

# **BELSŐÉGÉSŰ MOTOR ÜZEMÁLLAPOTÁNAK JELLEMZÉSÉRE ALKALMAS POLÁRDIAGRAMOS MEGJELENÍTÉSI MÓDSZEREK**

***Gárdonyi Gábor***

*Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,  
Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, doktorandusz,  
gardonyi@mogi.bme.hu*

***Manhertz Gábor***

*Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,  
Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, doktorandusz,  
manhertz@mogi.bme.hu*

***Dr. Antal Ákos***

*Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,  
Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, adjunktus,  
antal.akos@mogi.bme.hu*

***Dr. Bereczky Ákos***

*Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,  
Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, egyetemi docens,  
bereczky@energia.bme.hu*

***Dr. Samu Krisztián***

*Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,  
Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, tsz. vezető helyettes egyetemi docens,  
samuk@mogi.bme.hu*

## **Absztrakt**

Kutatásaink fő irányvonala belsőégésű motorokon mért rezgésjelek alapján az üzemállapot jellemzése, valamint az esetlegesen előforduló hibák detektálási lehetőségének felmérése, megvalósítása. Jelen tanulmány jó példát mutat arra, hogy egy belsőégésű motor esetén hogyan lehet egy primitív gyorsulásérzékelőjével (kopogásszenzor) akár több jellemző paraméterét is jellemezni a vizsgált berendezésnek. A jelek feldolgozását felkutatott vagy sajátfejlesztésű rezgéselemzési eljárásokkal valósítjuk meg.

*Kulcsszavak:* Belsőégésű motor, fordulatszám, üzemállapot, jelfeldolgozás

## 1. Bevezetés

Az autóiparban egyre inkább törekednek arra, hogy megfeleljenek a folyamatosan változó piaci direktíváknak. Ahhoz, hogy ezeknek a kritériumoknak a lehető legjobban eleget tudjanak tenni, az ár, az üzembiztonság, az üzemanyag fogyasztás, a károsanyag kibocsátási határértékek és a teljesítmény között kell a legmegfelelőbb kompromisszumot megtalálni.

Egy belsőégésű motornak számos olyan fizikai paramétere van, melynek mérésével meghatározható a motor, vagy épp egy alkatrészének, aktuális állapota [Dolatabadi, 2015]. Ezek közül a paraméterek közül az egyik lehet pl. a motor rezgése, melynek mérése és analízise több szakértői rendszer alapját adhatja [Chen, 2010]. Ezen rendszerek közül néhányat állapotfelügyeletre ill. hibadetektálásra is alkalmaznak [Geng, 2003] [Geng, 2005] [Barelli, 2009]. Az adott feladatok elvégzéséhez, jelenségek elemzéséhez frekvencia alapú elemzéseket is gyakran alkalmaznak. [Boaghe, 2002] az idő és a frekvenciatartománybeli módszereket kombinálva használja egy gázturbina diagnosztikájára. A szakirodalomban számos rezgésdiagnosztikai módszer lelhető fel, melyek alkalmasak különböző üzemállapotok, események jellemzésére, ám emellett további lehetőségeket is rejtnek magukban. A rögzített jeleket időtartományban veszik fel, majd lehetőség van ezek alapján a regisztrátumok alapján a frekvenciatérbe, vagy egyéb tartományokba való áttérésre is. Ezáltal, diagnosztikai szempontból, a legszemléletesebb módon tudjuk a lekérdezett numerikus és/vagy grafikus eredményeket megjeleníteni.

### 1.1. Belsőégésű motor paraméterei

Egy belsőégésű motor állapotát legfőbbképpen az alábbi paraméterek írják le:

- a motor effektív teljesítménye ( $P_e$ )
- a motor fajlagos üzemanyag-fogyasztása ( $b_e$ )
- a motor főtengelyén mérhető forgatónyomaték ( $M$ )
- a motor fordulatszáma ( $n$ )
- a motorba jutó levegő-üzemanyag keverék aránya (légfelesleg tényező –  $\lambda$ )

A motor főtengelyén mérhető forgatónyomatéknak ( $M$ ) fontos szerepe van a jármű mozgásában, mivel ez a forgatónyomaték fog különböző áttételeken keresztül eljutni a futóműig, amely a jármű tényleges mozgását végzi. A motor főtengelyén megjelenő effektív

munka ( $W_e$  – [J]) és a forgatónyomaték között a főtengeley szögelfordulása ( $\phi$  – [rad/s]) teremt kapcsolatot:

$$W_e = M \cdot \phi \quad (1)$$

ahol:  $M$  [Nm] a forgatónyomaték,  $\phi$  [rad] a motor szögelfordulása.

A (1)-es egyenlet mindkét oldalát leosztva az idővel, az effektív teljesítményhez [W] jutunk:

$$P_e = \frac{W_e}{t} = M \cdot \frac{\phi}{t} = M \cdot \omega \quad (2)$$

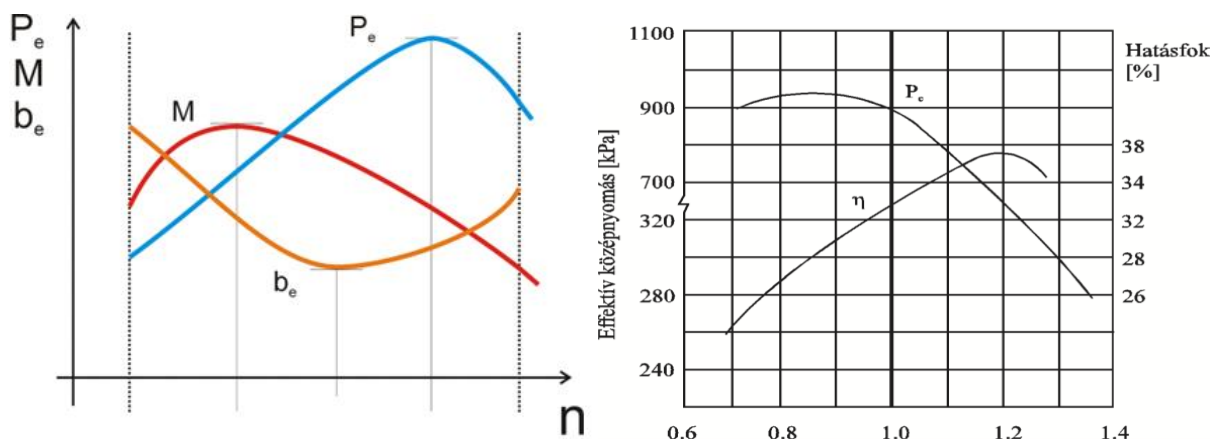
ahol:  $\omega$  [rad/s] a főtengeley szögsebessége

A szögsebességből a fordulatszám [1/s] megkapható:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

A fordulatszám pontos ismerete más működési paraméterek meghatározásában is segítségünkre lehet. Ehhez a motor egy megfelelő forgó alkatrészének forgási sebességét kell valamilyen módon, minél pontosabban megmérni. Ez a motor saját érzékelőinek jele alapján is kivitelezhető, de ezek a jelek gyakran nehezen hozzáférhetőek. Lehetséges kiegészítő szögjeladó felszerelése, azonban ez a motorblokk körül rendelkezésre álló korlátozott hely miatt ütközhet akadályba.

A motor további fontos paramétere a légfelesleg tényező, mely megadja a motor által beszívott és az elméleti égéséhez szükséges levegőmennyiség arányát. Ez az arány többek között befolyásolja az égési folyamatot és ezen keresztül a motor hatásfokát, teljesítményét, valamint káros anyag kibocsátását. A mai modern gépjármű motorok számos szenzorral vannak felszerelve és a vezérlés a motorhoz kapcsolt érzékelők jeleiből határozza meg az adott üzemmódhoz a szükséges keveréket. A nem megfelelő légfelesleg tényező a motor több paraméterére is hatással van, ezek folyamatos monitorozása a diagnosztika alapja.



