

SZENT ISTVÁN EGYETEM

**BELSŐÉGÉSŰ MOTOROK MŰKÖDÉSI
MIKROFOLYAMATAINAK ANALÍZISE
A GÉPÜZEMELTETÉS CÉLJÁBÓL**

Doktori értekezés

Bárfai Zoltán

Gödöllő

2001

A doktori program

címe: Agrárenergetika és Környezetgazdálkodás

tudományága: Műszaki tudomány

vezetője: Dr. Kocsis Károly
egyetemi tanár, kandidátus
Szent István Egyetem
Gazdaság- és Társadalomtudományi Kar

Témavezető: Dr. Faust Dezső
egyetemi tanár, kandidátus
Szent István Egyetem
Gépészmérnöki Kar
Rendszertechnika Intézet

.....
A programvezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	7
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	11
2.1. A forgattyúmű elmélete	11
2.1.1. Gázerők	11
2.1.1.1. Keverékképzés a dízelmotorban	11
2.1.1.2. Az égés folyamata dízelmotorban	12
2.1.2. Tömegezők	19
2.2. A motor üzemi viszonyai változó terhelés mellett	26
2.2.1. A terhelő nyomaték változó jellege	26
2.2.2. A terhelő nyomaték változásának mutatói	26
2.2.3. A terhelő nyomaték változó jellegének okai	28
2.2.4. A motor nyomaték görbéjének változása	32
2.2.5. A nyomatékok egyensúlya a motor főtengelyén	35
2.2.6. A váltakozó terhelés hatása a traktormotor munkájára	35
2.2.7. A regulátor érzéketlenségi fokának és a traktor tehetetlenségi nyomatékának hatása a motor munkájára a regulátoros ágon	38
2.2.8. A traktormotor munkája a szabad ágon	40
2.2.9. A fordulatszám ingadozása és a teljesítmény alakulása váltakozó jellegű terhelésnél	42
2.2.10. A traktormotor terhelési tényezője	44
2.3. Belsőégésű motorok üzemi jellemzői, vizsgálatuk jelentősége	45
2.3.1. Dízelmotorok üzemi jellemzői	45
2.3.2. A megfelelő műszaki állapot jelentősége	46
2.3.3. A dízelmotorok teljesítményének meghatározása	48
2.3.3.1. A motorvizsgálatok jelentősége	48
2.3.3.2. Külső terheléssel végzett vizsgálatok	49
2.3.3.3. A motorteljesítmény meghatározása közvetett módon	50
2.3.3.3. Modellezésen alapuló motorteljesítmény meghatározás	53
2.4. Dízelmotor terhelésjelzése és –szabályozása	54
2.5. Az irodalmi áttekintés alapján levonható következtetések	55
3. VIZSGÁLATI ANYAG ÉS MÓDSZER	57
3.1. A vizsgálatok előzménye	57
3.2. Vizsgálati módszer	58
3.3. A főtengely szögsebesség-változásának vizsgálatára alkalmazott	

kísérleti mérőrendszerek	59
3.3.1. A főtengely szögsebesség-változásának vizsgálata optikai jeladóra épülő mérőrendszerrel.....	60
3.3.2. A főtengely szögsebesség-változásának vizsgálata Hall-jeladóval	64
3.4. Vizsgálati körülmények	70
3.5. A PERKINS 1004-4T motor bemutatása	71
3.6. A fékpadi vizsgálatok során alkalmazott mérőeszközök bemutatása.....	73
4. EREDMÉNYEK	75
4.1. PERKINS 1004 4T típusú motor vizsgálati eredményei	75
4.1.1. A fékpadi mérések eredménye	75
4.1.2. A motorjellemző paraméterek és a főtengely szögsebesség-változása közötti összefüggések meghatározása	76
4.2. A motorteljesítmény meghatározása a főtengely szögsebesség-változása alapján többparaméteres felületillesztéssel	84
4.2.1. Matematikai modellalkotás a részleges üzemi tartományra	84
4.2.2. Matematikai modellalkotás a teljes üzemi tartományra	89
4.3. A hajtóanyag-fogyasztás meghatározása a főtengely szögsebesség-változása alapján többparaméteres felületillesztéssel.....	92
4.4. OETL ADN 60W típusú motor vizsgálati eredményei	95
4.5. Új tudományos eredmények	98
5. KÖVETKEZTETÉSEK, JAVASLATOK	105
6. ÖSSZEFOGLALÁS	107
SZUMMARY.....	109
MELLÉKLETEK	
M1.: Irodalomjegyzék	111
M2.: A PERKINS 1004-4T típusú motor fékpadi mérési adatai	119
M3.: Vizsgálati adatok a regulátoros jelleggörbe mérési pontjaiban	129
M4.: Vizsgálati adatok az $n=2400 \text{ min}^{-1}$ főtengely fordulatszámon felvett terhelési görbe mérési pontjaiban	143
M5.: Vizsgálati adatok az $n=2000 \text{ min}^{-1}$ főtengely fordulatszámon felvett terhelési görbe mérési pontjaiban	155
M6.: Vizsgálati adatok az $n=1600 \text{ min}^{-1}$ főtengely fordulatszámon felvett terhelési görbe mérési pontjaiban	171

1. BEVEZETÉS

Az emberiség által felhasznált energia jelentős része a belsőégésű motorok üzemeltetéséhez 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.

Mindhárom említett területen új lehetőségeket és távlatokat nyit a mikroelektronika, a mérés technika és a számítástechnika célorientált alkalmazása. A belsőégésű motorokban lezajló mikrofolyamatok újszerű tanulmányozását és a kimunkált eredmények hasznosítását is csak az említett új, fejlett technikák alkalmazása teszi lehetővé.

Munkám a motorok üzemeltetési szempontból lényeges energetikai jellemzőinek a működési mikrofolyamatok elemzésén alapuló vizsgálatára irányult. A Szent István Egyetem Rendszertechnika Intézetének ezen területen folytatott korábbi kutatásaira, műszerfejlesztési és üzemi tapasztalataira építve a belsőégésű motor mikrofolyamatait a főtegel szögsebesség-változásának mérésén keresztül vizsgáltam.

Ilyen irányú elméleti, illetve valós üzemi körülmények közötti kutatások más kutatóhelyeken is folytak, ezek azonban a motor változó terhelés melletti (instacioner) állapotára vonatkoztak.

Mikrofolyamat alatt az egy munkaciklusra –a periodikusan ismétlődő energiaátalakulás egy periódusa- eső főtegel-szögsebesség változások alakulását értem. A vizsgálatok elvégzéséhez a módszer által megkövetelt mérési pontosságot és felbontást biztosító mérőrendszert állítottam össze.

Vizsgálataimat stacioner körülmények között, dízelmotorokon végeztem. Választásomat indokolja, hogy a mezőgazdaság erőgép rendszerének döntő részét dízelmotorok alkotják.

Munkám elméleti hipotézise, hogy a motor működésének jelzett mikrofolyamata visszatükrözi a terhelési viszonyokat, a pillanatnyi üzemállapotot, valamint az egyes szerkezeti elemek műszaki állapotát. A vizsgálati módszer így lehetővé teszi a motor gazdaságos működésének üzem közbeni folyamatos ellenőrzését, a műszaki állapot kedvezőtlen változásának észlelését az üzemeltetés időtartama alatt.

Ezen túl a műszaki állapot és a főtengelyszögsebesség-változás közötti összefüggések feltárására irányuló további vizsgálatok eredményeitől függően hozzájárulhat a műszaki diagnosztika fejlesztéséhez.

Értekezésemben foglalkozom a belsőégésű motor főtengelyszögsebesség-változás vizsgálatához szükséges forgattyúmű elméleti kérdésekkel, ezen belül a gázerők és tömegezők hatásával.

Tárgyalom a motor változó terhelés melletti üzemi viszonyait, mivel a gépüzemeltetés gyakorlata szempontjából meghatározó témáról van szó. Áttekintem a belsőégésű motorok üzemi jellemzőinek mérésére alkalmazott módszereket, a vizsgálatok jelentőségét.

Ismertetem az üzemeltetési paraméterek újszerű mérését célzó fejlesztési megoldást, a kutatómunka keretében elért gyakorlati és tudományos eredményeket.

A gépek, így a belsőégésű motorok üzemeltetési életszakasza kiemelkedően fontos a gazdaságosság, a megbízhatóság, az indokolatlan környezetkárosítás szempontjából. Sajnos ez az életszakasz sokkal kevésbé kutatott és vizsgált, mint az ezt megelőzők.

A Rendszertechnika Intézet vizsgálati módszerhez kapcsolódó műszaki fejlesztési tevékenységében az elmúlt évtizedben tevékenyen részt vettem. Munkámmal a vizsgálati módszer gyakorlati alkalmazhatóságának igazolását, illetve továbbfejlesztését céloztam meg 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, környezetkímélő gépüzemeltetést, hanem a diagnosztikai- és szerviz tevékenység támogatásával a költségtakarékos gépüzemfenntartást is elősegítik.

Az értekezés célkitűzései

A kidolgozott mérési módszer gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálatán keresztül, illetve a módszer továbbfejlesztésével munkám általános célja az értekezéshez

kapcsolódó eredményekkel hozzájárulni a belsőégésű motorok gazdaságos üzemeltetésének, műszaki diagnosztikájának valamint a gépüzemeltetés információs rendszerének fejlesztéséhez.

