

# Aszinkron motorok mechanikai eredetű hibáinak vizsgálata tranziens üzemállapotban

**Bendiák István**

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Automatizálási és Energiarendszerek Intézet, Automatika Tanszék, [bendiak.istvan@uni-obuda.hu](mailto:bendiak.istvan@uni-obuda.hu)

---

A dolgozat célterülete aszinkron motorok tranziens üzemállapotának vizsgálata villamos jelanalízis módszerével. Az állandósult állapotra vonatkozó mérések mellett kiemelkedő szerepet a jelfeldolgozásban a forgógépek indítási körülményeinek megismerése. A gépek üzeme alatt megjelenő terhelés ledobás és felvétel ugrásszerű nyomatéklökéseket okoz, ami egy olyan elektromechanikai rendszerben van, amely számos kisfrekvenciájú lengést idéz elő. A pályamunka célkitűzése ezeknek a tranziens jeleknek a vizsgálata, hatása a gép életciklusára: A tudományos publikációk elemzése mellett saját eredménnyel megismerni és bemutatni a fellépő hibajeleket.

---

## 1. Bevezető

A villamos forgógép diagnosztikában a beszélhetünk statikus és tranziens üzemállapotokról. A mindkét üzemtípusnak eltérő követelményei vannak. A gépekről alkotott életciklus-modell létrehozásához szükség van a tranziens viselkedés minél alaposabb ismeretére. A pályamunka elsősorban elektromechanikai követelményekre épülő méréseket mutat be a mechanikai határterületek becsatolásával [1-40].

## 2. Villamos forgógépek üzemeltetésének mechanikai jellemzői

A következő fejezetben a villamos forgógépek mechanikai követelményét rendszerezem (teljesség igénye nélkül, fókusz pontokat kiemelve). A tranziens üzemviszonyok méréselőkészítése alatt felmerül a kérdés azon mechanikai követelményekkel kapcsolatban, amelyek a gép túlterhelés, terhelésváltozási tűrőképességét meghatározzák.

A tengelyek terhelés hatására deformálódnak, pontjaik elmozdulnak. Az elmozdulások következtében a csapágyakban, a kapcsolódó fogaskerekek között, a terheléseloszlás egyenlőtlené válik, terheléscsúcsok alakulnak ki, ami az elemek gyorsított kifáradását eredményezi. A tengely és a csatlakozó alkatrészek védelme érdekében az alakváltozást korlátozni kell (példa: 2.1. táblázat).

Csapágy típusa	Ömeg [rad]	Ömeg [fok]
----------------	------------	------------

Egysoros mélyhornyú golyóscsapágy	0,0025	0,1432
Kúpörgős csapágy	0,0016	0,0917
Önbeálló csapágy	0,05	2,8647
Hengergörgős csapágy	0,0006	0,0344

2.1. táblázat Néhány érték csapágyakra megengedhető elmozdulás tekintetében [2].

## 2.1. Tengelykapcsolók fizikai szempontjai

A gépek üzemét külső vagy belső okokra visszavezethető lökések, dinamikus hatások jellemzik, melyeket csökkenteni, mérsékelni szükséges [2-3], különösen indítás és terhelésváltozás esetén.

A dinamikus hatásokat csökkentve védjük a gépet hajtó háromfázisú aszinkron motorokat. Fordított a feladat, amikor egy belsőégésű motor járásából adódó dinamikus hatásokat tompítják a hajtott egység védelme, kedvezőbb üzeme szempontjából (hibridhajtású járművek). Leggyakrabban a hajtott gép feladatából, a technológiából adódik a jelentős dinamikus hatás és ennek csökkentése a feladat. A lökésszerű terhelésingadozásokat rugalmas kapcsolók vagy rugalmas hajtások alkalmazásával lehet csillapítani. A villamos hajtások esetén a frekvenciaváltók korszaka előtt gyakori volt, hogy a hálózati frekvenciaingadozása miatt lendkereket alkalmaztak, ez inkább szinkron gépekre volt érvényes, de minden forgó mozgást végző rendszernél hasznos.

Ha röviden össze akarjuk foglalni egy lengő rendszer fogalmát, akkor következők szerint járunk el: A valóságos rugót két tényező, a rugómerevség és a csillapítási tényező jellemez. Legyen a rugómerevség  $s$ , a csillapítási tényező  $\delta$ . A rugómerevség a kitérő erő, illetve nyomaték és kitérés, illetve szögelfordulás hányadosaként lehet definiálni. A rugómerevség lehet állandó (lineáris rugóknál) és a terhelés függvényében változó (regresszív illetve progresszív rugók esetén). A számítások egyszerűsítése érdekében a nem lineáris karakterisztikájú rugóknál a közepes rugómerevséggel kell számolni [2-3].

A csillapítási tényező:

$$\delta = \frac{F}{\dot{f}} = \frac{M}{\dot{\varphi}} = \operatorname{tg}\beta$$

Az  $F$  kitérő erővel vagy  $M$  nyomatékkal egyenesen, az  $f$  kitérés, illetve a  $\varphi$  szögelfordulás sebességével pedig fordítva arányos. A gyakorlati számításokban a csillapítási tényezőt állandónak lehet tekinteni (bizonyos esetekben).

A valóságos rugó párhuzamosan kapcsolt s rugómerevségű ideális rugóval és  $\delta$  csillapítási tényezőjű viszkózus elemmel helyettesíthető. Így a rugalmasan összekapcsolt erő és munkagép, amely egy kéttömegű lengőrendszert alkot [2-3].

A mozgás differenciálegyenletei:

$$\theta_1 \frac{d^2\varphi_1}{dt^2} + \delta \frac{d\varphi}{dt} + s\varphi = M(t)$$

És:

$$\theta_2 \frac{d^2\varphi_2}{dt^2} - \frac{d\varphi}{dt} - s\varphi = 0$$

Ahol  $\varphi_1$  a hajtóoldal, a  $\varphi_2$  a hajtott oldal,  $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ , a tengelykapcsoló szögelfordulása.

Az első egyenlettel  $\theta_1$ -gyel a másodikat  $\theta_2$ -vel osztva, majd összevonva:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \left(\frac{\varphi}{\theta_1} + \frac{\varphi}{\theta_2}\right) \frac{d\varphi}{dt} + \left(\frac{s}{\theta_1} + \frac{s}{\theta_2}\right) \varphi = \frac{M(t)}{\theta_1}$$

Lineáris inhomogén differenciálegyenletet kapunk:

Legyen bevezetve:

$$\frac{1}{2} \left( \frac{\varphi}{\theta_1} + \frac{\varphi}{\theta_2} \right) = K$$

$$\frac{s}{\theta_1} + \frac{s}{\theta_2} = \omega_0^2$$

$$\frac{M}{\theta_1} = m_0$$

A gerjesztő nyomaték legyen:

$$M(t) = M_0 \cdot \cos\omega t$$

Ezeket behelyettesítve:

$$\ddot{\varphi} + 2K\dot{\varphi} + \omega_0^2 \cdot \varphi = m_0 \cdot \cos\omega t$$

A differenciálegyenlet általános megoldását úgy érhetjük el, hogy a homogén egyenlet általános megoldásához hozzáadjuk az inhomogén egyenlet partikuláris megoldását. A számítás egyszerűsítése érdekében a jobb oldalt  $m_0 \cdot \sin\omega t$  hozzáadásával  $m_0 e^{i\omega t}$ -tel egészítjük ki, és ennek megfelelően  $\varphi$ -t komplex számnak tekintjük. A megoldásban természetesen  $\varphi$ -nek csak a valós részét vesszük figyelembe, így:

$$\ddot{\varphi} + 2K\dot{\varphi} + \omega_0^2 \cdot \varphi = m_0 \cdot e^{i\omega t}$$

Az egyenlet megoldását:

$$\varphi = A \cdot e^{i(\omega t - \gamma)}$$

Alakban lehet keresni:

A kifejezés deriválásával és helyettesítésével az:

$$A \cdot (-\omega^2 + 2 \cdot K \cdot i \cdot \omega + \omega_0^2) \cdot e^{i(\omega t - \gamma)} = m_0 \cdot e^{i\omega t}$$

Összefüggést lehet nyerni: Ezt átrendezve és a jobboldalt kifejtve:

$$A \cdot (\omega_0^2 - \omega^2 + 2 \cdot K \cdot i \cdot \omega) = m_0 \cdot e^{i\gamma} = m_0 \cdot (\cos\gamma + i \cdot \sin\gamma)$$

A két komplex szám abszolút értékének egyenlőségéből:

$$m_0 = A \cdot \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot K^2 \cdot \omega^2}$$