**1. ábra: Belsőégésű motor karakterisztikái  
(balra – fordulatszám függvényében, jobbra – a légfesleg-tényező függvényében)**

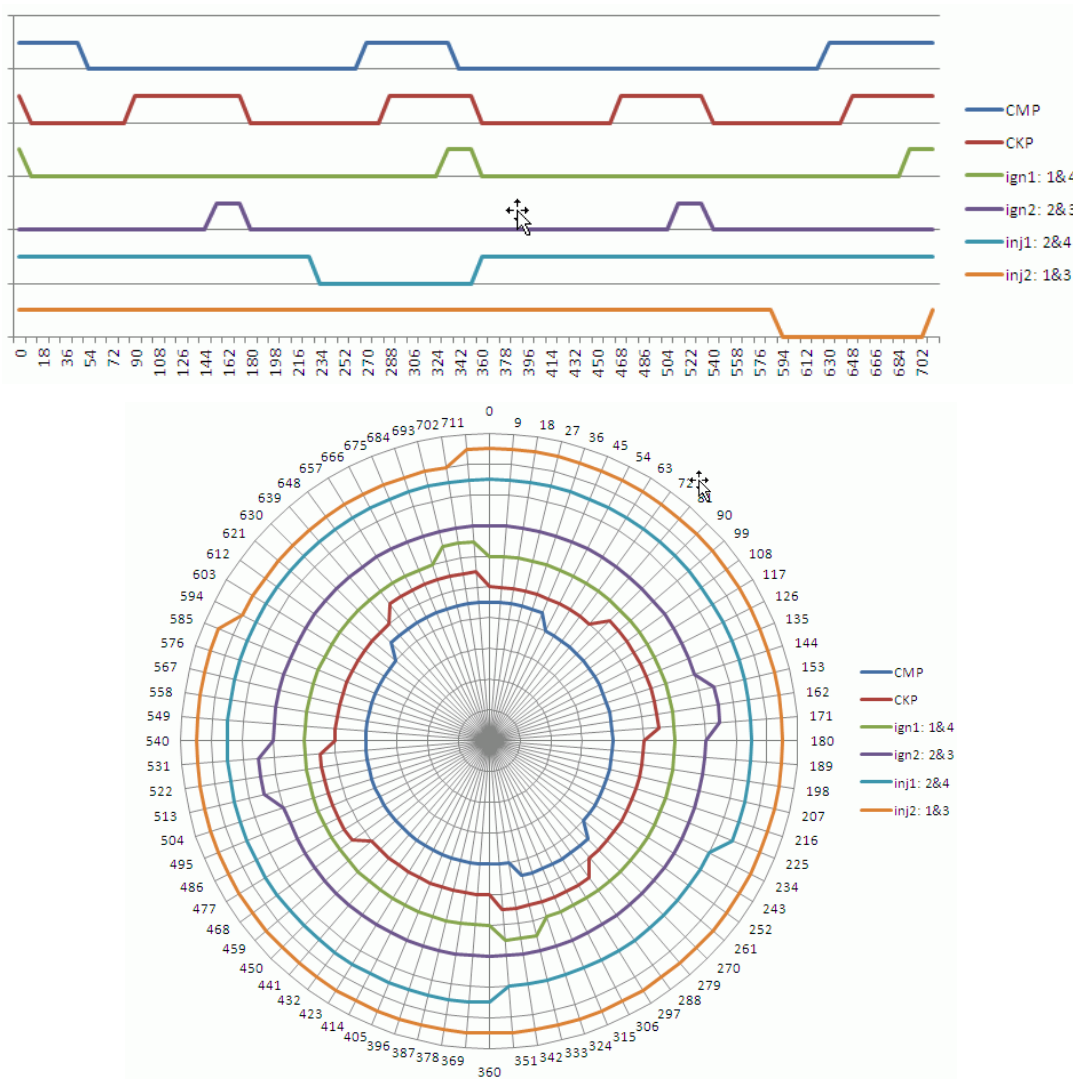
### 1.2. Polárdiagramos megjelenítési módszerek

Forgógépek üzemi paramétereit, rezgéseinek intenzitását, vagy egyéb jellemzőit szokás a fizikai folyamat jobb átláthatóságának érdekében polárdiagramon ábrázolni. A megjelenítés alapját adhatja a motor saját, főtengelyre szerelt, fordulatszám-mérő jeladója, becsült fordulatszám, de a diagram végső esetben akár fordulatszám jel nélkül is létrehozható. Utóbbi esetben a mérés hátrányként említendő, hogy a járás egyenetlensége figyelmen kívül marad. Mivel a belsőégésű motor egy összetett forgógép és egyes mérések, elemzések során a berendezés főtengelyének adott szöghelyzete viszonyítási alapul szolgál, ezért a mintavételezést az esetek nagy részében nem relatív idő, hanem főtengely szög alapján végzik el. Ennek eredményeképp a mintavételezett jelsorozat szögtartományba képződik le, melynek segítségével pl. adott szöghelyzetre is lehet különböző kritériumok alapján a berendezést szabályozni [Zhang, 2009]. Így képet kaphatunk a ciklikusan megjelenő folyamatok időpontjáról, vagy a berendezés hozzá tartozó működési fázisáról. Ezen információk gyakran közvetlenül is felhasználásra kerülnek a működtetés érdekében pl. sikló csapágyazás figyeltetésénél, vagy kiegyensúlyozást segítő szabályozások esetén.

A polárdiagram egy kétdimenziós koordináta rendszer, melynek egy adott pontját egy szög és egy távolság határoz meg. Ezeket radiális és szögkoordinátának szokták nevezni. A derékszögű koordináta rendszerből Pitagorasz-tétel segítségével lehet áttérni polárkoordinátákra. Belsőégésű motoroknál a diagram  $360^\circ$ -os maximális skálaértéke helyett

720°-ot szokás definiálni, mivel négyütemű motor esetében egy működési ciklus két teljes főtengety fordulat során zajlik le.

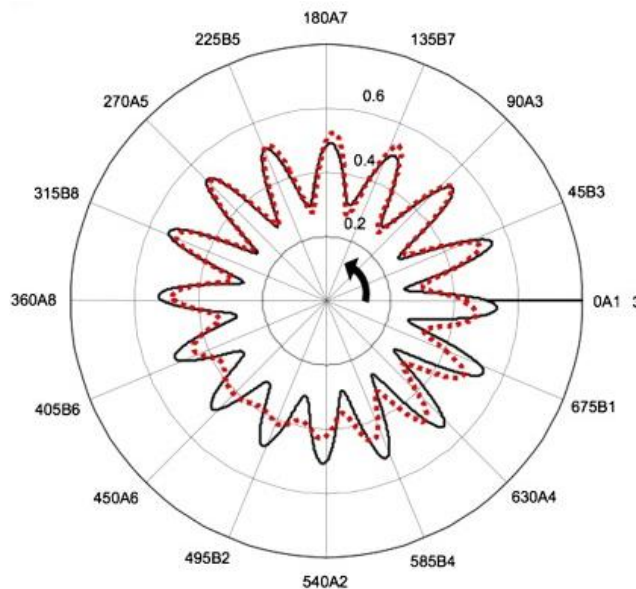
Olyan kutatásoknál, melyeknél előtérbe kerülnek a keverék égéstérbe való juttatásával és begyűjtésével kapcsolatos állapotok, gyakran alkalmaznak ilyen módszereket. Ennek oka az, hogy benzinmotor esetében a gyújtás, dízelmotor esetében a keverék égéstérbe való juttatása, majd a komprimálása a főtengety szöghelyzetéhez képest történik. Ehhez az adott szöghelyzethez képest lehet állítani a keverék befecskendezésének és/vagy gyújtás „időpontját”, mely beállítás hatással van a motor működésére. Egy gyújtási, valamint injektálási folyamat a főtengety szög függvényében látható az alábbi ábrán (2. ábra), illetve ennek a folyamatnak a polárdiagramra való transzformálása.