Értekezésem célkitűzéseit részletesen az alábbiakban határozom meg:

1. Mérési, adatfeldolgozási módszer kialakítása belsőégésű motorok működési mikrofolyamatainak elemzésére a főtengely-szögsebesség változásának vizsgálata alapján.
2. A mérési módszernek megfelelő mérőrendszer és mérőprogram összeállítása belsőégésű motorok főtengely-szögsebesség változásának vizsgálatára.
3. A mikrofolyamat-elemzési módszerre építve a főtengely szögsebesség-változása, valamint a fékpadi 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 vizsgálatára alapján.
5. Matematikai modell kialakítása belsőégésű motorok hajtóanyag-fogyasztásának meghatározására, a főtengely-szögsebesség változás vizsgálatára alapján.
6. Alapozó vizsgálatok elvégzése a belsőégésű motor főtengelyének szögsebesség-változása és a műszaki állapot közötti lehetséges összefüggések feltárásához, a vizsgálati módszer műszaki diagnosztikai alkalmazhatóságának megítéléséhez.
7. Egy többfunkciós fedélzeti mérőberendezés kifejlesztésének megalapozása, melynek segítségével a munkavégzés folyamán is mérhetővé válnak a belsőégésű motorok egyes energetikai jellemzői.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A forgattyús hajtómű elmélete

A forgattyús hajtómű a belsőégésű motor alapvető szerkezeti egysége. Létrehozza a termodinamikai folyamathoz szükséges változó munkateret, miközben a forgattyútengely (főtengely) forgó mozgást végez. Mechanikus mozgás-átalakító szerepe van, alternáló mozgásból forgó mozgást hoz létre. A forgattyúműre ható erők ismerete lényeges a motor kialakítása, szilárdsági méretezése, a kívánatos egyenletes járás biztosítása szempontjából.

Mivel munkám a főtengely-szögsebesség változásának vizsgálatán alapul, így fontosnak tartom a motor forgattyús hajtóművét terhelő gáz- és tömegezők, illetve ezen erőket keltő hatások összefoglaló áttekintését.

2.1.1. Gázerők

2.1.1.1. Keverékképzés a dízelmotorban

A belsőégésű motor a hajtóanyag kémiai energiáját annak elégetésével, a motor főtengelyén hasznosítható mechanikai munkává alakítja át. Dízelmotor esetében az energiaátalakítás folyamatának meghatározó szakasza a hengertérbe juttatott hajtóanyag levegővel történő keveredése, gyulladása és égése. Többek között ennek függvénye a forgattyús főtengely mozgásviszonyait jelentős mértékben meghatározó gázerők nagysága.

A dízelmotorok keverékképzési folyamata a hajtóanyag hengertérbe való befecskendezésével kezdődik. Megvalósításában a hajtóanyag-ellátó rendszer minden

szerkezeti egysége közvetve vagy közvetlenül részt vesz. A motor gazdaságos és megbízható üzemének biztosításához az adagoló szivattyúnak ciklusonként azonos - hengerenként egyenlő- hajtóanyag mennyiséget kell szállítania utólagos befecskendezés nélkül a legnagyobb fordulatszámon is. Minimális fordulatszámon a folyadékoszlop elszakadása nélkül stabilan kell működnie. A hajtóanyag beporlasztását közvetlenül a befecskendező fűvóka végzi, optimális esetben megfelelő nyomáson, utónyitás- és csepegés mentesen. A befecskendezés bonyolult, instacioner folyamat, számtalan konstrukciós tényező függvénye [48,63].

Gyorsjárású dízelmotorokban a befecskendezés időtartama *Ricardo* [58] szerint 1,5-3 ms között változik. A belsőégésű motorokban lezajló energiaátalakulási folyamatokra meghatározó tényező a keverékképzés minősége, melyre közvetlen befolyással vannak a gázolaj penetrációs tulajdonságai és a porlasztás minősége. Az említettek körfolyamatra gyakorolt hatását munkájában vizsgálja *List* [45].

A keverékképzés folyamatát érintő kérdéseket hazai és nemzetközi eredmények alapján *Sitkei* [63] egységes szemlélettel dolgozta fel, kiegészítve azokat saját kísérleti eredményeivel és megállapításaival. A folyamatra vonatkozó, többnyire közelítő jellegű számítási módszerek áttekintésében utal *Pischinger* [52] és *Natanzon* [50] munkájára, melyek e módszerek tökéletesítése terén hoztak jelentős eredményeket. Elméleteik közötti különbség elsősorban abban rejlik, hogy *Natanzon* figyelembe veszi a csővezetékben a fejszelep zárásáig visszaáramló üzemanyag mennyiségét is.

2.1.1.2. Az égés folyamata dízelmotorban

A dízelmotorok égésfolyamatának kutatásához kapcsolódó szakirodalom illetve hivatkozás az 1920-as évek elejéig visszamenően fellelhető. Az égésfolyamat részekre osztásának gondolatával elsőként *Ricardo* foglalkozott 1923-ban. Téziseit a témát érintő későbbi munkáiban is közli. Az égésfolyamat részletes vizsgálata területén nemzetközi vonatkozásban fontosnak ítélem meg *Inozemcev [31]* és *Pischinger [53]* munkáját, továbbá *Vibe* belsőégésű motorok körfolyamatával kapcsolatos kutatási eredményeinek közzétételét [79]. A hazai kutatások vonatkozásában az égésfolyamattal kapcsolatos tudnivalókat legalaposabban *Sitkei [63]* ismerteti.

Az égés folyamatának vizsgálatához kapcsolódó kutatások eredményeként a folyamat négy szakasza jól ismert a következők szerint:

A gyulladási késedelem fázisa a befecskendezés kezdetétől a termikus öngyulladás kezdetéig tart. Fő jellemzői az alábbiakban foglalhatók össze:

- a) a reakciósebességek viszonylag kismértékűek, a reakció termékei közbülső termékek (hidegláng-folyamatok),
- b) a hajtóanyag folyamatosan lép be a hengerbe, felhalmozódva a gyulás kezdetéhez,
- c) a fizikai és kémiai folyamatok okozta nyomás- és hőmérséklet változás gyakorlatilag elhanyagolhatóan kismérvű, a nyomást és a hőmérsékletet gyakorlatilag a kompresszió szabja meg.

Az első fázis végére a hengertérben több tűzfészek keletkezik, melyekben a reakció lángképződéshez vezet.

Az égés második fázisa az öngyulladástól a maximális nyomás eléréséig tart. Gyorsjárású dízelmotoroknál a maximális nyomás helye *Maass és Klier [47]* szerint 7-10 fokkal a felső holtpont után van.

A fázis jellemzői:

- a) a tűzfészek közel egyidejű gyulladása,
- b) az égés tömegsebességének gyors növekedése, mely a fázis végére eléri a maximumát,
- c) a gyulladási késedelem az üzemanyag-koncentráció gyors növekedése mellett folytatódhat,
- d) a nyomás és a hőmérséklet gyors növekedése.

Az öngyulladási pontok száma függ a tüzelőanyag tulajdonságaitól, a porlasztás minőségétől és a tüzelőanyag-cseppek égésterben való eloszlásától. Az öngyulladási pontok száma –melynek a megfigyelések szerint minden üzemállapotban nagy jelentősége van- a terheléssel növekszik [47].

Sitkei [63] megállapítása szerint a pontokból képződő láng terjedési sebessége kinetikai és diffúziós égés esetén 10-30 m/s, de bizonyos térfogatokban a detonációs jellegű öngyulladás feltételei is kialakulhatnak, ahol a láng hangsebességgel terjed.

Az égés harmadik fázisa a maximális nyomástól a maximális hőmérséklet eléréséig tart (20-35° fokkal a felső holtpont után). Jellegzetességei az alábbiak:

- a) maximális sebességű, intenzív égés,
- b) az adagolás befejeződik a légfelcsapás -tényező közelít a minimális értékhez,

- c) a közbenső termékek koncentrációja csökken, míg a végtermékek koncentrációja gyorsan növekszik,
- d) a hőmérséklet emelkedik a maximális értékig, míg a nyomás az expanzió következtében csökken.

Az égés negyedik fázisa a lassú utóégés, a maximális hőmérséklet elérésétől az égés befejezéséig tart. Időtartama mintegy 50%-a a keverékképzés és égés összes időtartamának, mialatt az összes hőmennyiség 10-20%-a kerül bevezetésre.

A fázis jellemzői az alábbiakban foglalhatók össze:

- a) az égési sebesség folyamatosan csökken, a reakció lassan kialszik,
- b) hajtóanyag adagolás nincs, a henger oxigéntartalma közelít a minimális értékhez,
- c) az égés végtermékeinek növekedése, a CO₂ és a H₂O görbéi aszimptotikusan közelednek a maximális értékhez,
- d) a nyomás és a hőmérséklet rohamos esése az expanzió következtében.

A fent említett folyamat az expanzió vonalán jobbra növekvő dugattyúsebesség mellett zajlik. A bevezetett hőmennyiség kihasználása nagymértékben csökken. *Sitkei [63]* megállapítása szerint megfelelő keverékképzéssel a negyedik fázis lefolyása rövidíthető.

Az energiaátalakulási folyamat akkor tekinthető ismertnek ha a nyomás a hőmérséklet és a gázösszetétel változása az égés folyamán ismert. Az energiaátalakulást leíró jellemző függvények az alábbiak:

hőközlésfüggvény:

$$\frac{dQ_h}{d\varphi} = f(\varphi) \quad /1/$$

égésfüggvény:

$$\frac{dQ_{\dot{e}}}{d\varphi} = f(\varphi) \quad /2/$$

falveszteségfüggvény:

$$\frac{dQ_f}{d\varphi} = f(\varphi) \quad /3/$$

Az égésfüggvény az égés során felszabaduló hőmennyiség, a falveszteségi függvény a munkaciklus alatt az égésteret határoló falaknak átadott –vagy azoktól elvett– hőmennyiség, a hőközlésfüggvény pedig a munkaközegnek ténylegesen átadott, illetve attól elvont hőmennyiség változása a forgattyú szögelfordulásának függvényében [15].