Az iránytangensek egyenlőségéből pedig a fáziskésés tangense:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{2 \cdot K \cdot \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Az alapegyenlet partikuláris megoldásának valós része:

$$\varphi = A \cdot \cos(\omega t - \gamma)$$

A homogén egyenlet általános megoldás:

$$\varphi = a \cdot e^{-Kt} \cdot \sin\left(\sqrt{\omega_0^2 - K^2} \cdot t + \alpha\right)$$

Az  $a$  és  $\alpha$  állandók a kezdeti feltételekből határozhatók meg. Az inhomogén egyenlet általános megoldása:

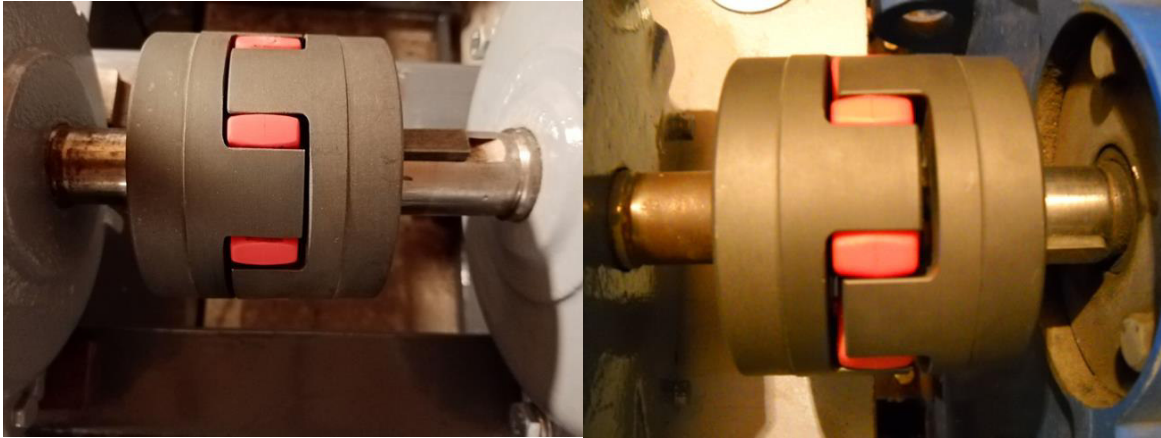
$$\varphi = \frac{m_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4 \cdot K^2 \cdot \omega^2}} \cdot \cos\left(\omega t - \operatorname{arctg} \frac{2 \cdot K \cdot \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right) + a \cdot e^{-Kt} \cdot \sin\left(\sqrt{\omega_0^2 - K^2} \cdot t + \alpha\right)$$

A rugalmas tengelykapcsoló lengése egy  $\omega$  körfrekvenciájú csillapítatlan és egy:

$$\sqrt{\omega^2 - K^2}$$

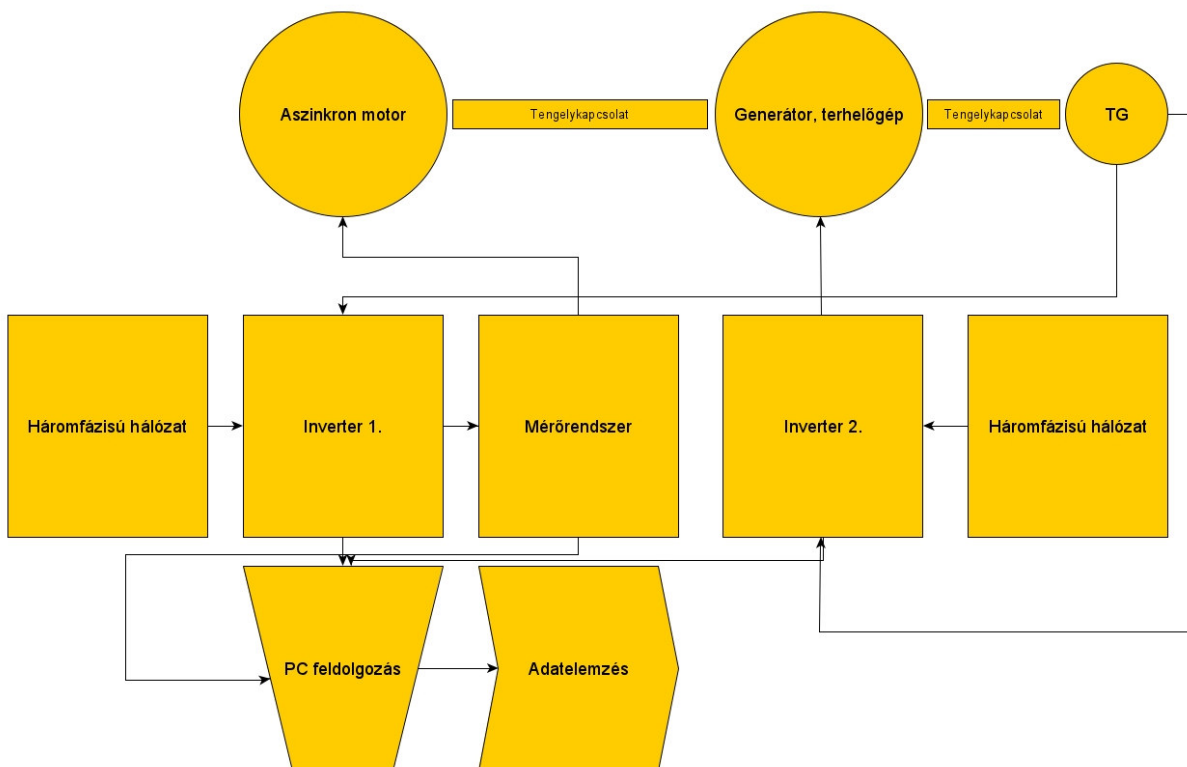
Körfrekvenciájú csillapított rezgésből tevődik össze. Ha  $\omega \leq K$ , akkor a csillapított rezgés aperiodikus és bizonyos idő múlva elhanyagolható, de az indítást követő rövid időtartam alatt lényegesen befolyásolja a tengelykapcsoló lengéseit. A korábbi összefüggések alapján belátható, hogy a csillapítás intenzitása a választott rugó paramétereitől ( $s$  és  $\delta$ ) függ, valamint a kapcsoló tehetetlenségi nyomatékától is.

A csillapítás megszűnése után az egyenlet jobb oldalának első tagja írja le a mozgást, amely a gerjesztő nyomaték ( $M$ ) körfrekvenciájának ( $\omega$ ) megfelelő csillapítatlan kényszerrezgés. Ennek a rezgésnek amplitúdója ( $A$ ) és fáziskésése ( $\gamma$ ) a gerjesztő nyomaték frekvenciájától és a rugó paramétereitől függ. Az amplitúdó az  $\omega = \omega_0$ -ig növekszik, majd csökken, vagyis maximumát akkor éri el, amikor a gerjesztő frekvencia  $\omega$  az  $\omega_0$  saját frekvencia közelébe esik. Ekkor amennyiben a rendszer csillapítókéességét jellemző  $K$  érték kicsi, bekövetkezhet a rezonancia jelensége.



2.1. ábra. A rezonancia a gyakorlatban, meglazult körmös tengelykapcsolat (motor-generátor gépcsoport).

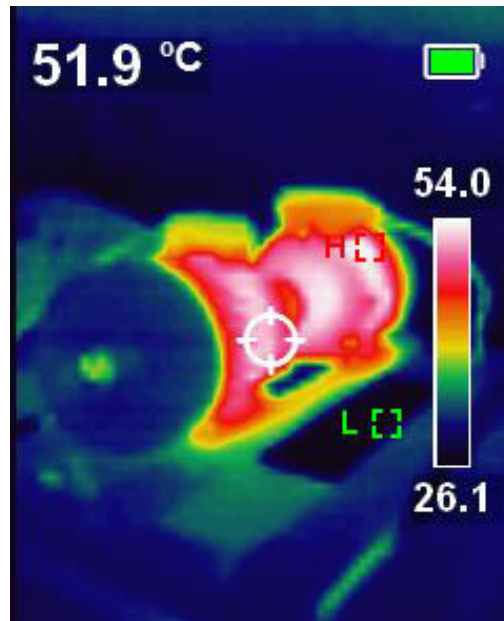
A mechanikai tulajdonsággal szoros összefüggésben van a termikus és az indításokból származó változó hézag kialakulása, amely a 2.1. ábrán látható. A gépcsoport indításakor jelentős oszcillációra lehet számítani.



2.2. ábra Egyszerűsített mérési elrendezés blokkvázlat.

A mérőrendszer NI (National Instruments) feszültség és árammérő kártyák segítségével mérték a motor jellemző adatait.

