

**PRESENTATION OF A CONDITION
MONITORING SYSTEM FOR A THREE-
PHASE WOUND-ROTOR ASYNCHRONOUS
MOTOR AND ANALYSIS OF
STATOR-ROTOR CURRENT SPECTRUM
WITH SIGNAL ANALYSIS SAFETY ASPECTS**

**HÁROMFÁZISÚ CSÚSZÓGYŰRŰS
ASZINKRON MOTOR ÁLLAPOTFIGYELŐ
RENDSZERÉNEK BEMUTATÁSA ÉS
ÁLLÓRÉS-Z-FORGÓRÉS-Z
ÁRAMSPEKTRUMÁNAK ELEMZÉSE,
JELANALÍZIS BIZTONSÁGI SZEMPONTJAI**

BENDIÁK István¹

Abstract

The condition monitoring of electrical machines holds outstanding importance in modern industry. Although the three-phase wound-rotor asynchronous motor is less frequently used nowadays, it remains advantageous in applications requiring high starting torque, such as crane drives. Due to its specific structure involving sliding contacts, it is particularly sensitive to various faults, making early detection essential. The system examined in this study is based on the spectral analysis of stator and rotor currents. Through spectral analysis, characteristic faults such as broken rotor bars or eccentricity can be identified. The application of Fourier analysis helps extract useful information from the measured signals. The aim of the research is to present an efficient condition monitoring system suitable for industrial applications. The purpose of this paper is to introduce the structure of the proposed monitoring system, the methodology of spectral analysis, and the importance of signal quality in safety-critical environments.

Keywords

Slip ring induction motor, Fourier analysis, spectrum

Absztrakt

A villamos gépek állapotfigyelése ki-emelkedő jelentőségű a korszerű iparban. A háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor napjainkban ritkábban alkalmazott géptípus, de különösen nagy indítónyomatékot igénylő rendszerekben előnyös (daruhajtások). Sajátos (csúszó kontaktusok) szerkezete miatt érzékeny a különféle hibákra, ezért fontos ezek korai felismerése. A vizsgált rendszer az állórész- és forgórész-áram spektrumának elemzésén alapul. A spektrumanalízis segítségével olyan jellegzetes hibák azonosíthatók, mint például a törött rúd vagy excentricitás. Az Fourier-analízis alkalmazása segít a jelekből hasznos információkat megjeleníteni. A kutatás célja egy hatékony, iparban is alkalmazható állapotfigyelő rendszer bemutatása. A dolgozat célja a javasolt állapotfigyelő rendszer felépítésének, a spektrumanalízis módszertanának és a jelminőség fontosságának bemutatása biztonságkritikus környezetben.

Kulcsszavak

Csúszógyűrűs aszinkron motor, Fourier-analízis, spektrum

¹ bendiak.istvan@uni-obuda.hu | ORCID: 0009-0009-3320-4089 | PhD Student, Doctoral School for Safety and Security Sciences Óbuda University | Doktorandusz, Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola

CSÚSZÓGYŰRŰS ASZINKRON MOTOR MÉRÉSE, BEVEZETŐ

A villamos gépek állapotfigyelése kiemelkedő [1-13] jelentőségű a korszerű ipari rendszerekben, különösen a megbízhatóság, a hatékonyság és a biztonság szempontjából. Az ipari automatizálás térnyerésével és a prediktív karbantartás iránti igény növekedésével egyre fontosabbá válik a villamos forgógépek üzemi viselkedésének folyamatos megfigyelése. A háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor napjainkban ritkábban alkalmazott géptípus, elsősorban a korszerűbb frekvenciaváltós hajtások térhódítása miatt. Ennek ellenére továbbra is előnyös bizonyos speciális alkalmazásokban, különösen nagy indítónyomatékot igénylő rendszerek esetén, például daruhajtásokban vagy nehézgép-mozgatásban.

A csúszógyűrűs aszinkron motor egyik fő előnye a szabályozható indítási jellemző, ugyanakkor sajátos szerkezete – különösen a csúszógyűrűk és a szénkefék jelenléte – miatt fokozottan érzékeny a különféle meghibásodásokra. Ezek a hibák lehetnek villamos eredetűek (pl. szigetelési problémák), mechanikai természetűek (pl. forgórész-törés, excentricitás), vagy a kontaktusokból adódó problémák (pl. ívképződés, érintkezési instabilitás). E hibák időbeni felismerése elengedhetetlen az üzembiztonság megőrzése és a nem tervezett leállások elkerülése érdekében.

A vizsgált állapotfigyelő rendszer az állórész- és forgórész-áram spektrumának elemzésére épül, amely nem invazív módon nyújt információt a gép belső állapotáról. Az áramjelek frekvenciaanalízise lehetővé teszi a tipikus hibajelenségek – mint például túlmelegedett forgórész rúd, rotor-excentricitás, kiegyensúlyozatlanság – azonosítását. A spektrumanalízis során alkalmazott Fourier-transzformáció lehetővé teszi a komplex időbeli jelek frekvenciakomponenseinek vizsgálatát, ami alapja lehet egy automatizált hibadetektáló algoritmusnak.

A jelen kutatás célja egy olyan hatékony és ipari környezetben is alkalmazható állapotfigyelő rendszer (kopási térkép) bemutatása, amely képes valós idejű diagnosztikai információkat szolgáltatni. A rendszer kiemelt figyelmet fordít a jelminőségre, valamint a zaj- és zavarvédelmi szempontokra, mivel ezek közvetlenül befolyásolják a diagnosztikai pontosságot. A biztonságkritikus ipari környezetben különösen fontos, hogy a mérési rendszer megbízható, ismételhető és megfelelő felbontású adatokat szolgáltatson.

A dolgozat részletesen bemutatja a javasolt állapotfigyelő rendszer felépítését, a spektrumanalízis alkalmazott módszertanát, valamint a jelanalízis során fellépő tipikus kihívásokat és azok kezelésének lehetőségeit. Kiemelten tárgyaljuk a statikus és dinamikus hibák spektrumban való megjelenését, valamint a hibafrekvenciák viselkedését különböző üzemállapotokban. A rendszer célja nem csupán a hibák detektálása, hanem azok osztályozása, előrejelzés becslése és a lehetséges következmények mérlegelése.

Végző soron a kutatás célja, hogy hozzájáruljon a háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motorok üzembiztonságának növeléséhez, a karbantartási stratégiák optimalizálásához és a karbantartási költségek csökkentéséhez. Az ipar 4.0 és a gépi tanulási technológiák térhódításával az ilyen típusú diagnosztikai rendszerek integrálhatók intelligens gyártási platformokba is. A fejlesztett rendszer hosszú távon lehetőséget kínál az üzemidő növelésére, a meghibásodási kockázatok csökkentésére, valamint a hibák ok-okozati összefüggéseinek pontosabb feltárására.

A gépről készített képsorozat (1-5. ábrák) bemutatja a motor adatait és a motor felépítését. Az 1. ábra a motor adattáblája a névleges feszültség, áram, frekvencia, fordulatszám, típussorozat megjelölése (CZD-csúszógyűrűs forgórészű darumotor). A 2. ábra motor

felső csúszógyűrű burkolat levétele után. A 3. ábra közeli felvétel a motor állórész és forgórész kötéséről, valamint a csúszógyűrűkről. A 4-5. ábrák a tengelykapcsolat ellenőrzése, amely a mérés alatt megjelenő tengelybeállítási hibára utalt.



1. ábra Csúszógyűrűs aszinkron motor adattáblája.



2. ábra Csúszógyűrűs aszinkron motor felső burkolat levétele után.



3. ábra Közeli felvétel a csúszógyűrűkről.



4. ábra Csúszógyűrűs aszinkron motor tengelykapcsolat burkolat eltávolítása.