Az értekezésemben bemutatott vizsgálati módszer szempontjából az említettek közül különösen fontos az égésfüggvény, melyet *Vibe* [79] félempirikus összefüggésekkel határoz meg. Vizsgálatai alapján az égés kezdetétől mért τ időpontig az egy ciklusba bevezetett hajtóanyag elégett hányada a következők szerint alakul:

$$x = 1 - e^{-ay^{m+1}} \quad /4/$$

ahol:

$$x = \frac{m_t}{m_{t0}} \text{ és } y = \frac{\tau}{\tau_\epsilon} \quad /5/$$

m	Az egy ciklusba bevezetett összes hajtóanyag
t	tömege
0	
m	A ciklus kezdetétől τ időpontig elégett hajtóanyag
t	
τ	Az égés teljes időtartama
\acute{e}	
τ	Az égés kezdetétől a vizsgált időpillanatig eltelt idő

A /4/ egyenlet differenciált alakja a levezetés mellőzésével:

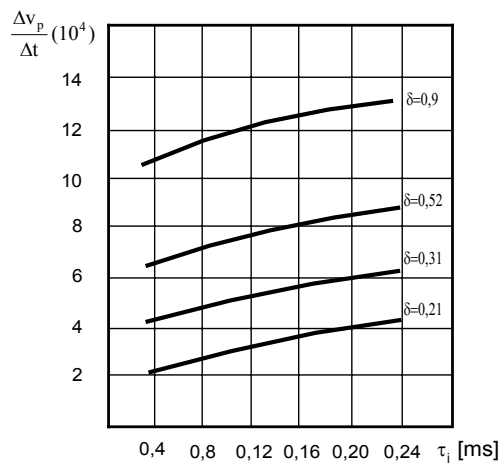
$$w_0 = a(m+1)y^m e^{-ay^{m+1}} \quad /6/$$

A /6/ összefüggésben szereplő a tényező az égés tökéletességét jellemzi, értéke dízelmotorra 6-10, míg m értéke 0,5-1,5, növekedésével az égésfüggvény alakja az elhúzódoó égés jellegének megfelelően alakul.

A kutatások során a hajtóanyag az égéskamrába történő bevezetésétől kezdve a végtermékké való átalakulásáig tartó folyamat elemzésére irányuló vizsgálatokat kiterjesztették a nyomás idő szerinti mérésére, valamint szinképelemzésre.

Sitkei a motorok égésfolyamataival foglalkozó munkájában [63] áttekintést ad a keverékképzés lefolyásáról és az égésre gyakorolt hatásáról a különböző kialakítású égőterekben. Részletesen vizsgálja a dugattyúkamra térfogatának, az égőtér alakjának valamint a keverékképzésben résztvevő egyéb szerkezeti egységek (porlasztó, összekötő csatorna) konstrukciós hatását.

Csepel motoron végzett kísérletek eredménye alapján bemutatja a nyomás- és égési sebesség alakulását a kompresszió ütem alatt. Összehasonlítást ad különböző hengerfal-hőmérsékletek mellett a nyomásgörbék alakulására. Vizsgálja a gyulladási késedelem hatását a nyomásemelkedés sebességére (1. ábra).



1. ábra. A nyomásemelkedési sebesség közepes értékének változása a gyulladási késedelem függvényében *Sitkei* [63] nyomán.

Inozemcev munkájában [31] *Briling* klasszikus vizsgálatára hivatkozik, aki megadja a dízelmotor munkafolyamatának karakterisztikáját különféle tényezők függvényében és kísérleti adatok alapján felállítja az égés lefolyásának törvényét a motor különböző üzemi viszonyaira. Utalást tesz *Csaromszkij* kísérleteire, aki kimutatta a keverékképzés hatását az égésfolyamat kifejlődésére, összefüggést állított fel az égés lefolyása és a szabályozhatóság között és megállapította, hogy a hajtóanyag a hengerben a levegővel alkotott keverék minősége szerint többé-kevésbé egyenetlenül ég el.

Inozemcev közli *Neumann* 1938-ban publikált, ma már klasszikusnak számító összefüggését, mely az égési reakció bimolekuláris jellegéből indul ki:

$$-\frac{dC_B}{d\tau} = K \cdot C_B \cdot C_{O_2} \quad /7/$$

ahol:

- $\frac{dC_B}{d\tau}$ - A hajtóanyag koncentrációjának az égés eredményeként bekövetkező csökkenése az időegység alatt
- C_B, C_{O_2} - A hajtóanyag illetve az oxigén térfogat-mólban kifejezett koncentrációjának értéke a hengerben
- K - A reakciósebesség állandója

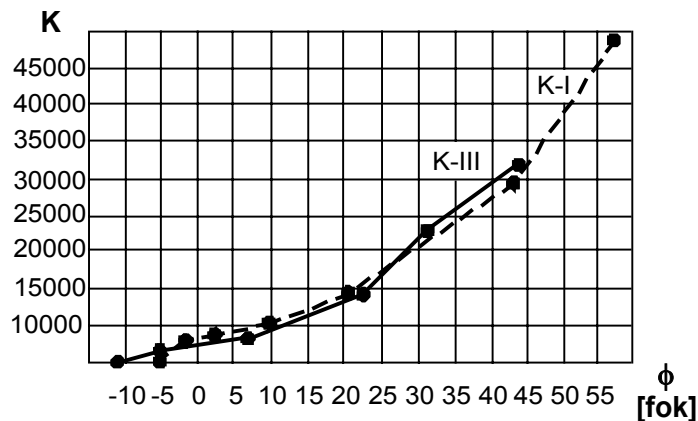
Inozemcev említett munkájában meghatározza a reakciósebesség látszólagos állandóinak fogalmát a hajtóanyag heterogén és homogén égésének eseteire és az égésfolyamat egész terjedelmére vonatkozó értékeik kiszámítására elméleti módszereket ad. Különböző terhelés és előbefecskendezési szög beállításával állandó

fordulatszámokon megadja az égési sebesség csúcscértékének változását a főtengely fordulatszámának függvényében.

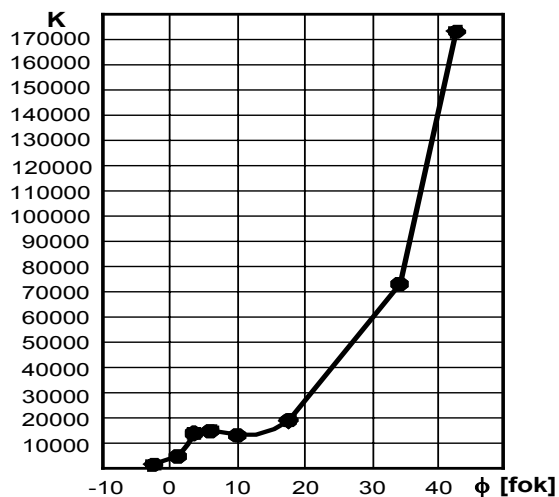
Megállapítja, hogy a fordulatszám csökkenésével a forgattyús főtengely φ_2 szögelfordulása -amely az égés időtartamának felel meg-, valamint a φ_1 szögelfordulás -amely a gyulladási késedelem periódusának felel meg- egyaránt csökken. Növekedik a hajtóanyag mennyiségének azon része, amely a felső holtpont tájékán ég el, melynek következtében a nyomás csúcscértéke növekszik. Azonban a gázok örvénylése mérséklődik, így az égési sebesség csökkenése a fordulatszám csökkenésével a keverékképzés minőségének romlására vezethető vissza.

Az égési sebesség és a hőmérséklet összefüggéseinek vizsgálatára *Inozemcev* állandó fordulatszámokon (1600, 1200 és 1000 min^{-1}) végzett méréseket [31]. Eredményei szerint a "K" sebesség állandó a hőmérséklet emelkedésével kezdetben csekély mértékben, majd a folyamat második felében a hőmérséklet kis mértékű növekedése, sőt csökkenése esetén is rohamosan növekszik.

A sebességállandó exponenciális változását az idő függvényeként és a $\lg K=f(\varphi)$ függvény lineáris voltát *Inozemcev* és *Neumann* is megállapította (2, 3 ábra).



2. ábra. A sebességállandó változása a főtengely szögelfordulása függvényében.
K-I: $n=1600 \text{ min}^{-1}$, K-III : $n=1000 \text{ min}^{-1}$



3. ábra. Az égési sebesség változása a forgattyústengely szögelfordulása függvényében JuMO-4 motornál Inozemcev [31] nyomán.

A 3. ábra esetében a szerző nem közli, hogy a vizsgálatok milyen körülmények között zajlottak (pl. terhelés, fordulatszám), ami megítélésem szerint megnehezíti a bemutatott eredmény értékelését.

Inozemcev az elméleti égéstörvény gyakorlati ellenőrzésére gázelemzést végzett.

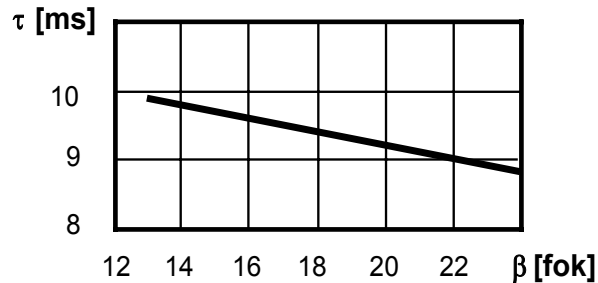
Ezzel is kimutatta a fordulatszám változásának hatását a keverékképzésre és égésre.

