

SZENT ISTVÁN EGYETEM

BELSŐÉGÉSŰ MOTOROK MŰKÖDÉSI MIKROFOLYAMATAINAK
ANALÍZISE A GÉPÜZEMELTETÉS CÉLJÁBÓL

Doktori értekezés tézisei

Bárfai Zoltán

Gödöllő

2001.

A doktori program

Címe: Agrárenergetika és Környezetgazdálkodás

Tudományága: Műszaki tudomány

Vezetője: Dr. Kocsis Károly C.Sc.
egyetemi tanár, igazgató
Szent István Egyetem, Gödöllő
Európai Tanulmányok Központja

Témavezető: Dr. Faust Dezső C.Sc.
egyetemi tanár, intézetigazgató
Szent István Egyetem, Gödöllő
Rendszertechnika Intézet

.....
A programvezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

ELŐZMÉNYEK, CÉLKITŰZÉSEK

Az emberiség által felhasznált energia jelentős része a belsőégésű motorok használatához kötődik. A tömeges használat komoly terhelést jelent a környezetre. Ezzel is magyarázható, hogy a kutatás-fejlesztés, a gyártás és az üzemeltetés területén nagy erőfeszítések történnek a motorok energetikai hatásfokának javítására és a káros anyagok kibocsátásának csökkentésére.

Munkám a motorok üzemeltetési szempontból lényeges energetikai jellemzőinek a működési mikrofolymatok elemzésén alapuló vizsgálatára irányult. A Rendszertechnika Intézet korábbi méréseire, műszerfejlesztési és üzemi tapasztalataira építve a belsőégésű motor mikrofolymatait a főtengely szögsebesség-változásának mérésén keresztül vizsgáltam. Ilyen irányú elméleti, illetve valós üzemi körülmények közötti mérésen alapuló kutatások már folytak, ezek azonban a motor változó terhelés melletti (instacioner) állapotára vonatkoztak.

A Rendszertechnika Intézet -vizsgálati módszerhez kapcsolódó- műszaki fejlesztési tevékenységében az elmúlt évtizedben részt vettem. Jelen munkámmal a kidolgozott vizsgálati módszer gyakorlati alkalmazhatóságának igazolását, illetve annak továbbfejlesztését céloztam a belsőégésű motorok üzemeltetésének fejlesztése érdekében.

A kidolgozott vizsgálati eljárás egy többfunkciós fedélzeti mérőberendezés kifejlesztésének megalapozásával a személy- és haszongépjármű gyártáshoz hasonlóan a traktormotor gyártásban is lehetőséget biztosíthat a kor igényeinek megfelelő technikai előrelépéshez. Ennek alapja, hogy a beépített fedélzeti műszerek nem csak a gazdaságos, környezet- kímélő gépüzemeltetést, hanem a diagnosztikai- és szerviz tevékenység megújulásával a költségtakarékos gépüzemfenntartást is elősegítik.

Az értekezés célkitűzései

Munkám általános célja az értekezéshez kapcsolódó eredményekkel a belsőégésű motorok gazdaságos üzemeltetésének elősegítése, műszaki diagnosztikájának fejlesztése, a gépüzemeltetés információs rendszerének támogatása.

Értekezésem célkitűzéseit részletesen az alábbiakban határozom meg:

1. Mérési, adatfeldolgozási módszer kialakítása belsőégésű motorok működési mikrofolymatainak elemzésére a főtengely-szögsebesség változásának vizsgálata alapján.
2. A mérési módszernek megfelelő pontosságú mérőrendszer és mérőprogram összeállítása belsőégésű motorok főtengely-szögsebesség változásának vizsgálatára.

3. A mikrofolyamat elemzési módszerre építve a főtengely szögsebesség-változása, valamint a fékpadai méréssel meghatározható, a gépüzemeltetés szempontjából is lényeges motorjellemzők (nyomaték, fordulatszám, teljesítmény, hajtóanyag-fogyasztás) közötti összefüggések feltárása.
4. Matematikai modell kialakítása belsőégésű motorok teljesítményének meghatározására, a főtengely-szögsebesség változás vizsgálata alapján.
5. Matematikai modell kialakítása belsőégésű motorok hajtóanyag-fogyasztásának meghatározására, a főtengely-szögsebesség változás vizsgálata alapján.
6. A belsőégésű motor főtengelyének szögsebesség-változása és a műszaki állapot közötti lehetséges összefüggések feltárása, a vizsgálati módszer műszaki diagnosztikai alkalmazhatóságának megítélése céljából.
7. Egy többfunkciós fedélzeti mérőberendezés kifejlesztésének megalapozása, melynek segítségével a munkavégzés folyamán is mérhetővé válnak a dízelmotor egyes energetikai jellemzői.

VIZSGÁLATI ANYAG ÉS MÓDSZER

A kísérleti mérőrendszert elsődlegesen azzal céllal alakítottam ki, hogy segítségével bizonyítsam azt a -kutatás alapját képező- munkahipotézist, mely szerint a főtengely-szögsebesség időbeni változásának jellegét meghatározza a főtengelyre ható terhelés nagysága, illetve a motor műszaki állapota.

Ezáltal a főtengely-szögsebesség változásának analízise az üzemeltetés szempontjából lényeges motorjellemzők (pl. effektív teljesítmény, hajtóanyag-fogyasztás) kellő pontosságú meghatározására, illetve műszaki állapot jelzésre, motordiagnosztikai célú felhasználásra ad lehetőséget.

A motor periodikus mikrofolyamatait a főtengely szögsebesség-változásán keresztül vizsgáltam. Működési mikrofolyamat alatt az egy munkaciklusra –a periodikusan ismétlődő energiaátalakulás egy teljes periódusa, négyütemű motor esetében főtengely-szögelfordulásban kifejezve 720 fok - eső főtengely-szögsebesség változások alakulását értem.

A mikrofolyamatokat munkaszakaszokként elemzem. Munkaszakasz a munkaciklus tartamának egy hengerre jutó része, négyütemű négyhengeres motor esetében 180 fok főtengely-szögelfordulás. Négyütemű egyhengeres motor esetében a munkaszakasz egy munkaciklus lefolyásának felel meg.