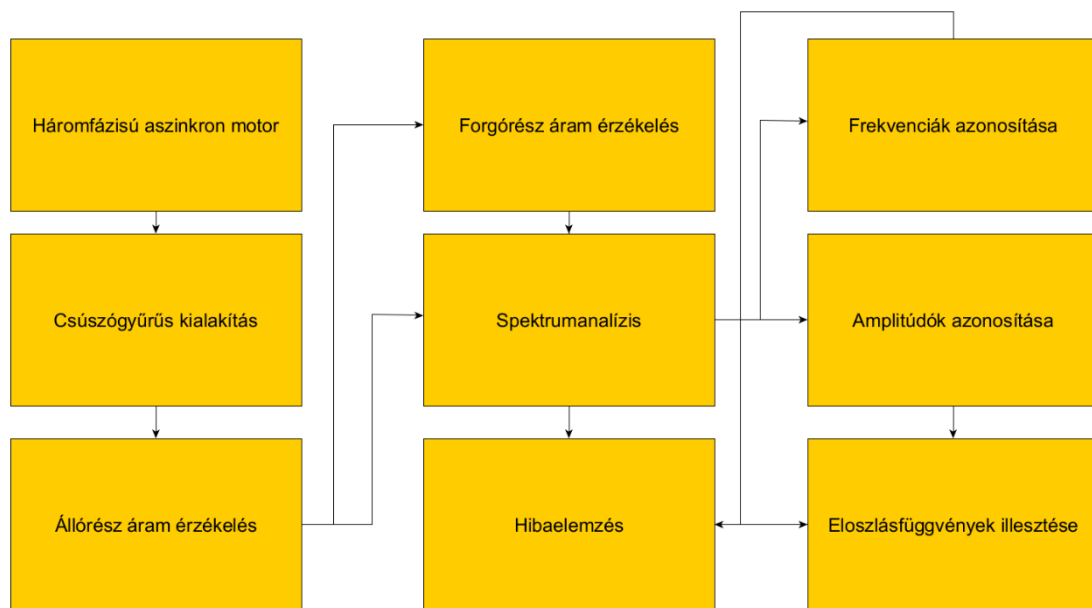


5. ábra Csúszógyűrűs aszinkron motor tengelykapcsolatának ellenőrzése.

HÁROMFÁZISÚ CSÚSZÓGYŰRŰS ASZINKRON MOTOR ÁLLAPOTFIGYELŐ RENDSZERÉNEK HATÁSVÁZLATA

A mérési blokkvázlat (6. ábra) mutatja a háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor állapotfigyelő rendszerének hatásláncát. A módszer célja a motor működése közbeni hibák korai felismerése és diagnosztizálása. A baloldalon (6. ábra) található a motor táplálása, amely háromfázisú váltakozó árammal történik. A hálózati feszültség és áram jelei mérésre kerülnek, ezek a bemeneti paraméterek. A motor csúszógyűrűs kivitele lehetővé teszi, hogy a forgórész áramait is közvetlenül mérni lehessen.

A mérőeszközök a motor állórész- és forgórészáramait [7] figyelik valós időben. A nyers áramjelek további feldolgozásra kerülnek egy előfeldolgozó egységben. Ez az egység zajszűrést, normalizálást és mintavételezést végez. Az így előkészített jelek frekvenciatartományba kerülnek átalakításra egy [8] gyors Fourier-transzformáció segítségével (előzetes feldolgozás). A spektrum alapján jellemző hibafrekvenciák kereshetők ki, amelyek például törött rúdra, excentricitásra vagy kiegyensúlyozatlanságra utalhatnak. A spektrum-adatokat egy kiértékelő algoritmus elemzi, amely gépi tanulással és [9] szabályalapú logikával történhet. A döntéshozó modul meghatározza, hogy van-e jelen hiba, és ha igen, milyen típusú. Az eredmények megjelennek egy vizualizációs felületen, ahol a karbantartó személyzet követni tudja az állapotváltozásokat. A rendszerriasztást is tud küldeni, ha súlyos meghibásodást észlel. A teljes diagnosztikai ciklus automatizált és ciklikusan ismétlődik [10].



6. ábra Háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor állapotfigyelő rendszerének blokkvázlata.

A megoldás nagy számításai kapacitást igényel, de jól skálázható ipari környezetben. A rendszer célja, hogy csökkentse a nem tervezett leállásokat és javítsa az üzembiztonságot. Ez különösen fontos a nehéziparban, ahol a daruhajtások kritikus szerepet játszanak. A digitális adatfeldolgozás és a spektrumanalízis központi szerepet kap. A rendszer

bővíthető további érzékelőkkel is, például rezgés- vagy hőmérsékletmérőkkel. A kialakítás lehetővé teszi a valós idejű monitorozást és távoli hozzáférést is. Összességében a blokkvázlat egy modern, megbízható és ipar számára hasznos állapotfigyelő rendszer struktúráját mutatja be (6. ábra).

A mérési elvek és módszerek (6. ábra alapján):

- A bemutatott blokkvázlat egy csúszógyűrűs aszinkron motor működésének és vizsgálati elrendezésének főbb folyamati lépéseit mutatja be.
- A rendszer alapját a háromfázisú hálózati betáplálás biztosítja, amely ellátja a villamos gépet.
- A csúszógyűrűs motor különlegessége, hogy forgórésze csúszógyűrűkkel kapcsolódik a külső áramkörhöz, ezáltal szabályozhatóvá válik a nyomatékleadás.
- A forgórész csúszógyűrűire kapcsolt ellenálláslánc lehetőséget ad a nyomaték és az indítási áram karakterisztikájának optimalizálására.
- A vázlat kiemeli a mechanikai terhelés és a motor közötti kapcsolatot, amely meghatározza a működési viszonyokat.
- A forgórész és a terhelés közötti energiacsere vizsgálata fontos szempont a hatásfok és teljesítménytényező meghatározásában.
- A motor kimeneti tengelye mechanikai munkát végez, amelyet forgatónyomaték és fordulatszám jellemez.
- A hatásláncban a veszteségek különböző pontokon keletkeznek: tekercsvesztés (réz- és vasvesztés), valamint mechanikai (súrlódás, szellőzési) formában.
- A vázlat alapján az energiaátvitel vizsgálható teljesítményáramként is, amely villamos → mágneses → mechanikai formában jelenik meg.
- A diagram lehetővé teszi a gép különböző hatásfokainak (pl. részleges, belső, össz-hatásfok) elkülönített elemzését (különböző frekvenciákon).
- A tudományos kutatás szempontjából ez a hatáslánc ideális modell a veszteségek kvantitatív becslésére és optimalizálására (nagy frekvenciás veszteségek).
- A motor belső folyamatai, mint például a légrés aszimmetria, árameloszlás és nyomatékképzés, a modell mentén részletesen követhetők.
- A vázlatban szereplő komponensek alapján különböző szabályozási stratégiák – például indítási ellenállásváltoztatás – is szimulálhatók, valamint a két inverteres szabályozási módszerek tesztelése is megvalósítható (állórész és forgórész külön táplálása).
- A rendszer komplexitása lehetőséget ad különféle hibaforrások (pl. forgórész tekercssérülés, rúdszakadás, vasmagtorzulás, hőterhelés) hatásainak modellezésére.
- Összefoglalva, ez a hatásvázlat egy többdimenziós vizsgálati és oktatási eszköz, amely valósághűn leképezi a csúszógyűrűs motor működési mechanizmusait kutatási célokra és oktatási célokra.

A forgórész áram mérése (közvetlenül ennél a géptípusnál megvalósítható) kulcsfontosságú a villamos gépek állapotának pontos értékeléséhez. A rotor áramspektrumnak kiemelt szerepe van a forgórész diagnosztikájában, mivel lehetővé teszi a frekvenciatartományban megjelenő jellemző hibajelek azonosítását szlip (csúszás) frekvenciát figyelembe

véve. A spektrumelemzése során a periodikus jelenségek – például a forgási frekvencia, harmonikusok vagy modulációs melléksávok – vizsgálatával pontosan meghatározhatók a hibák forrásai. Például excentricitás, repedések vagy laza rögzítések specifikus frekvencia-komponenseket eredményeznek és ennek közvetlenül a forgórészen történő azonosítása. Így a spektrumelemzése megbízható alapot nyújt a prediktív karbantartáshoz és az üzembiztonság növeléséhez a forgórész áram felhasználásával.

KUTATÁSBAN HASZNÁLT MATEMATIKAI HÁTTÉR RÖVID BEMUTATÁSA

Következő fejezettrészben át kell [2] tekinteni azokat a matematikai készleteket (nem minden pontra kiterjedő matematikai készlet), amelyeket feltétlenül fel kell használni a forgógépek diagnosztikai elemzése során [2], [3].