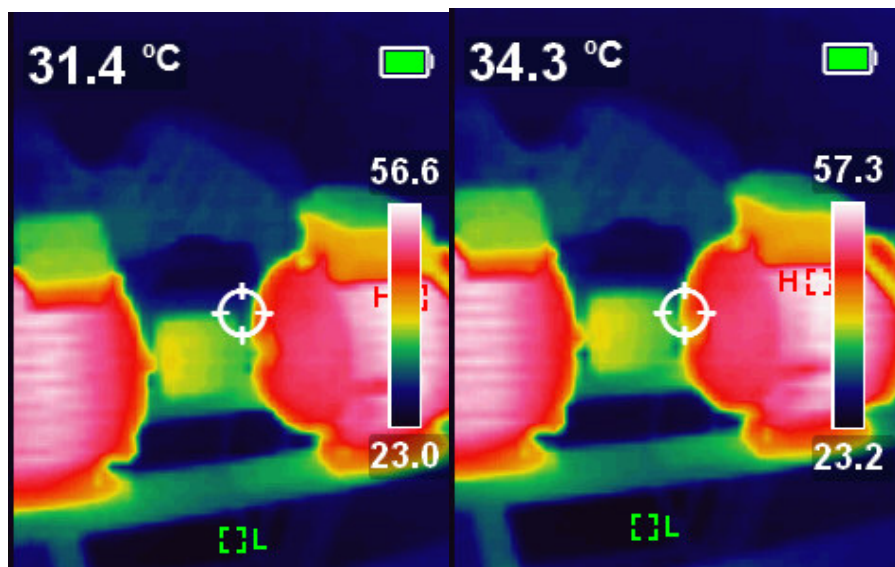
A 2.3. ábra szemléltet egy hőkamerával vizsgált gépkapcsolatot, ahol körmos tengelykapcsolók biztosítják a mechanikai összekötést.



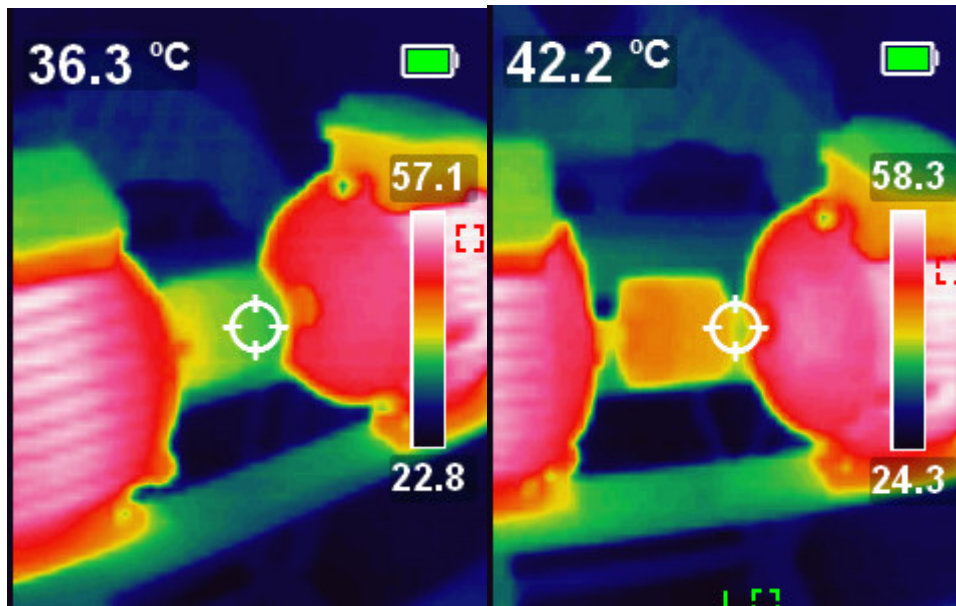
2.3. ábra Aszinkron motor-generátor gépcsoport, melegedésmérés alatti hibaelemzés, hőkamerás felvétellel.

A pályamunka készítése alatt kontrolmérésre mindig felhasználásra kerül a termográfiai felvételek, amelyeken jól végig követhető a motor és tengelykapcsoló aszimmetrikus melegedése.

A hőkamerás felvételeken jól látható a kamera követi leghidegebb és legmelegebb pontokat. Kezdeti szakaszban a motorházra fókuszál, majd a terhelési állapot előre haladtával csapágyfészek irányába (2.4-5. ábrák).



2.4. ábra Aszinkron motor tengelykapcsolójának aszimmetrikus melegedés folyamata.

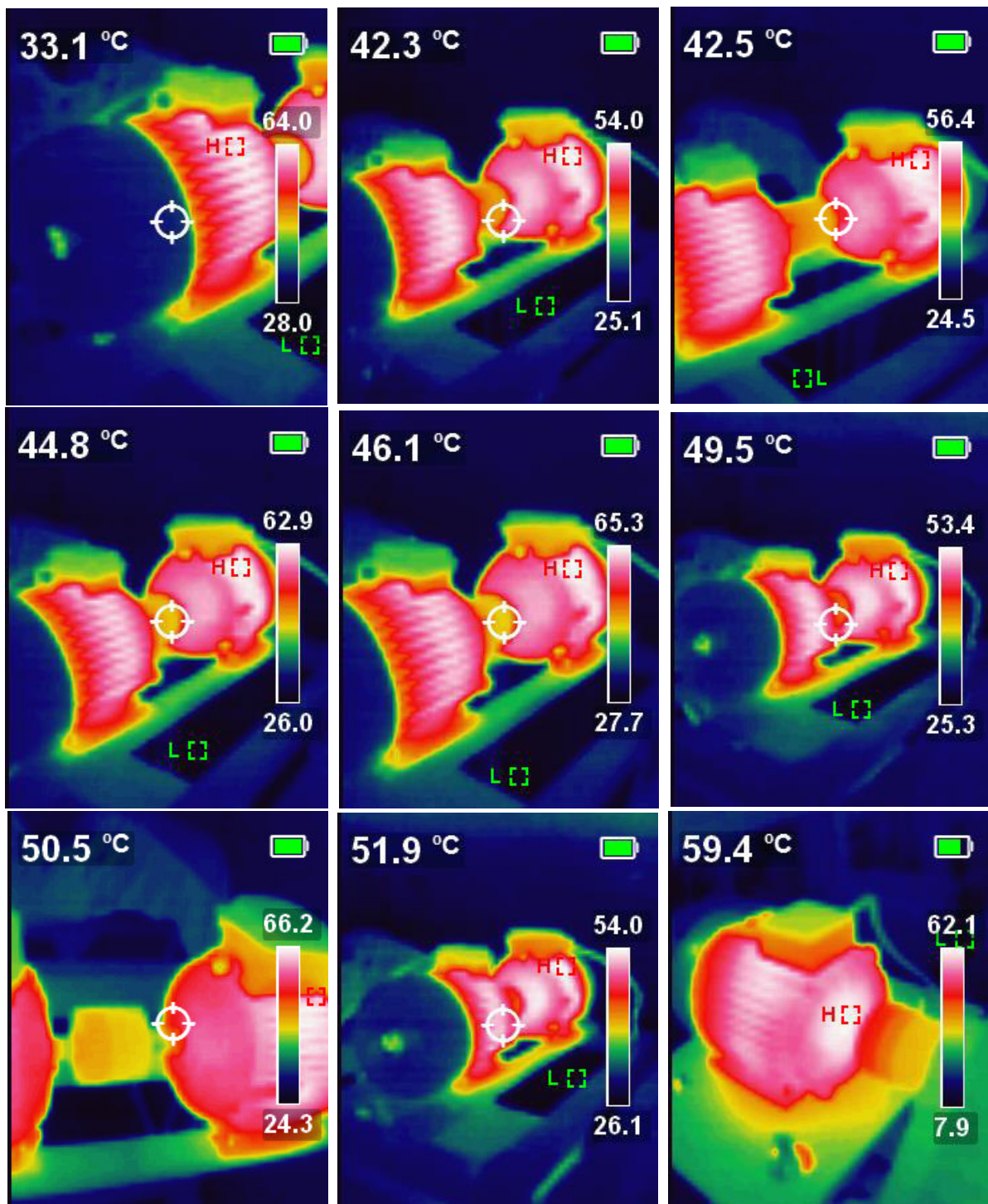


2.5. ábra Aszinkron motor tengelykapcsolójának aszimmetrikus melegedés folyamata.

A motoron körmös tengelykapcsoló van és betétkopás, hőmérsékletváltozás, tengelybeállítási hiba jelentkezik. Ez a folyamat a gyártási tesztelésekkel összhangban gyakoribb méréseket követel meg.

A 2.5-6. ábrák már állandósult (részben termikus viszony tekintetében) üzemi állapotot mutatnak, ahol kamera már a csapágy külső gyűrűre összpontosít, azt érzékeli legmelegebb pontnak.

A hiba eredetét nem egyszerű megállapítani, mert nem jelenhető még egyértelmű, hogy a rossz tengelybeállítás okozza a jelenséget, a gépek nem melegednek szimmetrikusan, állórész-



forgórész eltérő veszteségi mérlege miatt.

