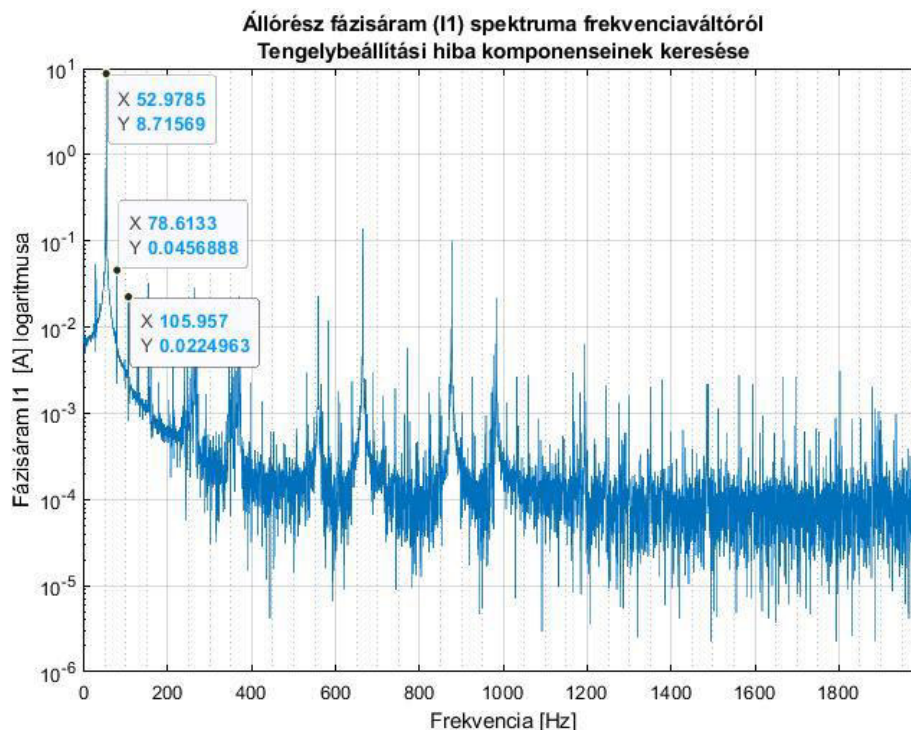
$g(n)$ - M hosszúságú ablakfüggvény

$X_m(f)$ - Az ablakos adatok DFT-je az mR idő középpontjában.

R -Ugrásméret az egymást követő DFT-k között. Az ugrás mérete az ablakhossz és az L átfedési hossz közötti különbség. Az STFT négyzetes nagysága a függvény teljesítményspektrális sűrűségének spektrogramos reprezentációját adja.