A vizsgálati módszer összehasonlításon alapul. A főtengely szögsebesség-változásának jellege a motor különböző terhelési- és műszaki állapotában összehasonlítható, így a motor üzemi viszonyai, műszaki állapota értékelhető. A főtengely szögsebessége meghatározható az idő -mint mérhető fizikai paraméter- segítségével.

A mérési módszer a következő munkahipotézisre épül. A belsőégésű motor hengerében a hajtóanyag hengertérbe juttatása és égése kvantált energia bevitel, melynek következtében az expanzió folyamán a főtengely gyorsuló mozgása jellemző. A többi ütem során illetve az erőgép munkavégzésével a keletkezett energia felemésződik. Ez a főtengely negatív értékű szögsebesség-változását, tehát lassulását eredményezi. A szögsebesség változását leíró függvény grafikonjának egyes jellemzőit (pl. a munkaszakaszok gyorsuló ágának meredeksége, amplitúdója) meghatározzák a motor pillanatnyi üzemi viszonyai és műszaki állapota.

Az egy munkaszakaszt jellemző, az említett gyorsuló illetve lassuló szakaszból álló függvény jellegére vonatkozóan az égés folyamatát, a gáz- és a tömegegyerők hatását leíró, az irodalomban fellelhető összefüggéseket tekintetem át. Ezekből különösen az értekezés 8. ábrán bemutatott tangenciális diagram és a 10. ábrán látható, az erők függvény-harmonikusait ismertető diagram mutat szoros összefüggést az általam végzett mérésekkel.

Meg kell azonban jegyezni, hogy míg az említett összefüggések és diagramok a motorban végbemenő folyamatok leírását célozzák, addig én kutatásaim során ezen folyamatok mérésének alapjául szolgáló algoritmusokat kerestem. Az eltérő cél természetesen eltérő megközelítés módot követelt meg. A számomra is alapul szolgáló hivatkozott szerzők célja az volt, hogy a folyamatok mélyén lévő egy-két domináns hatással minél jobban le lehessen írni a folyamat egészét.

A jelenlegi munka végső célja azonban az, hogy a motorban végbemenő folyamatokról, azonos_idejű adatokat tudjunk mérni. Ebben az esetben a jelenségek "külső", sztochasztikus hatásokkal terhelt felülete alapján kell a "belső" hatások számszerűsítését elvégezni. A munkám elkezdésekor felállított és reményeim szerint a továbbiakban bizonyított hipotézis az volt, hogy ha a motor főtengelyének egységnyi szögelfordulásához tartozó időintervallumokat kellő finomságú kvantálással mérni és regisztrálni tudom, akkor az így nyert adathalmaz alapján elvégzett elemzések révén azonos idejű mérésekre alkalmas jellemzőket lehet találni.

Méréseimet a motor különböző beállítási állapotaiban, laboratóriumi körülmények között végeztem két különböző típusú dízelmotoron, két egymástól független, részben a mérési elvben, részben a mérőkapacitásban különböző, saját fejlesztésű és összeállítású mérőrendszer segítségével a következők szerint:

1. **Külső terhelés mellett**, fékpadi mérésekhez kapcsolódóan négyhengeres, négyütemű soros PERKINS 1004-4T típusú dízelmotorokon. A fékpadi mérések során felvettem a vizsgált motor regulátoros jelleggörbáját maximális hajtóanyag adagolás (töltés) mellett, a terhelés változtatásával. További méréseket végeztem terhelési jelleggörbék felvételéhez. A terhelési jelleggörbe a hajtóanyag-fogyasztás oldaláról jellemzi a motor teljesítőképességét. Ismerete dízelmotor esetén a füstölési határ illetve a fajlagos fogyasztás intenzív növekedése kezdetének megállapításához ad segítséget. A vizsgálatot a terhelés és a töltés egyidejű növelésével $n_1=1600 \text{ min}^{-1}$, $n_2=2000 \text{ min}^{-1}$, és $n_3=2400 \text{ min}^{-1}$ állandó értéken tartott fordulatszámokon végeztem.
2. **Terhelés nélkül**, a motorbeállítási hibák hatásának vizsgálatára egyhengeres OETL ADN 60W típusú dízelmotoron mesterségesen előidézett, különböző mértékű műszaki állapot változtatások mellett $n_1=1000 \text{ min}^{-1}$, $n_2=1500 \text{ min}^{-1}$ és $n_3=2000 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámokon. Két szerkezeti egységen, a porlasztón és a levegőszűrőn mérhető műszaki állapot változások hatását vizsgáltam külön-külön. Ehhez a porlasztó nyitónyomását 205 bar és 125 bar értékre állítottam. A levegőszűrő eltömítéséhez 100%-os, 50%-os fojtást és fojtás nélküli állapotot állítottam be.

A főtengely szögsebesség-változásának vizsgálatára alkalmazott kísérleti mérőrendszerek

A kvantált- és ciklikus energia bevitellel összefüggő főtengely gyorsulások és lassulások méréséhez szükséges, hogy a főtengely-szögsebesség, illetve a szögsebesség változás mértékének meghatározása kellő pontossággal és felbontó képességgel történjen. Tekintettel, hogy az alkalmazott elektronikus rendszerek órajelét mindenkor kvarcoszcillátor állította elő, ugyanakkor a mért jellemzők alapadatai mindenkor idő dimenziójúak, a pontosság ilyen értelmű további vizsgálata szükségtelennek látszott.

A mérési feladat megoldására két lehetséges méréstechnikai módszerrel és ennek megfelelően két különböző működési elvű jeladóra épülő mérőrendszerrel végeztem kísérleteket. A vizsgálatok során a következő jeladókat alkalmaztam:

1. A főtengelyre szerelt inkrementális optoelektronikus jeladó.
2. A lendkerék-fogaskoszorú fölött elhelyezett Hall-jeladó.

