

**LIFE CYCLE MODEL OF BEARINGS AND
SHAFT MISALIGNMENT
FREQUENCIES OF ASYNCHRONOUS
MOTORS****ASZINKRON MOTOROK CSAPÁGYAINAK
ÉS TENGELYBEÁLLÍTÁSI
FREKVENCIAINAK ÉLETCIKLUS
MODELLJE**BENDIÁK István¹**Abstract**

The target area of the research is the analysis of the mechanical failure of three-phase asynchronous motors, including primarily the assessment of the excitation frequencies caused by bearing and shaft adjustment and the knowledge of the wear process. The field of science is one of the widely studied branches, however, there are parts that do not provide clear (in the case of current signal analysis) guidance on the cycles of bearing wear. The research foundations are partly derived from vibration diagnostics, but the analysis is based on electrical signal testing. Objectives: The design of the wear characteristic fields is the four elements, the outer and inner ring of the bearing, rolling elements, especially running rolling elements and the bearing basket, as well as the analysis of errors resulting from shaft alignment errors. The first sketch of the wear process and setting up step rules, creation of simplification routes, getting to know the user.

Keywords

Shaft Misalignment, Bearing Frequency, Outer ring frequency, Inner Ring Frequency, Asynchronous motor

Absztrakt

A kutatás célterülete háromfázisú aszinkron motorok mechanikai meghibásodásának elemzése, azon is belül elsősorban csapágy és tengelybeállítás okozta gerjesztő frekvenciák felmérése és kopási folyamat megismerése. A tudományterület szélesen művelt ágazatok közé tartozik, azonban van olyan részegysége, amely nem ad egyértelmű (áram jelalak-analízis esetén) eligazítást a csapágy elhasználódás ciklusaiban. A kutatási alapok részben a rezgésdiagnosztikából származnak, de az analízis villamos jelvizsgálatra épít. Célkitűzések: A kopási jellegzők kidolgozása a négy elem, a csapágy külső és belső gyűrű, gördülő elemek, egysorban futó gördülő elemek és a csapágy kosár, valamint a tengelybeállítás hibákból származó hibák elemzése. A kopás folyamatának első vázlata és lépésszabályok felállítása, egyszerűsítési útvonalak létrehozása, az elhasználódás megismerése.

Kulcsszavak

Tengelybeállítás, Csapágyfrekvencia, Külső gyűrű frekvencia, Belső gyűrű frekvencia, Aszinkron motor

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

KUTATÁSI ELŐZMÉNYEK, BEVEZETŐ

A kutatás célterülete háromfázisú aszinkron [1] motorok mechanikai, azon is belül elsősorban csapágy és tengelybeállítás okozta gerjesztő frekvenciák felmérése és kopási folyamat megismerése. A tudományterület [2] szélesen művelt ágazatok közé tartozik, azonban van olyan résterülete, amely nem ad egyértelmű (áram jelalak-analízis esetén) eligazítást a csapágy elhasználódás [3] ciklusaiban. A kutatási alapok részben a rezgésdiagnosztikából származnak.

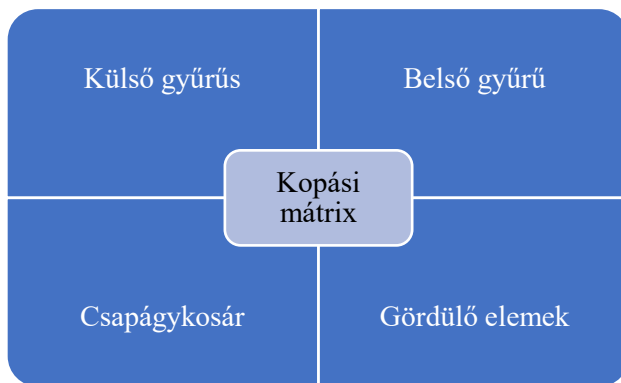
A kopási jelleg-mezők kigondolása négy elem, a csapágy külső és belső gyűrű, gördülő elemek, egysorban futó gördülő elemek és a csapágy kosár, valamint a tengelybeállítás hibákból származó hibák elemzése. A tengelybeállítás esetén [4] merőlegességi és párhuzamosság, szöghibából származó gerjesztő hibák elemzése amplitúdó, frekvencia tartományban. A kopás folyamatának első vázlata és lépésszabályok felállítása, egyszerűsítési útvonalak létrehozása. Az elhasználódás folyamatában visszatéri pontok és előrejelzés struktúrájának kidolgozása. Ennek alapja a motor áramjel vizsgálata [5] fázisáram és Parkvektor komponens elemzések alapján. A dolgozat első része a kutatás háttérének bemutatásával foglalkozik, a második az kopási folyamat köré épült tapasztalatokkal.

A villamos gépek egy integrált rendszer [6] részei (frekvenciaváltó, szenzorok, szoftverek stb.) és azzal már nélkülözhetetlenül együtt dolgoznak. Ebben a folyamatban nyílik lehetőség a gépről alkotott működési térkép felállítására. Számos forgógép van jelen az iparban, együttműködés és ellenőrzés szükséges, folyamatos állapotfigyelés.

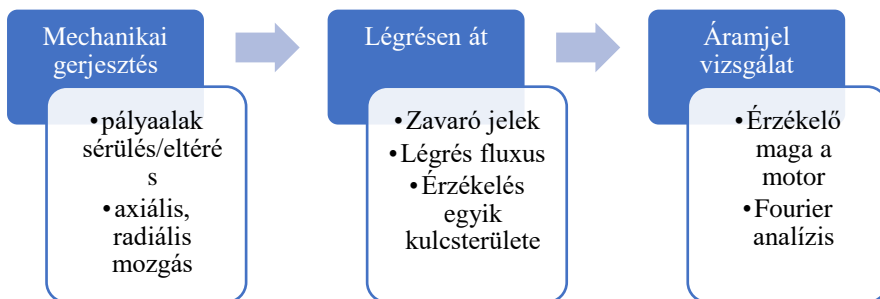
Itt már nem csupán hibajelek detektálása a cél, hanem ezen túlmutató információforrás kezelése és fejlesztése, elindulva az öntanuló villamos hajtások területe felé. Gépek és [7] rendszerüzemeltetők közös munkája, egymás üzemviteli jellemzőinek elemzése és korrigálása, abból konklúziók levonása. A dolgozat elsősorban a mechanikai eredetű jelekkel foglalkozik, és abból képez elemzési [8] lehetőségeket. Szakterület hazai és nemzetközi viszonylatban megalapozott és széleskörűen művelt ágazat.

A nemzetközi szakirodalom rendkívül [9] gazdag ismeretet szolgáltatott a dolgozat megszületéséhez, amit saját mérési eredményekkel vizsgáltam meg. A jelanalízis mellett a termográfia is helyet kap a jelenségek bemutatásában, önmagában nem szerepel külön ágazatként.

Az első beszámoló ezen fázisának [10] alapvető célja eddig nem ismert kopási folyamat felállítása és folyamatos fejlesztése, amely lehetőséget biztosít az [11] áram jelalak-analízis keretein belül a csapágy és tengelybeállítási hibák előre jelzésre és tervszerű leállás elősegítésére. A frekvenciaösszetevők és köztük megjelenő [12] modulációk elemzési lehetőségeinek továbbfejlesztése. Az 1-3. ábrák mutatják a mérés alapvető elképzeléseit, rezgésdiagnosztikával szembeni előnye, hogy nincs szükség gépbe vagy gépre épített szenzorokra (pl.: piezokristályra).

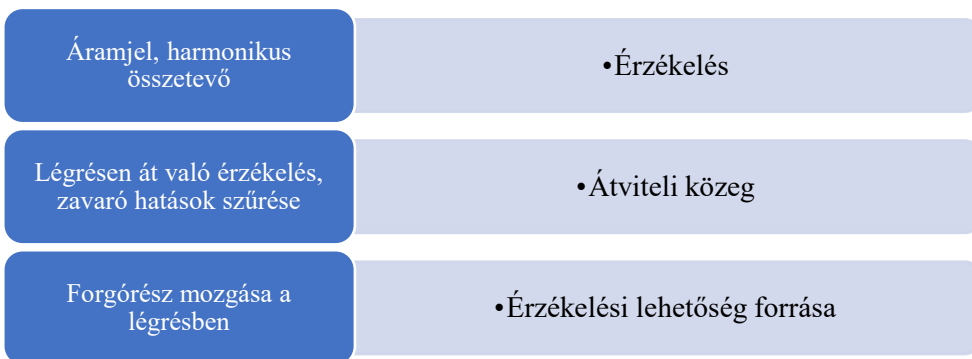


1. ábra Csapágy kopási folyamatának elemei áram jelalak-analízisben való elemzéshez, (szerzői ábra).