3.2. Tengelybeállítási hiba jeleinek keresése az állórész fázisáram spektrumban

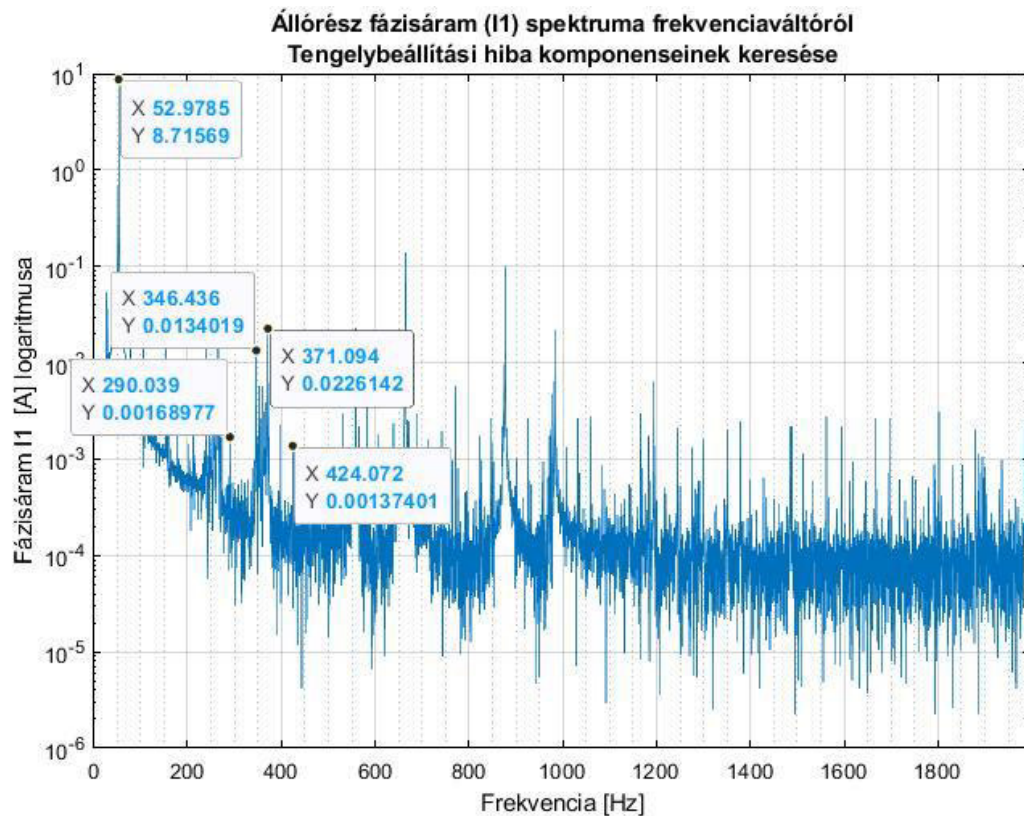
Első lépésként a motor fázisáram spektrumát vizsgáltam állandó terhelés mellett. A 3 kW-os négyfázisú aszinkron motort tápláló aktuális állórész frekvencia (spektrumban is látható) 52,97 Hz, névleges 20,0 Nm leadása mellett, tengely fordulatszáma 1538 1/min; ehhez tartozó forgási frekvencia 25,6 Hz, a motor fázisáramának mintavételezése 4 kHz-el történt. A vizsgálat célja a tengelybeállítási hibára utaló hibafrekvenciák keresése, amely függ az alapharmonikus és a forgási frekvenciától és ezek harmonikusaitól.

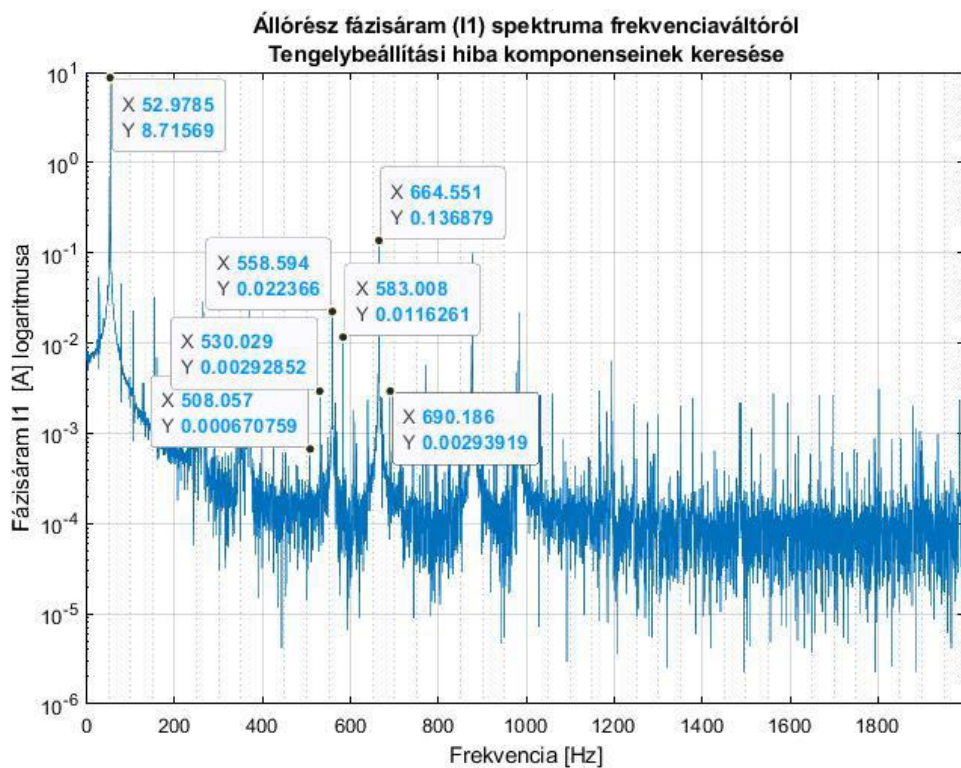
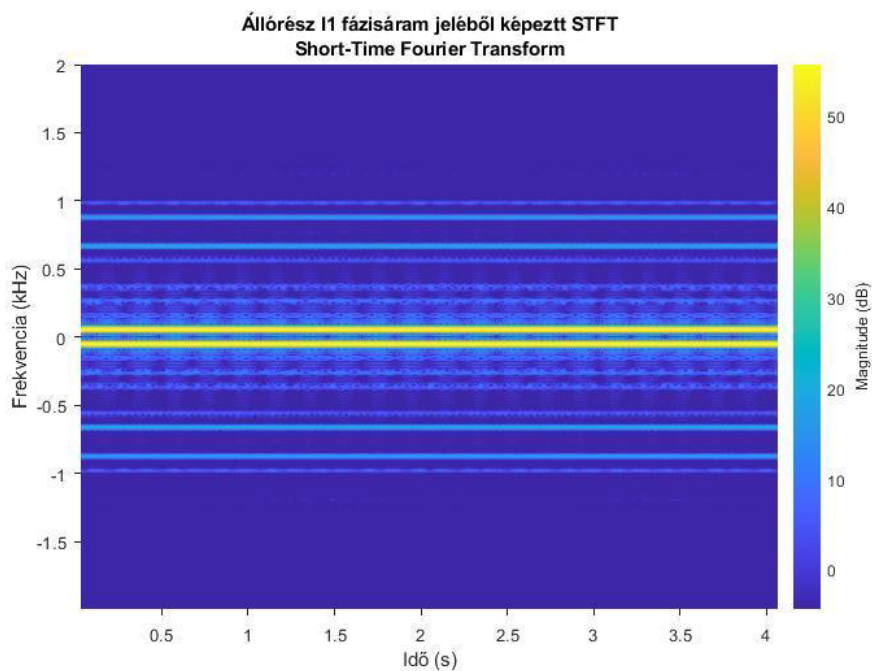