A főtengely szögsebesség-változásának vizsgálata Hall-jeladóval

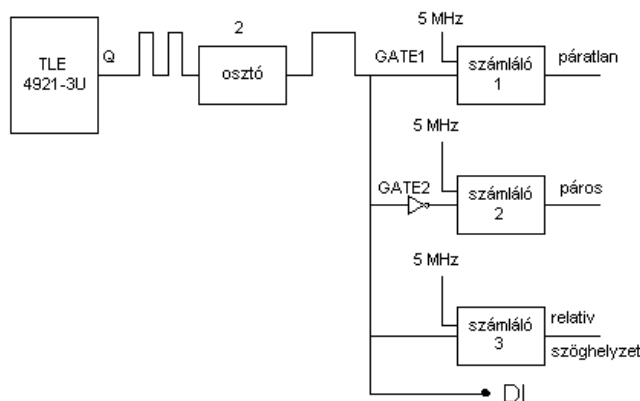
Az inkrementális jeladóval végzett vizsgálatok eredménye ismeretében célul tűztem ki egy olyan mérési elrendezés vizsgálatát, amely a vizsgált motor szerkezeti elemeinek felhasználásával is működőképes. Az inkrementális optikai jeladó felszerelése mindenkor a motor körülményes megbontásával jár, valamint speciális tengelykapcsoló beiktatása szükséges a főtengely és a jeladó tengelye közé. Ezzel szemben, ha a lendkerék fogaskoszorút alkalmazzuk a jeladó részeként, úgy a mérések minimális szerelés után kivitelezhetők.

Így a megelőző kutatási eredmények tapasztalataira építve módosítottam a mérőrendszer összeállítását és új mérőrendszert állítottam össze a korábbihoz hasonló vizsgálati célokkal. Az értekezés ezen mérőrendszerrel végzett vizsgálatok eredményét tartalmazza.

A Hall-jeladóra épülő kísérleti mérőrendszer elemei:

1. Dinamikus differenciál Hall-jeladó
Típus: TLE 4921-3U
2. Többfunkciós számláló/időmérő digitális I/O Mérőkártya
Típus: PCL-836
3. PC és mérőprogram.

A méréselrendezési vázlatot az *1. ábra* mutatja.



1. ábra. Méréselrendezési vázlat Hall-jeladó esetén.

A jeladó Hall-szonda egy kis méretű félvezető lapka, amelyet a lendkerék fogaskoszorú fölé helyeztem el kötőcsavaros rögzítéssel. Így fordulatonként a fogszámnak megfelelő jelmennyiség áll elő. Többszöri kísérlet eredményeként az érzékelő és a fogaskoszorú közötti távolság megfelelő értéke 0,55 mm-re adódott.

A Hall-feszültség erősítését az erősítő és szűrőegység végzi. A szűrés a zajnyomás miatt szükséges. A feszültségjel az osztó- és illesztő egységen át jut a számlálókba. A mérőfej a mérőszámítógépben lévő kártyához hajlékony kábelon keresztül csatlakozik.

A főtengely szögsebesség-változásának vizsgálatára alkalmazott mérőprogram meghatározza azt az időtartamot, amíg a fogaskoszorú két szomszédos foga a jeladó felett elhalad és az ebből képezhető pillanatnyi fordulatszám értékét. A pillanatnyi fordulatszám értékeknek így meghatározott sorozatát un. text fájl formátumban rögzítettem. Az így képzett adatsorok szolgálták a további elemzések alapadataiként.

A mérőprogram segítségével a fékpadon beállított üzemállapotokban mértük és rögzítettük a főtengely szögsebesség-ingadozását –illetve az ezzel arányos pillanatnyi fordulatszám értéket 720 fok főtengely elfordulás alatt.

A mérések kétféle formában zajlottak:

1. A főtengely adott szögelfordulásához tartozó pillanatnyi szögsebesség értékének meghatározása és rögzítése 720 fok főtengely szögelfordulás alatt. Az így előállított minták a rájuk szuperponálódott zaj miatt további feldolgozásra alkalmatlannak bizonyultak.
2. A főtengely adott szögelfordulásához tartozó pillanatnyi szögsebesség értékének meghatározása 24x720 fok szögelfordulás alatt. A szögsebesség értékek átlagolása és rögzítése 720 fok főtengely elfordulásra vetítve.

További feldolgozásra a 2. módszer bizonyult alkalmasnak, mivel a mért szögsebesség értékek 24 fordulatra vett átlagolása gyakorlatilag zajszűrésnek tekinthető. Ezért tehát feldolgozásra az így előállt mintákat használtam. Minden egyes mérési pontban a terhelés beállítását követően, állandósult üzemi állapotban 15 db mintát vettem. Mivel a vizsgált motorok fogaskoszoróján 115 db (Perkins 1004-4T), illetve 117 db (OETL ADN 60W) fog van, ennek megfelelően minden minta 230, illetve 234 koordináta pontból állt.

Tekintettel, hogy a további vizsgálataim a motorműködés egy munkaszakaszának jellemzőire vonatkoztak, ezért a méréseket a motor üzemi viszonyainak állandósult állapotában végeztem. A munkaszakaszok néhány 10 ms időállandóihoz képest a motor üzemi viszonyainak változásából adódó szögsebesség változások hosszabb idejű tranziens jelenségeként lépnek fel. A mérések során a rendelkezésemre álló külső műszerek segítségével, szemrevételezés alapján megállapított állandósult üzemi állapotban kezdtem meg a mintavételezést. Az ennek ellenére maradó tranziens hatások kiszűrésére matematikai statisztikai módszert alkalmaztam.

Az egyes üzemi állapotokra jellemző, rögzített 15 db mintából további feldolgozásra 5db olyan egymás után eltárolt mintát választottam, melyeknél a korrelációs együttható (ρ) értéke 0,90-nél nagyobb. A korrelációs együtthatót a vizsgált adathalmazok kovarianciájának és az adatok szórása szorzatának hányadosaként állítottam elő az alábbi függvénykapcsolattal:

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\delta_x \cdot \delta_y} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)}} \quad /1/$$