2. ábra Származtatás a rezgésdiagnosztika alapvető elképzeléseiből, (szerzői ábra).

Érzékelés fizikai gondolkísérlete, miként érzékelhető mechanikai jel mágneses úton (3 ábra)? Forgórész mozgása fluxusváltozást idéz elő a légréseben.



3. ábra Áramjel vizsgálat egyszerűsített elvi érzékelési elképzelése, (szerzői ábra).

KIALAKÍTOTT CSAPÁGY-HIBAMETRIA

A csapágy hibametria felállítása az első olyan lépés, amely megalapozza a kopásra következtethető rajzolando térkép felállítását. A hibametria felállítása nélkül nem lehet algoritmust létrehozni.

A vizsgálati struktúra szemléltetésére készült a 1-2. táblázatok. A csapágyfrekvenciák mellé társulnia kell a tengelybeállításból eredő gerjesztő frekvenciáknak is, így a vizsgált jelek száma 150 darabra növekszik. Kísérleti eredmények azt mutatták [13], hogy nem csak a csapágyra vonatkozó frekvenciákat kell [14] számítani és ellenőrizni, hanem a tengely beállítási frekvenciákat is. Ettől eltérni nem célszerű, mert tengelybeállítási-hiba hatással lesz a csapágyra és fordítva [15].

A mérés alapvető elképzelése, hogy érzékelő egyben a vizsgált motor. Valamennyi hiba érzékelése a légréven [16] keresztül történik. A radiálisan keletkező elmozdulás nem lehet milliméteres nagyságrendű. A vizsgált aszinkronmotor légrése tizedmilliméter nagyságrendjében van, a forgórész belesúrlódna az állórészbe, az [17] észlelt mechanikai hibák axiális mágneses húzási-tolási elmozdulásból alapján jelennek meg, amely a forgórész közvetít az állórész vasmaggal. A vizsgálat közvetítő eszköze a mágnesestér, azon belül a forgótér, így ennek jellemzőit is figyelembe kell venni. A térvektor elmélet nem feltétlenül oldja meg a hibakeresési problémákat (fázisaszimmetria, attól a mechanikai komponens jelen lesz), mert a háromfázisú vektorok egy pályageometria alakjában nem választják szét a hiba jelek változatait. A térvektor elméletben szereplő téralak leírás és pályaváltozási [18] módszer sokszor nehezíti a hibaanalízist és a hibák egymásra hatás nem követhető egyértelműen, ezért arra következtetésre jutottam, hogy kopási mátrixot hozok létre, amely megmutatja egy elhasználódási folyamat okozóit és eredményeit [19].

ASZINKRON MOTOROK DIAGNOSZTIKAI VIZSGÁLATA ÁRAM JELALAK-ANALÍZIS MÓDSZERÉVEL

Az előző fejezetben bemutatott számítási folyamat előzi meg a jelfeldolgozási lépéseket. Ezek az adatok adatbázisokban tárolhatók és tovább felhasználhatók.

A forgógép diagnosztika szerteágazó szakterület, ezért jelenleg csak az aszinkron géptípusra fogok koncentrálni.

Az áram jelalak-analízis rendkívül széles körben alkalmazott módszer, napjainkra már kidolgozott eszközparkkal és mérési [1] eljárásokkal, [2] ennek lehetőségeit [20] vizsgálom ebben a fejezetben. Elsősorban a Park-vektorok (térvektorok) diagnosztikai alkalmazása kap kiemelt szerepet.

Áram jelalak kiértékelésének módszerei

- Hogyan lehet a kapott spektrumokból hibajelekre következtetni?
- Milyen jellemzőkkel bírhat egy villamos forgógép a jelfeldolgozás területén?
- Konklúzió: Érzékelő maga a motor (légréven keresztül)

A motoráram nagyon sok adatot tartalmaz [21] a motor aktuális működési állapotáról. A meghatározásukra vannak [22] ismert és kutatott (áramjel és szórt fluxusok) eljárások. Az általam végzett mérési sorozat arra irányult, hogy minél több üzemmód álljon rendelkezésre a motor viselkedéséről különböző táplálási módok alkalmazása mellett [23].

Csapágyhibák vizsgálata motoráram spektrum alapján

Csapágyhibák keresésénél a mintavételezés létfontosságú kiindulási feltétel. A spektrumok elemzésének olyan lépéssel kell haladnia, amelyben látható a csapágyra vonatkozó jel. A nemzetközi szakirodalmak szerint a következő összefüggés alapján lehet elindulni [1], [2-3],

$f_{keresend\acute{o}\ hibafrekvencia} = |f_{\acute{a}ll\acute{o}r\acute{e}sz\ frekvencia} \pm m \cdot f_{csap\acute{a}gyra\ jellemz\acute{o}\ frekvencia}|$
 ahol $m=1, 2, 3, \dots, n$

Kopási folyamatábrában szereplő mezők jelölései.

Komponens	Amplitúdó [A]	Harmonikus rendszám	Harmonikus értéke frekvencia [Hz]	f [Hz]
Outer ring Külső gyűrű	o1.	oh1.	of1.	133,32
	o2.	oh2.	of2.	216,63
	o3.	oh3.	of3.	299,95
	o4.	oh4.	of4.	383,27
	o5.	oh5.	of5.	466,6
	o6.	oh6.	of6.	549,91
	o7.	oh7.	of7.	633,23
	o8.	oh8.	of8.	716,55
	o9.	oh9.	of9.	799,88
	o10.	oh10.	of10.	883,2
Inner ring Belső gyűrű	in1.	inh1.	inf1.	203,25
	in2.	inh2.	inf2.	332,83
	in3.	inh3.	inf3.	462,42
	in4.	inh4.	inf4.	592,02
	in5.	inh5.	inf5.	721,6
	in6.	inh6.	inf6.	851,19
	in7.	inh7.	inf7.	980,79
	in8.	inh8.	inf8.	1110,38
	in9.	inh9.	inf9.	1239,96
	in10.	inh10.	inf10.	1369,55
Cage Kosár	c1.	ch1.	cf1.	59,23
	c2.	ch2.	cf2.	68,45
	c3.	ch3.	cf3.	77,69
	c4.	ch4.	cf4.	86,91
	c5.	ch5.	cf5.	96,14
	c6.	ch6.	cf6.	105,37
	c7.	ch7.	cf7.	114,61
	c8.	ch8.	cf8.	123,83
	c9.	ch9.	cf9.	133,06
	c10.	ch10.	cf10.	142,29

1. Táblázat. Hibametria felállítására egyszoros mélyhornyú csapágy külső, belső gyűrű és kosár komponensekre, (szerzői táblázat).

Komponens	Amplitúdó [A]	Harmonikus rendszám	Harmonikus értéke frekvencia [Hz]	f [Hz]
Rolling elements Gördülő elemek	r1.	rh1.	rf1.	110,88
	r2.	rh2.	rf2.	162,52

	r3.	rh3.	rf3.	214,18
	r4.	rh4.	rf4.	265,83
	r5.	rh5.	rf5.	317,48
	r6.	rh6.	rf6.	369,13
	r7.	rh7.	rf7.	420,78
	r8.	rh8.	rf8.	472,43
	r9.	rh9.	rf9.	524,08
	r10.	rh10.	rf10.	575,72
Shaft Tengely	s1.	sh1.	sf1.	73,66
	s2.	sh2.	sf2.	97,32
	s3.	sh3.	sf3.	120,97
	s4.	sh4.	sf4.	144,63
	s5.	sh5.	sf5.	168,3
	s6.	sh6.	sf6.	191,95
	s7.	sh7.	sf7.	215,61
	s8.	sh8.	sf8.	239,27
	s9.	sh9.	sf9.	262,94
	s10.	sh10.	sf10.	286,6

2. Táblázat. Hibametria felállítása egysoros mélyhornyú csapágy gördülő elemek és tengelyűtési, forgási frekvencia komponensekre, (szerzői táblázat).

A táblázat felosztása a következő

A harmonikusokat első megközelítésben a tizedik rendszámig kell követni, mert az egyik azonosító a frekvencia és amplitúdó mellett a harmonikusrendszám. Ha nagyobb rendszámig tart a számítás, akkor a zaj is megnő, mert a szűrés esetén a zavaró jelek elemzését harmonikus rendszámhoz is kell hasonlítani.