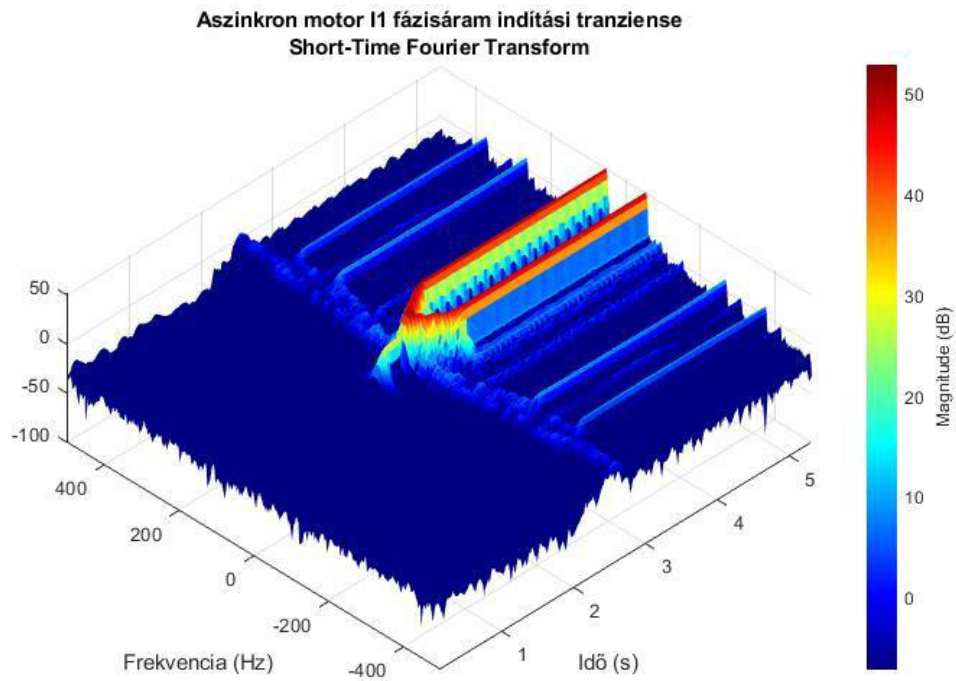
3.1. ábra. Állórész áram I_1 fázisáram spektrumának képzése frekvenciaváltós üzemben.