**2. ábra: Gyújtási és befecskendezési impulzusok a főtengety szöghelyzetének függvényében (CMP – vezérműtengety, CKP – főtengety, ign – gyújtás, inj - befecskendezés)**

Forrás: <http://www.miataturbo.net/megasquirt-18/does-ms3-look-right-62430/>

[Charlres, 2009], [Charles 2010] az ún. NPP (Novel Polar Presentation) módszert alkalmaz egy 2 soros, 16 hengeres motorral kapcsolatos gyújtásidőzítéssel kapcsolatos kutatása során, mely a megszokott polárdiagramos megjelenítési módszernek egy továbbfejlesztett változata. Első lépésben az adott motor jellegéhez kell igazítani a diagram skáláját, és osztását. Egy osztás egy adott henger felső holtpontját jelzi a főtengely szögének függvényében. A skálák elnevezései az alábbi módon tevődnek össze. A karaktorsor első részében a főtengely szöge szerepel, majd A vagy B jelzi, hogy melyik hengerversor, melyet a megjelölt soron lévő henger sorszáma követ. Az osztások 45°-os lépésközzel követik egymást, mivel két főtengely fordulat (720°) alatt gyűjtődik be az összes henger. A 3. ábra azt mutatja be, hogy a felvett pillanatnyi szögsebesség segítségével milyen módon derül ki az, hogy egy adott hengerben hibás gyújtás történt.

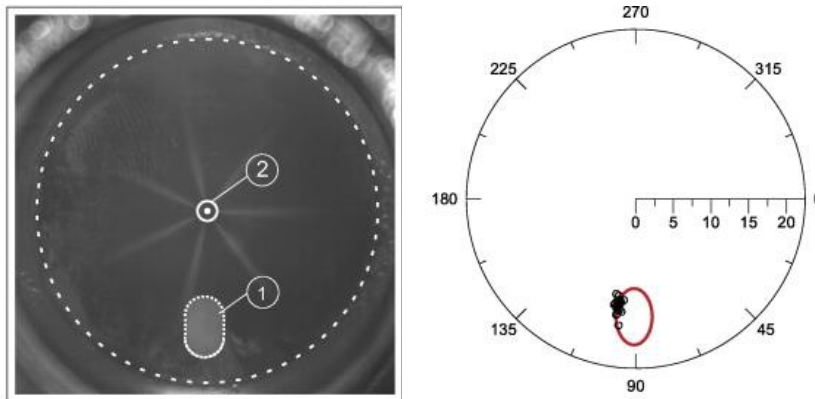


**3. ábra: Nagyfrekvenciás komponensek Novel Polar Plot-on hibás gyújtás esetén (folytonos vonal – normál működés, szaggatott vonal – A8-as hengeren gyújtási hiba)**

Forrás: [Charles, 2009]

A gyújtás/komprimálás után az égés elkezdődik, melynek lángfrontja fokozatosan terjed az égés térben a gyújtási ponttól a henger faláig. A lángterjedés sebessége és a lángfront helyzete is megjeleníthető a taglalt módszerrel. Tehát, nem csak főtengely szöghelyzetéhez viszonyítva alkalmazzák a polárdiagramos megjelenítést, hanem pl. bármilyen kör keresztmetszetű vizsgálati sík esetén is akár, pl. egy dugattyú felületén. Ezzel a megjelenítési móddal az is vizsgálható, hogy a keverék gyulladása hol történik (4. ábra), vagy benzinmotor esetében a korai vagy késői gyújtás miként befolyásolja a láng terjedését a dugattyú síkjában. Az **Hiba!**

**A hivatkozási forrás nem található.** ábrán korai, valamint kései gyújtás esetén lezajló lángterjedés is látható.



**4. ábra: Láng képződés a dugattyú síkjában Diesel-motor hidegindítása esetén (1 – izzító gyertya, 2 – injektor fúvóka, piros ovális – izzító gyertya helye)**  
 Forrás: [Pastor, 2011]

[Shibata, 1999] és [Wu, 2005] az ún. Symmetrized Dot Pattern eljárást taglalják, melyhez a motor fordulatszámjele nem szükséges és ezért a diagramot is  $360^\circ$ -ig skálázza. Az SDP eljárás során az időtartománybeli jelsorozatot egy olyan transzformációnak vetik alá, amelynek végén egy olyan ponthalmaz keletkezik, melynek 3 szimmetriatengelye van. Ezt a ponthalmazt alkotó pontok lokálisan olyan összefüggéseket tartalmaznak, amelyeket globálisan érzékelve azt az érzetet keltik, mintha egy összefüggő ábrát látnánk. Továbbá, ez az alakzat tartalmazza a kiindulási jelre jellemző tulajdonságokat, így össze lehet hasonlítani más jelekkel, amelyekből további információkat kaphatunk a jel viselkedéséről. Az SDP módszer során a jel  $t$  időpontbeli értékét ( $X(t)$ ), valamint egy attól egy  $\tau$  idővel későbbi időpontbeli értékét ( $X(t+\tau)$ ) polárkoordinátákká alakítjuk, majd ábrázoljuk. Ezek a polárkoordináták egy radiális vektorból, és két szögértékből állnak:  $P(A(i), \Theta(i), \Phi(i))$ . Az eljárás kezdetén egy adatpárt ( $X(t), X(t+\tau)$ ) ábrázolunk úgy, hogy a kezdő egyenesre (Initial Line) szimmetrikusak legyenek. Ezután elforgatjuk a szimmetriatengelyt egy meghatározott szöggel, és lemásoljuk a pontpárokat. Majd ezt addig ismétljük, amíg körbe nem érünk. Ha a forgatási szög túl kicsi, akkor az elforgatás előtti és utáni szögek egybemosódnak, ami megnehezíti a megkülönböztetésüket. [Shibata, 1999] alapján a  $60^\circ$  és a feletti forgatási szögek esetén jól kivehetőek a jel tulajdonságai. Ha túl nagy a szög, kevesebb szimmetriatengelyt kapunk, és így az ábra végső soron kevesebb információt fog közölni. Az 5. ábrán látható eljárásnál  $60^\circ$  a forgatási szög, így három szimmetriatengely látható, ami az információmennyiség, és megkülönböztethetőség szempontjából elegendő. A  $\Delta t$  idővel mintavételezett diszkrét jeleket

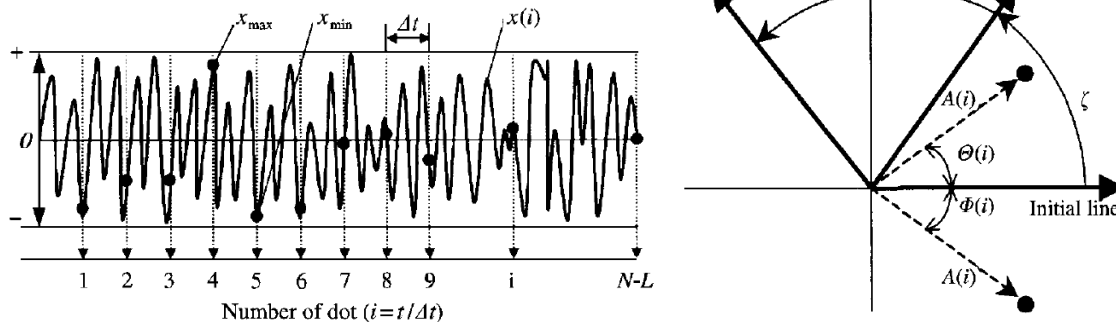
$(x(i))$  az alábbi összefüggésekkel tudjuk polárkoordinátákká  $(P(i))$  alakítani:  
[Delvecchio, 2009]

$$A(i) = \frac{x(i) - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad \Theta(i) = \theta + \frac{x(i+L) - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \zeta \quad \Phi(i) = \theta - \frac{x(i+L) - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \zeta \quad (1)$$

ahol:

- $A(i)$  az ábrázolandó pont helyét leíró radiális vektor
- $\Theta(i)$  [°] az ábrázolandó pont helyét leíró szögérték
- $\Phi(i)$  [°] az ábrázolandó pont párjának helyét leíró szögérték
- $i$  az ábrázolandó pont sorszáma ( $i = 1, \dots, N$ )
- $L$  – az ábrázoláshoz szükséges időkésltetés (Lag)
- $x(i)$  – az  $i$ -edik időponthoz tartozó diszkrét jelérték,
- $x_{max}$  a legnagyobb jel amplitúdó
- $x_{min}$  – a legkisebb jelamplitúdó
- $\theta$  [°] a szimmetriatengely forgatási szöge
- $\zeta$  az ábrázolási szög erősítése

Ebben az ábrázolásmódban az időkésltetés ( $L$ ) és az erősítés ( $\zeta$ ) változó paramétereknek számítanak, így ezektől függ a keresett hiba vagy üzemállapot megkülönböztethetősége.



**5. ábra: Az SDP transzformáció sematikus ábrázolása**

Forrás: [Shibata, 1999]

## 2. Alkalmazott mérési elrendezés

A rezgésmérések alapjául egy gázüzemű belsőégésű motor szolgált. A gázmotoros egység alapja egy, a Ganz-Set Kft. által készített BAG-20 típusú berendezés, mely az alábbi egységekből áll:

- Wiscon Total TM27 típusú gázmotor.



- Marelli CX IM B3 180M típusú aszinkron generátor

Gyorsulásméréshez egy egytengelyű, autóiparban alkalmazott, Siemens által gyártott kopogás szenzor került felhasználásra. Ennek jelét egy National Instruments által gyártott USB-6361 típusú DAQ eszköz rögzített. Az adatgyűjtő 16Bit-es felbontással, valamint 2MS/s-os maximális mintavételi frekvenciával rendelkezik. A kopogásszenzor felrögzítésére két opció is adódott. Az egyik a hengerfej és a forgattyúház illesztésénél, a másik a forgattyúházon (6. ábra). Az első rögzítési ponton a mérési eredményekből láthatóan számos negatívan befolyásoló tényezőt lehetett felfedezni.



**6. ábra: A gyorsulásmérő szenzor rögzítése az első rögzítési helyen (bal) és a második rögzítési helyen (jobb)**

Az egyik probléma a rögzítés helye maga, hiszen a forgattyúház és a hengerfej nem esik egy síkba, ezáltal nem tud a szenzor teljesen felfeküdni a felületen. A rögzítéshez egy alátétet kellett alkalmazni, ami rugalmas tagként is működhett, melynek eredményeként nagy gyorsulásokat, akár  $100\text{m/s}^2$  (továbbiakban g) felettieket is felfedezni véltünk az időjelen. Másik probléma, hogy az alátét vastagsága sem megfelelő, még így is felütkezhet a gyorsulás érzékelő talpa a forgattyúház öntvényén. A harmadik gond, pedig a motor festéséből származó kedvezőtlen rezgésátvitel a szenzor felé. A házon kb.  $\sim 0,3$  mm vastagságú festék réteg található, ami szintén nem kedvez a mérésnek. Az említett tényezők mind-mind jelentős zajt visznek a rendszerbe, melyek megnehezíthetik a spektrumtartománybeli analízist.

A fordulatszám mérésének leggyakrabban alkalmazott módja, hogy a motor főtengelyéhez egy nagy felbontású encodert rögzítünk, mely digitális jelszinten szolgáltat adott számú fel- és lefutó élet. A digitális jelszintű billenéseket egy számlálóval egyszerűen kiolvashatjuk. Az eszköz adott szögelfordulásonként produkál jelváltozást, így két felfutó él között eltelt időből lehet számítani a tengely forgássebességét. A mérések során a gázmotor 1500 fordulat/perccel üzemelt, mely egy Kübler 8.5822.3851.2048 típusú jeladóval került mintavételezésre.

Mérések során a motor tüzelőanyag – levegő keverék összetételét egy szabályzó szeleppel állítottuk, majd a kipufogógáz oxigén koncentrációjából határoztuk meg a beállított értéket. A mérésekre felhasznált oxigén koncentrációmérő egy Servomex 570A típusú paramágneses

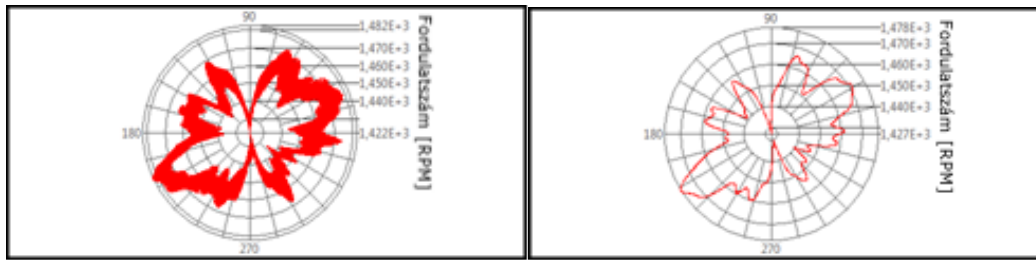
berendezés volt. A légfesleg tényező meghatározható az égéstermék  $O_2$  koncentrációjából az alábbi összefüggés alapján:

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = 1 + \left[ \frac{O_2}{21 - O_2} \right] \frac{V_0}{L_0} \approx \frac{20,9}{20,9 - O_{2,m\acute{e}rt}} \quad (2)$$

ahol:  $L$  a valóságos levegő mennyisége,  $L_0$  az elméleti levegő mennyisége,  $V_0$  az elméleti füstgáz mennyisége.

### 3. Mérési eredmények

Amennyiben mintavételezett adatsorokat a motor fázisszöge függvényében polárdiagramon szükséges ábrázolni, megelőző jelfeldolgozást kell alkalmazni. Az adatgyűjtő eszközök nagy része egyenlő időközönként digitalizálja az aktuális értékeket, azonban célszerű a megjelenítés előtt ezt szögtartományba konvertálni. Az áttérés egyszerűen megvalósítható, ha rendelkezésre áll az időben mintavételezett adatsor, valamint a hozzá tartozó forgássebesség-lefutás. Utóbbi egyaránt előállítható egy tengely fordulatszámának direkt mérése vagy becslése útján. Amennyiben a berendezés könnyen hozzáférhető, egy szögjeladót szerelve valamely működés szempontjából releváns forgó tengelyre (pl. motor főtengety) a forgássebesség-lefutás könnyen előállítható. A fordulatszám szögelfordulás szerinti polárdiagramos megjelenítésével többletinformációhoz lehet jutni, mely jól mutatja a rendszert hajtó energiaforrás időben változó jellegét. Ez alapján meghibásodásokra lehet következtetni, mely lehet mechanikai szorulás, megnövekedett súrlódás, vagy egyéb helytelen működést okozó jellemző is.