Amplitúdók és harmonikusok felosztása

Az első az amplitúdó értéke a tizedik harmonikusig. Jelölése utal a komponensre o1-outer ring-külső gyűrűs első harmonikus, in1-inner ring/inner race-belső gyűrű első harmonikus, c1-cage-kosár-első harmonikus, r1-rolling elements-gördülő elemek első harmonikus.

Az s1-shaft-tengely első harmonikus, vagyis a forgási frekvencia modulált értékének első harmonikusa. A moduláló jel az a tápláló hálózat frekvenciája (alapesetet feltételezve).

Frekvencia összetevők jelölései

- of1.: Outer ring/race-külső első frekvencia összetevő
- of2.: Outer ring/race-külső második frekvencia összetevő
- of3.: Outer ring/race-külső harmadik frekvencia összetevő
- A komponensek folytatódnak ugyanezen jelölés szerint of10.-ig.
- inf1.: Inner ring/race-belső gyűrű első frekvencia összetevő
- inf2.: Inner ring/race-belső gyűrű második frekvencia összetevő
- inf3.: Inner ring/race-belső gyűrű harmadik frekvencia összetevő
- A komponensek folytatódnak ugyanezen jelölés szerint inf10.-ig.

- cf1.: Cage-kosár frekvencia első összetevő
- cf2.: Cage-kosár frekvencia második összetevő
- cf3.: Cage-kosár frekvencia harmadik összetevő
- A komponensek folytatódnak ugyanezen jelölés szerint cf10.-ig.
- rf1.: Rolling elements-gördülő elemek első frekvencia összetevő
- rf2.: Rolling elements-gördülő elemek második frekvencia összetevő
- A komponensek folytatódnak ugyanezen jelölés szerint rf10.-ig.
- sf1.: Shaft-tengely első frekvencia összetevő
- sf2.: Shaft-tengely második frekvencia összetevő
- A komponensek folytatódnak ugyanezen jelölés szerint sf10.-ig.

CSAPÁGYÉLET-CIKLUS MODELL, KOPÁSI ALGORITMUS

A kutatás első fázisának célja létrehozni egy olyan folyamatlemező térképet amely, túlmutat a függvénytranszformációk begyakorolt elemzésein. A kutatás nem teljes egy olyan rendszer nélkül, amely rávilágít egysoros mélyhornyú golyós csapágy által generált jelleg-mezőkre.

Kiindulási pontok a modell létrehozásában

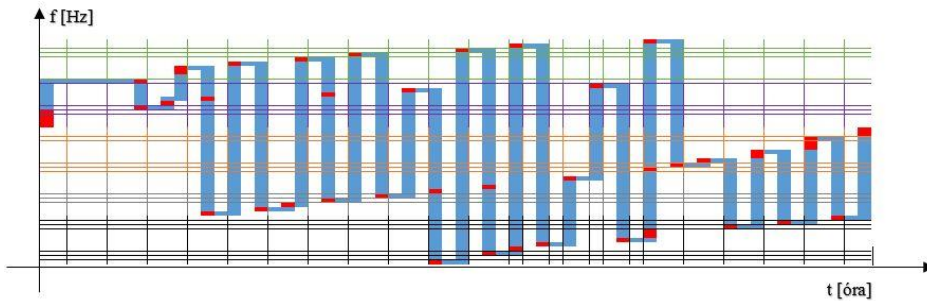
- A négy csapágy hibafrekvencia mellett a tengelybeállítási frekvenciát közös útvonalra hozni az elhasználódás folyamatában.
- Lehet-e párhuzamot állítani a frekvenciatartományokban?
- Melyik elemnél indul meg először a hiba jel és milyen frekvenciatartományban?
- Hogyan hatnak egymásra a hibafrekvenciák?
- A harmonikus rendszámnöveléssel mennyi zaj kerül a mérési feldolgozásba?
- Mennyi minimális és maximális lépésszám közötti eltérés (technológiai folyamat és gépfüggő kritérium)?

Ezekre a kérdésekre életciklus modellel lehet válaszolni.

A 1-2. táblázatok és 4. ábra szerint készült egy modell. A négy csapágy hibafrekvencia és egy tengelybeállításra vonatkozó frekvencia és ezek a 10. harmonikusig vannak számítva. Ettől egyenlőre nem tér el a számítás (következő lépésekben szükséges, mert a visszalépési útvonalakat fel létre kell hozni).

Vannak kisebb frekvenciánál jelentkező komponensek pl. kosárkopás és ettől lényegesen nagyobb (vagy együtt roncsolódó alkatrészek, amik egymásra hatnak) frekvenciatartományú jelek, mint pl.: belső gyűrű.

Az első mérföldkő mérései és számítási eredménye 4. ábrán látható életciklus modell, kopási folyamatára. A 4. ábra mélyhornyú golyós csapágyra vonatkozik vagy általánosságban egysoros mélyhornyú golyós csapágyra. A számítás figyelembe veszi a frekvenciaváltós táplálást, átszámol a fordulatszám és tápláló frekvencia függvényében. A frekvencia összetevők Fourier-transzformációval vannak számítva.



4. Ábra Egyszeres mélyhornyú csapágy kopási folyamatábrája áram jelalak-analízissel. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

ALGORITMUS MŰKÖDÉSI FOLYAMATA ÉS JELLEGMEZŐK ÉRTELMEZÉSE

- Zöldmező: Csapágy külső gyűrű szektor 1-10. harmonikusig amplitúdó komponens és frekvencia értékkel.
- Lilamező: Csapágy belső gyűrű szektor 1-10. harmonikusig amplitúdó komponens és frekvencia értékkel.
- Barnamező: Csapágy kosár szektor 1-10. harmonikusig amplitúdó komponens és frekvencia értékkel.
- Szürkemező: Csapágy gördülő elemek szektor 1-10. harmonikusig amplitúdó komponens és frekvencia értékkel.
- Feketemező: Tengelybeállítási hibatér szektor 1-10. harmonikusig amplitúdó komponens és frekvencia értékkel.

Lépési szabály

A 4. ábra kisméretű, ezért nem látszik a frekvencia érték, de színek alapján követhető folyamatára, ennek ez is a célja. Az élettartam balról jobbra halad a piros mezőket érintve a kékmező útvonalon. A mérete azért ilyen, mert így együtt látni az összes mezőt.

Lépési folyamat

Balról jobbra halad a hibajel kezdete kékmezőn (a sárgaszín a beavatkozási tartomány). A piros mezők hibafrekvencia lépési pontok (határállomások), amelyek Fourier-transzformációval vannak számítva. A kezdeti kopás a baloldali pirosmezőből indul (belső gyűrű hibafrekvencia, lilamező). Cél eljutni a jobboldali pirosmezőig, viszont ekkor már teljesen tönkremegy a hajtásrendszer.

Pirosmezőt nem lehet kihagyni, átlósan nem lehet menni, feltéve, ha nem keresztesz kékmezőt és nem hoz létre kétértelmű állapotot. Lépésszámot lehet csökkenteni, de akkor fennállhat olyan állapot, hogy a következő pirosmező csúcsához érkezik a folyamat, akkor kétértelművé válik és anomáliát ad, mert vagy kihagy egy lépést vagy kétszer elemez egy pirosmezőt, egyik sem megengedett.

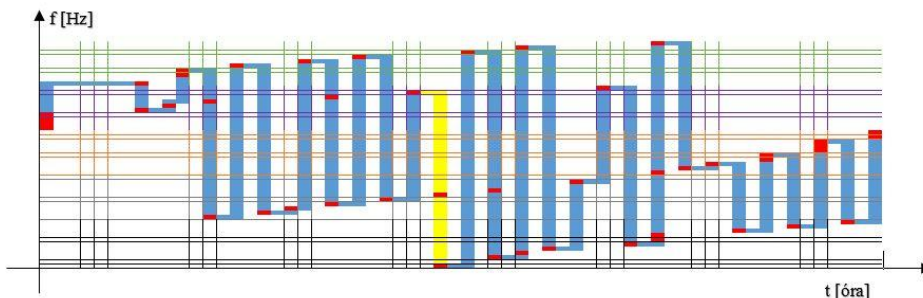
Kékmezők nem kereszteszhetik egymást egyik területben sem. Érinteni kell a pirosmezőket és azon/azokon keresztül kell tovább haladni. Pirosmezők lehetnek egymás mellett (vannak is), ennek oka a hibafrekvenciák közeledése egymáshoz. Tehát az egymásra hatást könnyebb látni, mint spektrumokban. A pirosmezőbe hosszanti vagy rövid oldalról

kell belélni, kikerülni nem lehet, akkor kihagyna egy hibafrekvenciát, értelmét veszti a kopási folyamat értelmezése.