2.6. ábrák Aszinkron motor tengelykapcsolójának aszimmetrikus melegedés folyamata, végigmutatva a melegedsmérés során keletkező veszteségi hőt.



A vizsgálat eredménye hasznos és szükséges, de nem elégséges feltétele a hibaterület szűkítésének. A forgógép diagnosztika ma már nélkülözhetetlen eleme villamos jelanalízisen történő mérés és számítás. A hőkamrás felvétel hasznos megoldás, de az iparban vannak olyan gépek, amelyek nehéz hozzáférhetőség miatt nem használható.

### 3. Aszinkron gép tranziens viselkedésének előkészítése, a komplex spektrum

A matematikából ismeretes, hogy a periodikus függvényekre értelmezett Fourier sorba-fejtés általánosítható nem periodikus függvények egy típusára is. A Fourier-transzformáció egy  $f(t)$  függvényhez egy  $F(j\omega)$  függvényt, az  $f(t)$  függvény komplex spektrumát rendeli, ahol [23]:

$$F(j\omega) = \mathcal{L}f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

Az  $F(j\omega)$  spektrum ismeretében az eredeti függvény az inverz Fourier-transzformáció segítségével állítható elő:

$$f(t) = \mathcal{L}^{-1}F(j\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega$$

Ez úgy fogható fel, hogy az  $f(t)$  függvényt  $\omega$  körfrekvenciájú szinuszos rezgések szuperpozíciójaként állítjuk elő.

Az  $\omega$ ,  $\omega+d\omega$  körfrekvenciasávba eső összetevő:

$$df(t) = \frac{1}{2\pi} F(j\omega)d\omega e^{j\omega t}$$

A fenti összefüggések gyakorlatilag biztosan alkalmazhatók, ha  $f(t)$  abszolút integrálható, vagyis ha:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty$$

Fontos általánosítást jelent, ha  $f(t)$  periodikus összetevőt is tartalmaz. Legyen:

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t)$$

Ahol  $f_1(t)$  abszolút integrálható, míg  $f_2(t)$  Fourier-sorba fejthető  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  alaphérfrekvenciával:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f_1(t)| dt < \infty$$

$$f_2(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\omega_0 t}$$

Ekkor az  $f(t)$  függvény spektruma:

$$F(j\omega) = F_1(j\omega) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2\pi C_k \delta(\omega - k\omega_0)$$

Ahol  $F_1(j\omega)$  az alapján számítható. Ez a spektrum alapján valóban előállítja a keresett függvényt, hiszen a Dirac-impulzusra vonatkozó reláció felhasználásával [23]:

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_1(j\omega) e^{j\omega t} d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} 2\pi C_k \delta(\omega - k\omega_0) e^{j\omega t} d\omega \\ &= f_1(t) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{jk\omega_0 t} \end{aligned}$$

Vagyis visszakaptuk az eredeti függvényt.

### 3.2. Az energiaspektrum

Az energiaspektrum: **Valamely  $f(t)$  jel  $E$  energiátartalmán négyzetének integrálját értjük:**

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt$$

Az elnevezés magyarázatához tételezzük fel, hogy  $i(t)$ , ill.  $u(t)$  valamely  $R$  ellenállás áramának, ill. feszültségének időfüggvényét jelenti. Az ellenálláson hővé váló energia a teljes folyamat során nyilván [23]:

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} Ri^2(t) dt = R \int_{-\infty}^{\infty} i^2(t) dt = RE$$

$$W = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{R} u^2(t) dt = \frac{1}{R} \int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) dt = \frac{1}{R} E_u$$

Az átalakuló energia tehát arányos az áram ill. a feszültség fent értelmezett energiátartalmával.

Amikor  $f(t)$  abszolút integrálható [23].

Ekkor energiátartalma alapján kifejezhető az alábbi alakban:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \right] dt$$

Az integrálok sorrendjét felcserélve:

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{j\omega t} dt \right] d\omega$$

A belső integrál csak abban különbözik a  $F(j\omega)$ -tól, hogy  $e^{-j\omega t}$  helyett  $e^{j\omega t}$  áll, vagyis  $F(-j\omega)$ -val egyenlő:

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) F(-j\omega) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) F^*(j\omega) d\omega$$

Mint az előző szakaszban láttuk

$$F(j\omega) \cdot F^*(j\omega) = |F(j\omega)|^2$$

Páros függvény végeredményben tehát:

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(j\omega)|^2 d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} |F(j\omega)|^2 d\omega$$

Az összefüggés Parseval tétele néven ismeretes. Amint látjuk,  $|F(j\omega)|^2$  meghatározza a jel energiataralmát. Érthető, hogy az  $|F(j\omega)|^2$  függvényt energiaspektrumnak nevezik.

### 3.3. A valós spektrum

A bevezetett  $F(j\omega)$  komplex spektrum tömör írásmódot tesz lehetővé. Egyes esetekben célszerűbb lehet azonban különválasztani a valós és képzetes részt. A valós spektrumokat (amplitúdó-sűrűségeket) az alábbi módon szokás definiálni [23]:

$$F(j\omega) = \frac{A(\omega) - jB(\omega)}{2}$$

Vagyis egyrészt  $F(j\omega)$  ismeretében:

$$A(\omega) = 2\operatorname{Re}F(j\omega)$$

$$B(\omega) = -2\operatorname{Im}F(j\omega)$$

Másrészt  $A(\omega)$  és  $B(\omega)$  ismeretében:

$$|F(j\omega)| = \frac{1}{2} \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}$$

$$\arg F(j\omega) = -\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{B(\omega)}{A(\omega)}$$

Az  $A(\omega)$ , és  $B(\omega)$  valós spektrumok közvetlenül is számíthatók az  $f(t)$  időfüggvény ismeretében. Ha  $f(t)$  abszolút integrálható, akkor:

$$A(\omega) - jB(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt = 2 \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\cos\omega t dt - 2j \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\sin\omega t dt$$

A valós és képzetes rész különválasztásával:

$$A(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\cos\omega t dt$$

$$B(\omega) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\sin\omega t dt$$

Ebből látható, hogy  $A(\omega)$  páros,  $B(\omega)$  páratlan függvény:

$$A(-\omega) = A(\omega)$$

$$B(-\omega) = -B(\omega)$$

A transzformáció megfordítása:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A(\omega) - jB(\omega)}{2} (\cos\omega t + j\sin\omega t) d\omega$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [A(\omega)\cos\omega t + B(\omega)\sin\omega t] d\omega + j \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [A(\omega)\sin\omega t - B(\omega)\cos\omega t] d\omega$$

Az első integrandus  $\omega$  páros, második  $\omega$  pedig páratlan függvénye. Ezért az első integrál átírható és a második integrál nulla [23]:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} [A(\omega)\cos\omega t + B(\omega)\sin\omega t] d\omega$$

Az energiaspektrum alapján:

$$|F(j\omega)|^2 = \frac{1}{4} [A^2(\omega) + B^2(\omega)]$$

Alakban fejezhető ki.

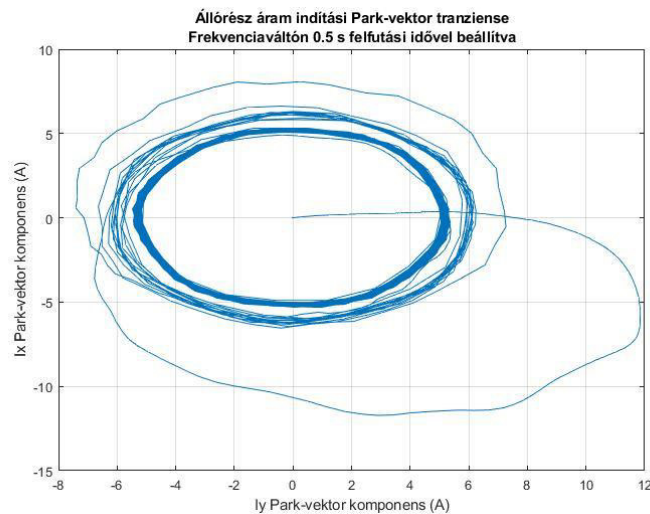
Ha  $f(t)$  nem abszolút integrálható, hanem periodikus összetevőt is tartalmaz, akkor a valós spektrumokban is fellépnek  $\delta(\omega - k\omega_0)$  alakú összetevők.