Munkájában [31] kísérleti eredményei alapján megállapítja, hogy a főtengely fordulatszámának csökkenése a hajtóanyag rosszabb eloszlását eredményezi az égéstérben. Az égő hajtóanyag mind kevesebb része jut el a kamra kerületi részeibe, az égés mindinkább a kamra közepére koncentrálódik.

A kamra közepén azonban az égésfolyamat rosszabbodik, mivel kellő mennyiségű oxigén hiányában az oxidáció tökéletlen és a CO mennyisége az 1600 min^{-1} fordulat mellett mutatkozó 2%-ról 1000 min^{-1} fordulathoz 6%-ra növekszik. Kimutatta, hogy a gyúlési késedelem végén és az égés első pillanataiban a gázok 0,3-0,5%-ban meghatározhatatlan szénhidrogéneket, 0,2-0,4%-ban hidrogént, 0,4-1,2%-ban metánt és ennél nehezebb szénhidrogént tartalmaznak amelyek oxigén jelenlétében elégséggel maximum 2,5% mennyiségű szénsavat alkottak.

Ide vonatkozó vizsgálataival több motortípuson végzett kísérleteik eredményeként hasonló összetételt mutatott ki V_{as} és $mtsa$ is [76,77].

Az előbefecskendezési szög változtatásával végzett vizsgálatai eredményeként *Inozemcev* kimutatta, hogy a hajtóanyag-befecskendezés kezdetének késedelme esetén az égésfolyamat mindinkább áthelyeződik az expanzió vonalára, ennek következtében az utóégés az expanzió vonalán nagyobb mértékű lesz és a kipufogó gázokkal távozó hőmennyiség növekszik (4. ábra).



4. ábra. Az égésfolyamat időtartamának változása az előbefecskendezési szög függvényében.

2.1.2. Tömegezők

A forgattyúműben a forgó mozgást végző szerkezeti egységek tömegezőket ébresztenek. A forgattyúmű forgó mozgást végző részei:

- forgattyú,
- forgattyúkarok,
- a hajtórúdnak a forgattyúcsapon lévő csapágya,
- a hajtórúd tömegének egy része.

Az utóbbi két tömeget *Kománcsi és mtsa [40]* megállapítása szerint a hajtórúd tömegének 0,725 részével lehet figyelembe venni. A forgó tömegekben ébredő tehetetlenségi erő:

$$F_c = m \cdot r \cdot \omega^2 \quad /8/$$

ahol:

F_c - Centrifugális erő [N]

m - A forgattyúsugárra redukált tömeg [kg]

r - Forgattyúsugár [m]

ω - Szögsebesség [s^{-1}]

A forgó tömegekben ébredő tehetetlenségi erő vektorának nagysága állandó

fordulatszámra nem változik, de iránya körbejár és rázza a motort. Ezért ki kell

egyenlíteni, ami a főtengely fordulatszámával járó ellensúlyokkal oldható meg. Négy- és többhengeres motoroknál szimmetrikus főtengely esetén a forgó tömegek keltette erők ellensúlyok nélkül is kiegyenlítik egymást. Amellett, hogy az erők eredője kifelé nulla, a motoron belül hajlító nyomatékok keletkeznek és periodikusan változó hajlító igénybevétel lép fel [16,27,47].

A dugattyú, a gyűrűk, a csapszeg és [Kománcsi és mtsa, 1978] szerint a hajtórúd tömegének mintegy 0,275 része lengő mozgást végez a lökethossznak megfelelő pályán. A lengőmozgás során jelentős gyorsulások és lassulások lépnek fel. Az erők nagysága és értelme változik, de iránya mindig a hengerfurat geometriai tengelyében van. Az erők nagysága és előjele a forgattyúsög függvényében számítható [40,41,46].

Az első- és másodrendű tömegelő fogalma a dugattyút származtatásából kiindulva könnyen megérthető:

$$x = r(1 - \cos \alpha) + \frac{r}{\lambda}(1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}) \quad /9/$$

ahol:

A dugattyú elmozdulása [m]

Forgattyúsugár [m]

Hajtókararány (r/l)

A forgattyú és a hengerfurat geometriai tengelye által bezárt szög [fok]

- A hajtókar hossza a csapok között [m]

A /9/ idő szerinti kettős differenciálását elvégezve a gyorsulás kifejezhető. Az elsőrendű tömegelő a végtelen hosszú hajtórúd (kulisszás hajtómű) esetén ébredő tömegelő, míg a másodrendű a véges hajtórúd miatt keletkező további erőhatások sorbafejtéssel számított első tagja [40,71,75].

A dugattyú gyorsulása:

$$a = -r \cdot \omega^2 \cdot (\cos \alpha + \lambda \cdot \cos 2\alpha) \quad /10/$$

melynek felhasználásával az első- és másodrendű tömegelő:

$$F_I = m r \omega^2 \cos \alpha \quad /11/$$

$$F_{II} = m r \omega^2 \lambda \cos 2\alpha \quad /12/$$

ahol:

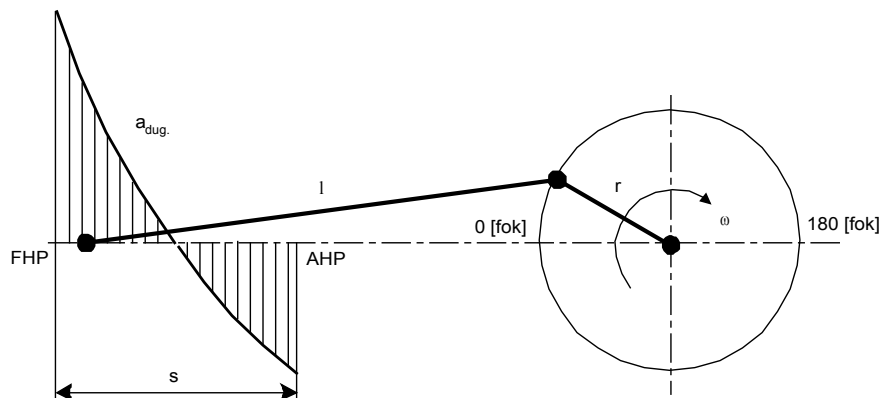
$F_{I,II}$ - A tömegelők összege [N]

m - A lengő mozgást végző tömegek [kg]

a - A dugattyú gyorsulása [m/s^2]

ω - Szögsebesség [s^{-1}]

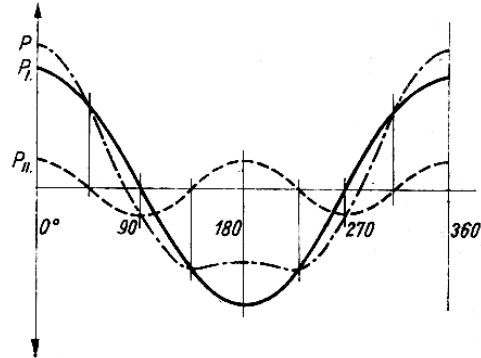
Adott értékek mellett a dugattyú gyorsulása a löket mentén az 5. ábra szerint mutatható be.



5. ábra. A dugattyú gyorsulása a löket mentén Pattantyús [51] nyomán.

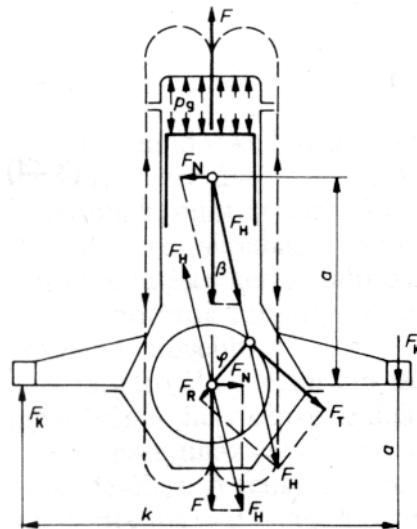
Ludvig [46] szerint tömegerők értéke a felső holtpontban a legnagyobb, mivel itt az első- és másodrendű erők maximális értékei összegződnek. Amint azt a 6. ábra is mutatja az alsó holtpontban a két tömegerő különbsége hat. A forgattyús hajtóműre a gázerők és tömegerők közös eredője hat. A maximális gázerő és a maximális tömegerő ellentétes irányban hat. Az ebből eredő gyengítő hatás csak akkor jelentős ha a motor nagy töltéssel és nagy fordulatszámmal jár. A gázerők nagysága a töltéstől, a tömegerők nagysága a fordulatszámtól függ. [13,15,40].

Ezek alapján megállapítható, hogy a forgattyúmű szilárdsági igénybevétele akkor a legkedvezőtlenebb, amikor a motor nagy töltéssel de kis fordulatszámon –ez az eset áll elő nagy terhelés esetén-, vagy pedig kis töltéssel, de nagy fordulatszámon jár. Megítélésem szerint ennek figyelembevétele a gépüzemeltetés során különös fontossággal bír.



6. ábra. Első- és másodrendű tömegek a forgattyúsög függvényében.

A motor forgattyúkörén érintőlegesen ható -a dugattyúerőkből származó- erőhatás a motor forgatónyomatékát adja. A tangenciális erők a gázerőkből és az alternáló mozgást végző tömegek keltette inerciaerőkből származnak (7. ábra). A motor forgó részei keltette tömegeknek -mivel mindig radiális irányú- nincs tangenciális összetevője [47,27,15].



7. ábra. A belsőégésű motorban ébredő erőhatások.