A folyamat alapkérdése: Hol kell leállítani a gépet?

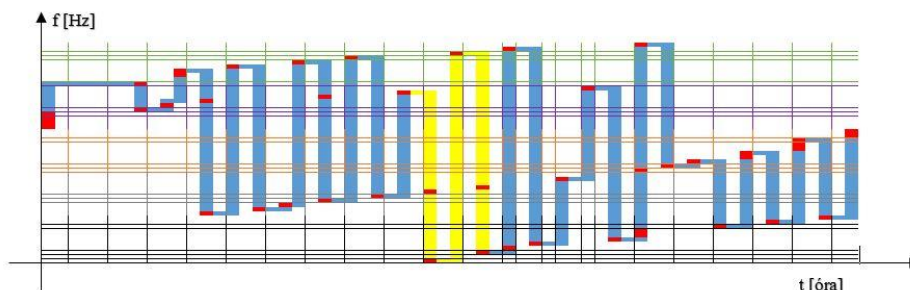
A barnamezőbe való belépéskor már sérülni kezd a csapágykosár is, ekkor már nem előzhető meg időben egy tervszerűtlen leállítás, mert előfordulhat, hogy nagyobb terhelési állapotban felgyorsított lesz a roncsolódás.

Az ésszerű leállást akkor kell megtenni, amikor a tengelybeállítási frekvencia legnagyobb rendszáma belép a kopási térkép területére (5. ábra sárgamező és 6-8. ábrák kiterjesztett sárgamező), vagyis a feketemező baloldal felőli első pirosmezője. Ha itt leállítjuk a gépet, akkor még nem történhet túl nagy károkozás. Ennek a tervszerű leállítási folyamatnak a szemléltetésére készült az 5-6. ábrák, ahol a sárgamezők jelentik a leállási sávokat. A keskeny sárgasáv egy olyan rész, ahol az első figyelmeztető jelzést célszerű (5. ábra) kiadni a gépről. Viszont még nem történik jelentős hiba. Ha megvárjuk a 7. ábra szerinti kiterjesztett sárgamező szélesedő területét, akkor maradandó roncsoló hatás keletkezik. Ezek a mezők frekvencia-amplitúdó (harmonikus rendszámmal) tartományban vizsgálják a jelek előfordulását. Ezt megelőző belső és külső gyűrű, valamint gördülő elemek frekvencia tartományait célszerű minél több matematikai transzformációval figyelni. Történik-e durva ugrás vagy lengés a hajtásrendszerben? Ha igen, akkor honnan származik milyen hatást gyakorol a géprendszerre?



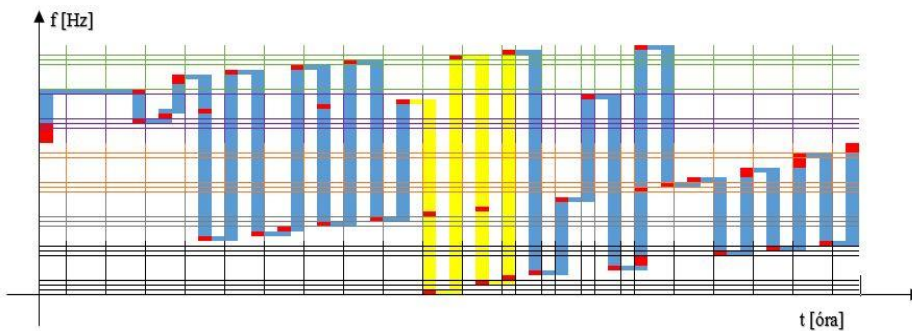
5. Ábra. Csapágy kopási folyamatábrája határmezővel. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

A 6. ábra a második kiterjesztett leállómező, sárgamező, a tengelybeállítási frekvencia (fekete négyzetsáv) kezd belélni a kopási térképre. Itt már feltétlen szükséges jelezni a felhasználó felé a tervszerű leállítás szükségességét.



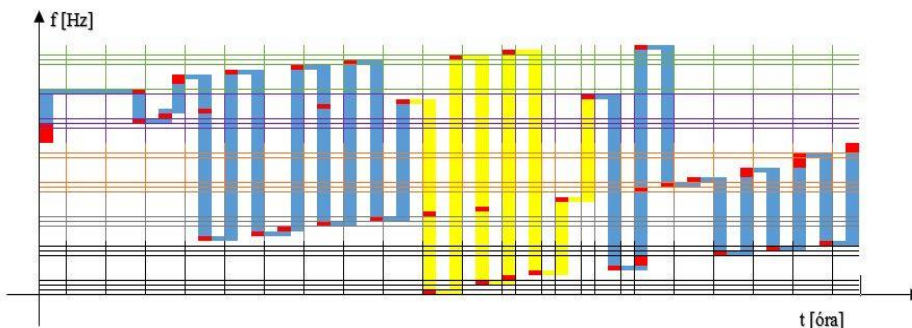
6. Ábra. Csapágy kopási folyamatábrája kiterjesztett határmezővel. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

A 7. ábra már a tervezett leállás kritikus utolsó teljes szakasza, kritikus stádium.



7. Ábra. Csapágy kopási folyamatábrája leállómezővel, kritikus stádium. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

A 7. ábra egy olyan kiterjesztett állapotot, ahol a leállást már meg kell tenni. Az átlépés a tengelybeállítási frekvenciáknak már több tagja jelen van (fekete rácsmező), a gördülő elemeknek kettő, a belső gyűrű még nem ad alacsony frekvenciájú részt, a külső gyűrű viszont kettő komponenssel van jelen (zöld rácsmező), ha csak a sárgamezőt elemezzük. Ha itt sem történik meg, akkor még folytatódik a hibaelemzés a belső gyűrű következő frekvencia jelének belépéséig (8. ábra szerint).



8. Ábra: Csapágy kopási folyamatábrája végső leállómezővel, kritikus stádium. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

A 8. ábra a végső szélesített leállómezőt jelzi (szélesített sárga útvonal). A szélesítés oka, hogy megvárta az elemző még a ciklus első szakaszában a korábban csak nagyobb frekvencia tartományban előforduló belső gyűrű hibafrekvencia újra belép a kopási útvonalba (lilarács-mező). A tervszerű leállást 5-6. ábrák szerint célszerű megtenni.

A gyakorlatban mindig kulcskérdés: Mennyi biztonsági tartalék van még hátra? A 8. ábra szerint már nincs, ekkor elhasználta a csapágy a középkorú élettartam ciklusát.

Sáv	Elem	Összes lépés	Sárgamezőben lévő lépések	Különbözet
Zöld	Külső gyűrű	113	36	77

Lila	Belső gyűrű	194	59	135
Barna	Kosár	216	60	155
Szürke	Gördülő elemek	220	63	157
Fekete	tengelyütés	81	53	28
Összesítés		833	307	526

3. Táblázat: Lépésszámok áttekintése a különböző mezőkben (8. ábra szerint), (szerzői táblázat).

Sáv	Elem	Összes lépés	Sárgamező	Különbözet
Zöld	Külső gyűrű	113	36	77
Lila	Belső gyűrű	194	59	135
Szürke	Gördülő elemek	220	63	157
Fekete	Tengelyütés	81	53	28
Összesítés		608	211	397

4. Táblázat: Lépésszámok csökkentésének lehetőségei, (szerzői táblázat).

Sáv	Elem	Elem	Összes lépés	Különbözet
Zöld	Külső gyűrű	113	36	77
Lila	Belső gyűrű	194	59	135
Fekete	Tengelyütés	81	53	28
Összesítés		388	148	240

5. Táblázat: Lépésszámok csökkentésének lehetőségei, gördülő elemszámítás kihagyással, (szerzői táblázat).

Sáv	Elem	Elem	Összes lépés	Különbözet
Zöld	Külső gyűrű	113	36	77
Fekete	Tengelyütés	81	53	28
Összesítés		194	89	105

6. Táblázat: Lépésszámok csökkentésének lehetőségei. Legyszerűbb állapot, felülvizsgálatra szorul, (szerzői táblázat).

Sáv	Elem	Elem	Összes lépés	Különbözet
Zöld	Külső gyűrű	113+10	36	87
Fekete	Tengelyütés	81	53	28
Összesítés		204	89	115

7. Táblázat: Lépésszámok csökkentésének lehetőségei. Lépésszám visszaállítási módszer, ha túl kevés a számítás a kopási folyamat előre jelzéséhez, (szerzői táblázat).