Tengelybeállítási hibafrekvenciái (harmonikusok száma: 1-8)			
Frekvencia [Hz]	78,61	Frekvencia [Hz]	178,71
Amplitúdó [A]	0,0456	Amplitúdó [A]	0,0022
Harmonikus	1	Harmonikus	5
Frekvencia [Hz]	105,9	Frekvencia [Hz]	211,91
Amplitúdó [A]	0,0224	Amplitúdó [A]	0,0062
Harmonikus	2	Harmonikus	6
Frekvencia [Hz]	127,44	Frekvencia [Hz]	240,47
Amplitúdó [A]	0,0036	Amplitúdó [A]	0,0135
Harmonikus	3	Harmonikus	7
Frekvencia [Hz]	158,93	Frekvencia [Hz]	264,89
Amplitúdó [A]	0,0069	Amplitúdó [A]	0,0290
Harmonikus	4	Harmonikus	8

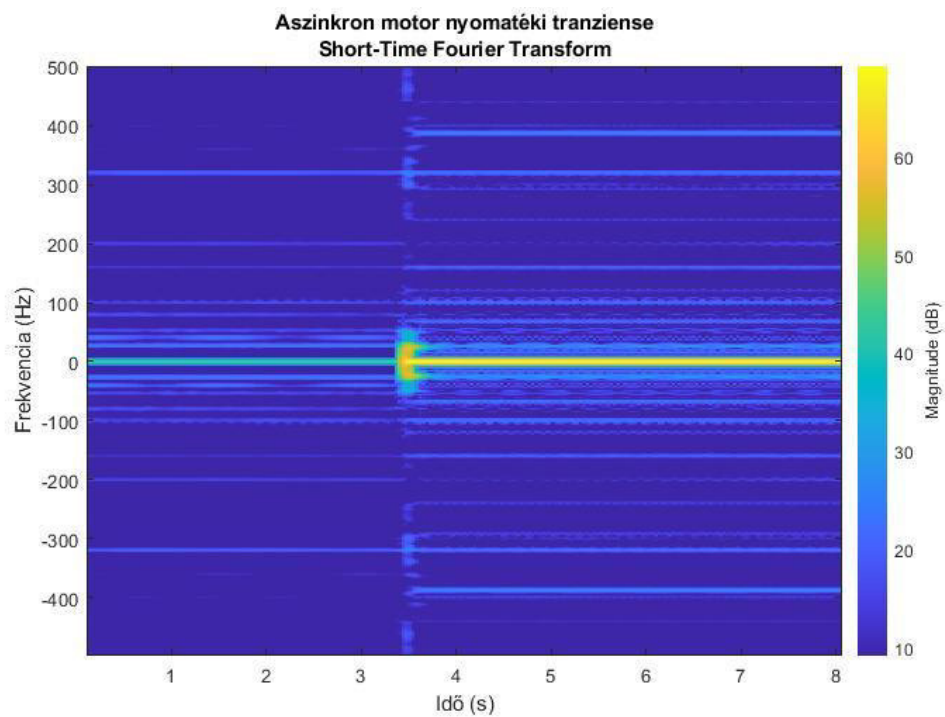
3.1. táblázat Tengelybeállítási hibafrekvenciák.



3.2. ábra. Állórész áram I_1 fázisáram spektrumának képzése frekvenciaváltós üzemben.3.3. ábra. Állórész áram I_1 fázisáram spektrumának képzése frekvenciaváltós üzemben.3.4. ábra. Állórész áram I_1 fázisáram spektrumának képzése frekvenciaváltós üzemben, Short-Time Fourier Transform.