**7. ábra: Encoderrel mért sebességprofil polárdiagramos megjelenítése (balra) és a fordulatok során átlagolt fordulatszám értékek (jobbra)**

A megjelenítés átláthatósága függ attól, hogy milyen paraméter adja az alapot az ábrázolás fázisszögének megállapításához. Belsőégésű motor esetén érdemes egy teljes működési ciklust – azaz két teljes főtengely-fordulatot – választani. A következő illusztráció (8. ábra) ugyanazon jelet ábrázolja a két említett módon. Míg a működési fázis szerinti ábrázolásban az ütemek jól elkülöníthető módon elemezhetőek, a másik esetben 2-2 ütem egybeolvad. Ilyenkor jóformán elkülöníthetetlené válnak az egymás utáni, egymástól jelentősen eltérő tulajdonságokkal jellemezhető fordulatok.

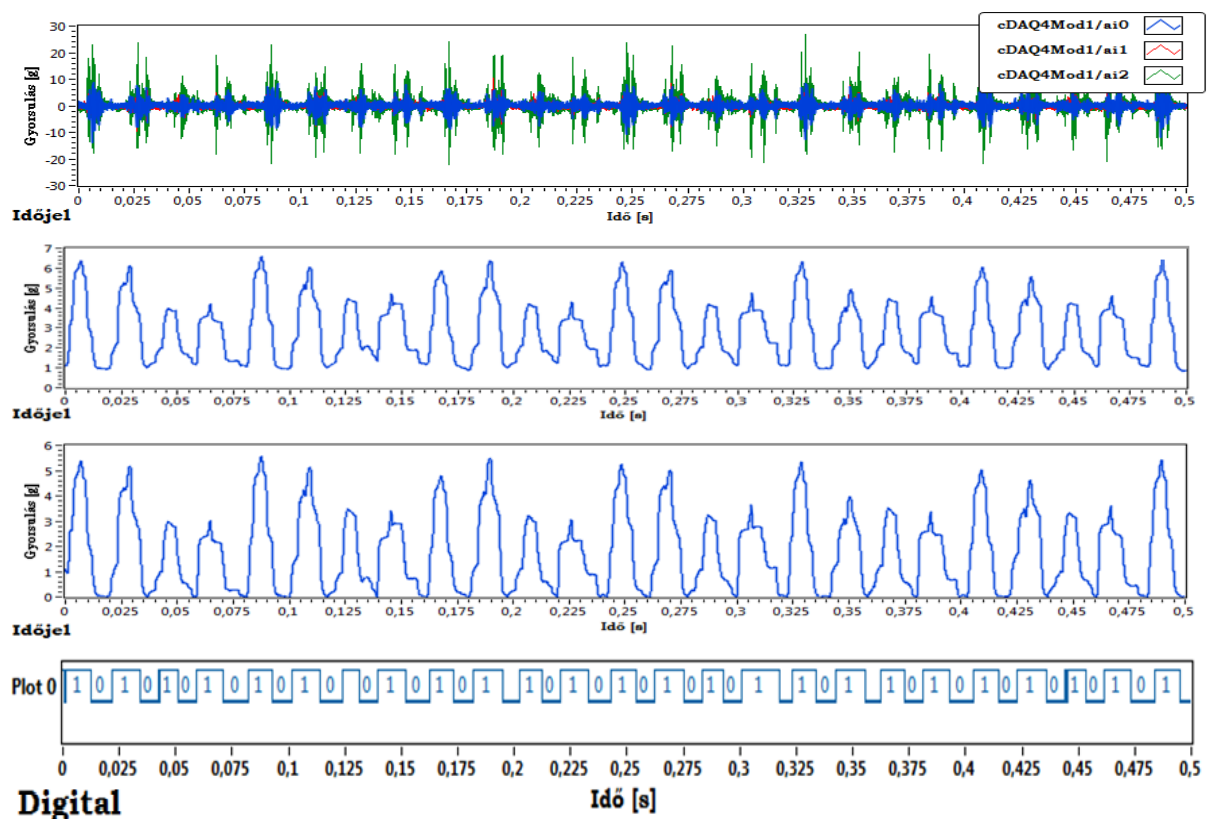


**8. ábra: Keresztirányú rezgések effektív értéke főtengely fázis és a motor működési fázisának függvényében**

### 3.1. Fordulatszámbecslés

A belsőégésű motorok működéséből adódik, hogy benne ciklikusan megjelenő energiatermelő folyamatok játszódnak le. Az ezek során jelentkező tranzien্স folyamatok felhasználhatóak fordulatszámbecslő eljárás során. Amennyiben a berendezés fordulatszáma a keresett paraméter, akkor az megállapítható lenne spektrális, vagy kepstrum analízis segítségével. Ezek elvégzése viszont viszonylag számításigényes és a kellően pontos megállapításhoz érdemes több másodperc hosszúságú jelet alapul venni. Ennél viszonylag egyszerűbb megoldás a jel energiataralmát, vagy egyéb statisztikai paramétereit figyelni, amivel 4 hengeres motor esetén főtengely-fordulatonként két ponton is meg lehet állapítani az elmúlt félfordulat átlagos forgási sebességét. Ez a módszer a spektrális analízishez képest több, egymást követő jelmanipulációs műveletet igényel, azonban lényegesen sűrűbben és hasonló pontossággal nyerhető ki használható adat. A következő diagramokon (9. ábra) (egy

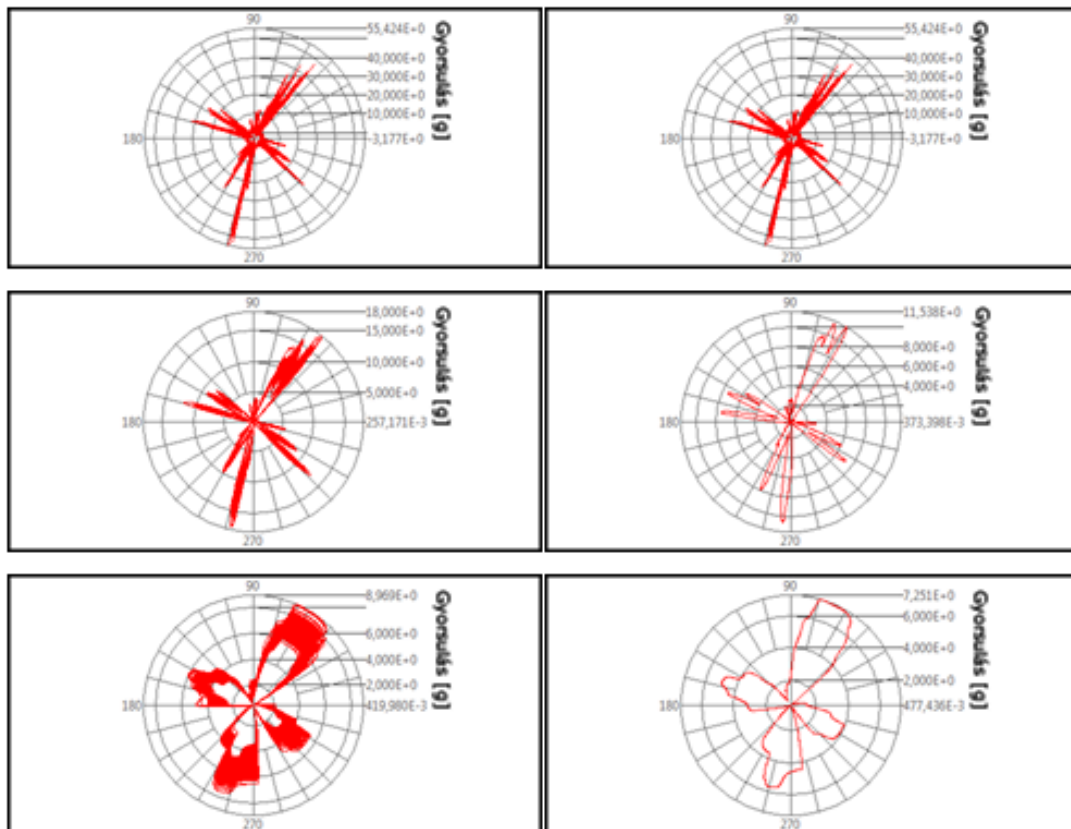
belsőégésű motoron felvett rezgésjelen) a fordulatszámbecslő eljárás során alkalmazott részeredmények láthatók lépésről-lépésre. Először a használt szenzor által szolgáltatott jelekből kell kiválasztani a célnak leginkább alárendelhető mérési csatornát – rezgések esetén nagymértékű eltérések tapasztalhatóak más-más irányban regisztrált gyorsulások között. Az időjelek alapján már jól felismerhető a motorműködés ütemessége, azonban azok időpontjának automatikus meghatározása akadályokba ütközik. Ezt ki lehet küszöbölni a mért jelek energiataralmának csúszó ablakos számításával, mely az 9. ábrán látható, hogy jóval tisztábban mutatja az ütemeket. Az így kapott adatsor feldolgozása már egy küszöbszint-átlépés figyelettel lehetséges. A komparálás előtt célszerű még morfológiai szűrést is végezni, mellyel az alsó holtpontok a zérus szintre húzhatóak, így a küszöbszint meghatározása is könnyebbnek bizonyul, valamint a feldolgozás is robusztusabbá válik. A legelső ütemdiagramon a feldolgozás végeredménye látható, melyben a felfutó élek határozzák meg az egymás utáni hengeraktivitások időpontját.