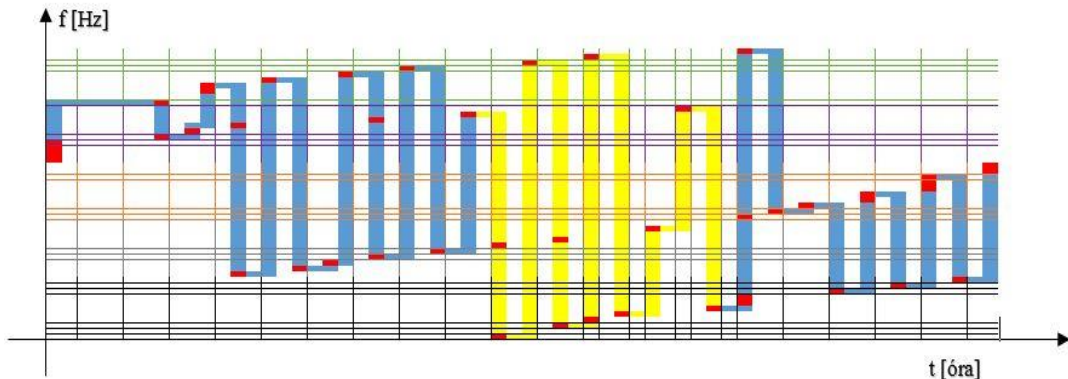
Belső gyűrű mezőnek 4+6 lépése bevonás miatt (7. táblázat).

KOPÁSI FOLYAMATÁBRA ELŐREJELZŐ MÓDSZEREK KIDOLGOZÁSÁVAL, ÖSSZEFOGLALÁS

A korábbi kopási folyamat eredményeképpen felmerül az igény, hogy ne legyen szükség kívánni a kisebb frekvenciájú jelleg-mezők megjelenését. Az öt alkotó rácsmezőt, a külső, belső gyűrű, kosár, gördülő elemek, tengelyütési frekvencia közül el kell hagyni azon elemeket, amely a kisebb frekvencia mezőn dolgoznak.

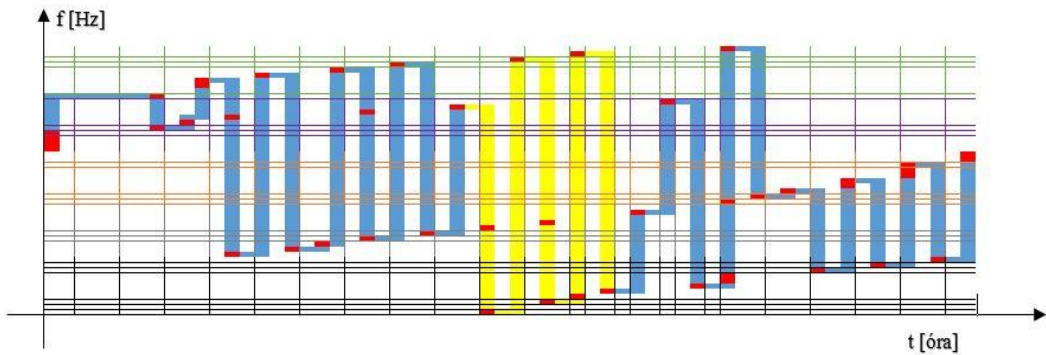
Végig haladva a kopási folyamaton a 9. ábra szerint, a kritikus mező szűkítése. Elképzelések:

- Haladási mezők áttekintése
- Leállási mezők felmérése
- Lépésszám-csökkentés
- Belépő mezők elemzése
- Mezőkihagyások és visszalépések



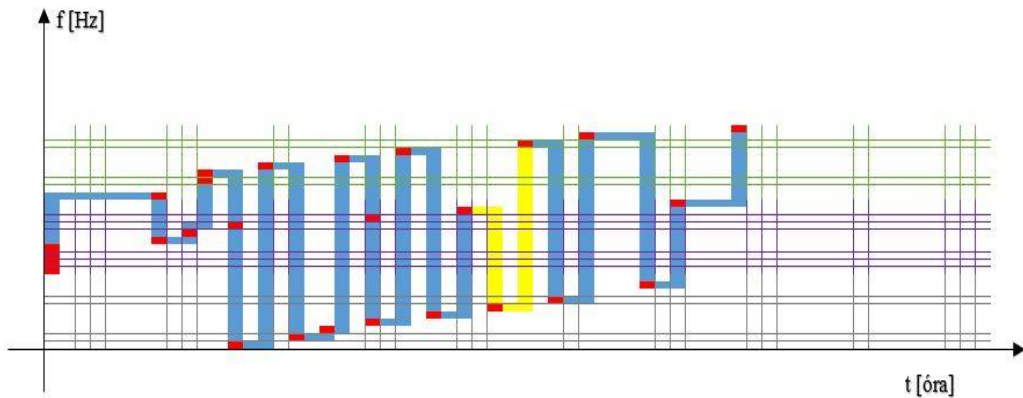
9. Ábra: Csapágy kopási folyamatábrája végső leállómezővel, kritikus stádium (sárgamező). (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

A 9. ábra haladási lépéseit le kell csökkenteni (a korábbi 8. ábra). Az első lépés a 10. ábra szerinti kosár frekvencia kihagyása, mert kisebb frekvenciatartományban mozog, illetve a roncsolódás jelenléte hatással lesz mindegyik alkotóelemre, ezért feltételezhető a fokozott kopás.



10. Ábra. Kosár frekvenciát kiejtő kopási algoritmus futási folyamatábrája. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

A 11. ábrán már nem szerepel a kosár frekvencia, az előre jelzési sáv kisebb lesz (sárgamező). Ekkor az algoritmus a sárgamező kezdő és végpontjára eső pirosmezőkre érvényes frekvencia értékekhez tartozó amplitúdóeloszlást vizsgálja. A kritikus szakasz elemzése során felmerül a további lehetőség arra, ha el kell kerülni a legkisebb tengelyütést is, akkor az erre eső legnagyobb frekvencia komponenst is meg kell előzni.



11. Ábra Tengelybeállítási és kosár frekvenciákat kiejtő kopási algoritmus futási folyamatábrája. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

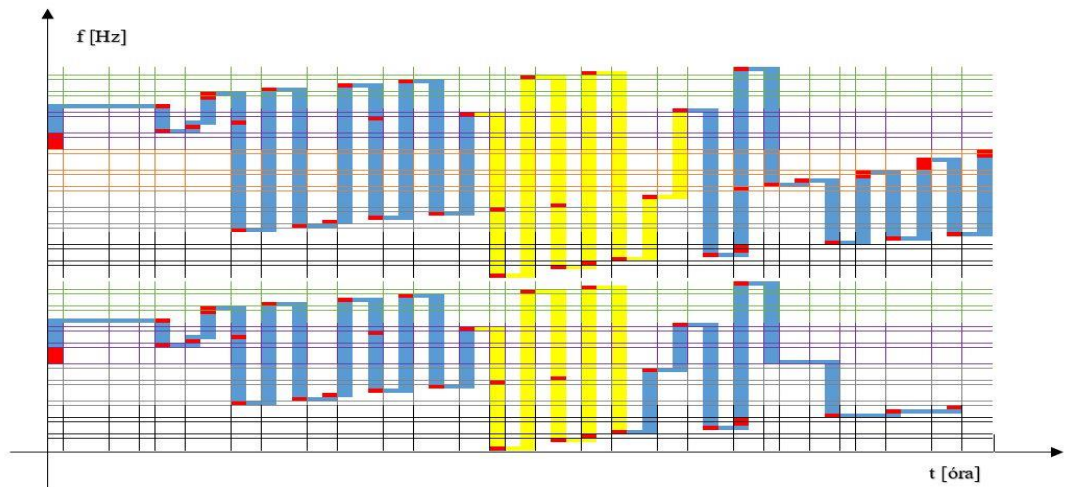
A 11. ábra szerinti algoritmus kezdőpontja a belső gyűrű a végső pontja a külső gyűrű frekvencia összetevője, közben áthalad a gördülő elemek lilamezőjén. Ebben az esetben a leállási sárgamező belső és külső gyűrű két frekvencia komponense között van úgy, hogy egy gördülő elem frekvencia rész esik a futási folyamatába, vagyis erre az esetre vizsgál amplitúdóeloszlást.