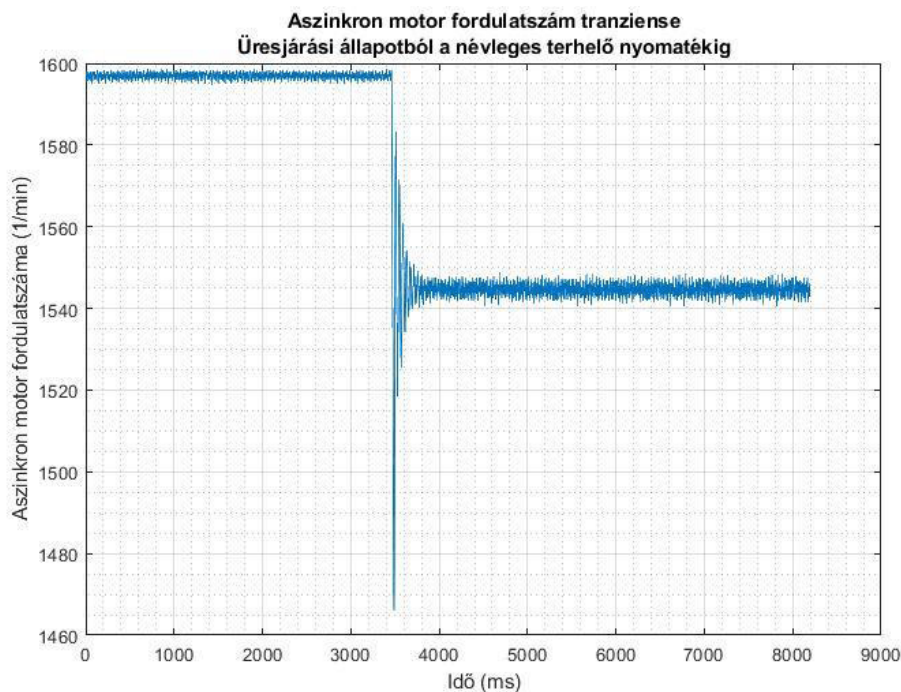


3.5. ábra. Állórész áram I₁ fázisáram indítási tranziense frekvenciaváltós üzemben, Short-Time Fourier Transform.



3.6. ábra. Aszinkron motor nyomatéki tranziense frekvenciaváltós üzemben, Short-Time Fourier Transform.

A 3.1-6. ábrák FFT és STFT alkalmazásával számítják a keresendő mechanikai hibajeleket. Ez a számítás szükséges, de nem elégséges feltétele komplex adatelemzés kialakításához. A 3.7. ábra üresjárási állapotból való átmeneti folyamat, terhelési üzemi fordulatszámra.



3.7. ábra Aszinkron motor fordulatszám tranziense 53 Hz tápláló frekvencia mellett, üresjárási állapotból.

4. Összefoglalás

Villamos forgógépek állapotfelügyelete széleskörű elemzési módszereket követel meg. A kiválasztási lépések következőképpen történtek.

A motor folyamatos üzemének mérése, áram jelalakból spektrum és hibametria képzése. Állórész fázisáram számítása és abból spektrum képzése. Tengelybeállítási hibára utaló hibafrekvencia keresése és hibametria felállítása. Operációkutató alkalmazása a hibáról alkotott függvényben.

A csapágyak által generált jelek vizsgálata az áramjel alapján, mekkora harmonikusig célszerű számítani? Erre nehéz korrekt választ adni. Intelligens villamos hajtás fejlesztése esetén minél nagyobb értékig, „ami függ a mintavételezési időtől is” számítani és folyamatos összehasonlításokat végezni egy korábbi terhelési állapottal.

Állórész áram „ I_1 ” fázisáramából képzett spektrum hibametria térképe. A számítás egy tervezésű szoftver alapján történt, összhangban a Matlab-bal.

A harmadik fejezetben bemutatott transzformációk közül a STFT többségi információt adó rész az frekvencia-idő-amplitúdó intenzitás együttes ábrázolása. Indítás vagy terhelés átkapcsolás pillanatában nemcsak az alapharmonikus játszik döntő szerepet, hanem a vele együttesen keletkező többszörös harmonikusok is.

A pályamunka újdonságkeresési iránya az állandósult és tranzienst üzemállapot sajátos hibajelek megjelenési gyakoriságán alapszik.