#### 4. Aszinkron motorok monitoring rendszereinek alapvető kérdései

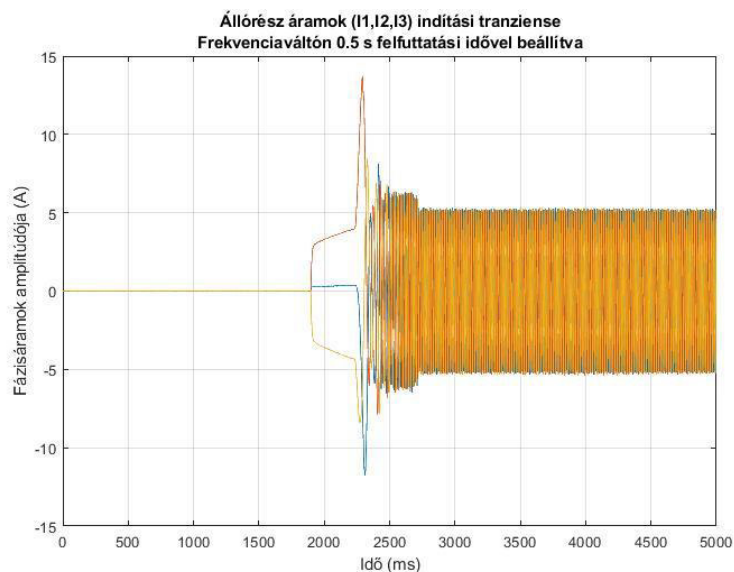
Aszinkron motorok esetén (és minden forgógépnél is) alapvető fontosságú kérdés a nyomaték viselkedése az időben, ami összefüggésben lesz a gép fluxusával is. A sztátor (állórész) mennyiségekre felírva („s” indexek az állórészre utalnak) :  $\bar{\Psi}_s = \int_0^t (\bar{u}_s - \bar{i}_s \cdot \mathbf{R}_s) dt + \bar{\Psi}_{s0}$ , A fluxusvektor meghatározásához az állórész feszültségéből először le kell vonni az állórész ellenálláson eső feszültséget, majd az így kapott indukált feszültséget integrálni kell és végül hozzáadni a kiindulási  $\bar{\Psi}_{s0}$  feltételt [28-33].

Mérés során az aszinkron gép állórészének fázis ellenállását be kell vinni a Park-vektor számításba. Nyomaték [29-33]:  $\mathbf{m}(t) = \mathbf{c} \cdot \mathbf{p} \cdot (\bar{\Psi}_s \times \bar{i}_s)$ , ahol: p a póluspárok száma, a c konstans, értéke  $c = \frac{3}{2}$  háromfázisú és  $c = 1$  kétfázisú gépekre. Az  $\mathbf{L}_m$  az állórész és a forgórész tekercsek közötti kölcsönös (főmező) induktivitás.

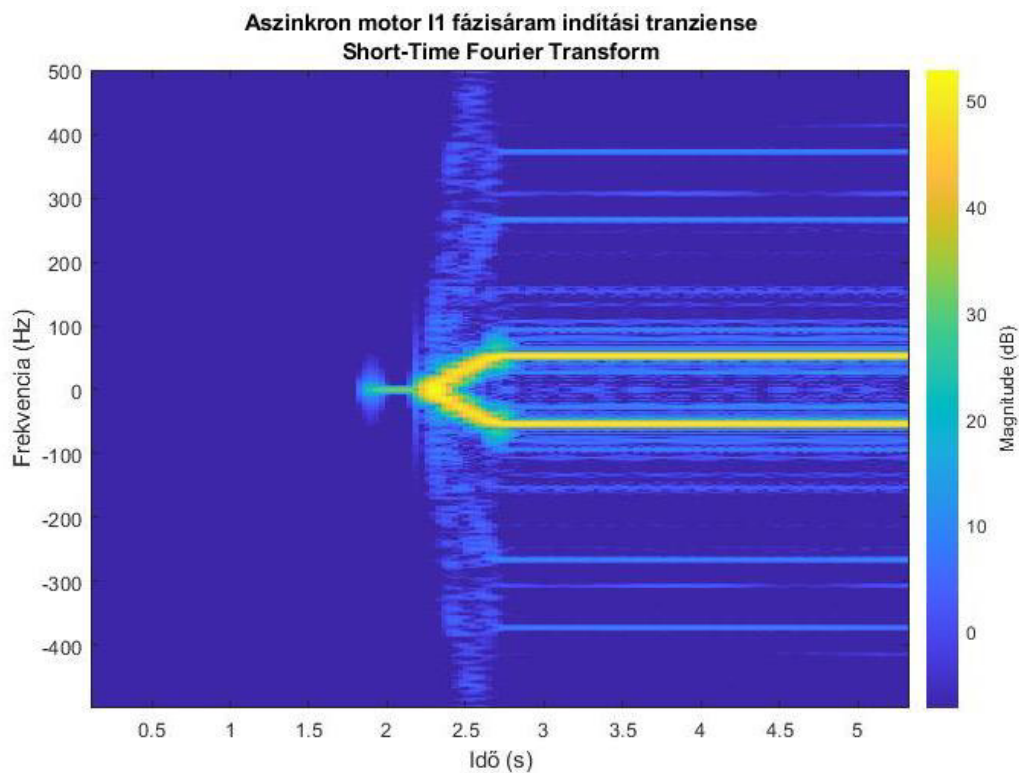
A 4.1. ábra háromfázisú kalickás aszinkron motor felfutási tranziensét mutatja állórész áram szemszögéből. Az indítás nyomaték-áram korláttal valósult meg (ettől nagyobb tranziens is kialakulhat). A 4.2. ábra ugyanazzal a feltétellel megvalósított indítási tranziens a háromfázisú áramok szemszögéből.



4.1. ábra. Állórész áram indítási Park-vektor tranziense frekvencia felfuttatás esetén.

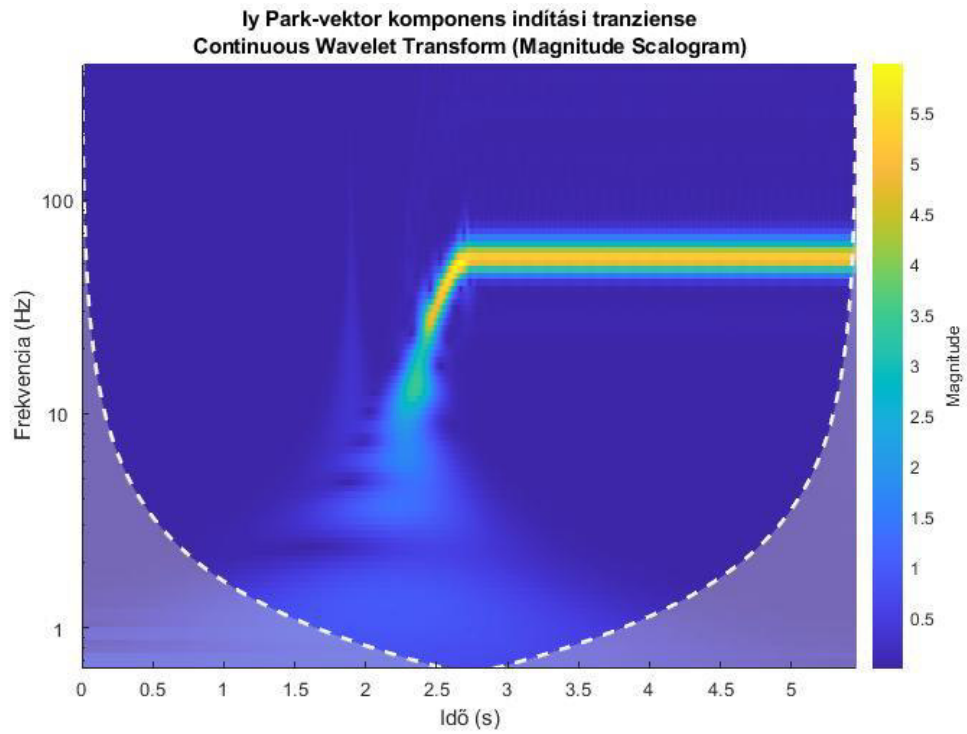


4.2. ábra. Állórész áramok  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  indítási tranziense frekvenciaváltóról, korlátozott felfuttatás.