**9. ábra: Belsőégésű motor fordulatszám-becslésének lépései (fentről lefelé haladva: Mért időjelek, jelek csúszó ablakkal számított effektív értéke, morfológiai szűrés, komparálás)**

### 3.2. Becsült fordulatszám referenciával kapott eredmények

Az előzőekben említésre került a csúszó ablakos effektív érték számítás fogalma. Ennek lényege, hogy az adatsorból egy „ablakhossznyt” kiemelve kerül kiszámításra annak négyzetes középértéke (RMS), majd az így kapott érték kerül a vizsgálati időpontba. Ez a számítás kompromisszumokkal jár, hiszen egy konvolúciós átlagoló szűrő tulajdonságait is magában hordozza. Előnye, hogy jóval tisztább kép kapható az ábrázolás során, azonban a kiértékelés rovására megy, hogy egy ugrásszerű változás meredeksége az alkalmazott ablakhossz függvényében ellaposodik. A következő ábráson (10. ábra) a motor mért rezgés gyorsulása látható RMS számítás nélkül, valamint 50 és 400 minta hosszú ablakméret alkalmazása mellett. Az első esetben tisztán látszanak az egymást gyorsan követő impulzusok is, a kép részletekben gazdag és a pillanatnyi amplitúdók szempontjából jelentősen nagy értékek láthatók. A további ábrázolásoknál az ablakozás a közeli eseményeket fokozatosan összeolvasztja. Az utolsó képen látható módon a motorütemeket már csak egy-egy kiemelkedő buborék jelöli, melyek megjelenése és megszűnése is fokozatosan történik – az említett ablakmérettől függő „elkenő” hatás következtében.



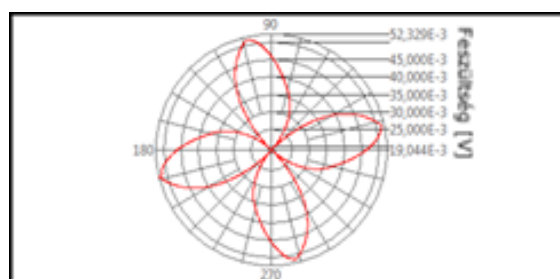
**10. ábra: Motorrezgések és 50, 400 mintás csúszó ablakkal számított effektív értékek ábrázolása (fentről lefele), több fordulat együttes megjelenítésével (balra) valamint 100 fordulat átlagolásával (jobbra)**

A motor több jellemzőjének párhuzamos mérése, majd ezek ugyanazon sebességprofil szerinti szögtartományba konvertálása nagyban segítheti a lezajló folyamatok elemzését, megértését. A vizsgált belsőégésű motor gyújtásimpulzusainak detektálására szolgáló mintavételezett feszültségjellel a gyújtótranszformátor működését lehet indikálni. Vele párhuzamosan a motor keresztirányú rezgéseit megjelenítve polárdiagramon, alapvető összefüggések válnak láthatóvá.



**11. ábra: Gyújtótranszformátor működése és keresztirányú rezgések együttes megjelenítése**

A szikragyújtás a mért feszültségjel elkülönülő szakaszainak váltásakor indul be. Ezek a jelenségek az illusztráció alapján kicsivel 45, 135, 225 és 315°-os fázisszögek utáni helyzetekhez rendelhetők. A gyorsulásjelen látható, hogy ezekben a pontokban rendszerint hirtelen megemelkedik a jel szórása, ezzel együtt energiatartalma is. Ebből következtetni lehet égésből származó rezgéskomponensek megjelenésére, a lüktető fordulatszám során megnövekedett sűrűlódásra, de egyéb tényezőkre is, melyek a gyújtási pillanatot követő láncreakció következményei. A feszültségjel effektív érték számítása ez esetben is segítheti az átláthatóságot, de természetesen csak az előzőekben említett kompromisszumok árán. Ugyanazon mérés módosított adatsora a 12. ábrán tekinthető meg.



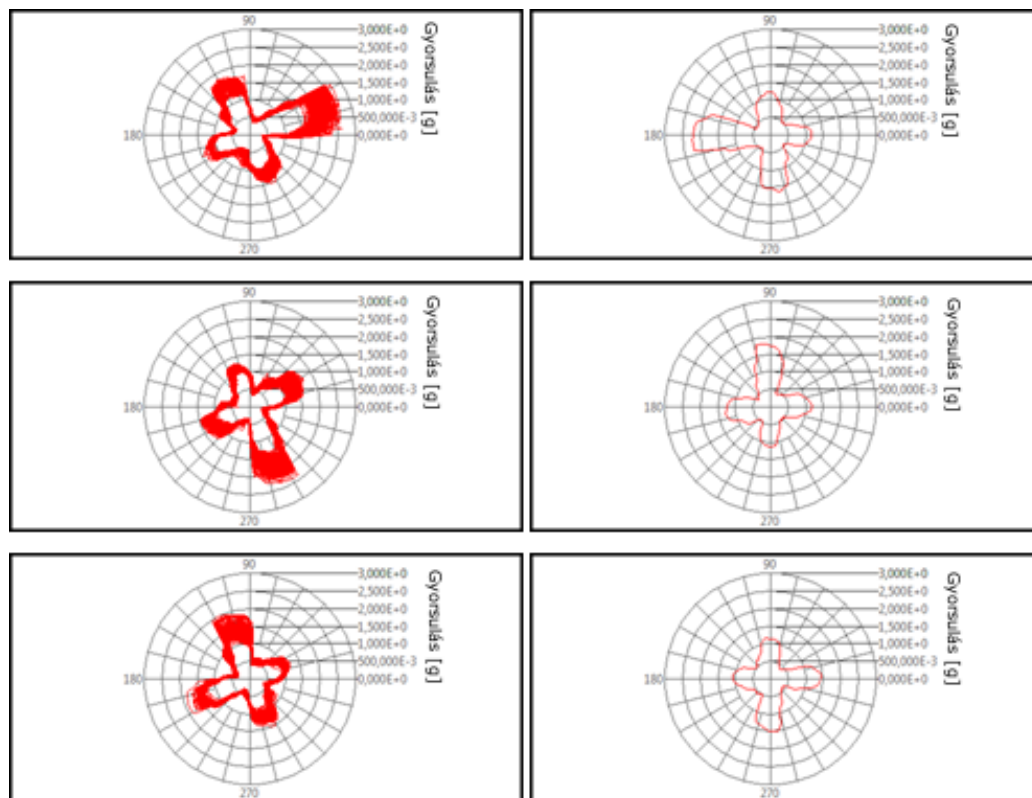
**12. ábra: Gyújtótranszformátor indikálása során mért feszültségjel 400 mintás csúzó ablakkal számított effektív értéke**