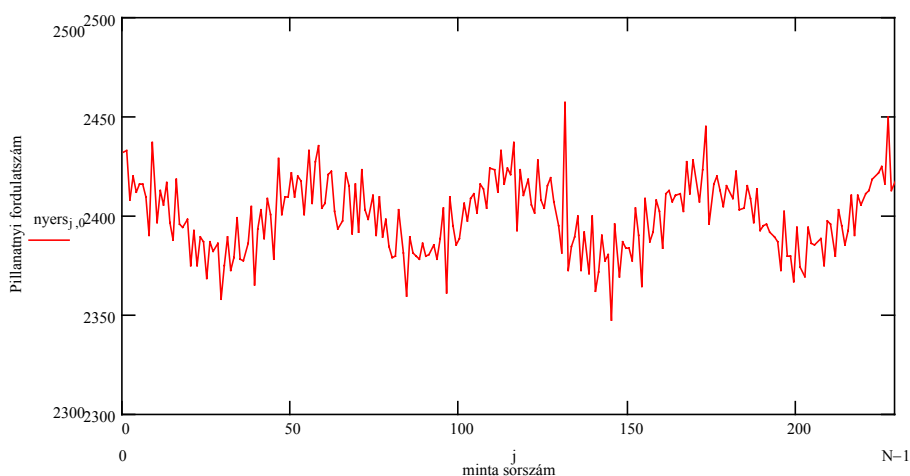
ahol:

- $\rho_{x,y}$ - Korrelációs együttható
- n - A vizsgált adathalmazok száma
- δ_x, δ_y - Az x és y értékek szórása
- n - Az adathalmazok száma

Kiszámítva a kiválasztott minták szórását (s), a szórásnégyzetet (s^2) valamint a variációs koefficienset ($s\%$), szignifikancia vizsgálatként további páronkénti összehasonlítással meghatároztam a szórásnégyzetek hányadosát (F). A kiszámított értékekre bebizonyosodott, hogy kisebbek, mint a $P=5\%$ szinten megadott $F=1,26$ érték, ezért az 5 minta szórása $P=5\%$ szinten szignifikánsan azonosnak tekinthető. A továbbiakban az adott üzemi állapotot jellemző reprezentatív mintaként azt az egyet választottam, melynek adatai a legkisebb szórásúak.

A mérés során nyert elsődleges adatok, a fentebb említettnek megfelelően, 230 db. időadatból álló sorozatok. Az adatsor 0.2 ms nagyságrendbe eső, a $2\pi/115$ radián szögelforduláshoz tartozó időértékekből áll. A jobb áttekinthetőség miatt ezeket az időadatokat első lépésként pillanatnyi fordulatszám értékek diszkrét sorozatává konvertáltam, és minden további elemzést az ilyen formátumú adatokkal végeztem.

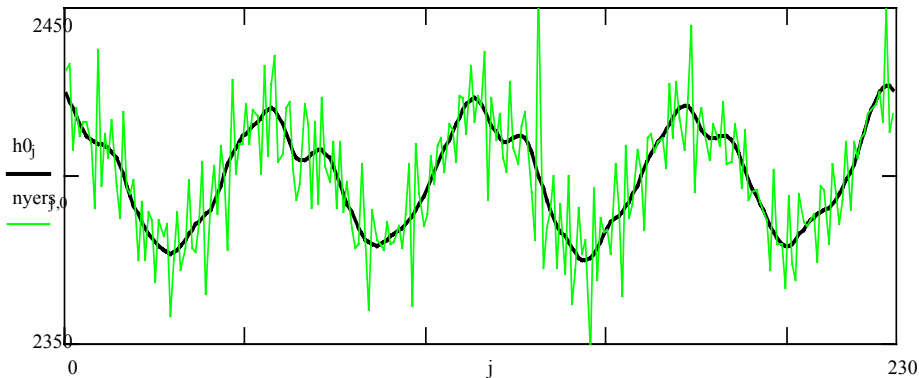
A 2. ábra nyers adatsort mutat $n=2400 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámra a terhelési jelleggörbe egy pontjában.



2. ábra. Nyers adatsor ($n_{\text{átlag}}=2400 \text{ min}^{-1}$, $F=49,05\text{N}$).

Mint a látható, a nyers adatsor szomszédos értékei között előfordulnak olyan fordulatszám ugrások, amelyek nyilvánvalóan nem a lendkeréken fellépő ilyen mértékű gyorsulásból/lassulásból adódnak. Az érzékelők rezgésének és egyéb másodlagos zavaró tényezőknek betudható, magasabb frekvenciájú összetevők kiszűrése céljából a nyers adatsoron diszkrét Fourier transzformációt (DFT) végeztem.

A Fourier transzformált abszolút értékei által alkotott spektrum alapján nyilvánvaló, hogy mivel feltételezzük a jel periodikus voltát, így csak a vonalas spektrum jellegnek megfelelő, a motorfordulat egészszámú többszöröseiként megjelenő harmonikusok veendőek figyelembe. Ezt megerősíti, hogy a domináns, alacsonyabb sorszámú harmonikusok láthatóan ilyenek. Ilyen megfontolások alapján a Fourier transzformáltra alapozott aluláteresztő szűrő határfrekvenciáját 6. harmonikus összetevőre állítottam be. Minden adatsoron ezt a szűrési algoritmust használtam. A 3. ábra magasságó szűrés után előálló adatsort mutat, vízszintes tengelyen a minta sorszámát, a függőleges tengelyen a pillanatnyi fordulatszám értékét min^{-1} -ben feltüntetve.



3. ábra. Magasvágó szűrőssel előálló adatsor ($n_{\text{átlag}}=2400 \text{ min}^{-1}$, $F=49,05\text{N}$).

Az adott szögelforduláshoz tartozó pillanatnyi fordulatszám értéket a mintára jellemző átlagértékhez ($n_{\text{átlag}}$) viszonyítva %-os értékre átszámítottam ($n\%$). Meghatároztam a minta minimális fordulatszámát (n_{min}), maximális fordulatszámát (n_{max}), a kettő különbségét (Δn), a közepes fordulatszámot ($n_{\text{közepes}}$) és a fordulatszám egyenlőtlenséget (δ).

A továbbiakban a főtengelyen mérhető, fordulaton belüli szögsebesség változás eddigiekben bemutatott módon meghatározott időfüggvénye, valamint egyes, az üzemeltetés szempontjából fontos, a későbbiekben részletesen ismertetett motorjellemező paraméterek közötti összefüggés keresését kíséreltem meg.

A mérések elvégzése és az adatok előzetes feldolgozása után a 3. ábrán láthatóhoz hasonló függvények a fékpadon beállított üzemiállapotok mindegyikére vonatkozóan rendelkezésemre álltak.