A klasszikusan ismert Dirac-impulzus segítségével a formálisan kibővíthetjük a differenciálható függvények körét. Ha ugyanis a Dirac-impulzust függvényként kezeljük, akkor a véges ugrással rendelkező függvényeket is differenciálhatónak tekintjük. Valamely $f(t)$ függvény $f'(t)$ általánosított deriváltján olyan általánosított függvényt értünk, amelyre felírható [2]:

$$f(t) = \int_{-\infty}^t f(x) dx, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0$$

Tipikus ilyen függvény az $1(t)$ egységugrás. Ennek ebben az értelemben vett differenciálhányadosa:

$$\dot{1}(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \text{nincs értelmezve}, & t = 0 \\ 0, & t > 0 \end{cases}$$

Nyilvánvaló, hogy $\dot{1}(t)$ ismeretében $1(t)$ nem állítható elő (1) alapján integrálással, mert a $t=0$ helyen $1(t)$ nincs értelmezve.

Be kell vezetni az $\dot{1}(t, \tau)$ függvényt az alábbi definícióval [2]:

$$\dot{1}(t, \tau) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ t/\tau, & 0 < t < \tau \\ 1, & \tau < t. \end{cases}$$

Ennek határértéke $\tau \rightarrow 0$ esetén az $1(t)$ egységugrás. A $\delta(t, \tau)$ függvény definíciójából következik, hogy:

$$1(t, \tau) = \int_{-\infty}^t \delta(x, \tau) dx, \quad \dot{1}(t) = \delta(t, \tau).$$

Képezzük a $\tau \rightarrow 0$ határértéket, akkor:

$$1(t) = \int_{-\infty}^t \delta(x) dx, \quad \dot{1}(t) = \delta(t)$$

A Dirac-impulzus integrálja tehát az egységugrást adja és ennek megfelelően az egységugrás általánosított deriváltja a Dirac-impulzus [2].

Ennek alapján képezhetjük bármely szakadós $\varphi(t)$ függvény általánosított deriváltját. Legyen:

$$\varphi(t) = [1 - 1(t - t_1)] f_1(t) + 1(t - t_1) f_2(t)$$

ahol $f_1(t)$ és $f_2(t)$ folytonosak és differenciálhatók.

Képezzük ennek általánosított deriváltját a szorzatra vonatkozó differenciális szabály formális alkalmazásával [2]:

$$\varphi''(t) = -\delta(t - t_1)f_1(t) + [1 - (t - t_1)]f_1''(t) + \delta(t - t_1)f_2(t) + 1(t - t_1)f_2''(t)$$

A folytonos $f_1(t)$ függvényekre $f_1''(t) = \dot{f}_1'(t)$, míg pl.:

$$\delta(t - t_1)f_1(t) = \delta(t - t_1)f_1(t_1)$$

Hiszen $\delta(t - t_1)$ a t_1 hely kivételével mindenütt nulla.

Így tehát [2]:

$$q''(t) = [1 - 1(t - t_1)]\dot{f}_1'(t) + [f_2(t_1) - f_1(t_1)]\delta(t - t_1) + 1(t - t_1)\dot{f}_2'(t)$$

Mivel $1''(t) = \delta(t)$ vagyis a $t=0$ helyen fellépő egységnyi ugráshoz a $\delta(t)$ derivált tartozik, akkor a t_1 helyen fellépő $\Delta_1 = f_2(t_1) - f_1(t_1)$ ugráshoz nyilván a $\dot{\Delta}_1 \delta(t - t_1)$ ugrás tartozik.

A $q''(t)$ derivált integrálásával és

$$1(t) = \int_{-\infty}^t \delta(x) dx, \quad 1(t) = \delta(t)$$

figyelembevételével visszakapjuk:

$$\varphi(t) = [1 - 1(t - t_1)] f_1(t) + 1(t - t_1) f_2(t)$$

függvényt.

Az itt formálisan bevezetett és később felhasznált általánosított derivált fogalma és néhány tétele matematikailag szigorúan is igazolható a disztribúcióelmélet vagy az operátorszámítás segítségével. Az „általánosított” derivált megegyezik a „disztribúció” értelemben vett deriválttal [2].

LAPLACE-TRANSZFORMÁCIÓ ALKALMAZÁSA

A koncentrált paraméterű lineáris invariáns hálózatok átmeneti jelenségeinek törvényszerűségeit matematikailag közönséges, lineáris, állandó együtthatós differenciálegyenletek írják le, amelyek megoldásának kiindulási értékeit ismerjük [2].

Tudjuk, hogy a teljes megoldás meghatározását nagymértékben megkönnyíti a Laplace-transzformáció alkalmazása. Alábbiakban össze kell foglalni a legfontosabb szabályokat.

A Laplace-transzformáció egy $f(t)$ valós változós (de esetleg komplex értékű) függvényhez egy $F(s)$ komplex változós függvényt rendel [2]:

$$F(s) = \mathcal{L}f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} 1(t) f(t) e^{-st} dt$$

Megjegyzendő, hogy a gyakorlatban az $F(s)$ függvényeket általában elemi úton számíthatjuk ki, vagy megfelelő táblázatból vesszük [2].

A Laplace-transzformáció néhány tétele:

A transzformáció lineáris, tagonként elvégezhető és az állandó szorzó kiemelhető:

$$\mathcal{L} \sum_{k=1}^n C_k f_k(t) = \sum_{k=1}^n C_k \mathcal{L}f_k(t) = \sum_{k=1}^n C_k F_k(s)$$

Az integrált függvény transzformáltja [2]:

$$\mathcal{L} \int_0^t f(\tau) d\tau = \frac{1}{s} F(s)$$

A derivált függvény transzformáltja [2]:

$$\mathcal{L}f'(t) = sF(s) - f(0)$$

Az ún. hasonlósági tétel [2]:

$$\mathcal{L}f(kt) = \frac{1}{k} F\left(\frac{s}{k}\right), k > 0$$

Az ún. eltolási tétel:

$$\mathcal{L}[1(1 - T)f(t - T)] = e^{-sT} F(s)$$

A tétel megfordítása:

$$\mathcal{L}^{-1}[e^{-sT} F(s)] = 1(t - T)f(t - T) = \begin{cases} 0, & t < T \\ f(t - T), & t > T \end{cases}$$

Az ún. csillapítási tétel:

$$\mathcal{L}[f(t)e^{-\gamma t}] = F(s + \gamma)$$

Itt a γ lehet komplex is.

A konvolúció-tétel [2]:

$$f(t) = f_1(t) \cdot f_2(t) = \int_0^t f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau$$

$$F(s) = \mathcal{L}[f_1(t) \cdot f_2(t)] = F_1(s) F_2(s)$$

A határérték-tételek:

$$f(+0) = \lim_{t \rightarrow 0} f(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sF(s)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s)$$

Utóbbi akkor alkalmazható, ha $F(s)$ minden szingularitásának valós része negatív, megengedve azonban az $s=0$ szingularitást.

A transzformáció megfordítását elvileg a Reimann-Mellin inverziós integrál szolgáltatja [2]:

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}F(s) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma - j\infty}^{\sigma + j\infty} F(s) e^{st} ds, \quad \sigma > \sigma_0$$

Ahol σ_0 az $F(s)$ konvergencia –abszcisszája. A gyakorlatban a fenti tételt ritkán alkalmazzák. Ha $F(s)$ racionális tört, akkor az inverz transzformáció a kiejtési tétellel végezhető. Legyen $M(s)$ és $N(s)$ polinomok, $N(s)$ minden zérusra egyszeres, akkor:

$$F(s) = \frac{M(s)}{N(s)}, f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{M(s_k)}{N'(s_k)} e^{s_k t}, t > 0$$

$$N(s_k) = 0, N''(s) \neq 0, k = 1, 2, \dots, n;$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} F(s) = 0$$

A kifejtési tétel egy másik alakja [24]:

$$F(s) = \frac{M(s)}{N(s)}, f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{M(s_k)}{N''(s_k)} e^{s_k t}, t > 0$$