### 3.3. Légfesleleg-tényező változásának vizsgálata

A motor rezgésének intenzitásából, a mért jelekből következtethetünk a lezajló belső folyamatok minőségére, gyorsaságára is. A következő példában (13. ábra) a motor 1.1, 1.4 és

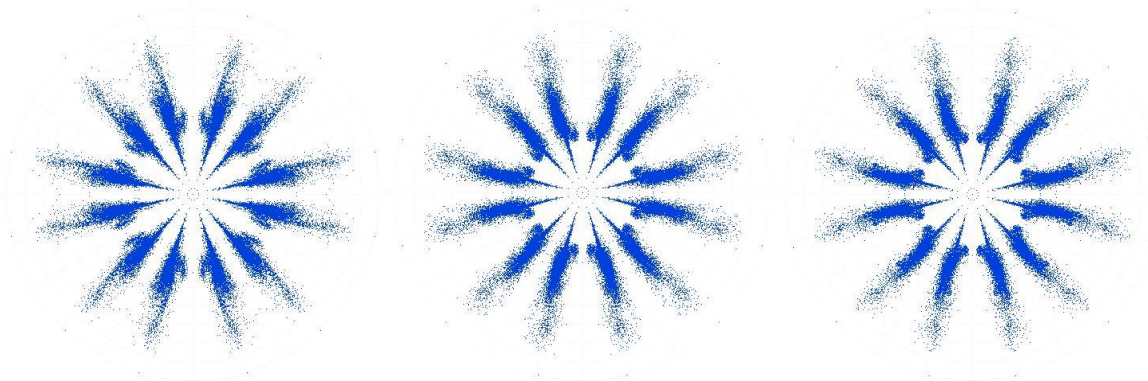


1.6-os légfelesleg tényező melletti üzemeltetése során felvett jelek kerülnek bemutatásra a két módszerrel. Az átlagolt eredmények sokkal tisztább, kiértékelhetőbb eredményt szolgáltatnak (jobb oldali diagramok). Szemmel látható módon a légfelesleg tényező növelésével a rezgés intenzitása csökkenő tendenciát mutat. A szemléltetett eredményt további célokra is fel lehet használni. Például a motortípus karakterisztikus görbéit előre meghatározva a rezgésből számítható a fordulatszám, valamint a rezgésjel effektív értéke, majd ezek alapján következtetni lehet külön mérés nélkül az aktuális légfelesleg tényező mértékére. Természetesen más jellemzők közti korrelációt megfigyelve egyéb konklúziók is levonhatóak.

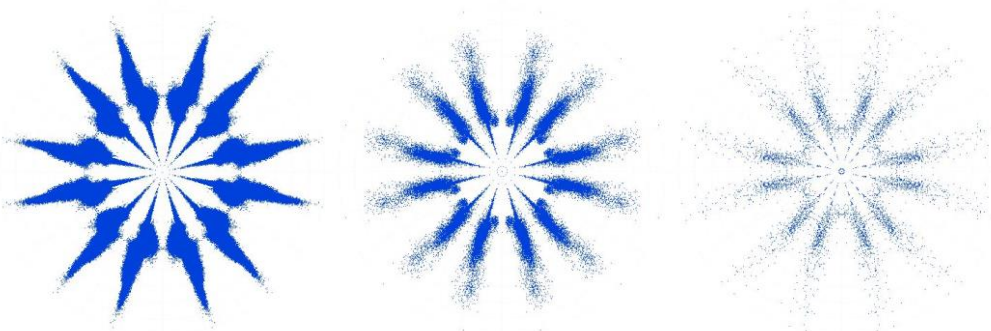


**13. ábra: Keresztirányú rezgések effektív értéke (fentről lefele) 1.1, 1.4, 1.6-os légfelesleg tényezők mellett több fordulat együttes megjelenítésével (balra) valamint 100 fordulat átlagolásával (jobbra)**

Második esetben a referenciajel nélkül alkalmazható SDP módszer adja a megjelenítés alapját. A korábbiakban ismertetett definíció szerint a leképezés eredménye függ a beállított paramétereiktől. Az alábbi ábrák (14. és 15. ábra) gázmotoron mért rezgésjelekből készültek. Látható, hogy az L (Lag) vagy épp a  $\tau$  paraméter változtatásával az alakzat jellege, bár nagymértékben nem, de változik. L növelésével egyre kevesebb mintát vesz számításba az eljárás, így az alakzat kevesebb pontból tevődik össze. A  $\tau$  paraméter változtatásával a különbség jobban szembetűnőbb, de ezzel kapcsolatban is hasonló megállapítás tehető. Az időcsúsztatás növelésével szintén kevesebb pont jelenik meg a polárdiagramon.

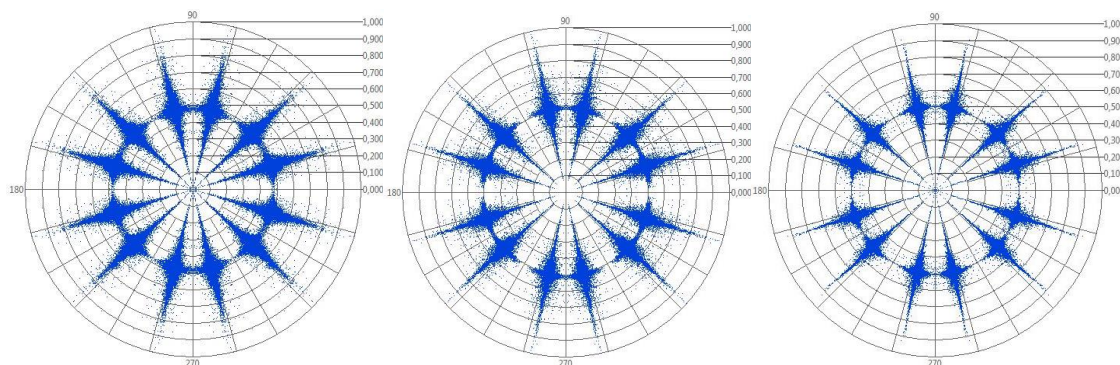


**14. ábra: Az SDP módszer L (Lag) paraméterének változtatásának hatása állandó  $\tau = 0,002s$  mellett  
(L értékei rendre: 25, 100, 1000 minta)**



**15. ábra: Az SDP módszer  $\tau$  (időcsúsztatás) paraméterének változtatásának hatása állandó  $L=100$  mellett  
( $\tau$  értékei rendre: 0.0001s, 0.002s, 0.02s)**

Az alábbi ábrán (16. ábra) eltérő légfelesleg-tényező mellett rögzített jelek SDP képei láthatóak. A légfelesleg-tényező növelésével (balról-jobbra) a létrehozott ábrák a következők szerint változnak. Ahogy korábban már megállapítottuk, a rezgések teljesítménytartalma csökkenő tendenciát mutat. Az SDP módszerben, bár nem a teljesítménytartalmat vizsgáljuk, de a változás itt is látható. A ponthalmaz az égési tulajdonságok romlása miatt egyre inkább összetartóbb lesz és az ágak kismértékben elkezdnek az origó felé húzni.