Algoritmus konklúziója

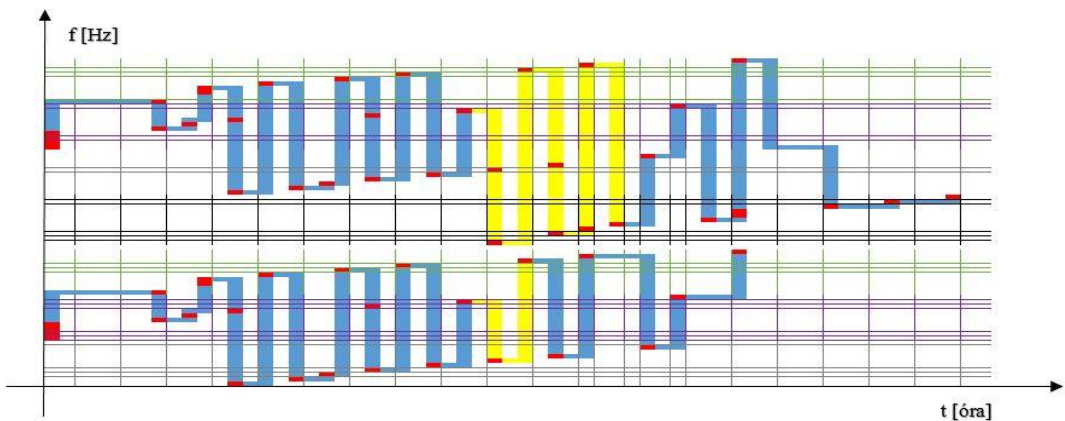
Az egyszerűsítés indoka lehet az a tény, hogy el kell dönteni az információ és zaj egymásra hatását. Ha kisebb jel teljesen eltérő frekvenciatartományban dolgozik, akkor ne fusson le úgy egy algoritmus, hogy végigelemez egy olyan részt, amelyben még több zaj van, mint hasznos információ. Itt beszélhetünk ellenőrzött tanulási folyamatról.

Kopási algoritmus egyszerűsítési életciklusa

A kopási folyamatára ellenőrzött tanulási folyamat alatt a 12-13. ábrák szemléltetik. Az ábrák célja megmutatni a korábbi fejezetben bemutatott egyszerűsítési folyamat lépéseit közvetlen kapcsolódó képekkel.



12. Ábrák: Csapágy kopási folyamatábrája egyszerűsítés módszerével. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).



13. Ábra: Csapágy kopási folyamatábrája egyszerűsítés módszerével, vizsgálati mezők csökkentésének folyamata. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

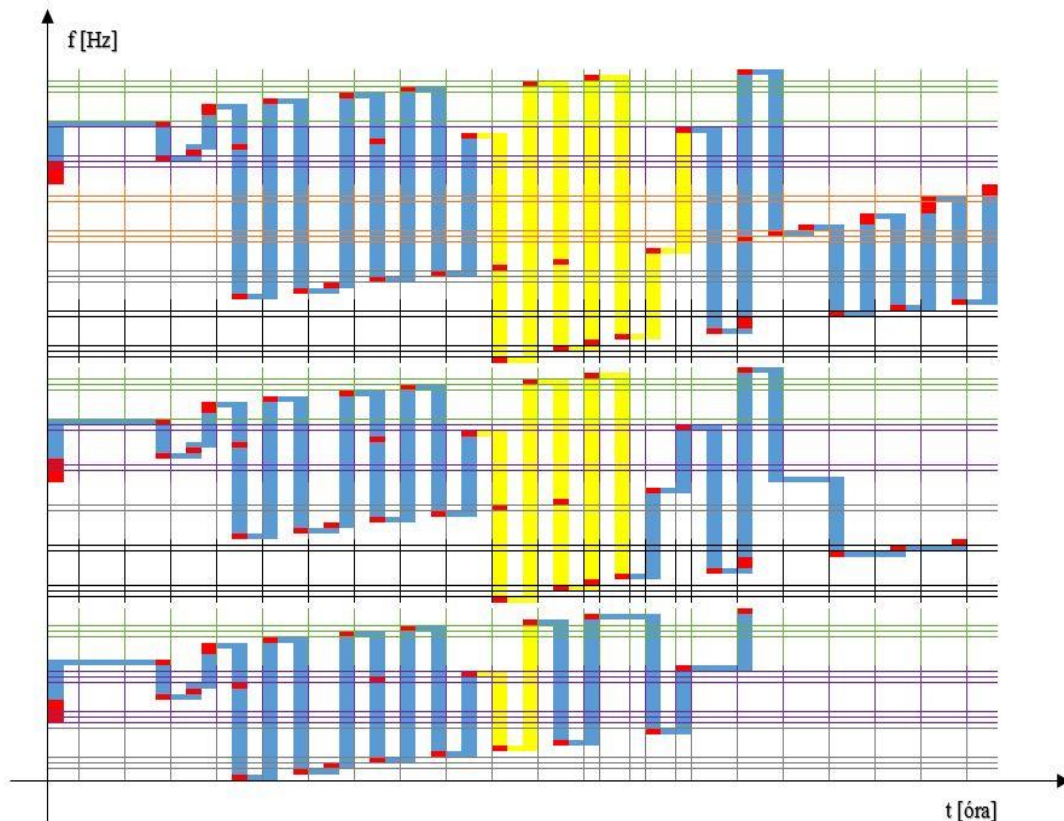
A 14. ábra az egyszerűsítő elemzésnek összesített folyamata, az futási folyamat ebben az esetben frekvencia komponenscsökkentésre összpontosít.

Tovább fejlesztési lehetőségek

- Csapágyfrekvencia mezők felcserélése, mezőáthaladási pontok csökkentése.
- Jelenleg frekvencia komponensek alapján rendez lépési sorrendet, ennek változtatása.
- A jellegmezők amplitúdóeloszlás alapján történő vizsgálata.

- Közeleső frekvencia kapcsolatok elemzése.
- Lehetséges-e hibafrekvencia kihagyás (pirosmező)?
- Milyen egyszerűsítési folyamat állíthatók elő?
- Visszalépések számának vizsgálata

A tengelyütési frekvencia mező nem feltétlen hagyható el. A villamos hajtás technológiai folyamata nagyrészt meghatározza ezt a kérdést és sok esetben a tengelybeállításra összpontosítanak. Elméletben vizsgálható így, mint korai előrejelzés, de a legnagyobb harmonikus esetén vizsgálni kell, hogy mikor lép be a jellegmezőre, erre szolgál 14. ábra összehasonlítása. A kialakított hibametria további felülvizsgálatra szorul.



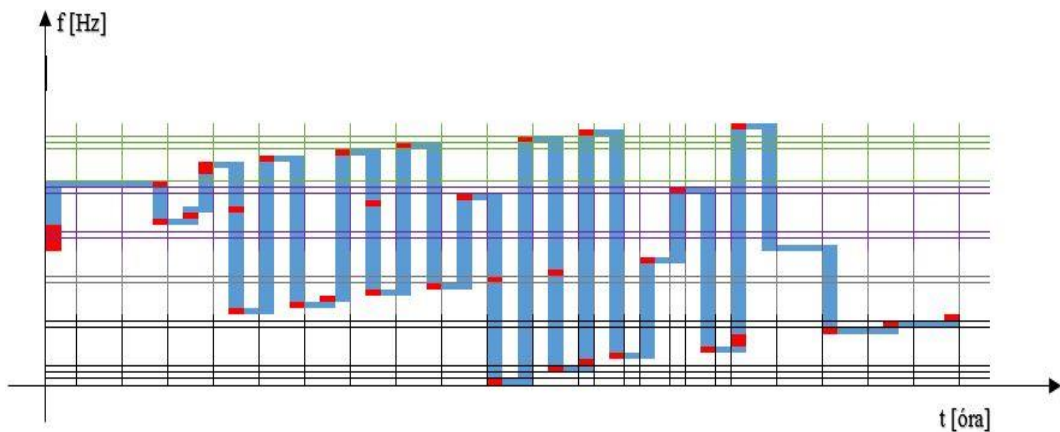
14. Ábra: Csapágy kopási folyamatábrája mindhárom egyszerűsítési jellegmezővel. A legfelső mind az öt jellegmezőt tartalmazza. A középső a kosár frekvenciát hanyagolja el, a legalsó pedig már a tengelyütési frekvenciát is. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

A kopási folyamat egysoros mélyhornyú golyós csapágyra készült. Vannak olyan gépek, ahol nagyobb terhelés miatt más típust alkalmaznak. Ebben az esetben a kopási folyamat frekvencia és amplitúdó eloszlással, harmonikusokkal felírja a kopási mezőket. Gyakran előfordul, hogy számos ismeretlen frekvencia komponens van jelen, ekkor zajelemzés is nagy hangsúlyt kap. A mérésekben van abszolút hiba is, a mérőrendszere, a frekvencia átvitelre is jellemző eltérések, erre külön hibamezők hozhatók létre, függően attól, hogy milyen eszközzel történik a mérés.