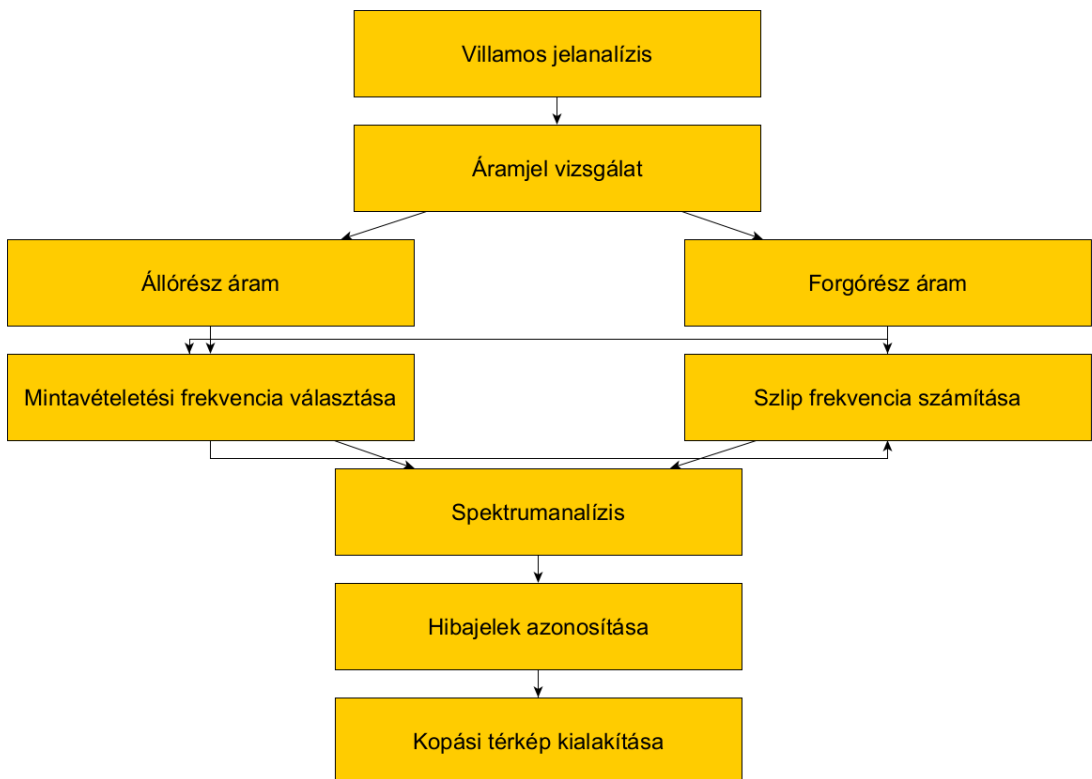
$$N(s_k) = 0, N_k(s) = \frac{N(s)}{s - s_k}, N_k(s_k) \neq 0$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} F(s) = 0$$

Ha $F(s)$ számlálója és nevezője megegyező fokszámú-vagyis $F(s)$ nem tart a végtelenben nullához-, akkor az áltörtet átalakítjuk egy állandó és egy valódi tört összegévé [2].

HÁROMFÁZISÚ ASZINKRON MOTOR MECHANIKAI HIBÁINAK ELEMZÉSE ÁRAMJELALAK-ANALÍZISSEL

A következő fejezetben a csúszógyűrűs aszinkron motor mérési elve kerül bemutatásra és az adatfeldolgozás lépései vázlat alapján. A 7. ábra (blokkvázlat) leírása és jelentősége.



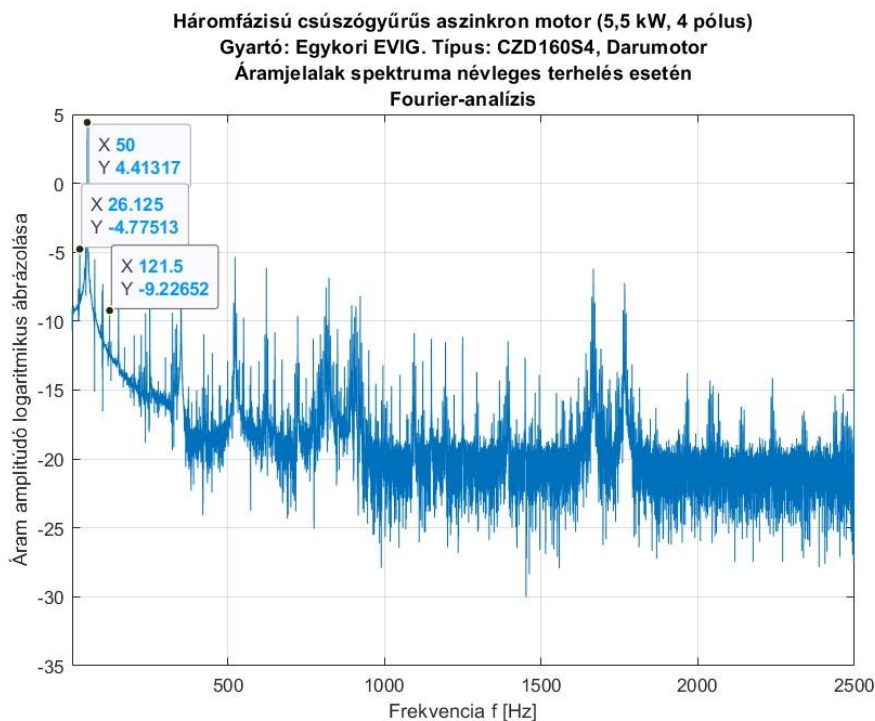
7. ábra Villamos jelanalízis szerepe a villamos gépek vizsgálata során, mérési koncepció.

A blokkvázlat elemzése és folyamat bemutatása

- A motor táplálása háromfázisú hálózatról történik, amely biztosítja a mérést.
- A mérés célja az állórész és a forgórész áramának elkülönített vizsgálata.
- A forgórész jeleit a csúszógyűrűkön keresztül lehet érzékelni, és külön jelfeldolgozás alá esnek.
- Az áramjelek A/D átalakításon történik, majd digitális adatgyűjtő egységbe kerülnek.
- A feldolgozás során Fourier-analízis történik a hibafrekvenciák meghatározására.
- A rendszer képes valós idejű mérésre és adatfeldolgozásra (napjainkra alapkövetelmény).
- Az eredmények alapján lehetséges a csapágyhibák, rotorhibák és egyéb rendellenességek detektálása, kielemezése.
- A rendszer alkalmas laboratóriumi és ipari alkalmazásra, továbbá bővíthető más szenzoros mérésekkel is.

ÁLLÓRÉSZÁRAM SPEKTRUMÁNAK ELEMZÉSE

A következő fejezetben a motor állórészáram-spektrumának feldolgozása kerül bemutatásra. A felvett Fourier-analízis bemenetei értékei a gépről alkotott kopási térkép előkészítéséhez.

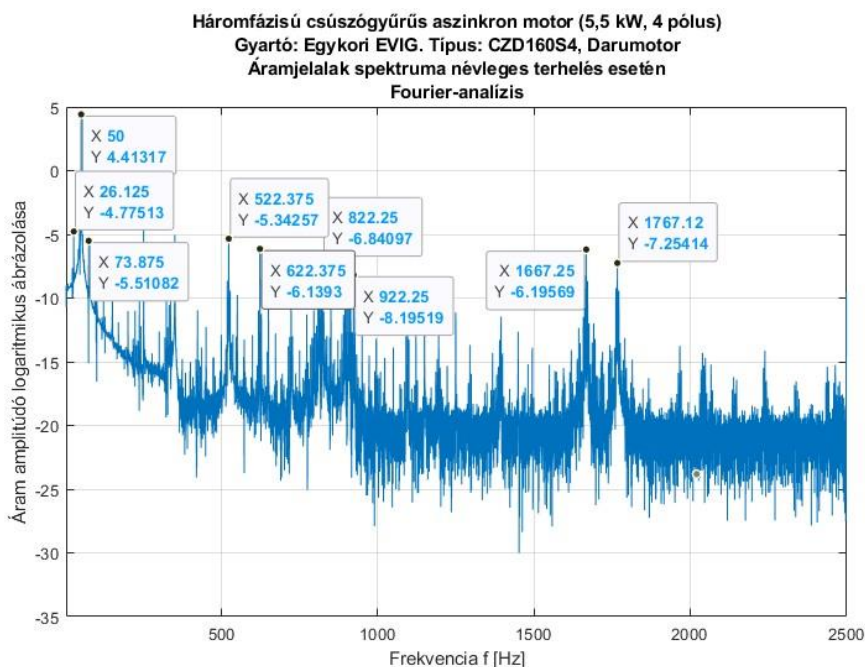


8. ábra Háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor állórész áram Fourier-analízise. Tartomány 0-2500 Hz-ig (FFT-Fast Fourier Transform).