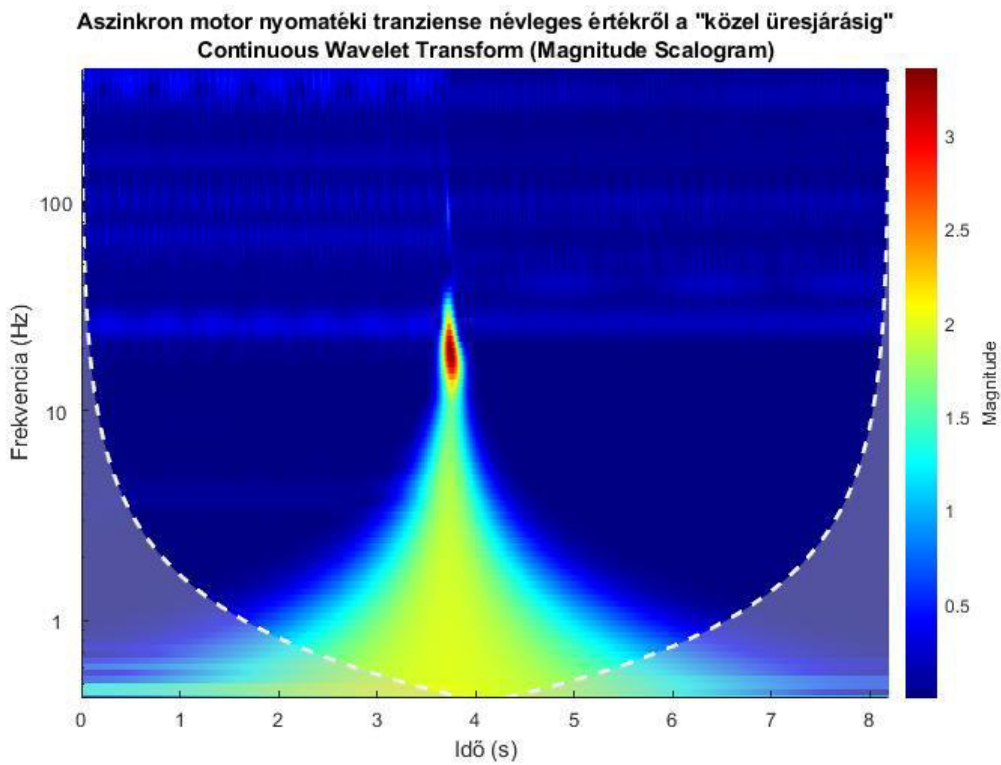


4.3. ábra. Állórész áram  $I_1$  fázisáram spektrumának képzése frekvenciaváltós üzemben, Short-Time Fourier Transform.

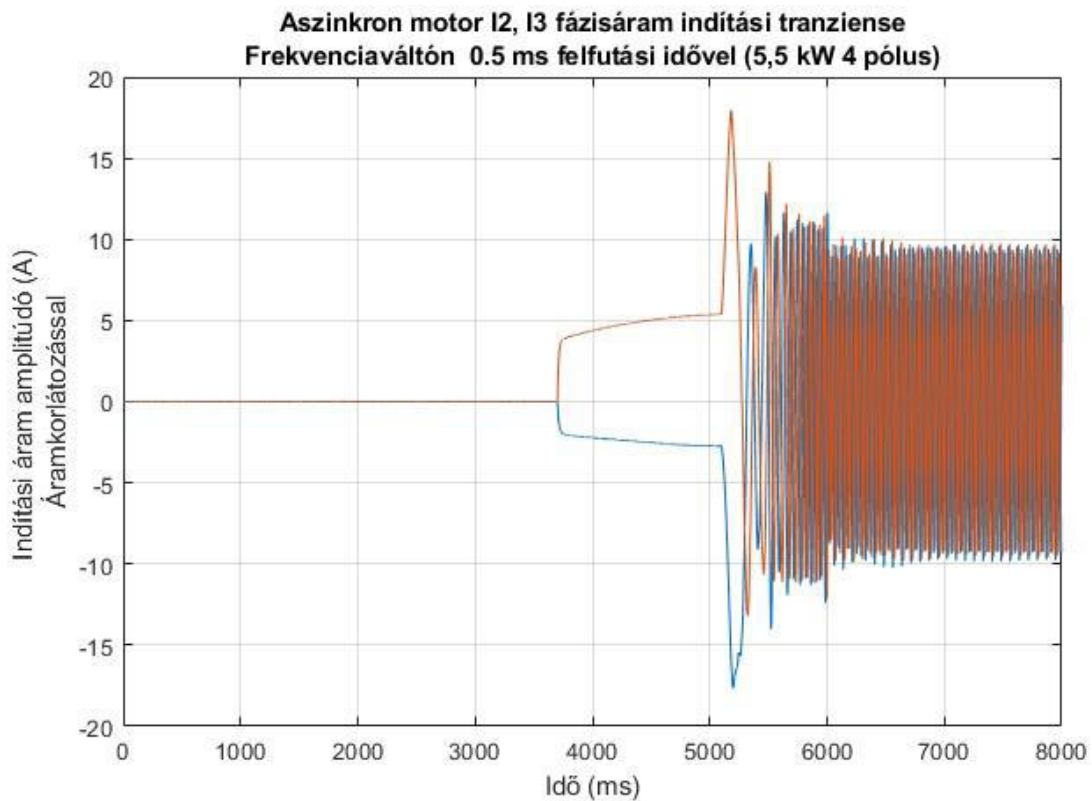
4.3. ábra. Állórész áram  $I_1$  fázisáram spektrumának képzése frekvenciaváltós üzemben, Short-Time Fourier Transform. Látható a felfutási tranziensben keletkező együttesen fellépő harmonikusok megjelenése, aminek gépcsoport rezonancia frekvenciájának keresésében is szerepe van.



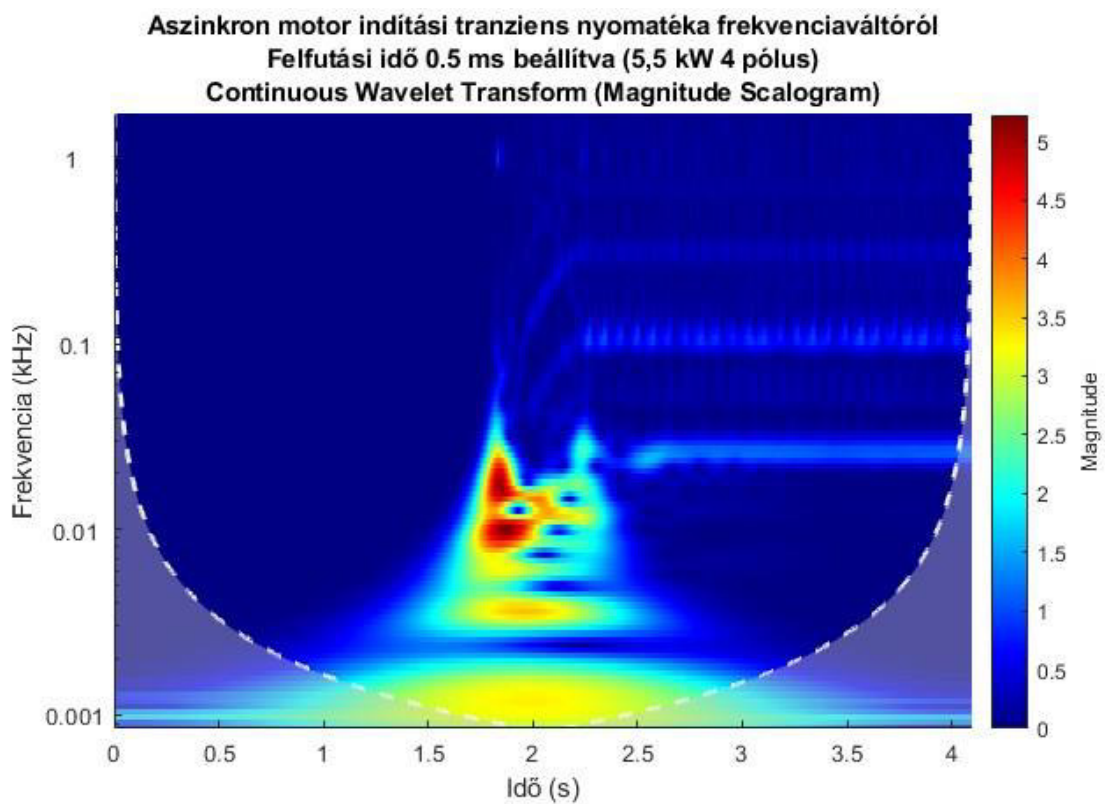
4.4. ábra. Állórész áram I<sub>y</sub> Park-vektor komponens indítási tranziense frekvenciaváltós üzemben.



4.5. ábra. Aszinkron motor nyomatéki tranziense névleges értékről az üresjárási állapotig.