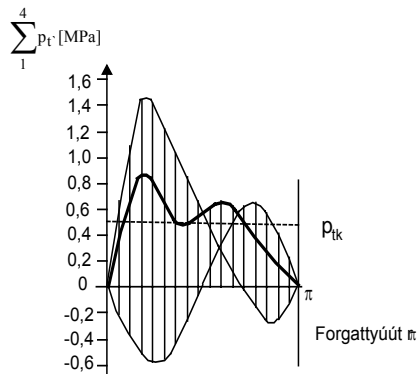
F dugattyúerő; F_N dugattyú oldalnyomás; F_H hajtórúderő; F_T tangenciális erő; F_K támaszerő

A 7. ábra jelöléseivel az F dugattyúerőből -ami a gáz- és tömegeerők összege- az F_T tangenciális erő a következők szerint határozható meg:

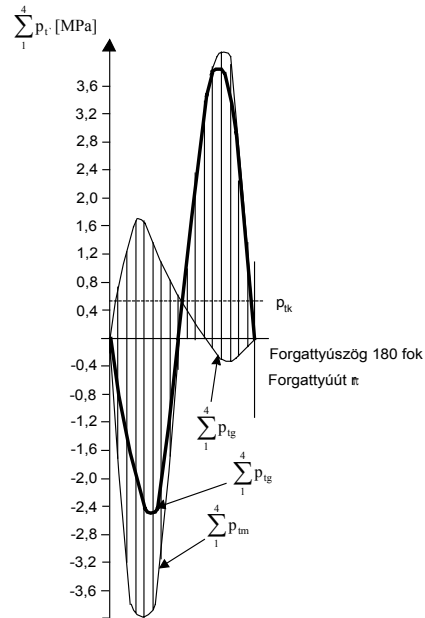
$$F_T = F_H \cdot \sin(\varphi + \beta) = F \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta} \quad /13/$$

A tangenciális diagramokat a szemléletesség érdekében grafikus szerkesztés alapján rajzolják meg. A szerkesztés az indikátor diagram alapján történik. Az egyesített tangenciális diagramoknál a motor terhelését és fordulatszámát is figyelembe kell venni [47]. Jurek [34] szerint ez különösen négyütemű négyhengeres motorok esetében fontos, mert a tangenciális diagram alakját bizonyos fordulatszámok és terhelések jelentősen módosítják. Megállapítását később közölt vizsgálati eredményeim alapján magam is megerősítem.

A fent említetteket támasztják alá Schiroslawski [60] egyhengeres dízelmotoron, valamint Dezsényi és mtsai [15] négyhengeres négyütemű benzinmotoron teljes terhelés, nyitott fojtószelep állás mellett végzett méréseinek eredményei is. Ez utóbbiakat a 8. és a 9. ábra mutatja.



8. ábra.
Négyhengeres négyütemű motor eredő tangenciális diagramja ($n=1500 \text{ min}^{-1}$).



9. ábra.
Négyhengeres négyütemű motor eredő tangenciális diagramja ($n=3500 \text{ min}^{-1}$).

A két diagram alakja szembetűnően más. A 8. ábra a négyütemű négyhengeres motorokra jellemző közismert formának felel meg, az eredő pozitív, míg a 9. ábra szerinti nagy fordulatszámon jól érzékelhető a tömegeroők torzító hatása. A nagy pozitív és negatív területek a négyhengeres motorok rossz kiegyenlítésére mutatnak.

Az egyes működési ütemekben a dugattyúra ható gáz- és tömegeroők állandóan változnak. A főtengeley forgó mozgásának egyenletességét a forgattyúcsapra ható tangenciális erők eredőjének időbeli változása és a lendkerék lendítő nyomatéka szabja meg. A forgattyútengelynek az egyenletes forgástól való eltérése az egyenlőtlenességi fokkal adható meg. Ez a szögsebesség ingadozásnak a motor közepes szögsebességéhez való viszonya:

$$\delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_k} = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_k} \quad /14/$$

A közepes szögsebesség mint számtani középérték is kifejezhető:

$$\omega_k = \frac{\omega_{\max} + \omega_{\min}}{2} \quad /15/$$

A belsőégésű motorok járásegyenletessége a terhelés és a fordulatszám függvénye. Kis fordulatszámon általában -mivel a forgó tömegben tárolható energia a szögsebesség négyzetétől függ- egyenlőtlenebb a motor járása, mint nagy fordulatszámon. Az egyenlőtlenségi fok értékét gépjárműmotorokra *Jurek* [34] 1/200-1/300, motorkerékpár motorokra 1/30-1/100 értékben határozza meg. A motor járásának egyenletessége függ a hengerek számától, a munkaütemek számától valamint a lendkerék méretétől, tömegétől [34,35,71].

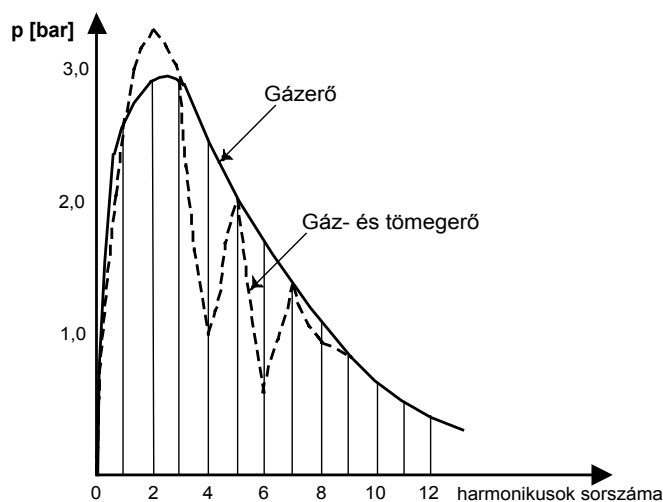
A tangenciális erő (F_T) és a forgattyúsugár (r) szorzata a motor indikált nyomatékát adja.

$$M_i = F_T \cdot r \quad /16/$$

A belsőégésű motorok forgattyús tengelye a normális működésből származó csavaró- és hajlító igénybevételen felül járulékos igénybevételnek is ki van téve. Különösen veszélyes a csavaró lengésekből ébredő igénybevétel, amely a forgattyús tengely fáradásos törését okozhatja [13,14,16]. Ezt támasztja alá négyhengeres motor forgattyús hajtóműve csavarólengéseinek vizsgálati eredményeivel *Finichiu* [22] is.

Dezsényi a gáz- és tömegezők keltette gerjesztő hatások vizsgálatára irányuló munkájában [14] kiemeli, hogy a motor által kifejtett munka nagyságát a tömegezők nem befolyásolják. Ugyanis az alternáló mozgást végző tömegek keltette erőkből származó tangenciális erő által 2π főtengely fordulat alatt végzett munkamennyiség összege nulla.

Célszerű tehát ezen tömegeket a lehetőségekhez képest csökkenteni. Munkájában a főtengelyre ható erőket analízis útján harmonikusokra bontja a lengésekre káros harmonikusok megállapítása céljából. Vizsgálatai szerint a tömegforgató harmonikusok hatása csak az 1. rendű harmonikusnál veszélyes. A többinél (2,3,4. rendű) az eredő fajlagos gerjesztő erőt kisebb értékre szorítja le mint a gázforgató erő (10. ábra).



10. ábra. Tömegezők harmonikusainak hatása a gázerők harmonikusaira.

Az egyes gázforgató harmonikusok nagysága függ az indikált középnyomástól. A harmonikus erők értékét azért szükséges különböző középnyomások mellett ismerni, mert különböző fordulatszámoknál és terheléseknél a harmonikusok nagysága más.

Tehát a maximális teljesítmény és fordulatszám mellett felvett indikátor diagramból számított harmonikusok nem mértékadók a kisebb terhelések mellett fellépő lengések kialakulására.

2.2. A motor üzemi viszonyai változó terhelés mellett

2.2.1. A terhelő nyomaték változó jellege

A traktormotorok üzemi terhelése a fékpadi vizsgálatok során általában alkalmazott stacioner (állandó) terheléssel szemben leginkább instacioner (változó). Erre a laboratóriumi mérések illetve a szántóföldi körülmények között felvett hajtóanyag-fogyasztási adatok is utalnak. Az eltérés oka a munkagépek változó teljesítményigénye.

A traktormotor üzemi viszonyaival, a változó jellegű terheléssel részletesen foglalkozik *Rázsó és Sitkei [55]*. Tanulmányukban több fontos megállapítást tesznek az üzemi terhelés meghatározására és annak a traktormotor munkájára gyakorolt hatására vonatkozóan. Irodalmi áttekintésükben utalnak *Boltinszkij* kísérleteire,

melyeket speciális fékpadon végzett a motor jellemző mutatói és a változó jellegű terhelés paraméterei összefüggésének vizsgálatára.

Az említett szerzők megállapítják, hogy az üzem közbeni változó terhelés a főtengely fordulatszámának ingadozásához vezet, amely a regulátor szabályzó funkciójából adódóan folyamatos töltés-változtatást eredményez. Szántóföldi körülmények között a terhelőnyomaték nem állandó, a közepes érték körül ingadozik. Ez részben a talajegyenetlenségből következően a kerekek eltérő gördülési ellenállásából és az inhomogén talajszerkezetből származó változó mértékű talajellenállásból adódik.