A 8. ábrán egy háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor áramjelének spektruma látható. A motor teljesítménye 5,5 kW, 4 pólusú, és egykori EVIG (egykori Egyesült Villamosgépgyár, Budapest X., Gyömrői út 128.) gyártmányú, CZD160S4 típusú darumotor. Az ábrán az áram amplitúdó logaritmikus (dB) értéke szerepel a függőleges tengelyen. A vízszintes tengelyen a frekvencia [Hz] van feltüntetve, 0-tól 2500 Hz-ig.

A Fourier-analízis eredménye egy összetett spektrum, amely számos csúcsot és modulációs sávot tartalmaz. A legnagyobb amplitúdó az 50 Hz-es hálózati frekvenciánál látható, 4.41 dB értékkel. További kiemelt frekvenciák: 26.13 Hz (-4.78 dB) és 121.5 Hz (-9.23 dB). A spektrum jellemzője, hogy a névleges terhelés alatt végzett mérés dominánsan alacsony frekvenciatarományban mutat energia-koncentrációt.

A 26.1 Hz-es csúcs és más hasonló frekvenciák a forgórész ütésére, excentricitásra vagy egyensúlyhiányra utalhatnak. Ez különösen fontos egy csúszógyűrűs aszinkron motor esetében, ahol a mechanikai hibák könnyen jelentkezhetnek. A vizsgálatot folytatni kell az áramspektrum több megjelölt komponensét tartalmazó alkotórészszel.



9. ábra Háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor állórész áram Fourier-analízise. Tartomány 0-2500 Hz-ig (FFT-Fast Fourier Transform).

A 9. ábrán folytatva háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor áramspektrumának elemzését. Az ábra vízszintes tengelye ugyanúgy a frekvenciát [Hz], a függőleges tengelye az áram amplitúdóját ugyanúgy logaritmikus (dB) skálán ábrázolja.

A Fourier-analízis alapján jól elkülönülő frekvenciakomponensek láthatók, amelyek jellemzőek a motor villamos és mechanikai viselkedésére. A legnagyobb amplitúdójú csúcs 50 Hz-nél található, amely a hálózati frekvenciát természetesen a hálózati frekvencia alapharmonikusa. Számos további csúcs azonosítható, például 522,375 Hz-nél, 822,25 Hz-nél és 1767,12 Hz-nél. Ezek a csúcsok lehetnek mechanikai harmonikusok, oldalsávok vagy

valamilyen periodikus (tengelykapcsolati oszcilláció) hiba frekvenciakomponensei. Az áramspektrum 2500 Hz-ig terjed, és a zajszint közelítően -20 dB alatt marad.

KÉT ÁRAMSPEKTRUM ÖSSZEHASONLÍTÁSA:

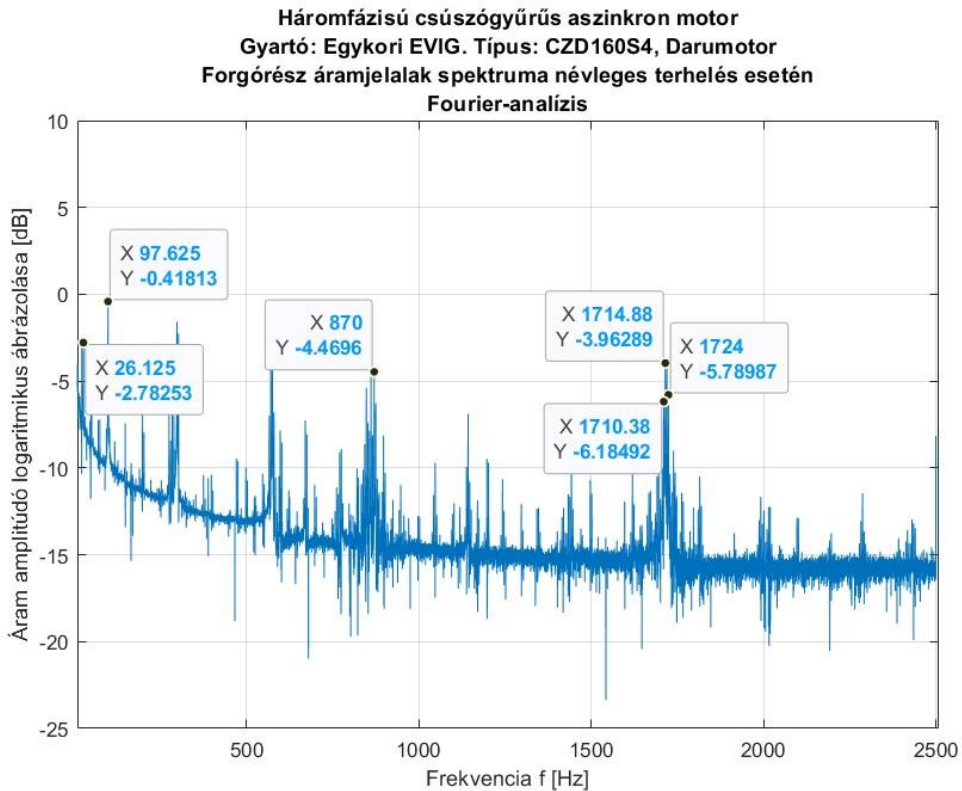
Mindkét ábrán jól látható a domináns 50 Hz-es frekvencia, amely a hálózati tápfeszültséget tükrözi, és ez a legnagyobb amplitúdójú csúcs. Az első spektrum kevesebb frekvenciakomponenst emel ki, így inkább az alacsony frekvenciatartományra koncentrál (26, 73 és 121 Hz körül). A második spektrum részletesebb, és több közép- és magas frekvenciás csúcsot jelöl meg, például 522, 822, 922, 1667 és 1767 Hz-nél. Ez utóbbi alapján feltételezhető, hogy a második mérés érzékenyebb volt a nagyobb frekvenciatartományokra vagy hosszabb adatfelvétel történt. Mindkét spektrum logaritmikus dB skálán mutatja az amplitúdót, és a csúcsok eloszlása utalhat rotor-, stator- vagy csapágyhibákra. A zajszint mindkét ábrán hasonló, -30 dB körül stabilizálódik, de a második spektrumban több szórt komponens figyelhető meg.

Összességében a második spektrum részletesebb és több diagnosztikai információt nyújt a motor állapotáról.

FORGÓRÉSZ ÁRAMSPEKTRUMÁNAK ELEMZÉSE

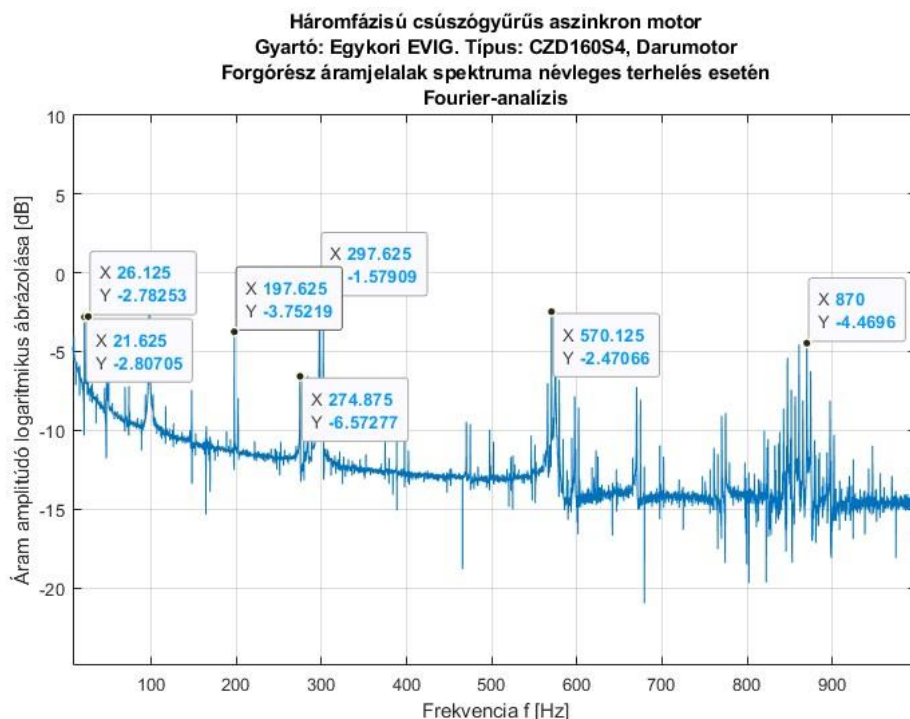
A 10. ábrán látható a csúszógyűrűs aszinkron motor forgórészének áramjeléből készült Fourier spektrum látható.