5. Irodalomjegyzék

- [1] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése gyakorlati szemszögből, 2013. november 14. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [2] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése gyakorlati szemszögből, 2014. április 23. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [3] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése iparjogvédelmi szemszögből, 2014. november 19. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [4] Bendiák István, Háromfázisú pólusátkapcsolással rendelkező ötvözt forgórészű aszinkron gép, szabadalom, Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala, Ügyiratszám: P1500106/24, 2015.03.13 Budapest
- [5] Bendiák István, Aszinkron gépek gyakorlati kérdései, 2015. április 22. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [6] Bendiák István, Aszinkron gépek gyakorlati kérdései, XXXI. Kandó Konferencia 2015 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [7] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése gyakorlati szemszögből, OTDK 2015 március 25-27. Műszaki Tudományi Szekció, Budapest
- [8] Bendiák István, Aszinkron motorok gyakorlati kérdései, XXXII. Kandó Konferencia 2016 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [9] Bendiák István, Aszinkron gépek gyakorlati kérdései, OTDK 2017 április 6-8. Műszaki Tudományi Szekció, Dunaujváros
- [10] Bendiák István, Aszinkron motorok tervezése, XXXIII. Kandó Konferencia 2017 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [11] Bendiák István, Villamos hajtásrendszerek rezgései, XXXIII. Kandó Konferencia 2017 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [12] Bendiák István, Aszinkron motorok csapágydiagnosztikája, 2019. április 25. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [13] Bendiák István, Aszinkron motorok újratekercselési technológiáinak hatása a magas hatásfokú aszinkron motorok paramétereire, TDK dolgozat, Budapest 2019
- [14] Bendiák István, Aszinkron motorok diagnosztikai módszerei, 2019. november 12. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest

[15] Bendiák István, Aszinkron motorok csapágyhibáinak elemzése, XXXV. Jubileumi Kandó Konferencia 2019, Budapest

[16] Bendiák István, Forgógépek diagnosztikai eljárásai és alkalmazási lehetőségük felmérése, 2020. április 29. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest

[17] Dr. Prohászka János, Bevezetés az anyagtudományba I. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1988, ISBN 963 8354 (A Szerkezetvizsgálat módszerei és mechanikai tulajdonságok című fejezetek.)

[18] Dr. Nagy István, Állapotfüggő Karbantartás, Műszaki Diagnosztika I. Rezgésdiagnosztika, Delta-3N Kft. Paks, 2006

[19] Dr. Timár Peregrin László-Fazekas Albert-Kiss József-Miklós András-Dr. S. J. Yang, Villamos gépek zaja és rezgése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986

[20] Lukács Ottó, Matematikai Statisztika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 2002

[21] Zombori Béla, Elektronika (5.kiadás), Nemzeti Tankönyvkiadó-Tankönyvmester Kiadó, Budapest, 2004

[22] Ctirad Smetana, Zaj-és rezgésmérés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975

[23] Molnár László, dr. Varga László, Gördülőcsapágyazások tervezése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977

[24] By Brian P. Graney and Ken Starry, Rolling Element Bearing Analysis, From Materials Evaluation, Vol. 70, No. 1, pp: 78-85, Copyright 2011 The American Society for Nondestructive Testing, Inc. Materials Evaluation- January 2012

[25] SKF Bearing Calculator program: Csapágy típusára ellenőrzött számítás és a csapágyfrekvenciák értékeinek, elnevezéseinek a származási helye: Oldal cím:

<http://webtools3.skf.com/engcalc/CalcBearingFrequencies.do>

[26] SKF online csapágy katalógus: Oldalcím:

<http://webtools3.skf.com/engcalc/CalcBearingFrequenciesUpdate.do>

[27] SKF online katalógus csapágy geometriai adatainak megismerése céljából: Oldalcímek:

<https://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/index.html?designation=6206>

<http://webtools3.skf.com/engcalc/calculator/calculator.jsp>

[28] <http://www.jp.nsk.com/app02/BearingGuide/html/bearing32765.htm#>

[29] <http://webtools3.skf.com/engcalc/calculator/freqcalc/bearing/index.jsp>

[30] C. Kumar, G. Krishnan and S. Sarangi, "Experimental investigation on misalignment fault detection in induction motors using current and vibration signature analysis," 2015 International Conference on Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management (ABLAZE), Noida, 2015, pp. 61-66, doi: 10.1109/ABLAZE.2015.7154971.