2.2.2. A terhelő nyomaték változásának mutatói

Rázsó és Sitkei említett tanulmányában [55] részletesen elemzi a regulátor érzéketlenségi foka és a főtengelyre redukált tehetetlenségi nyomaték hatását a motor üzemére. Ismertetik a közepes terhelőnyomaték (M_k) összetevőit a traktormotor főtengelyén:

$$M_k = M_f + M_v + M_\alpha + M_\theta + M_s \quad /17/$$

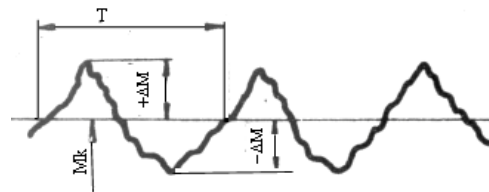
ahol:

- M_f - a gördülési ellenállás nyomatéka [Nm]
- M_v - a vonóerő nyomatéka [Nm]
- M_α - az emelkedési ellenállás nyomatéka [Nm]
- M_θ - a tehetetlenségi erők nyomatéka [Nm]
- M_s - a súrlódási erők nyomatéka [Nm]

A /17/ összefüggésben nincs utalás a kerékcúszás hatására. Azonban szántóföldi körülmények között a hajtókerék vízszintes talajtömörítő munkája miatt az egy kerékfordulatra eső megtett út kisebb lesz mint tiszta gördüléskor. Ennek oka a szlip, melynek további hatása, hogy a haladási sebesség kisebb mint a kerék kerületi sebessége. A szlip elfogadható értéke *Tibold [73]* szerint kerekes járószerkezetre 0,12-0,15, míg láncralp esetén 0,05-0,06. Csökkentésére az üzemeltetőnek számos lehetősége van.

Fekete a motor terhelési tényezőinek vizsgálatával foglalkozó munkájában [21] a fentiekben túl említést tesz a gyorsítás és a TLT hajtásából adódó nyomaték összetevők hatására is, melyek létjogosultsága a mezőgazdasági gépi munkavégzés energetikai jellemzéséhez nem vitatható.

Egynemű környezeti körülmények (talaj, növényzet stb.) esetén a terhelő nyomaték ingadozása az 11. ábra szerint alakul.



11. ábra. A terhelőnyomaték ingadozása Rázsó és Sitkei [55] nyomán.

A terhelő nyomaték változásának mértéke (ΔM) megadható az egyenlőtlenégi fok (δ) és a közepes nyomaték (M_k) segítségével:

$$\Delta M = \frac{1}{2} \cdot M_k \cdot \delta \quad /18/$$

$$\delta = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{M_k}, \text{ ahol } M_k = \frac{M_{\max} + M_{\min}}{2} \quad /19/$$

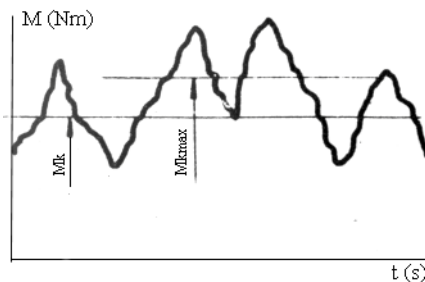
A /19/ összefüggésben szereplő M_{\max} és M_{\min} a terhelőnyomaték maximum illetve minimum értékei. A fentiek alapján megállapítható, hogy:

- a terhelő nyomaték változása jellemezhető az egyenlőtlenégi fokkal (δ). Minél nagyobb a terhelés ingadozása, annál nagyobb a nyomatékváltozás (ΔM) értéke, ami meghatározó a terhelhetőség szempontjából,
- a terhelő nyomaték pillanatnyi értéke periodikusan ingadozik a közepes érték körül. A jelenség fontos fizikai jellemzője a periódusidő (T). A

nyomatékváltozás hatása annál nagyobb, minél hosszabb a periódus időtartama.

Rázsó és Sitkei [55] rámutat a terhelő nyomaték pillanatnyi értékének periodikus változása mellett a közepes nyomaték változására is, melynek jelentős hatása van a traktormotor munkájára (12. ábra). A gépüzemeltetés szempontjából ennek egyik legfontosabb következménye, hogy a motor nem terhelhető huzamosan a névleges teljesítmény 100%-ára.

A tartós terhelés korszerű, nagy rugalmasságú motoroknál 85-88 %-os értéket is elérhet. A dízelmotor tartós teljesítményének meghatározásához a tervezés során az egyes szerkezeti részek hőterhelésének figyelembevétele is szükséges [74].



12. ábra. A közepes nyomaték változása.

2.2.3. A terhelő nyomaték változó jellegének okai

Sík terepen haladásakor a motort terhelő nyomaték összetevői a gördülési ellenállás és a vonóerő nyomatéka. A többi komponens hatása elhanyagolható. Tökéletesen sima talajon haladásakor a gördülési ellenállás (F_f) és annak nyomatéka (M_f) állandó értékű lenne. A valóságban a helyi talajegyenetlenségek a talajellenállás pillanatnyi értékét megváltoztatják.

A gördülési ellenállás növekedése [55] szerint az alábbi összefüggéssel írható le:

$$\Delta F_f = \sum_{i=1}^4 (G_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_i) \quad /20/$$

ahol:

G_i - A vizsgált kerék súlya [N]

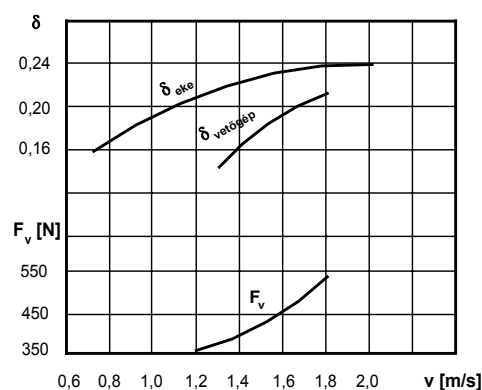
$\operatorname{tg} \alpha_i$ - A talajegyenetlenség okozta helyi felszínemelkedés szöge

A gördülési ellenállás egyenlőtlenségi foka (δ) a szélső értékek illetve a közepes érték segítségével a nyomtérk-egyenlőtlenséghez hasonlóan fejezhető ki. Maximális értéke kedvezőtlen esetben:

$$\delta_f = \frac{2 \cdot G \cdot \operatorname{tg} \alpha}{G \cdot f} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{f} \quad /21/$$

A gördülési ellenállási tényező értéke [73] szerint kerekcsjárószerkezetre 0,02-0,20, míg lánctalpra 0,02-0,15 között vehető figyelembe.

A közepes terhelőnyomaték másik összetevője a vonóerő nyomatéka (M_v). A vonóerő ingadozásának mértéke függ a vontatás körülményeitől és a vontatott gép jellemzőitől. Szántásnál a vonóerő egyenlőtlenségi foka, ahogyan azt a 13. ábra is mutatja a sebesség növelésével növekszik, míg az eketeszámának növelése esetén csökken [55].



13. ábra. A vonóerő egyenlőtlenségi foka Rázsó és Sitkei [55] nyomán.

Fekete szántóföldi körülmények mellett végzett, a vonóerő vizsgálatára irányuló munkájában [20] ide vonatkozóan a gyakorlati gépüzemeltetés szempontjából értékes összefüggéseket tár fel. Elemezte a munkamélység szórása és a vonóerő variációs tényezője közötti összefüggést, valamint az utóbbi szlip/vonóerő függvényre gyakorolt hatását. Vizsgálati eredményei azt mutatták, hogy a vonóerő szórásának csökkentése a szlip csökkenésével és a vonóképesség növekedésével jár együtt. Féligfüggesztett munkagépekkel üzemeltetett traktoros gépcsoport esetére megállapította, hogy helyszabályozás helyett vegyes szabályozással végezve a szántást, a munkamélység szórásának csekély növekedése (55 mm) mellett a vonóerő variációs tényezője 14-15 %-ról 11 %-ra csökkenthető.

Talajművelő gépcsoport energetikai vizsgálata során *Komándi [43,44]* a vonóerő *Gorjacschin-féle* meghatározására utal:

$$F_v = G \cdot f + k \cdot n \cdot a \cdot b + \varepsilon \cdot n \cdot a \cdot b \cdot v^2 \quad /22/$$

ahol:

- G - A munkagép súlya [N]
- f - Gördülési ellenállási tényező (0,3-0,4)
- k - Fajlagos talajellenállási tényező [N/m²]
- n - A művelőtestek száma
- a - Művelési mélység [m]
- b - Egy művelőtest munkaszélessége [m]
- v - Haladási sebesség [m/s]
- ε - Talajszelet-gyorsítási tényező [Ns²/m⁴]

Közúti járművekre a vonóerőt *Rázsó és Sitkei [55]* az alábbiakban adja meg:

$$F_v = \frac{M_m \cdot i_s \cdot i_0 \cdot \eta_e}{r_k} = G \cdot f \cdot \cos \alpha + c \cdot v^2 \pm G \cdot \sin \alpha \pm \delta \cdot m \cdot \frac{dv}{dt} \quad /23/$$

ahol:

- M_m - A motor forgatónyomatéka [Nm]
- i_s - A sebességváltó áttétele
- i₀ - A véglehajtás áttétele
- η_e - Az erőátvitel hatásfoka
- m - A jármű tömege [kg]
- G - A jármű súlya [N]
- f - Gördülési ellenállási tényező
- α - A lejtő szöge
- c - Légellenállási tényező
- v - A jármű haladási sebessége [m/s]
- δ - A forgó tömegek együtthatója
- t - Idő [t]

Az erő- és munkagép kapcsolatában vontatás esetén a terhelés a kereken mint kerületi erő jelentkezik. A kerületi erő két szélső érték között változik, egyenlőtlenségi foka:

$$\delta_k = \frac{F_{k \max} - F_{k \min}}{F_k} = \frac{2 \cdot \Delta F_k}{F_k} = \frac{2 \cdot (\Delta F_v + \Delta F_k)}{F_k} \quad /24/$$

ΔF_k a közepes értéktől való eltérés. A kerületi erőt a vonóhorgon kifejtett hasznos vonóerő (F_v) és a gördülési ellenállás (F_f) alkotja.