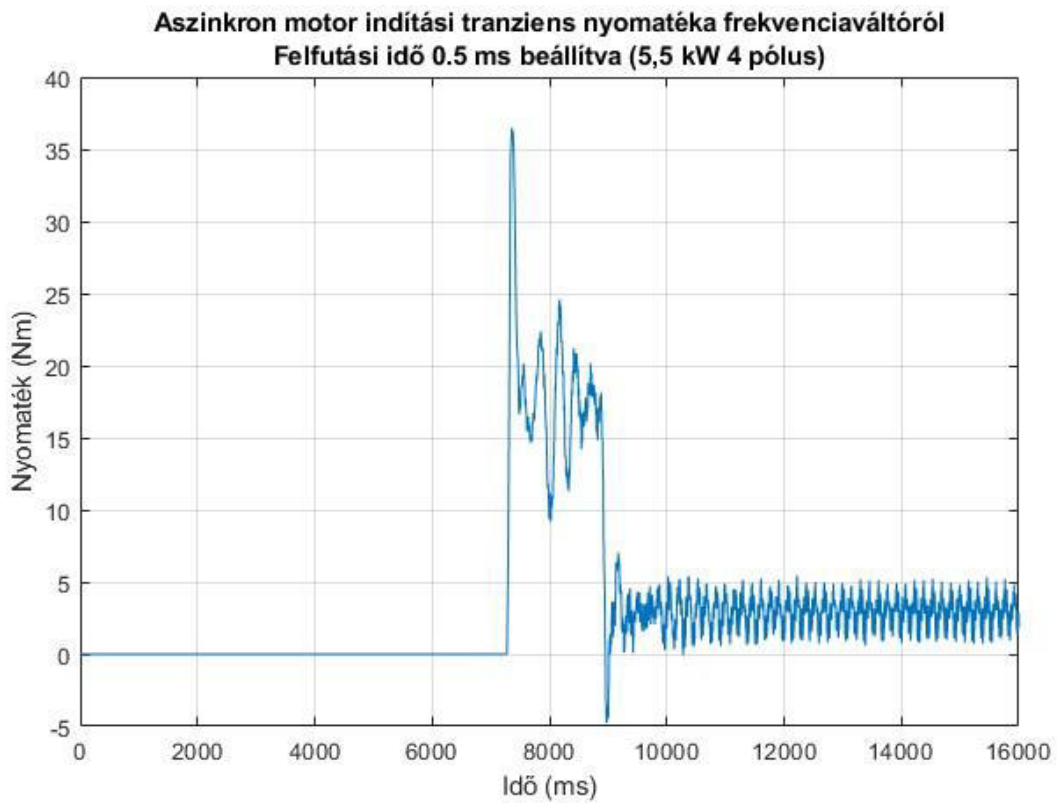


4.6. ábra Aszinkron motor kettes és hármas fázisában keletkező indítási tranziens frekvenciaváltós felfuttatás esetén.

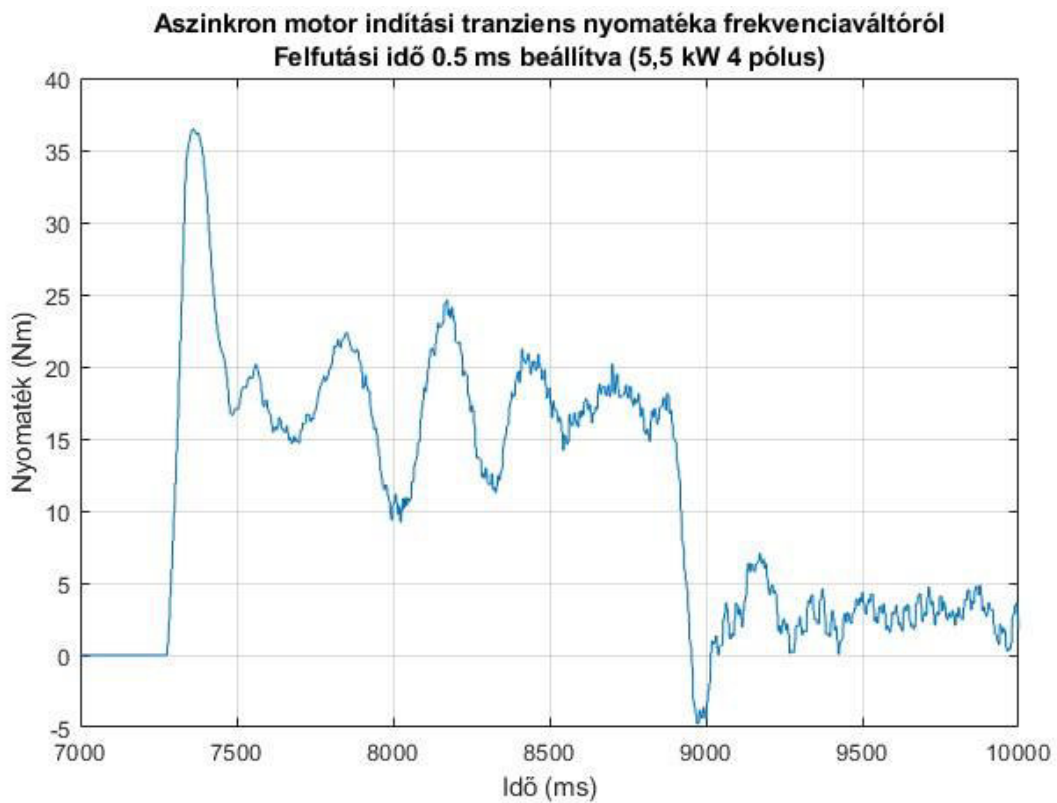


4.7. ábra Aszinkron motor indítási tranziens nyomatéka frekvenciaváltóról, Continuous Wavelet Transform Magnitude Scologram, lengő beállítás esetén, nyomatéki oszcilláció.

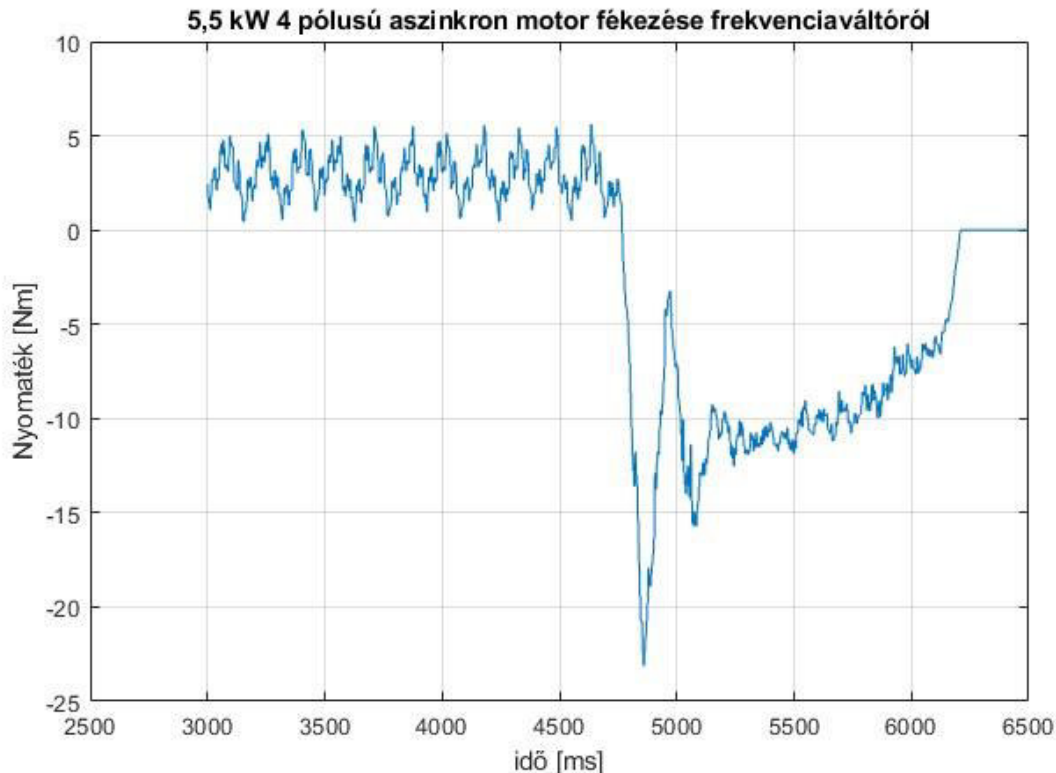




4.8. ábra Aszinkron motor indítási tranziens nyomatékának időfüggvénye közel üresjárású sűrűdó nyomatékértékig.



4.9. ábra Aszinkron motor indítási tranziens nyomatékának időfüggvénye nagyított állapotban.



4.10. ábra Aszinkron motor fékezési transziens nyomatékának időfüggvénye.

A nyomatéki transziens vizsgálatának eredményei többszöri felfutás esetén nagyobb eltérés is mutathatnak, a gép és géprészek melegedése következtében.

## 5. Összefoglalás

A dolgozat tartalmi részének célja megismerni az áram jelalak-analízis forgógépekre irányuló elemzési módszereit. Elsősorban mechanikai hibákat helyeztem előtérbe. Ennek az az oka, hogy a meghibásodások közel fele csapágy, tengelyről átadódó problémaként jelentkeznek.