**16. ábra: Az SDP módszer eredménye 1.1, 1.4, 1.6-es légfelesleg-tényező mellett  
( $L= 35$  minta,  $\tau = 0,0005s$ )**



#### 4. Összegzés

Munkánk során röviden ismertettük a belsőégésű motorok jellemzésére alkalmas paramétereket, majd áttekintettünk azokat a megjelenítési módszereket, melyek képesek egy motor rezgésjeleinek polárdiagramos ábrázolására. Az irodalomban számos ilyen módszer fellelhető, melyek megfelelő működéséhez szükség van a mért berendezés fordulatszámjelére referencia gyanánt. Található olyan módszer is, melynek effajta referenciára nincs szüksége.

Ahhoz, hogy olyan mérési eredményeket is fel lehessen dolgozni, melyek során a fordulatszámot nem rögzítettük, az ismertetett fordulatszámbecslő algoritmussal hoztuk létre a jelfeldolgozáshoz szükséges referencia adatsort. Az eljárás alapját a rezgésjel teljesítménytartalmának csúszóablakos eljárással képzett időfüggvénye adja. A kapott függvényen morfológiai szűrést, majd komparálási műveletet végezve megkapható a szögelfordulás szerint ekvidisztáns jelsorozat, melyben az élváltások jelzik az egyes hengerek aktivitását.

A felkutatott polárdiagramos megjelenítési módszereket alkalmazva a motor fordulatszámától függetlenül vizsgálható az egyes hengerek működési fázisa, valamint ennek köszönhetően a gyújtási időpontok és a rezgésjelek kapcsolata. A gyújtási időpontok meghatározásában nagy szerepet játszott a gyújtótranszformátor feszültségjelének figyelése is. Ezen kívül eltérő légfelesleg-tényezővel járatott gázmotor rezgésjeleit elemeztük, melyek során felfedezhető az összefüggés a légfelesleg-tényező alakulása, valamint a rezgésjelek effektív értékei között. Itt sikerült kipróbálni az SDP módszert is, amely fordulatszám referencia nélkül polárdiagramon jeleníti meg a rezgésjeleket egy szimmetrikus ábra formájában, mely ábrának jellege a légfelesleg növelésével változott.

Kutatási munkánk további lépéseiként az SDP módszer felülvizsgálata és képfeldolgozási irányba való továbbfejlesztése kerülhet szóba, melynek eredményeként pl. a rezgésjelek és a légfelesleg-tényező közötti karakterisztika definiálása körvonalazódhat. A létrehozott fordulatszámbecslő eljárás felülvizsgálata, finomítása, valamint további becslési algoritmusok kidolgozása is célként fogalmazódott meg.

Ezek mellett belsőégésű motorok hibadetektálására is alkalmasak lehetnek a taglalt módszerek, hiszen a gyújtófeszültség, valamint a rezgésjelek polárdiagramos megjelenítésének segítségével a gyújtáskimaradások, és a nem megfelelő hengerműködések is megfigyelhetőek lehetnek. Ezekhez további mérésekre - akár új mérési konfigurációval - és hibák mesterséges előidézésére van szükség.

## Irodalomjegyzék

- Dolatabadi, N – Theodossiades, S. – Rothberg, R.J. (2015): On the identification of piston slap events in internal combustion engines using tribodynamic analysis, *Mech. Sys. And Signal Proc*, vol. 58-59, pp. 308-3024, [doi:10.1016/j.ymsp.2014.11.012](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2014.11.012)
- Chen, A. – Dai, X. (2010): Internal combustion engine vibration analysis with short-term Fourier-transform Yantai, 3rd Int. Congr. On Image and Signal Processing, [10.1109/CISP.2010.5646222](https://doi.org/10.1109/CISP.2010.5646222)
- Geng, Z. – Chen, J. – Hull, B.J. (2003): Analysis of engine vibration and design of an applicable diagnosing approach, *Int. J. of Mechanical Sciences*, vol. 45, pp. 1391-1410, [doi:10.1016/j.ijmecsci.2003.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2003.09.012)
- Geng, Z. – Chen, J. (2005): Investigation into piston-slap-induced vibration for engine condition simulation and monitoring, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 282(3-5), pp. 735-751, [doi:10.1016/j.jsv.2004.03.057](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2004.03.057)
- Barelli, L. – Bidini, G. – Buratti, C. – Mariani, R. (2009): Diagnosis of internal combustion engine through vibration and acoustic pressure non-intrusive measurements, *Applied Thermal Engineering*, vol. 29(8-9), pp. 1707-1713, [doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.07.025](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.07.025)
- Boaghe, O.M. – Billings, S.S. – Li, L.M. – Fleming, P.J. – Liu, J.: (2002): Time and frequency domain identification and analysis of a gas turbine engine, *Control Engineering Practice*, vol. 10(12), pp. 1347-1356, [doi:10.1016/S0967-0661\(02\)00100-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00100-4)
- Zhang, Z. – Sun, Z. (2009): Rotational angle based pressure control of a common rail fuel injection system for internal combustion engines, American Control Conference, 2009. ACC '09., pp. 2690-2695, [10.1109/ACC.2009.5160566](https://doi.org/10.1109/ACC.2009.5160566)
- Internetes hivatkozás letöltve, 2015. Április 7-én a miataturbo.net weboldalról:  
<http://www.miataturbo.net/megasquirt-18/does-ms3-look-right-62430/>
- Charlers, P. – Jyoti, K. – Sinha, F. – Gu, F. – Lidstone, L. – Ball, A (2009): Detecting the crankshaft torsional vibration of diesel engines for combustion related diagnosis, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 321(3-5), pp.1171-1185, [doi:10.1016/j.jsv.2008.10.024](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.10.024)
- Charlers, P. – Jyoti, K. – Sinha, F. – Ball, A (2010): Application of novel polar representation method for monitoring minor engine condition variations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24(3), pp.1171-1185, [doi:10.1016/j.ymsp.2009.10.020](https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2009.10.020)
- Pastor, J.V. – García-Oliver, J.M. – Pastor, J.M. – Ramírez-Hernández, J.G. (2011): Ignition and combustion development for high speed direct injection diesel engines under lowtemperature cold start conditions, *Fuel*, vol. 90(4), pp. 1556-1566, [doi:10.1016/j.fuel.2011.01.008](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.008)
- Shibata, K. – Takahashi, A. - Shirai, T. (2000): Fault Diagnosis Of Rotating Machinery Through Visualisation Of Sound Signals, *Mechanical Systems And Signal Processing*, vol. 14(2), pp. 229-241, [doi:10.1006/mssp.1999.1255](https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1255)
- Wu, J-D. – Chuang, C-Q (2005): Fault diagnosis of internal combustion engines using visual dot patterns of acoustic and vibration signals, *NDT & E International*, vol. 38(8), pp. 605-614, [doi:10.1016/j.ndteint.2005.02.007](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2005.02.007)
- Delvecchio, S. – D'Elia, G. – Mucchi, E. – Dalpiaz, G. (2010): Advanced Signal Processing Tools for the Vibratory Surveillance of Assembly Faults in Diesel Engine Cold Tests. ASME. *J. Vib. Acoust*, vol.132(2), [doi:10.1115/1.4000807](https://doi.org/10.1115/1.4000807)