$$F_k = F_v + F_f \quad /25/$$

$$\Delta F_k = \Delta F_v + \Delta F_f \quad /26/$$

A kerületi erők egyenlőtlenségi foka:

$$\delta_k = \frac{\delta_v \cdot F_v + \delta_f \cdot F_f}{F_k} \quad /27/$$

ahol:

$$\delta_v = \frac{2 \cdot \Delta F_v}{F_v}; \delta_f = \frac{2 \cdot \Delta F_f}{F_f} \quad /28/$$

A fentiek alapján megállapítható, hogy minél nagyobb arányban szerepel a vonóerő, annak egyenlőtlenségi foka annál inkább meghatározza a kerületi erő egyenlőtlenségi fokát. Mivel a terhelő nyomaték pillanatnyi értéke a nagyobb lehet, mint a közepes érték, a lehetséges nyomatéknövekedés jellemzésére *Rázsó és Sitkei [55]* bevezeti a túlterhelési együtttható fogalmát:

$$v = \frac{M_{kmax}}{M_k} \quad /29/$$

Amennyiben a terhelőnyomatékokot alkotó komponensek növekedése egyidőben történik, TLT hajtással nem rendelkező gép esetében a túlterhelési együtttható közepes értékét a vonóerő- és a gördülési ellenállás nyomatékai, valamint túlterhelési együttthatóik határozzák meg:

$$v = \frac{v_f \cdot M_f + v_v \cdot M_v}{M_k} \quad /30/$$

Rázsó és mtsa említett munkájában utal *Boltinszkij* vizsgálataira. Eszerint a hajtókeréken jelentkező kerületi erő közepes értéke körül periodikusan váltakozó pillanatnyi erő görbéje különböző hullámhosszú és amplitúdójú szinusz görbékkel helyettesíthető.

$$\Delta F_{kx} = \Delta F_k \cdot \sin(m \cdot t_x) = \frac{\delta_k \cdot F_k}{2} \cdot \sin(m \cdot t_x), \text{ ahol } m = \frac{2\pi}{T} \quad /31/$$

A kerületi erő pillanatnyi értéke így:

$$F_{kx} = F_k + \Delta F_{kx} = F_k + \frac{\delta_k \cdot F_k}{2} \cdot \sin(m \cdot t_x) = F_k \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \delta_k \cdot \sin(m \cdot t_x) \right) \quad /32/$$

A motor főtengeyét terhelő nyomaték:

$$M_m = \frac{M_{kx}}{\eta_m \cdot i_s} = \frac{F_{kx} \cdot r_k}{\eta_m \cdot i_s}, \quad \eta_m = 0,975^n \cdot 0,965^m \quad /33/$$

ahol:

- r_k - A hajtott kerék gördülési sugara [m]
- η_m - A hajtásáttétel hatásfoka
- i_o - A hajtáslánc áttételi viszonyzáma
- n - A hajtásban résztvevő homlokfogaskerék-párok száma
- m - A hajtásban résztvevő kúpogaskerék-párok száma

Az előzőek alapján a motornyomaték általános összefüggése:

$$M_m = \frac{F_k \cdot \left(1 + \frac{\delta}{2} \cdot \sin(m \cdot t_x) \right) \cdot r_k}{\eta_m \cdot i_s} \quad /34/$$

2.2.4. A motor nyomatékgörbájének változása

Belsőégésű motorok mérhető forgatónyomatékát (M_m) az effektív középnyomásból származtatva az alábbiak szerint lehet megadni:

$$M_m = \frac{\frac{2}{i} \cdot p_e \cdot z \cdot V_h \cdot n}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{1}{\pi \cdot i} \cdot p_e \cdot z \cdot V_h = c \cdot p_e \quad /35/$$

ahol:

- i - Egy munkaciklus alatt megtett löketek száma
- p_e - Effektív középnyomás [Nm^{-2}]
- z - Hengerszám
- V_h - Lökettérfogat [m^3]
- n - A főtengey fordulatszáma [s^{-1}]
- c - Konstans

Rázsó és Sitkei munkájában [55] az alábbi összefüggésben vizsgálja a motornyomatékot:

$$M_m = A \cdot \frac{\eta_m \cdot \eta_v \cdot \eta_i}{\alpha} \quad /36/$$

ahol:

- A - Motorkonstans
- η_m - Mechanikai hatásfok
- η_v - Volumetrikus hatásfok
- η_i - Indikált hatásfok
- α - Légviszony

Állandó terhelés esetén a motor nyomatéka is állandó lesz. Dinamikus terhelés esetén a terhelő nyomaték folytonos változása állandó szögsebesség ingadozást eredményez a motor főtengelyén. Két eset állhat elő:

1. A főtengely szögsebesség-ingadozása belül marad a regulátor érzéketlenségi területén.
2. A főtengely szögsebesség-ingadozása kilép a regulátor érzéketlenségi zónájából.

Az első esetben a ciklusonként beadagolt hajtóanyag mennyisége nem változik. Az η_v , az α és az η_i értéke lényegesen nem változik. A második esetben a regulátor szabályoz. A légviszony változik, ennek következtében az indikált hatásfok is módosul. Az említett tényezők periodikus változása ciklus-egyenlőtlenséghez vezet. Ez egyrészt kisebb nyomaték kifejtésben, másrészt a motornyomaték periodikus változásában jut kifejezésre.

A csökkenés mértékét az alábbi jellemzők határozzák meg:

- a regulátor érzéketlenségi foka,
- redukált össztehetetlenségi nyomaték,
- a terhelés jellemzői.

A regulátoros jelleggörbe szabad ágán a motornyomaték [55] szerinti alakja:

$$M_m = M_{\max} \cdot \left[1 + \frac{\omega}{\omega_M} - \left(\frac{\omega}{\omega_M} \right)^n \right] \quad /37/$$

ahol:

- M_{\max} - Maximális nyomaték [Nm]
- ω - A vizsgálati szögsebesség [s^{-1}]

ω_M - A maximális nyomatékoz tartozó szögsebesség [s^{-1}]

n - Motortípustól függő tényező, értéke 1,06-1,15

Bevezetve a rugalmassági tényező *Komándi és Váradi [40]* szerinti értelmezését:

$$K = \frac{M_{\max}}{M_e} \quad /38/$$

melyben M_e a névleges fordulatszámhoz tartozó nyomaték. Így a /37/ egyenlet az alábbi alakra hozható:

$$M = K \cdot M_e \cdot \left[1 + \frac{\omega}{a_1 \cdot \omega_e} - \left(\frac{\omega}{a_1 \cdot \omega_e} \right)^n \right], \text{ ahol } a_1 = \frac{\omega_M}{\omega_e} \quad /39/$$

A képletben szereplő a_1 tényező a maximális nyomatékhoz tartozó szögsebesség és a névleges fordulatszámból adódó szögsebesség hányadosa. *Rázsó és Sitkei [55]* n értékére a korabeli traktormotorokra 1,06-1,15 értéket, míg a_1 -re 0,6-0,7 értéket ad meg. A nyomatékgörbe a regulátoros ágon közel lineáris, így a fentiek alapján:

$$M = M_e \cdot \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0 - \omega_e} \quad /40/$$

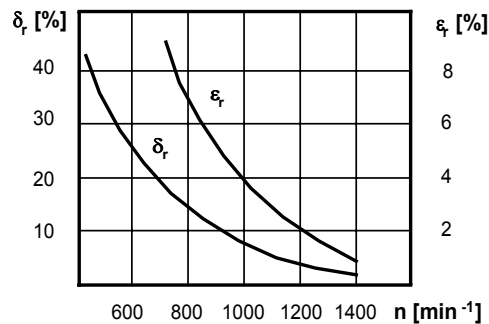
A motornyomaték és a regulátor egyenlőtlenségi foka közötti összefüggés:

$$M = M_e \cdot \frac{\omega_e \cdot c - \omega}{\omega_e \cdot (c - 1)} \quad /41/$$

ahol:

$$\omega_0 = \omega_e \cdot \frac{2 + \delta_r}{2 - \delta_r} \text{ és } c = \frac{2 + \delta_r}{2 - \delta_r} \quad /42/$$

A főtengely fordulatszáma és a regulátor egyenlőtlenségi foka közötti összefüggést a *14. ábra* mutatja.



14. ábra. A regulátor egyenlőtlenségi foka a fordulatszám függvényében
2.2.5. A nyomatékok egyensúlya a motor főténgelyén

A motor által kifejtett nyomaték (M_m) egyensúlyt tart a terhelőnyomaték közepes (M_{kx}) értéke és az inercianyomaték összegével minden terhelési szinten:

$$M_{kx} + \Theta_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} - M_m = 0 \quad /43/$$

A korábbi összefüggések felhasználásával a nyomatékgörbe egyenlete a regulátoros ágon a következő alakra hozható:

$$M_e \cdot \frac{\omega_e \cdot c - \omega}{\omega_e \cdot (c-1)} = \frac{F_k \cdot \left(1 + \frac{\delta_k}{2} \cdot \sin(m \cdot t_x)\right) \cdot r_k}{\eta_m \cdot i} + \Theta_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad /44/$$

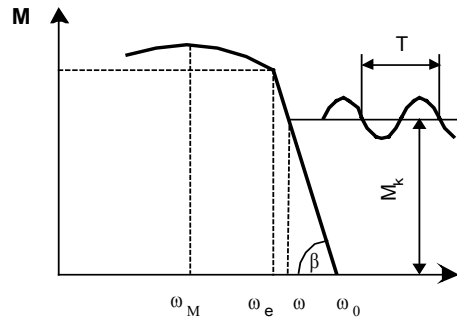
A motornyomaték és a terhelőnyomaték viszonyában három eset lehetséges:

1. $M_m > M_{kx}$: a főténgely gyorsul mozgása a motor fordulatszámának növekedését eredményezi (szöggyorsulás).
2. $M_m < M_{kx}$: a főténgely lassuló mozgása a motor fordulatszámának esését eredményezi (szöglassulás).
3. $M_m = M_{kx}$: stabilis terhelés, állandósult motorállapot.