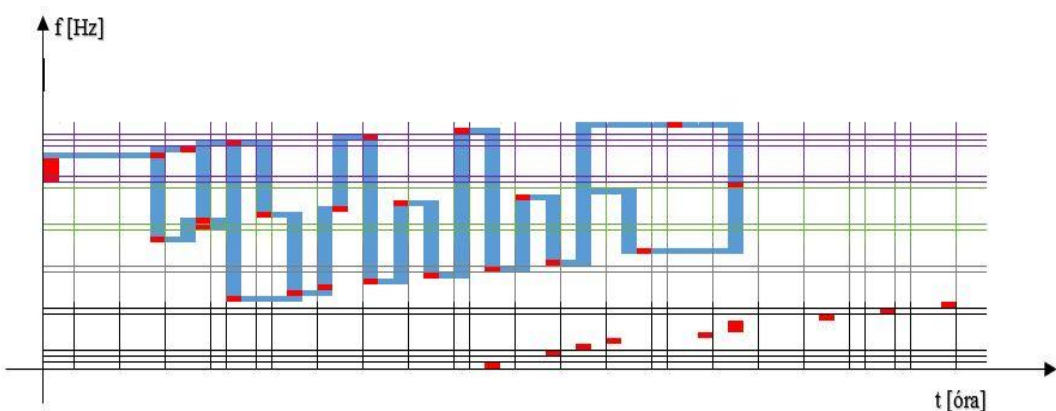
A bemutatott eredmények villamos forgógépekkel történt mérésekből származnak. Hibridhajtások esetén akkor használhatóak, ha villamos forgógép mechanikai összeköttetésben van (nem történik szétkapcsolás) a belsőégésű motorral, ekkor további elemzési lehetőségek lépnek életbe.

KOPÁSI ALGORITMUS VISSZACSATOLÁSI, ÚJRA ELEMZÉSI LEHETŐSÉGEK ÁTTEKINTÉSE

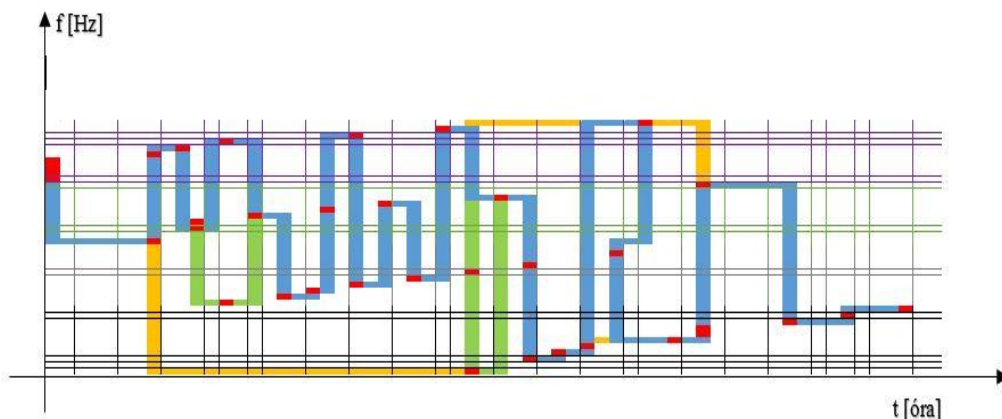
A kutatási eredmény összefoglalásaként nem nélkülözhető a visszacsatolási folyamat és az útvonal kiejtésének gondolata. A kékmező haladási vonala a normál életciklusnak felel meg, ezt a folyamatot meg kell ismerni a géprendszerben, viszont nem oldja meg az előre jelzés tanuló folyamatát, így nem lehet tanulásnak nevezni, ha mindig ugyanazon útvonalakon halad végig. Ennek eredményeképpen készültek a 15-18. ábrák, amik mutatják a mezőcserét és az útvonal felülvizsgálati lehetőségeket.



15. Ábra: Kopási algoritmus mezőfordítással. A belső (lilamező) és külső gyűrű (zöldmező) haladási irány felülvizsgálat szempontjából. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

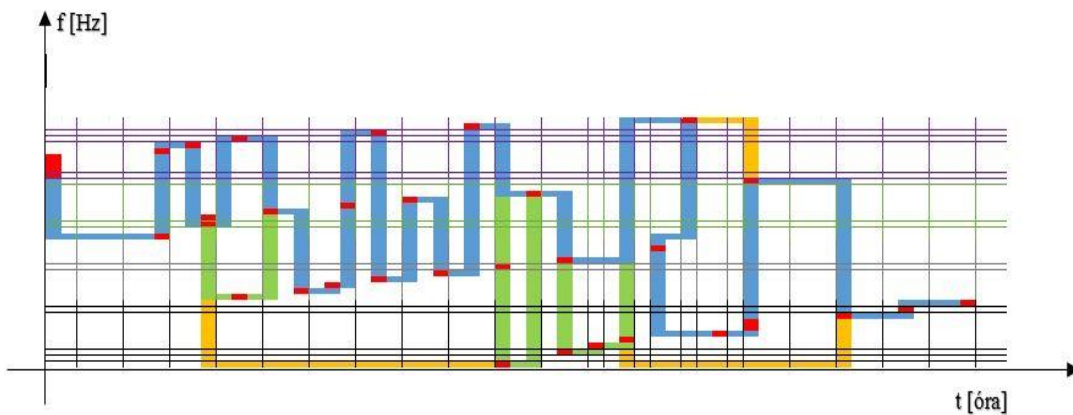


16. Ábra: Kopási algoritmus mezőfordítással és tengelyütemi frekvencia rész kihagyással. A belső (lilamező) és külső gyűrű (zöldmező) haladási irány felülvizsgálat szempontjából. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).



17. Ábra: Kopási algoritmus visszacsatolási útvonalakkal (narancssárga mezők) és kihagyási útvonalakkal (zöldmező). (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

A gépcsoport futtatási periódusa attól függ, hogy milyen üzemtípusra tervezik a gépet (pl.: folyamatos, szakaszos, szakaszos fékezés, forgásirányváltás, indítási tranziensek gyakorisága). Lehet végezni gyorsított öregítési módszereket (felmelegítés) vagy mesterséges sérülés okozása a csapágnak, tengelynek. A gyorsítási módszerek akkor használhatók eredményesen, ha számolnak azzal a tényezővel, hogy milyen járulékos hatást eredményez (pl.: kenőanyag-eltétel).



18. Ábra: Kopási algoritmus visszacsatolási útvonalakkal (narancssárga mezők) és kihagyási útvonalakkal (zöldmező), optimumkeresési folyamattal. (Jelölések: f : motor állórész áramfrekvencia [Hz]; t idő [óra]), (szerzői ábra).

A 15. ábra egy olyan esetet mutat, amikor a külső és belső gyűrű jellegmezője fel van cserélve. A lila lés a zöldmező, tehát a belső gyűrű rácsvonala került a felső tartományba lépés korrigálás céljából. Ez még önmagában egy lehetőség, a következőben meg kell változtatni az útvonalat is. A narancssárga és zöldmezők jelzik a módosításokat. A zöldmező lehet lépéskihagyás esete, a narancssárga mező pedig visszatérő útvonal, feltéve, ha a zöldmezőn keresztül történik a visszalépés. A lépés kihagyás nem feltétlen azt jelenti, hogy egy-

általán nem fut rajta a tanuló algoritmus, hanem azt, hogy ha keresi a következő hiba összetevőt, akkor frekvencia prioritás szerint nem ugrál harmonikus rendszám szerint sorba, hanem lép a következő kritikus pontra. Ennek első változatait mutatja 15. ábra. A 16. ábra arra a változatra világít rá, amikor a folyamat elkezdi felmérni a tengelybeállítási frekvencia összetevők jelenlétét. A külső gyűrű első harmonikusából (zöldmező) a belső gyűrű (lila-mező) első harmonikusán keresztül az elemző ciklusba. Ez egy rész folyamat, megnyitja a tengelybeállítási folyamat elemzését és lezárja a csapágy külső és belső gyűrű elemzését. Nem a teljes algoritmus áll meg, hanem részfolyamatot vizsgál. A 17. ábra már egy olyan rész, ahol ellenőrizni kell, a létrehozott kopási folyamatot, erre szolgál visszatérő narancs-sárga rész. A 18. ábra a tengelybeállítási frekvenciamezőből visszatérő algoritmus. Erre azért van szükség, mert a folyamatára segítségével fel lehessen mérni, hogy melyik frekvencia összetevő kell újra vizsgálni.