- [31] M. Lane, D. Ashari, F. Gu and A. D. Ball, "Investigation of motor current signature analysis to detect motor resistance imbalances," 2015 21st International Conference on Automation and Computing (ICAC), Glasgow, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICAC.2015.7313945.
- [32] P. C. P and J. G, "Inter-Turn Fault Analysis of Three Phase Induction Motor," 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), SONEPAT, India, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIICON49524.2020.9112890.
- [33] S. Owatchaiphong, "Design Concept of Low Cost Measurement for Motor Current Signature Analysis," 2018 Third International Conference on Engineering Science and Innovative Technology (ESIT), North Bangkok, Thailand, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ESIT.2018.8665120.
- [34] A. Giantomassi, F. Ferracuti, S. Iarlori, G. Ippoliti and S. Longhi, "Electric Motor Fault Detection and Diagnosis by Kernel Density Estimation and Kullback–Leibler Divergence Based on Stator Current Measurements," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 3, pp. 1770-1780, March 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2370936.
- [35] T. Yang, H. Pen, Z. Wang and C. S. Chang, "Feature Knowledge Based Fault Detection of Induction Motors Through the Analysis of Stator Current Data," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 65, no. 3, pp. 549-558, March 2016, doi: 10.1109/TIM.2015.2498978.
- [36] N. P. Sakhalkar and P. Korde, "Fault detection in induction motors based on motor current signature analysis and accelerometer," 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), Chennai, 2017, pp. 363-367, doi: 10.1109/ICECDS.2017.8390117.
- [37] S. Yeolekar, G. N. Mulay and J. B. Helonde, "Outer race bearing fault identification of induction motor based on stator current signature by wavelet transform," 2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, 2017, pp. 2011-2015, doi: 10.1109/RTEICT.2017.8256951.
- [38] S. Sarkar, P. K. Hembram, P. Purkait and S. Das, "Acquisition and pre-processing of three phase induction motor stator current signal for fault diagnosis using FPGA, NI Compact-RIO real time controller," 2016 IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON), Varanasi, 2016, pp. 110-114, doi: 10.1109/UPCON.2016.7894635.
- [39] F. Ferracuti, A. Freddi, S. Longhi and A. Monteriù, "Recurrence Quantification Analysis of Stator-Current Measurements for Electric Motor Fault Classification," IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Lisbon, Portugal, 2019, pp. 3691-3696, doi: 10.1109/IECON.2019.8927375.
- [40] J. A. Antonino-Daviu, A. Quijano-López, M. Rubbiolo and V. Clemente-Alarcon, "Advanced Analysis of Motor Currents for the Diagnosis of the Rotor Condition in Electric Motors Operating in Mining Facilities," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 4, pp. 3934-3942, July-Aug. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2818671.
- [41] C. Xu, C. Qiu and X. Wu, "Eccentricity faults diagnosis based on motor stray magnetic field signature analysis," 2017 Chinese Automation Congress (CAC), Jinan, 2017, pp. 5577-5582, doi: 10.1109/CAC.2017.8243776.
- [42] I. Ishkova and O. Vitek, "Analysis of induction motor faults by means of monitoring the current and magnetic flux density spectrums," 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Anacapri, 2016, pp. 611-616, doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525861.
- [43] H. S. Gerçekcioğlu and M. Akar, "Instantaneous power signature analysis for misalignment fault diagnosis in 3-phased induction motors," 2018 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Izmir, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU.2018.8404303.

- [44] A. Gheitasi, P. Wolfs and S. Alahakoon, "Distributed Motor Current Signature Analysis in an IoT Environment," 2019 29th Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), Nadi, Fiji, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC48547.2019.211811.
- [45] S. Ray and D. Dey, "Characterization of stator turn to turn faults of induction motor using cross-correlation analysis based features," 2016 International Conference on Intelligent Control Power and Instrumentation (ICICPI), Kolkata, 2016, pp. 297-301, doi: 10.1109/ICICPI.2016.7859721.
- [46] C. Hsiao and M. Liu, "Failure mode analysis of induction motor model," 2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI), Sapporo, 2017, pp. 25-28, doi: 10.1109/ICASI.2017.7988336.