Az ábrán a vízszintes tengely a frekvenciát [Hz], a függőleges tengely az áram amplitúdóját mutatja logaritmikus skálán [dB]. A spektrumelemzés gyors Fourier-transzformációval készült, és névleges terhelés melletti mérési eredményeket tükröz. Az egyik legjelentősebb frekvenciacsúcs a 1714,88 Hz-nél jelenik meg, $-3,96$ dB amplitúdóval. Emellett további kiemelt komponensek találhatók 26,125 Hz, 97,625 Hz, 870 Hz és 1724 Hz körül. Ezek a frekvenciák alapvetően mechanikai jelenségekhez és villamos aszimmetriákhoz köthetők, például tengelykapcsolati és rotorhibákhoz. A spektrum alapzaja közelítően -15 dB alatt stabilizálódik, de számos kisebb frekvenciaösszetevő is kimutatható. A legnagyobb csúcsokat automatikusan megjelölték a képen koordináta-értékekkel együtt, ami segíti az elemzést. Ez az ábra jól használható a forgórész hibáinak diagnosztikájára, forgási frekvencia, excentricitás vagy tekercselési hibák felismerésére.



10. ábra Háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor forgórész áram Fourier-analízise. Tartomány 0-2500 Hz-ig (FFT-Fast Fourier Transform).

A két forgórész áramspektrum 10-11. ábrák spektrális elemzése hasznos, de nem elegendő a hibaterkép felállítására. Az állórész és forgórész spektruma között eltérés a szlip (csúszás) frekvenciában van (valamint itt most nem részletezett villamos és forgási jellemzőn, a forgógépre érvényes frekvenciafeltétel) és motor pólusszámából adódó villamos és geometriai szögeltérések.



11. ábra Háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor forgórész áram Fourier-analízise. Tartomány 0-1000 Hz-ig (FFT-Fast Fourier Transform).

A 11. ábra mutatja a következő forgórész áramspektrumát megváltoztatott frekvencia skála mellett (1000 Hz-ig). A vízszintes tengely a frekvenciát [Hz], a függőleges tengely az áram amplitúdóját mutatja logaritmikus skálán [dB].

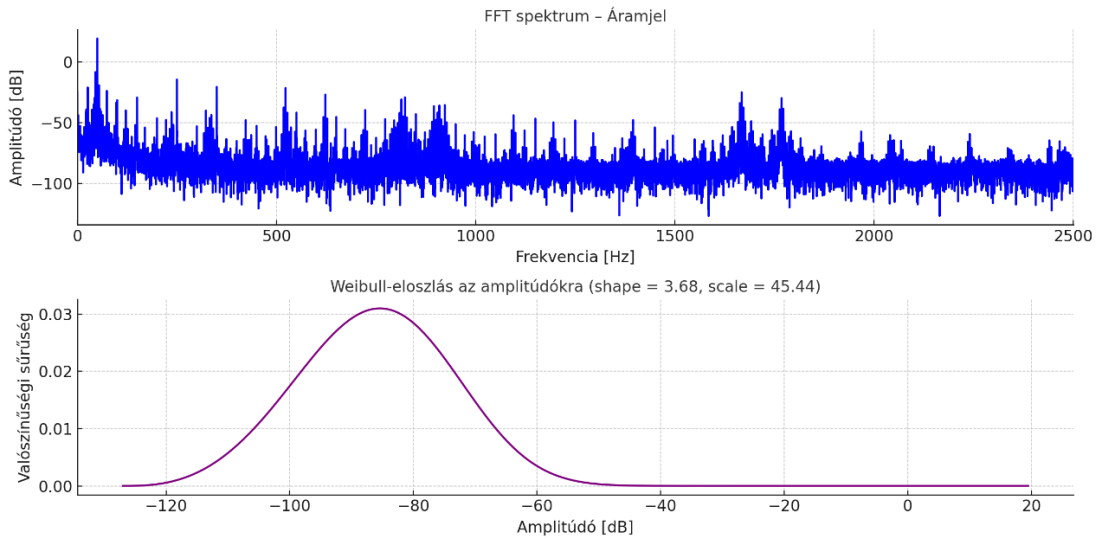
Az ábrán több jellegzetes csúcsot emel ki, például 21,625 Hz-nél, 197,625 Hz-nél, 297,625 Hz-nél és 870 Hz-nél. A legnagyobb amplitúdó $-1,57909$ dB, ami a 297,625 Hz frekvencián jelentkezik. A spektrum jól mutatja a jel frekvenciakomponenseinek eloszlását, amely alkalmas a forgórész hibadiagnosztikára. Az alapzaj szintje -15 dB körüli, viszonylag stabil, de a spektrumban több, kiemelkedő komponens is megtalálható. A 274,875 Hz-nél jelentkező $-6,57$ dB-es csúcs például mechanikai rezonanciára utalhat. A 870 Hz-es komponens ismét megjelenik, ahogy más spektrumokban is, ami megerősítheti annak fizikai jelentőségét.

Ez az ábra részletes képet ad a motor forgórészének állapotáról, és jól alkalmazható frekvenciaalapú hibakeresésre. Részletesebb elemzésre szükséges, mint a bemutatott néhány amplitúdó és frekvencia összehasonlítása, ezek a mérőszámok további számításra kerülnek.

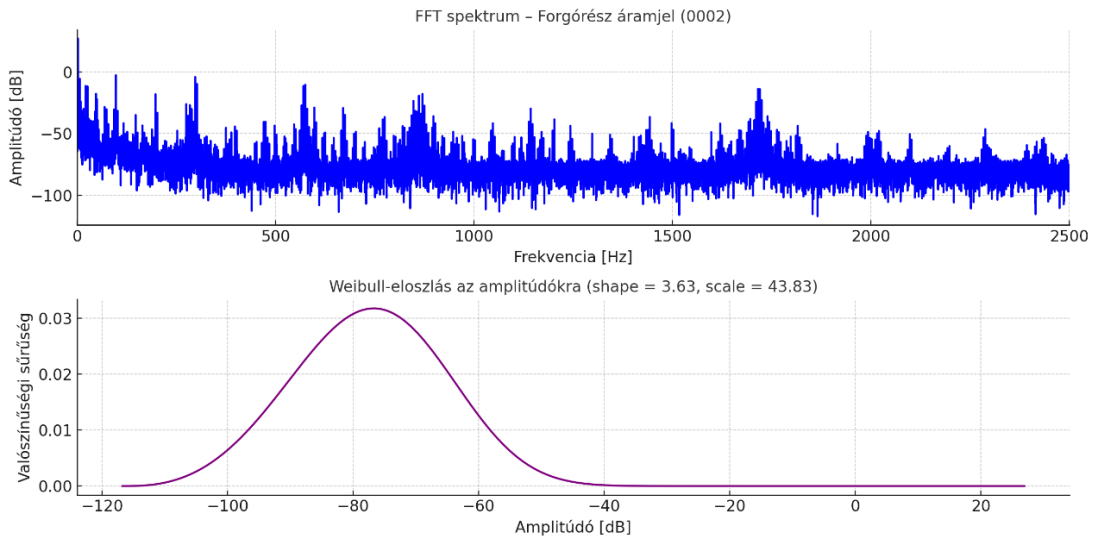
KOPÁSI TÉRKÉP, HIBAJELEK RENDSZEREZÉSE, ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatási elsődleges célja az [9] áramspektrumok mellett az eloszlás függvények szerepének felhasználása. Ebben az esetben a Weibull-és Gamma-eloszlás függvényekkel volt vizsgálva az amplitúdóspektrummal felhasználva. Ennek az a célja, hogy a gép egy

adott állapotában felvett áramspektrummal [10] összhangban megjelenítse a spektrum amplitúdó eloszlását. Ez az eloszlás még nem feltételen alkalmas hibametria felállítására, hanem arra szolgál, hogy támogassa a kopási térkép mezőeloszlásainak értékét amplitúdó nagyság szempontjából [12].