A mért függvények számos paramétereit megkíséreltem kapcsolatba hozni a motorüzemiállapot jellemzőkkel, hogy a következtetésre legalkalmasabb függvény jellemzőt megtaláljam. Többek között vizsgáltam a kapcsolat szorosságát a motorjellemezők és a mért függvények amplitúdó értékei, az időfüggvények teljesítmény spektrumai között is, de ezek megbízható használatához még további vizsgálatok szükségesek.

Végül az egyes munkaszakaszokhoz tartozó görbék gyorsuló szakaszára simuló, lineáris regresszióval illesztett egyenes meredeksége és a vizsgálatra kiválasztott motorjellemezők között találtam szoros kapcsolatot, így a további munkát ezzel végeztem.

A regressziós egyenes meredekségét az alábbiak szerint határoztam meg:

$$m = \frac{n \cdot \sum x \cdot y - (\sum x) \cdot (\sum y)}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad /2/$$

ahol:

- y - A függő értékeket tartalmazó tömb vagy cellatartomány
- x - A független értékek halmaza
- n - Az adatpárok száma

Vizsgálati körülmények

A vizsgálatok a SZIE Rendszertechnika Intézet valamint a Járművek és Hőtechnikai Tanszék (JHTT) laboratóriumában az MSZ 1658/1970 fékpadi mérésekre vonatkozó szabvány szerint folytak.

A fékpadi vizsgálat során az alábbi, közvetlenül mérhető motorjellemzők kerültek meghatározásra:

1. A főtengely fordulatszáma [min^{-1}], szögsebessége [s^{-1}],
2. A beállított terhelés nagysága (terhelőerő) [kN],
3. Az adott fordulatszámhoz tartozó előbefecskendezési szög [fok],
4. A hűtővíz be- és kimenő hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$],
5. Kipufogógáz hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$],
6. A hűtőlevegő kimenő hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$],
7. Motorolaj hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$],
8. Motorolaj nyomás [bar],
9. 100 g hajtóanyag elfogyasztásának időtartama [s],
10. A fogaskoszorú két egymást követő foga elfordulása közötti időtartam [s].

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Munkámban belsőégésű motorok mikrofolyamatait elemeztem a főtengely szögsebesség-változásának vizsgálatán keresztül. Értekezésem új tudományos eredményeit az alábbiakban foglalom össze:

1. A belsőégésű motorok főtengely-szögsebesség mikrováltozásainak vizsgálatára új mérési módszert, mérőrendszert és mérőprogramot dolgoztam ki.

A módszer azzal jellemezhető, hogy a lendkerék fogaskoszorúja fölött elhelyezett Hall-jeladó, vagy a főtengellyel összekapcsolt inkrementális optikai enkoder által biztosított nagy jelsűrűség (100-1000 impulzus/fordulat) mellett az impulzusok közötti Δt idők kerülnek mérésre és számítógépes rögzítésre.

A Δt időértékek a pillanatnyi szögsebességgel arányosak.

A Δt időértékek alapján a munkaszakaszon belül a motor mechanikus működéséből adódó inflexiós pontok meghatározhatók, illetve a vizsgálni kívánt szakaszok automatikusan kijelölhetők.

Ily módon az időelemek alapján a munkaszakaszok azonos részének automatikus matematikai statisztikai értékelése, a kiválasztott szakaszon a szögsebesség-változás meredekségének meghatározásán keresztül egyes, a gépüzemeltetés szempontjából lényeges motorjellemzők változása egyidejű méréssel regisztrálható.

A vizsgálati eredmények alapján megállapítható, hogy a módszer valamint a mérőrendszer a belső égésű motorok főtengely-szögsebesség mikrováltozásainak mérésére általánosan alkalmazható.

2. A belsőégésű motor különböző terheléshez tartozó üzemállapotaiban a munkaciklusok szükséges statisztikai mintavételi számát újszerűen a korrelációs függvény alkalmazásával határoztam meg.

A mérési adatokból az elemzéshez szükséges reprezentatív mintákat korrelációanalízissel állítottam elő. Ehhez az alábbi korreláció-függvényt alkalmaztam:

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\delta_x \cdot \delta_y} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)}} / 3/$$

ahol:

- $\rho_{x,y}$ - Korrelációs együttható
- n - A vizsgált adatpárok száma
- δ_x, δ_y - Az x és y értékek szórása
- n - Az adatpárok száma

A főtengely egyes szöghelyzeteiben a pillanatnyi szögsebesség meghatározásához szűrést végeztem a nem kívánt és az értékelést megnehezítő zavaró jelek csökkentése érdekében. A nyers mérési adatok szűrésére Fourier-analízist alkalmaztam, az alábbi függvény szerint:

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos kt + b_k \cdot \sin kt) \quad /4/$$

melynek együtthatói:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(\tau) \cos k\tau d\tau \quad /5/$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} f(\tau) \sin k\tau d\tau \quad /6/$$

3. Különböző motorfordulatszámok mellett összefüggéseket állapítottam meg az alábbiak között:

- a motornyomaték és a munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége,
- a motorteljesítmény és a munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége,
- a hajtóanyag-fogyasztás és a munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége.

Ezzel igazoltam a módszer alkalmasságát a motor üzemeltetés szempontjából lényeges energetikai jellemzőinek meghatározására.

Meghatároztam a munkaszakaszokon belüli jellemző szöggyorsulás meredeksége, valamint a motornyomaték, a teljesítmény és hajtóanyag-fogyasztás közötti összefüggéseket leíró függvényeket a vizsgált motorra vonatkozóan. A mérési eredmények feldolgozásával egyértelmű összefüggéseket tártam fel a főtengely szögsebesség-változását leíró függvény grafikonjának egyik jellemzője, a munkaszakaszok gyorsuló ágának meredeksége, valamint az említett motorjellemzők között.

Az előzetes vizsgálatok szerint az összefüggések lineáris jelleget mutattak, így az elemzéshez lineáris regresszió analízist alkalmaztam.