Modellek jelenlegi hiányosságai

- A kopási folyamat ábra visszalépési szabályait pontosítani kell
- A harmonikus prioritás nem oldja meg feltétlen a kopási folyamatelemzést, mert az alaktató elemek különböző frekvenciasávokban jelennek meg. Így ha alapvetően eltérő a frekvenciatartomány, akkor növelni kell a vizsgálati szakaszt, vagyis több mezőt kell létrehozni.
- A kopási folyamatlépés kihagyási mezőit ki kell dolgozni és ellenőrizni, mérési és számítási eredményekkel alátámasztva.
- Csapágy elhasználódás mértékére utaló útvonalak kidolgozása.
- Mezőcsere lehetőségek további elemzése szükséges.

A további célok közé tartozik, hogy az amplitúdó, frekvencia, harmonikus rendszám és alkatrész komponens alapján az amplitúdóváltozás milyen mértékben módosítja a kopási folyamat végig haladási változatait és visszacsatolásait.

ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatás első fázis eredménye, hogy spektrumképzések nem feltétlenül oldják meg az áramspektrum alapján a kopások korai felismerését. Ennek az az oka, hogy számos frekvenciák (modulációk) hatnak egymásra. A jellegmezős ábrázolás célja egy térképszerű megközelítés, ami hatékony szemléltetést és lépésszabály felállítását elősegíti. A különböző színskálák a követhetőséget segítik elő, illetve felhasználhatók a kopási útvonalak átmenetének bemutatásához. A jelenlegi állás még kezdeti stádiumnak tekinthető olyan szempontból, hogy az idő, mint kritikus tényező, hogyan definiálható a kopási folyamat során. Üzemidő, hőmérséklet, kenés, páratartalom és más külső beavatkozások hozzájárulnak a gép életciklusának formálódásához.

A kopási térkép arra szolgál, hogy megmutatja frekvencia, harmonikus, alkotóelem szerinti folyamat lezajlását (feltételezett jellegviselkedését) és egymásra hatásukat. A lépések kigondolása ilyen mezőkön jól követhető és különböző útvonalak dolgozhatók ki, amelyek előre jelzési folyamatot előkészítik és segítik. A mérési alapú kutatások jelenleg abban a fázisban vannak, hogy a kopási mezők nagy és kis frekvenciás tartományaira külön-külön vizsgáló szabály szükséges.

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] Bendiák István, *Forgógépek diagnosztikai eljárásai és alkalmazási lehetőségek felmérése*, Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest, Felelős kiadó: Prof. Dr. Kovács Levente Adalbert az Óbudai Egyetem rektora, 2020, ISBN 978-963-449-204-7
- [3] Bendiák István, *Aszinkron motorok mechanikai jellemzőinek vizsgálata áram jelalak-analízis módszerével*, Diplomamunka, Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, 2020, Budapest
- [4] B. Noureddine, P. Remus, R. Raphael and S. Salim, "Rolling Bearing Failure Detection in Induction Motors using Stator Current, Vibration and Stray Flux Analysis Techniques," IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, 2020, pp. 1088-1095, doi: 10.1109/IECON43393.2020.9254401.
- [5] S. R. Kapoor, N. Khandelwal and P. Pareek, "Bearing fault analysis by signal energy calculation based signal processing technique in Squirrel Cage Induction Motor," 2014 International Conference on Signal Propagation and Computer Technology (ICSPCT 2014), Ajmer, India, 2014, pp. 33-38, doi: 10.1109/ICSPCT.2014.6884922.
- [6] J. Xinjie, H. Malik and S. K. Panda, "An Optimized Intelligent Technique for Bearing Fault Diagnosis using Motor Current Signal Analysis," 2022 International Power Electronics Conference (IPEC-Himeji 2022- ECCE Asia), Himeji, Japan, 2022, pp. 730-735, doi: 10.23919/IPEC-Himeji2022-ECCE53331.2022.9807128.
- [7] M. S. Moiz et al., "Health Monitoring of Three-Phase Induction Motor Using Current and Vibration Signature Analysis," 2019 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI), Rawalpindi, Pakistan, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICRAI47710.2019.8967356.
- [8] J. Jung et al., "Monitoring of journal bearing faults based on motor current signature analysis for induction motors," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 300-307, doi: 10.1109/ECCE.2015.7309702.
- [9] W. Zhou, T. G. Habetler, R. G. Harley and B. Lu, "Incipient Bearing Fault Detection via Stator Current Noise Cancellation using Wiener Filter," 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Cracow, Poland, 2007, pp. 11-16, doi: 10.1109/DEMPED.2007.4393064.
- [10] R. Pusca, R. Romary, N. Bessous and S. Sbaa, "Comparative Study between Two Diagnostic Techniques Dedicated to the Mechanical Fault Detection in Induction Motors," 2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICEE49691.2020.9249884.
- [11] J. Jung et al., "Monitoring Journal-Bearing Faults: Making Use of Motor Current Signature Analysis for Induction Motors," in *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 23, no. 4, pp. 12-21, July-Aug. 2017, doi: 10.1109/MIAS.2016.2600725.
- [12] P. Pareek, N. Khandelwal and S. R. Kapoor, "A new approach for bearing fault analysis in Squirrel Cage Induction Motor," 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853090.

- [13] G. Avalos, S. Aguayo, J. Rangel-Magdaleno and M. R. A. Paternina, "Bearing fault detection in induction motors using digital Taylor-Fourier transform," 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, Spain, 2022, pp. 1830-1835, doi: 10.1109/ICEM51905.2022.9910779.
- [14] N. Bessous, S. E. Zouzou and A. Chemsá, "A new analytical model dedicated to diagnose the rolling bearing damage in induction motors - simulation and experimental investigation -," 2016 4th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT), Hammamet, Tunisia, 2016, pp. 1-9, doi: 10.1109/CEIT.2016.7929085.
- [15] E. Elbouchikhi, V. Choqueuse, F. Auger and M. E. H. Benbouzid, "Motor Current Signal Analysis Based on a Matched Subspace Detector," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 66, no. 12, pp. 3260-3270, Dec. 2017, doi: 10.1109/TIM.2017.2749858.
- [16] N. Khandelwal, P. Pareek and S. R. Kapoor, "Start-up transient current analysis for Squirrel Cage Induction Motor," 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853261.
- [17] A. Soualhi, G. Clerc and H. Razik, "Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor Using an Improved Artificial Ant Clustering Technique," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 9, pp. 4053-4062, Sept. 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2230598.
- [18] Yong Li and Tengxi Wang, "Signal segmentation for isolating the influence of PQ variation and machine manufacturing imperfections on bearing fault detection," 2013 International Electric Machines & Drives Conference, Chicago, IL, USA, 2013, pp. 734-741, doi: 10.1109/IEMDC.2013.6556175.
- [19] A. Husna, K. Indriawati and B. L. Widjiantoro, "Discriminant Feature Extraction of Motor Current Signal Analysis and Vibration For Centrifugal Pump Fault Detection," 2021 International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA), Bandung, Indonesia, 2021, pp. 207-212, doi: 10.1109/ICA52848.2021.9625679.
- [20] E. T. Esfahani, S. Wang and V. Sundararajan, "Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in Induction Motors," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 19, no. 3, pp. 818-826, June 2014, doi: 10.1109/TMECH.2013.2260865.
- [21] B. Raison, G. Rostaing, O. Butscher and C. . -S. Maroni, "Investigations of algorithms for bearing fault detection in induction drives," IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02, Seville, Spain, 2002, pp. 1696-1701 vol.2, doi: 10.1109/IECON.2002.1185536.
- [22] Y. Tian, D. Guo, K. Zhang, L. Jia, H. Qiao and H. Tang, "A Review of Fault Diagnosis for Traction Induction Motor," 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), Wuhan, China, 2018, pp. 5763-5768, doi: 10.23919/ChiCC.2018.8484044.
- [23] S. Zhao et al., "The Inter-turns Short Circuit Fault Detection based on External Leakage Flux Sensing and VMD-HHT Analytical Method for DFIG," 2021 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD), Nanjing, China, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSMD53520.2021.9670783.