A dolgozat irányvonala egy általánosnak tűnő elvet követ az előkészítésben, utána lép túl a karbantartási kérdéseken. Ennek a ténynek háttér kérdése előtérbe helyezi az aszinkronmotorra utaló adathalmaz felállítását. A diagnosztikai mérések módszereit kiterjesztettem a „Short-Time Fourier Transform”, illetve a „Wavelet-Transform” alkalmazásokra. A Park-vektor transziens folyamatainak vizsgálatánál, az állórész áram és a nyomatéki paramétereket is szerepeltek, ami előzetes adatként szolgál a térvektor komponenseinek tárolásához.

A pályamunka tárgyalja a transziens spektrum jellemzőit is, ami pontos áram és feszültség mintavételezést követel meg. Az egyszerű adat összehasonlítás nem oldja meg az átfogó elektromechanikai ismereteket igénylő géprendszer felmerülő problémáit.

Lehetőségek és eredmények: A villamos hajtások korszerű kivitele megköveteli a tanulórendszer képességét. A saját mérési eredményeimből az alábbi eredményre jutottam. Háromfázisú villamos forgógép áramjel vizsgálata alapján mechanikai eredetű jelek feldolgozása a következőképpen: A hajtásoldali és hajtás ellenoldali csapágytípusra érvényes jeleket a mérve/számítva és feldolgozva (függetlenül attól, hogy hibás-e vagy sem) neurális hálózat [34-40] bemenetét képezi. A függvényvizsgálat megtörténik amplitúdó-frekvencia és idő-frekvencia tartományban is, függően attól, hogy a gép milyen szerepkörben van. A két csapágy (ami lehet azonos vagy eltérő) információit külön sorolt halmazok kapják meg. Az elemzésnél használt transzformációk, amelynek alapjai a fázisáram és a Park-vektor elmélete. A csapágyra vonatkozó négy hibafrekvencia előfordulási gyakorisága és harmonikusainak sorrendje komplementer halmazokat hoz létre egymással, törekedve a motor leterhelési állapotának figyelembevételére. A tengelybeállítás okozta frekvenciák külön halmazt alkotnak és társfüggvényei a csapágyra vonatkozó számításoknak.

A két mechanikai eredetű folyamat között kapcsolatteremtő neuront kell felállítani, ami vezeti a két központi jellemző összehangolását. A mérések és kutatások során következő még nem említett tapasztalatokra jutottam: A hengergörgős csapágy nagyobb axiális „játéka” olyan gerjesztő frekvenciákat hoz létre az áramspektrumba, amely tengelybeállítási hibaként viselkedik. Ennek az oka: Az aszinkronmotor légrése ebben a teljesítmény kategóriában tizedmilliméter nagyságrendjében van, ezért a mechanikai mozgás dominánsabb iránya tengelyirányú (axiális), a mágneses húzás-tolási összetevő, amely aszimmetriát idéz elő a légrésben hasonlóan jelentkezik a tengelykapcsoló axiális ütéséhez viszonyítva, ezért sok esetben tengelybeállítási jelként is lehet azonosítani.

Az axiális mozgás milliméter nagyságrendjében is lehet, különösen, ha a csapágytámasztó rugó (kompenzációs lemez) nincs benne a csapágyfészekben, vagy nem megfelelő szélességű (pl.: elhasználódás miatt). Illetve a gépre jellemző egyedi mechanikai megmunkálás következménye egy viszonylag nagyobb hézag. Természetesen közreműködik az a jelenség is, hogy a görgőknek más a pályafutása, mint a golyós csapágynak. A tranzienst folyamatok a méréseknél több oszcilláció hatás látható volt, ez többek között köszönhető ezeknek a mechanikai rejtett holtjátékoknak.

## 6. Irodalomjegyzék

- [1] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése gyakorlati szemszögből, 2013. november 14. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [2] Dr. Péter József, Gépszerkezettan, ÓE BGK 3033, Budapest, 2011
- [3] Dr. Kósa Csaba-Farnady Ernő-Gyurcsovics Lajosné-Halassy István-Horváth Sándor-Kriza Kálmán, Rugalmas rendszerek mechanikája (Műszaki mechanika II.), ÓE BL 271, Budapest, 2010
- [4] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése gyakorlati szemszögből, 2014. április 23. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [5] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése iparjogvédelmi szemszögből, 2014. november 19. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [6] Bendiák István, Háromfázisú pólusátkapcsolással rendelkező ötvözött forgórészű aszinkron gép, szabadalom, Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala, Ügyiratszám: P1500106/24, 2015.03.13 Budapest
- [7] Bendiák István, Aszinkron gépek gyakorlati kérdései, 2015. április 22. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [8] Bendiák István, Aszinkron gépek gyakorlati kérdései, XXXI. Kandó Konferencia 2015 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [9] Bendiák István, Aszinkron motorok elemzése gyakorlati szemszögből, OTDK 2015 március 25-27. Műszaki Tudományi Szekció, Budapest
- [10] Bendiák István, Aszinkron motorok gyakorlati kérdései, XXXII. Kandó Konferencia 2016 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [11] Bendiák István, Aszinkron gépek gyakorlati kérdései, OTDK 2017 április 6-8. Műszaki Tudományi Szekció, Dunaújváros
- [12] Bendiák István, Aszinkron motorok tervezése, XXXIII. Kandó Konferencia 2017 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [13] Bendiák István, Villamos hajtásrendszerek rezgései, XXXIII. Kandó Konferencia 2017 "Kandó a tudomány hajóján", Budapest
- [14] Bendiák István, Aszinkron motorok csapágydiagnosztikája, 2019. április 25. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [15] Bendiák István, Aszinkron motorok újratekerceselési technológiáinak hatása a magas hatásfokú aszinkron motorok paramétereire, TDK dolgozat, Budapest 2019

- [16] Bendiák István, Aszinkron motorok diagnosztikai módszerei, 2019. november 12. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [17] Bendiák István, Aszinkron motorok csapágyhibáinak elemzése, XXXV. Jubileumi Kandó Konferencia 2019, Budapest
- [18] Bendiák István, Forgógépek diagnosztikai eljárásai és alkalmazási lehetőségük felmérése, 2020. április 29. Tudományos Diákköri Konferencia, Budapest
- [19] Dr. Prohászka János, Bevezetés az anyagtudományba I. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1988, ISBN 963 8354 (A Szerkezetvizsgálat módszerei és mechanikai tulajdonságok című fejezetek.)
- [20] Dr. Nagy István, Állapotfüggő Karbantartás, Műszaki Diagnosztika I. Rezgésdiagnosztika, Delta-3N Kft. Paks, 2006
- [21] Dr. Timár Peregrin László-Fazekas Albert-Kiss József-Miklós András-Dr. S. J. Yang, Villamos gépek zaja és rezgése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986
- [22] Lukács Ottó, Matematikai Statisztika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 2002
- [23] Dr. Fodor György, Elméleti elektrotechnika II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1989, ISBN 9631816095
- [24] Zombori Béla, Elektronika (5.kiadás), Nemzeti Tankönyvkiadó-Tankönyvmester Kiadó, Budapest, 2004
- [25] Ctirad Smetana, Zaj-és rezgésmérés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975
- [26] Molnár László, dr. Varga László, Gördülőcsapágyazások tervezése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [27] 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
- [28] Retter Gyula: Egységes villamos gép elmélet, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976
- [29] Farkas András-Gemeter Jenő-Nagy Lóránt: Villamos gépek, ÓE-KVK 2043, Budapest, 2010
- [30] Kovács K. Pál: Villamos gépek tranziens folyamatai, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1970
- [31] Halász Sándor: Villamos hajtások, Havas&Társ, Budapest, 1987
- [32] Halász Sándor: Automatizált villamos hajtások I., Tankönyvkiadó, Budapest, 1989
- [33] Halász Sándor-Hunyár Mátyás-Schmidt István: Automatizált villamos hajtások II., Műgyetem Kiadó, Budapest, 1998

- [34] 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), Capri, Italy, 2016, pp. 611-616, doi: 10.1109/SPEEDAM.2016.7525861.
- [35] X. Song, Z. Wang and J. Hu, "Detection of Bearing Outer Race Fault in Induction Motors using Motor Current Signature Analysis," 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin, China, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICEMS.2019.8922036.
- [36] M. Zagirnyak, D. Mamchur and A. Kalinov, "A comparison of informative value of motor current and power spectra for the tasks of induction motor diagnostics," 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, Turkey, 2014, pp. 540-545, doi: 10.1109/EPEPEMC.2014.6980549.
- [37] T. Ciszewski, L. Swędrowski and L. Gelman, "Induction motor bearings diagnostic using MCSA and normalized tripple covariance," 2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Guarda, Portugal, 2015, pp. 333-337, doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303711.
- [38] B. Nouredine, 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.
- [39] A. Gheitasi and A. A. Anbuky, "Distributed signature analysis of induction motors using Artificial Neural Networks," 2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), Singapore, 2014, pp. 1858-1863, doi: 10.1109/ICARCV.2014.7064599.
- [40] 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.