Különböző, állandó értéken tartott vizsgálati fordulatszámokon ($n=1600 \text{ min}^{-1}$, $n=2000 \text{ min}^{-1}$, $n=2400 \text{ min}^{-1}$) valamint a regulátoros jelleggörbe mérési pontjaiban az alábbi összefüggéseket határoztam meg a motorteljesítmény (P), a motornyomaték (M) és a meredekség (m) között:

Nyomaték (M) – meredekség (m) összefüggései:

$$M_{(n1600)} = -1663,8244 \cdot m + 412,8414 \text{ [Nm]} \quad /7/$$

$$r^2 = 0,9960$$

$$M_{(n2000)} = -1435,5976 \cdot m + 642,3380 \text{ [Nm]} \quad /8/$$

$$r^2 = 0,9937$$

$$M_{(n2400)} = -1236,2773 \cdot m + 723,6813 \text{ [Nm]} \quad /9/$$

$$r^2 = 0,9983$$

Teljesítmény (P) - meredekség (m) összefüggései:

$$P_{(n1600)} = -278,7764 \cdot m + 69,1722 \text{ [kW]} \quad /10/$$

$$r^2 = 0,9960$$

$$P_{(n2000)} = -300,6709 \cdot m + 134,5309 \text{ [kW]} \quad /11/$$

$$r^2 = 0,9937$$

$$P_{(n2400)} = -310,7103 \cdot m + 181,8809 \text{ [kW]} \quad /12/$$

$$r^2 = 0,9983$$

Hajtóanyag-fogyasztás (B) –meredekség (m) összefüggései:

$$B_{(n1600)} = -46,7143 \cdot m + 12,5754 \text{ [kg/h]} \quad /13/$$

$$r^2 = 0,9936$$

$$B_{(n2000)} = -57,1914 \cdot m + 27,9598 \text{ [kg/h]} \quad /14/$$

$$r^2 = 0,9982$$

$$B_{(n2400)} = -55,1805 \cdot m + 36,1821 \text{ [kg/h]} \quad /15/$$

$$r^2 = 0,9972$$

A regulátoros jelleggörbe szabályozott szakaszának mérési pontjaiban a meredekség (m), valamint a motorteljesítmény (P), motornyomaték (M) és a hajtóanyag-fogyasztás (B) között a következő összefüggéseket tártam fel:

$$P = -247,576 \cdot m + 155,210 [\text{kW}] \quad /16/$$

$$r^2 = 0,9980$$

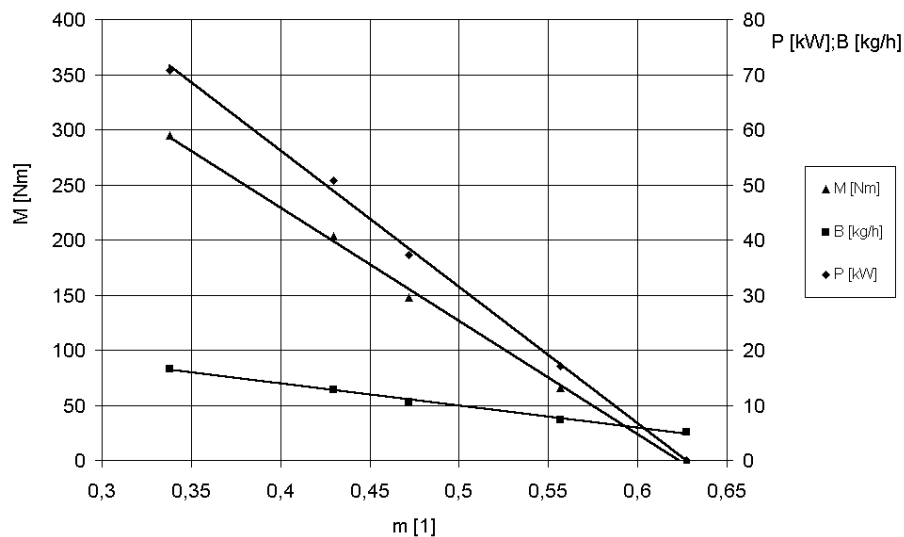
$$M = -1028,77 \cdot m + 640,976 [\text{Nm}] \quad /17/$$

$$r^2 = 0,9979$$

$$B = -40,0591 \cdot m + 29,8967 [\text{kg/h}] \quad /18/$$

$$r^2 = 0,9951$$

Az összefüggéseket a 4. ábra mutatja.



4. ábra. Motorjellemzők a meredekség függvényében.

A kiinduló egyenlet minden motortípusnál módosul. Az egyenletek felépítését motortípusonként kell meghatározni.

4. **Saját mérési eredményekre alapozott matematikai modellalkotással többparaméteres motorteljesítmény meghatározási módszert dolgoztam ki a teljes üzemi tartományra. A modell a motorteljesítmény, a főtengely átlagos szögsebessége, valamint a munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége között teremt összefüggést.**

A teljesítmény számítására a motor teljes üzemi tartományára megfelelő matematikai modell felállításához a vizsgálataim során felvett terhelési görbék 23 mérési pontját a szintén felvett regulátoros jelleggörbe szabályozott szakaszának 5 mérési pontjával kibővítve többparaméteres felületillesztést végeztem.

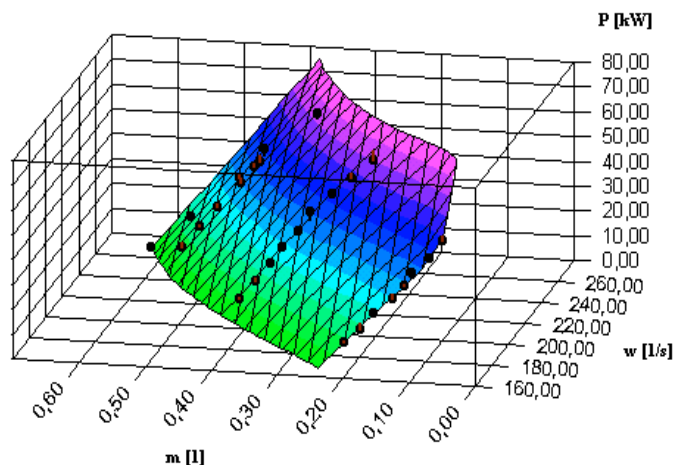
A mérési pontokra illesztett felület (5. ábra) egyenletének megadásával felállított modell két mért paraméter, a főtengely átlagos szögsebessége (ω) és a munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége (m) ismeretében számítja a motor pillanatnyi teljesítményét az alábbi függvénykapcsolatot szerint:

$$P = a + b \cdot \log \omega + c \cdot \log \omega^2 + d \cdot \log \omega^3 + e \cdot \log m + f \cdot \log m^2 + g \cdot \log m^3 \quad /19/$$

ahol:

- P - Motorteljesítmény [kW]
- ω - A főtengely átlagos szögsebessége [s^{-1}]
- m - A munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége [1]
- a,b,c,d,e,f,g - Az egyenlet változói

A kiinduló egyenletet motortípusonként kell optimalizálni.