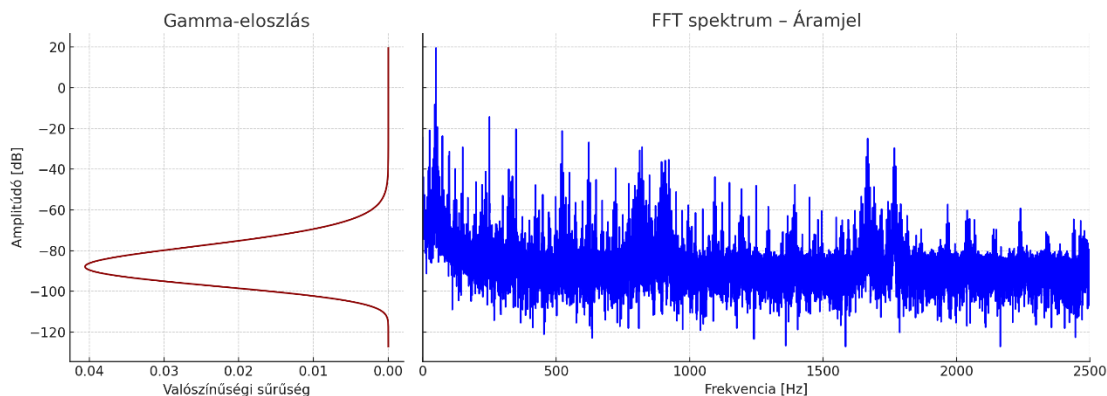
12. ábra Háromfázisú csúszógéyrűs aszinkron motor állórész áram Fourier-analízise és amplitúdó komponensek Weibull-eloszlása.



13. ábra Háromfázisú csúszógéyrűs aszinkron motor forgórész áram Fourier-analízise és hozzátartozó amplitúdó komponensek Weibull-eloszlása (áramfelvétel 0002-számú mérése).

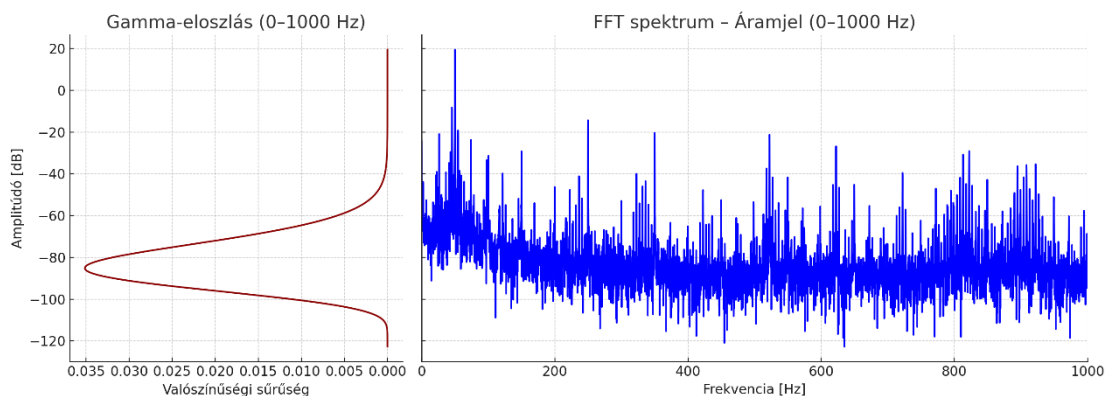
A 14-15. ábrák esetén az eloszlás függvények az áramspektrum amplitúdó tengelyéhez vannak illesztve, amelynek a jelentősége abban van, hogy átláthatóbb frekvenciataromány és az eloszlás függvény kapcsolata. Ebben az esetben Gamma-eloszlással függvényrel szemléltetve [12].

FFT és Gamma-eloszlás közös amplitúdótengellyel
(shape = 21.07, scale = 2.19)



14. ábra Háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor forgórész áram Fourier-analízise és amplitúdó komponensek Gamma-eloszlása.

Gamma-eloszlás és FFT spektrum 0-1000 Hz tartományban
(shape = 14.70, scale = 3.05)



15. ábra Háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor forgórész áram Fourier-analízise és amplitúdó komponensek Gamma-eloszlása (0-1000 Hz-ig számolva).

A [12] szakirodalom (Lukács Ottó: Matematikai statisztika című könyv) átfogóan tárgyalja a statisztikai módszerek alapjait, amelyek elengedhetetlenek a kutatások során. A könyv segítségével a kutatók képesek helyesen mintákat választani, eloszlásokat elemezni és hipotéziseket tesztelni. Bemutatja a lineáris regresszió, a korreláció és a többváltozós statisztika alkalmazását, amelyek nélkülözhetetlenek a komplex problémák megértéséhez (ebben az esetben az áramjel amplitúdó eloszlásait vizsgálva). A könyv rendszerezett elmé-

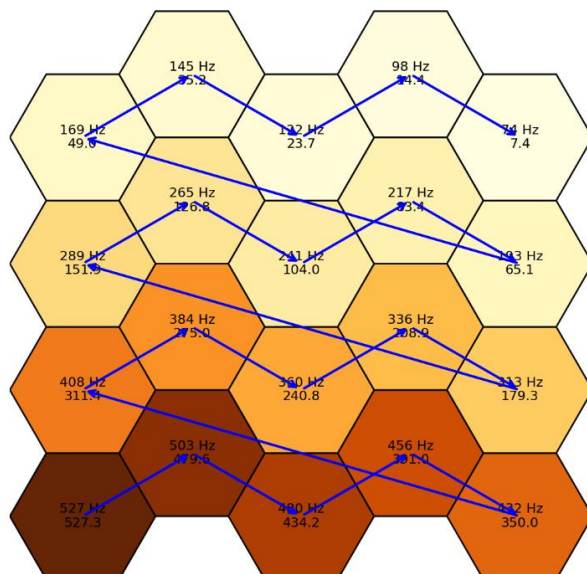
elég informatív. Az ábra különlegessége, hogy nemcsak az értékek nagyságát mutatja, hanem azok elhelyezkedését is egy vizuálisan jól értelmezhető struktúrában.

A 17. ábra egy kopási térkép haladási irány megjelöléssel méhsejt (Honeycomb) [9] típusú vizualizációt mutat, amely a frekvenciák és amplitúdók súlyozott értékeinek térbeli eloszlását szemlélteti hatszög (méhsejt) formában. A cellákban két adat szerepel: egy frekvencia érték (Hz-ben) és egy súlyozott érték ($\text{Hz} \times \text{amplitúdó}$), melyeket színekódolás segítségével különböztetnek meg. A színek a világossárgától a sötétbarnáig terjednek, utóbbi a legnagyobb értékeket képviseli – például az alsó bal sarokban $527 \text{ Hz} / 527.3$. A színeloszlás jól láttatja a kopás intenzitásának mértékét, amely a térkép alsó részén sokkal hangsúlyosabb, mint a felső régióban.

A kék nyilak különlegessége, hogy explicit módon jelzik a haladás irányát, azaz azt az útvonalat, amely mentén a kopás (feltételezett haladási irány) jelensége terjed a térben. Ez a funkció a prediktív karbantartás szempontjából különösen értékes, mivel segít előre jelezni a károsodás terjedését. Az irányvonalak általában a nagyobb értékek felé mutatnak, tehát a rendszer logikusan halad a gyengébből az erőteljesebb hibatünetek felé. A középső sávban erős átmenetek figyelhetők meg, például $265 \text{ Hz} / 126.8$ -tól $384 \text{ Hz} / 275.0$ -ig, ami a kopási folyamat felerősödésére utal. A frekvenciaértékek is fokozatosan nőnek a spirálhoz képest rendezettebb, lineárisabb formában. Ezzel szemben a korábban vizsgált spirális kopási térkép inkább egy ciklikus vagy időben forgó elrendezést képviselt, amely a hibák fokozatos kialakulását vagy periodikus megjelenését sugallta. A spirál vizuálisan érdekes, de kevésbé rendszerezett, míg a jelenlegi méhsejtes térkép strukturált, jól szegmentált adatokat mutat. Míg a spirálban a frekvenciák időbeli ciklikussága dominált, a méhsejt (honeycomb) [9] térképen a térbeli viszonyok és útvonalak kaptak kiemelt szerepet.

A haladási irány megjelölésével az elemzés következtetései sokkal egyértelműbbé válnak, és a hibák forrása is jobban lokalizálható. A méhsejtek közötti szoros kapcsolatok, valamint a vizuálisan is követhető nyilak segítségével a rendszer viselkedése sokkal áttekinthetőbb. Az ilyen típusú ábrázolás különösen hatékony eszköz lehet forgógépek állapotfigyelésénél, hiszen egyaránt szolgál statikus és dinamikus diagnosztikára. Az irányított kopási térkép ezáltal nemcsak a jelenlegi állapotot mutatja be, hanem prediktív előrejelzést is biztosíthat a hiba tovább terjedéséről. Összességében elmondható, hogy ez az 17. ábra gazdagabb információval szolgál, és döntéstámogatás szempontjából is erősebb, mint a spirál alapú megjelenítés.

Kopási térkép – Haladási irány megjelöléssel (Honeycomb)



17. ábra Háromfázisú csúszógyűrűs aszinkron motor tengelyütési frekvenciáinak méhsejt elrendezése és frekvenciaprioritás szerinti haladási iránya.

A méhsejt kopási térkép egy speciális [10] vizualizációs módszer, amely a gépek rezgés- vagy kopáselemzésében alkalmazott frekvencia- és amplitúdóadatok térbeli eloszlását jeleníti meg hatszögletű cellákban. Minden cella egy adott elemzési pontot képvisel, és tartalmazza a jellemző frekvenciát (Hz) valamint a hozzá tartozó súlyozott értéket (frekvencia $\times$ amplitúdó).

A színskála segít gyorsan azonosítani a kritikus pontokat, ahol a kopás vagy rezgés mértéke magas. Az elrendezés előnye, hogy jól láthatók a lokális eltérések és az értékek közötti kapcsolatok. Amennyiben haladási irány is meg van jelölve, a térkép még hatékonyabban mutatja a hiba vagy kopás lehetséges terjedését. Ez a fajta megközelítés különösen hasznos a forgógépek prediktív karbantartásában, mivel lehetőséget ad a hibák forrásának pontosabb lokalizálására és a megelőző beavatkozásra.

HONEYCOMB ALAPÚ KOPÁSI TÉRKÉP ALKALMAZÁSA FORGÓGÉPEK HIBADIAGNOSZTIKÁJÁBAN, ÖSSZEFOGLALÁS, KITEKINTÉS

Bevezetés:

A korszerű állapotfelügyeleti rendszerek egyik kulcseleme a gépek működés közbeni rezgés- és frekvenciaelemzése. A hagyományos spektrumábrák mellett egyre nagyobb szerepet kapnak az olyan térbeli vizualizációs módszerek, amelyek lehetővé teszik a hibák lokalizációját és időbeli lefolyásának nyomon követését [9].

Módszer:

A mérési adatokat szenzorhálózat gyűjti különböző térbeli pozíciókban. Minden érzékelési ponton számítottunk egy frekvenciaértéket és annak súlyozott amplitúdóját (frekvencia $\times$ amplitúdó). Az eredményeket hatszög alakú cellákban ábráztuk, ahol a színskála a kopás intenzitását jelzi. A világos színek alacsonyabb, míg a sötét színek magasabb kopási szintet mutatnak [10].

Eredmények:

A honeycomb térképen jól láthatók azok a területek, ahol a gép alkatrészei intenzívebb hibát mutat. A méhsejt elrendezés előnye, hogy sűrűbb adatstruktúrák is jól megjeleníthetők, és a szomszédos cellák közötti összefüggések könnyen követhetők. A vizualizáció lehetővé tette a hibák térbeli terjedésének nyomon követését és a kritikus zónák korai azonosítását [11].

Haladási irány megjelölése:

A térképen alkalmazott kék irányvonalak a hiba lehetséges terjedését is szemléltetik. Ezek alapján nemcsak az aktuális állapot volt vizsgálható, hanem következtetések is levonhatók a jövőbeni fejlődésről.

Következtetés:

A méhsejt alapú kopási térkép hatékony eszköz a forgógépek hibáinak korai felismerésében és nyomon követésében. A módszer vizuálisan jól értelmezhető, részletgazdag, és alkalmas prediktív karbantartási stratégiák támogatására. További kutatások során javasolt a térképek automatizált elemzésének bevezetése neurális hálózatokkal vagy gépi tanulási algoritmusokkal.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Jean-Claude Trigeassou, Electrical Machines Diagnosis, First published, 2011, Great Britain and the United States by ISTE Ltd and John & Sons, Inc. ISBN 978 1 84821 263 3
- [2] Dr. Fodor György, Elméleti elektrotechnika II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1989, ISBN 9631816095
- [3] Bendiák István, Semperger Sándor, Aszinkron motorok mechanikai eredetű hibáinak elemzése áramjelalak-analízis módszerével: Temesvári, Zsolt; Wühl, Tibor; Molnár, György (szerk.) XXXVIII. Kandó Konferencia 2022 - Kiadvány kötet Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar (2022) 419 p. pp. 33-48. , 15 p.
- [4] 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
- [5] N. Bhole and S. Ghodke, "Motor Current Signature Analysis for Fault Detection of Induction Machine—A Review," 2021 4th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), NaviMumbai, India, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICNTE51185.2021.9487715.

- [6] P. D. Yelpale, R. K. Jarial and A. J. Patil, "Fuzzy-based Induction Motor Fault Diagnosis Decision-Making System for Motor Current Signature Analysis," 2024 3rd International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangalore, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/INOCON60754.2024.10512034.
- [7] M. S. Eddine, K. Djallel, G. Abdelhalim and M. R. Morakchi, "Comparative Study of Envelope and TKEO Demodulation Techniques for detecting Rotor bar breakage using Motor Current Signature Analysis (MCSA)," 2024 International Conference on Advances in Electrical and Communication Technologies (ICAECOT), Setif, Algeria, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICAECOT62402.2024.10828764.
- [8] K. Laxmi Sree and K. C. Deekshit Kompella, "High Resolution based Bearing Damage Identification in Poly Phase Asynchronous Motor using Gabor Transforms of Stator Current," 2021 IEEE Bombay Section Signature Conference (IBSSC), Gwalior, India, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IBSSC53889.2021.9673443.
- [9] X. LI, B. -b. SUN and L. -w. SU, "Optimization of New Negative Poisson's Ratio Honeycomb Sandwich Reflector Structure," 2019 14th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications (SPAWDA), Shijiazhuang, China, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/SPAWDA48812.2019.9019311.
- [10] X. -W. Yuan, Z. Yang, M. -J. Gou, M. -L. Yang and X. -Q. Sheng, "A Flexible and Efficient Method for the Analysis of Electromagnetic Scattering by Inhomogeneous Objects With Honeycomb Structures," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 21, no. 3, pp. 541-545, March 2022, doi: 10.1109/LAWP.2021.3138133.
- [11] Xin Jin, Guoxi Li, Song Gao and Jingzhong Gong, "Optimal design and modeling of variable-density triangular honeycomb structures," 2017 8th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), Cape Town, 2017, pp. 138-143, doi: 10.1109/ICMIMT.2017.7917452.
- [12] O. Lukács, Matematikai statisztika, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1999.
- [13] H. Qiu, J. Lee, J. Lin, and G. Yu, "Wavelet filter-based weak signature detection method and its application on rolling element bearing prognostics," Journal of Sound and Vibration, vol. 289, no. 4-5, pp. 1066-1090, Feb. 2006. doi: 10.1016/j.jsv.2005.03.007.