5. ábra. A PERKINS 1004-4T motor teljesítményét leíró felület teljes üzemi tartományban. P-motorteljesítmény [kW]; ω -a főtengely szögsebessége [s^{-1}]; m-szögsebesség-változás meredeksége [1]

5. Saját mérési eredményekre alapozott matematikai modellalkotással többparaméteres hajtóanyag-fogyasztás meghatározási módszert dolgoztam ki a teljes üzemi tartományra. A modell a hajtóanyag-fogyasztás, a főtengely átlagos szögsebessége, valamint a munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége között teremt összefüggést.

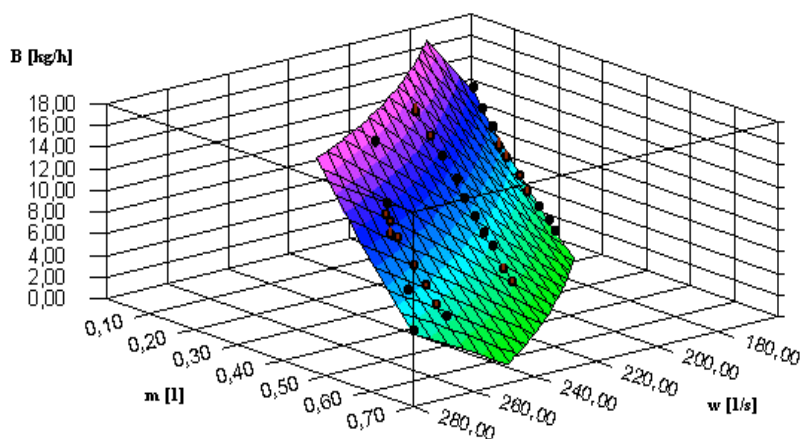
A hajtóanyag fogyasztás számítására alkalmas matematikai modell felállításához a méréseim során felvett terhelési görbék 23 mérési pontját a regulátoros jelleggörbe szabályozott szakaszának 5 mérési pontjával kibővítve felületillesztést végeztem. A mérési pontokra illesztett felület egyenletének megadásával felállított modell két mért paraméter, a főtengely átlagos szögsebessége (ω) és a munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége (m) ismeretében számítja a motor óránkénti hajtóanyag-fogyasztását a következő függvénykapcsolatot szerint:

$$B = a + \frac{b}{\omega} + c \cdot m + \frac{d}{\omega^2} + e \cdot m^2 + f \cdot \frac{m}{\omega} \quad /20/$$

ahol:

- B - Óránkénti hajtóanyag-fogyasztás [kg/h]
- ω - A főtengely szögsebessége [s^{-1}]
- m - A munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége [1]
- a,b,c,d,e,f - Az egyenlet változói

A kiinduló egyenletet motortípusonként kell optimalizálni.



6. ábra. A PERKINS 1004-4T motor hajtóanyag-fogyasztását leíró felület.

B-hajtóanyag-fogyasztás [l/h]; ω -a főtengely szögsebessége [s^{-1}]; m-a szögsebesség-változás meredeksége [1]

6. **Saját mérési eredmények alapján igazoltam, hogy a vizsgálati módszer alkalmas a terheletlen motor egyes szerkezeti egységeinek műszaki állapotában beállt változások, az előírt értéktől eltérő beállítási értékek észlelésére és kijelzésére. Ezzel megalapoztam a módszer továbbfejlesztését motordiagnosztikai célú felhasználásra.**

Az OETL ADN 60W típusú egyhengeres dízelmotoron terhelés nélküli állapotban végzett vizsgálatok eredményeként, két szerkezeti egység a levegőszűrő és a porlasztó esetében megállapítottam, hogy a rendellenes műszaki állapot hatása szignifikánsan jelentkezik a főtengely szögsebesség-változását leíró grafikon menetében.

1. A vizsgált szerkezeti egységek előírással műszaki állapotában valamint a rendellenes működési állapotban felvett szögsebesség-változást leíró görbék jellemzőit összehasonlítva, kimutatható eltérést tapasztaltam.
2. A görbék matematikai analízise eredményeként a levegőszűrő fojtásával végzett vizsgálatok esetében a munkaszakaszra jellemző szögsebesség-változást leíró görbe jellemzői közül az amplitúdó nagyságában mutatható ki változás. A fojtás nélküli állapothoz képest 50%-os fojtásnál 8%-os, míg 90%-os fojtásnál közel 40%-os amplitúdó csökkenés mérhető.
3. A porlasztó nyitónyomásának változtatásakor az előírt értékhez képest 40%-al alacsonyabb nyitónyomás esetén szintén a görbe amplitúdójának méretében van jelentős változás. Ez 20%-os méretcsökkenésben jelentkezik.

Megállapítottam, hogy a vizsgálati módszer jó lehetőséget ad a kutatások diagnosztikai célú továbbvitelére.

KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK

Belsőégésű motorok mikrofolyamatainak elemzésére irányuló, a főtengely-szögsebesség változás vizsgálatára épülő munkám eredményei alapján az alábbi következtetéseket vonom le, illetve javaslom megvalósításra a gépüzemeltetés információs rendszerének fejlesztése érdekében:

1. Különböző dízelmotorokon végzett, az értekezésben részletesen bemutatott vizsgálataim eredménye alapján kijelenthető, hogy a módszer és a mérőrendszer alkalmas belsőégésű motorok főtengely-szögsebesség változásának munkaszakaszonkénti vizsgálatára, a működési jellegzetességek által meghatározott mikrofolyamatok elemzésére.
2. A mérési módszerrel kimutathatók a belsőégésű motor üzemállapotában beállt, állandó terhelésből adódó változások. A bemutatott összefüggések azt mutatják, hogy a módszer alkalmas a motor terhelésének mérésére.
3. A mérési eredmények alapján egyértelmű összefüggés mutatható ki a belsőégésű motor főtengelyének szögsebesség-változását leíró függvény grafikonjának egy jellemzője, a munkaszakaszon belüli szöggyorsulás meredeksége, valamint a motor pillanatnyi teljesítménye között. Ez irányú vizsgálataim eredményei alapján igazolást nyert a módszer alkalmazása a motorteljesítmény meghatározására.
4. A mérési eredmények alapján egyértelmű összefüggés mutatható ki a belsőégésű motor főtengely-szögsebesség változását leíró függvény grafikonjának egy jellemzője, a munkaszakaszon belüli szöggyorsulás meredeksége, valamint a motor hajtóanyag-fogyasztása között. Így megállapítható, hogy a vizsgálati módszer alkalmas a belsőégésű motor hajtóanyag-fogyasztásának meghatározására.
5. A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a bemutatott vizsgálati módszer általánosan alkalmazható a belsőégésű motorok körében. Azonban a belsőégésű motor főtengely-szögsebesség változását leíró függvény grafikonjának egy jellemzője, a munkaszakaszon belüli szöggyorsulás meredeksége és a motor hajtóanyag-fogyasztása valamint a szöggyorsulás meredeksége és a pillanatnyi teljesítmény közötti összefüggések motortípus specifikusak.

A bemutatott kiinduló egyenletek minden motortípusnál módosulnak, a végleges formát a paraméterek statisztikai próbáinak eredményeként lehet felírni. Az egyenletek felépítését motortípusonként kell meghatározni.

6. A mérési eredmények alapján kimutatható, hogy a belsőégésű motor műszaki állapota meghatározza a munkaciklusra jellemző főtengely-szögsebesség változások alakulását. Ez irányú vizsgálataimmal egyértelmű összefüggést mutattam ki a főtengely-szögsebesség változását leíró függvény grafikonjában a munkaszakaszra jellemző amplitúdó, valamint két szerkezeti egység, a levegőszűrő és a porlasztó műszaki állapota, beállítási értéke vonatkozásában.

A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgálati módszer alkalmas a belsőégésű motor egyes szerkezeti egységeinek műszaki állapotában beállt változások észlelésére és kijelzésére.

7. Javaslom a módszer alkalmazhatóságának további vizsgálatát és fejlesztését a motordiagnosztikai célú felhasználás irányába. Megítélésem szerint ez jelentős mértékben hozzájárulna a gépüzemeltetéshez kapcsolódó műszaki kiszolgálás információs rendszerének fejlesztéséhez.
8. Javaslom a módszer diagnosztikai célú alkalmazhatóságának vizsgálatában a kutatások kiterjesztését négyütemű négy- és többhengeres dízelmotorokra. Ez irányú vizsgálatok gyakorlati jelentőségét adja ezen motorok elterjedtsége a mezőgazdasági termelésben, illetve a haszongépjármű iparban.
9. Javaslom egy berendezés orientált áramkör kialakítását, amely fedélzeti mérőberendezésként a géphasználat során a motorteljesítmény- és a hajtóanyag-fogyasztás mérését végezné, ezzel biztosítva az üzemeltetés szempontjából fontos energetikai jellemzők folyamatos, üzem közbeni rögzítését.

A KUTATÁS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓIM

1. **Bártfai Z.:** Számítógéppel támogatott műszaki diagnosztika a mezőgazdaságban. Mosonmagyaróvár, MAE Konferencia, 1995.
2. **Bártfai, Z.:** Analysis of functional microprocess of diesel engines for diagnostic purpose. Opatija, 25th Symposium of Croatian Agricultural Engineering Society, 1997.
3. **Bártfai Z.:** Új módszerek a műszaki diagnosztikában. Keszthely, MAE-CIGR Konferencia, 1997.
4. **Bártfai Z.-Stampel J.:** Egyhengeres dízelmotor diagnosztikai vizsgálata mikrofolyamat analízissel. Gödöllő, MTA Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, 1998.
5. **Bártfai, Z.:** Information Technology Aided Solid Waste Management in Hungary. Philadelphia, USA, XIV. International Conference on Solid Waste Technology and Management, 1998.
6. **Bártfai Z. - Stampel J.:** Dízelmotor terhelésvizsgálata a főtengely gyorsulásának analízisével. Gödöllő, MTA Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, 1999.
7. **Bártfai, Z.:** Analysis of functional microprocess of diesel engines for diagnostic purpose. In: *Hungarian Agricultural Engineering*, No: 11/1998. p. 62-63.
8. **Bártfai, Z.-Török, S.:** Cavitation and transient process of gear pumps. In: *Hungarian Agricultural Engineering*, No 12/1999. p. 73-74.
9. **Bártfai Z.:** Belsőégésű motor terhelésvizsgálata a főtengely szögsebesség-változásának mérésével. In: *Járművek* 1999., 46. évf., 4. sz. p. 15-17.
10. **Bártfai, Z.:** Egyhengeres dízelmotor műszaki állapotának ellenőrzése a főtengely szöggyorsulásának mérésével. In: *Mezőgazdasági Technika* 2000. 41. évf. 4. sz. p.
11. **Bártfai, Z.:** Diagnostics of quality in operation of diesel engines Nyitra, 4rd Conference on Quality and Realibility of Machines, 1999.

12. **Bártfai Z.**-Ilosvai P.-Stampel J.-Dr.Szabó J.: A működési mikrofolyamat-elemzés alkalmazása a hidraulika rendszerek diagnosztizálásában.
Gödöllő, MTA Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, 1991.
13. Dr. Balló B.-**Bártfai Z.**-Dr.Szabó J.-Stampel J.: A működési mikrofolyamat-elemzés alkalmazása a motorok műszaki diagnosztizálásában.
Gödöllő, MTA Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, 1991.
14. **Bártfai Z.**-Geiszler J.: A magyar mezőgazdaság gépesítésének helyzete, műszaki fejlesztési irányai
Izrael, Bet-Dagan, Agricultural Engineering in Small Scale Farming, 1992.
15. **Bártfai Z.**: Belsőégésű motorok folyamatos, üzem közbeni hajtóanyag-fogyasztás és teljesítmény mérése
In: *Mezőgazdasági Technika* 2000., XLI. évf., 12. sz. p. 2-3.