Ha a terhelés lassan változik, a regulátor működésének hatására a 3. állapot áll elő.

2.2.6. A váltakozó terhelés hatása a traktormotor munkájára

Adott T és δ paraméterekkel jellemzett M_k közepes terhelőnyomaték hatására a regulált ágon dolgozó motor esetén az abszolút érzékeny regulátor a 15. ábrán látható nyomatékgörbét állítja elő.



15. ábra. A terhelőnyomaték változása a regulált ágon.

A nyomatékok egyensúlyából kiindulva *Rázsó és Sitkei [55]* a terhelőnyomaték közepes értéke és a tehetetlenségi nyomaték ismeretében abszolút érzékeny regulátorra inhomogén differenciál egyenlet formájában meghatározza a szögsebesség pillanatnyi értékét. Az egyenlet megoldása a levezetés mellőzésével:

$$\omega = \omega_k + \left(\frac{1}{e^{Bt}} - 1 \right) - \frac{M_k \cdot \delta_k}{2 \cdot \sqrt{\Theta_\Sigma^2 \cdot m^2 + \text{tg}^2 \beta}} \cdot \left[\sin[(m \cdot t) - \varphi] + \frac{m \cdot \Theta_\Sigma}{\sqrt{\Theta_\Sigma^2 \cdot m^2 + \text{tg}^2 \beta}} \right] \quad /45/$$

A fenti kifejezésben:

$$\varphi = \arctg \left(\frac{m \cdot \Theta_\Sigma}{\text{tg} \beta} \right); B = \frac{\text{tg} \beta}{\Theta_\Sigma} \quad /46/$$

A valóságban $\varepsilon > 0$, az érzéketlenségi zónán belül a regulátor nem lép működésbe. Így a motornyomaték nem változik, tehát $\text{tg} \beta = 0$. Ezzel a /45/ egyenlet módosul:

$$\omega = \omega_k - \frac{M_k \cdot \delta_k}{2 \cdot \Theta_\Sigma \cdot m} \cdot \left[\sin \left(m \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right] \quad /47/$$

A szögsebesség minimális és maximális értékei az alábbiak szerint alakulnak:

$$\omega_{\min} = \omega_k - \frac{M_k \cdot \delta_k}{\Theta_\Sigma \cdot m} \quad /48/$$

$$\omega_{\max} = \omega_k \quad /49/$$

A terhelőnyomaték változása a kiinduló ($t=0$) ponthoz viszonyítva a szinuszos függvény pozitív vagy negatív ágára eshet. *Schafer* az üzemeltetés szempontjából a motor fordulatszám csökkenését tartja esetleges kedvezőtlen változásnak [59]. A 16. ábra

három különböző típusú motor szögsebesség ingadozását mutatja $\delta=0,3$ egyenlőtleneségi fok és $T=2$ s periódusidő esetén, 81%-os terhelés mellett [55]. Az ábra felső része regulátor nélküli esetre, míg az alsó rész abszolút érzékeny ($\varepsilon_r=0$) regulátorra vonatkozik. A regulátor érzéketlenségi fokát *Várad* és *Kománcsi* [40] az alábbi összefüggéssel adja meg:

$$\varepsilon_r = \frac{n_1 - n_2}{n_E} \quad /50/$$

n_1 és n_2 - Azon fordulatszámok, ahol a regulátor működésbe lép

n_E - Egyensúlyi fordulatszám

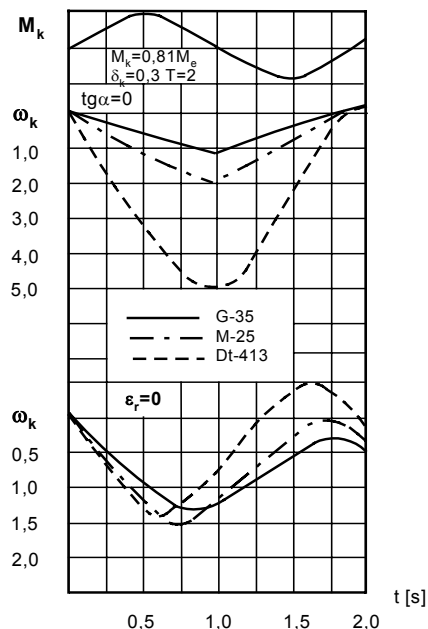
Az /50/ összefüggés a szerkezet súrlódási veszteségeire utal és azáltal jellemezhető, hogy egy adott n_E fordulatszámértékről a terhelés változásakor milyen n_1 vagy n_2 fordulatszámoknál mozdul ki és kezdi meg működését a regulátor.

Az érzéketlenségi tartomány a szögsebességből a /48/ és /49/ összefüggések felhasználásával:

$$\Delta\omega = \omega_{\max} - \omega_{\min} = \frac{M_k \cdot \delta_k}{\Theta_\Sigma \cdot m} \quad /51/$$

A fentiek alapján megállapítható, hogy a főtengely szögsebesség-változásának mértéke annál nagyobb, minél nagyobb a közepes terhelőnyomaték illetve minél kisebb a traktor össztehetetlenségi nyomatéka.

16. ábra. A főtengely szögsebesség ingadozása regulátor nélkül, illetve abszolút érzékeny regulátorra

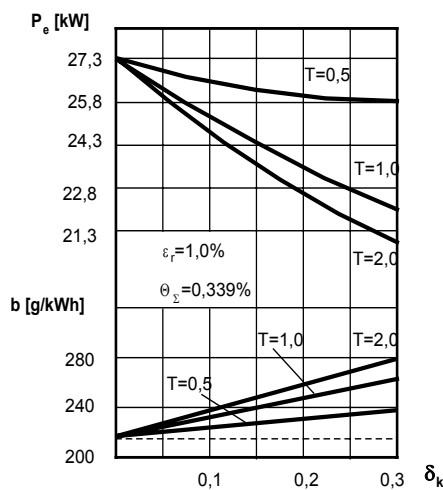


2.2.7. A regulátor érzéketlenségi fokának és a traktor tehetetlenségi nyomatékának hatása a motor munkájára a regulátoros ágon

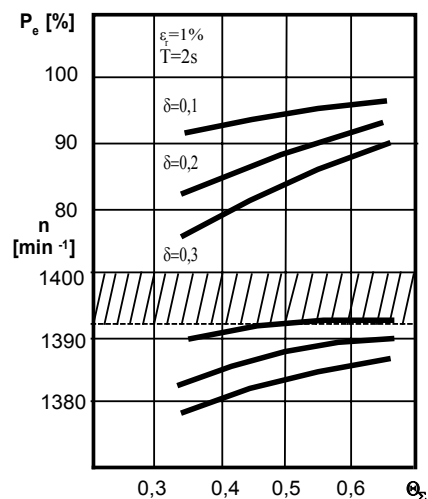
A motor főtengelyének szögsebesség ingadozását tekintve traktoros gépi munkák sorában a szántás a leginkább kedvezőtlen munkaművelet. A motor terhelése itt a névlegeshez közeli, a haladási sebesség viszonylag alacsony. A szántott talaj jellemzőitől függően a terhelőnyomaték 11. ábra szerinti értelmezésben bemutatott egyenlőtlenességi foka és az ingadozás periódus ideje nagy.

Egyes vizsgálati eredmények szerint [55] szinuszosan változó terhelés esetén ($\delta_k=0,3$; $T=2$ s; $\Theta=0,339$ kgm/s^2) a motor teljesítménye a 17. ábra szerint 22%-al csökkent, míg a fajlagos fogyasztás értéke 28%-al növekedett.

Rázsó és Sitkei munkájában [55] utal Kipskhaev vizsgálataira, aki a tehetetlenségi nyomaték értékét az eredetihez képest 65%-al megnövelve, a többi vizsgálati körülmény változatlanul hagyása mellett azt tapasztalta, hogy a teljesítmény csak 14%-al csökkent és a fajlagos fogyasztás is csak 18%-al növekedett. Vizsgálati adatait foglalja össze a 18. ábra, ami a teljesítmény változását mutatja a tehetetlenségi nyomaték függvényében. A vonalazott terület a regulátor érzéketlenségi tartománya, melyre a névleges fordulatszám *Mészáros és Sitkei* [48] 1-3%-ot ad meg.

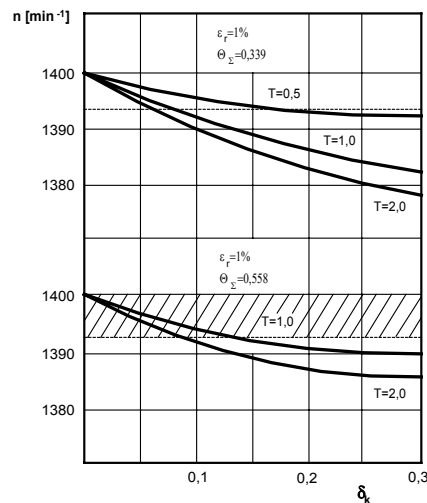


17. ábra.
A teljesítmény és a hajtóanyag-fogyasztás változása a terhelésingadozás függvényében.



18. ábra.
A teljesítmény és a fordulatszám változása a tehetetlenségi nyomaték függvényében.

Amint az a 19. ábrán jól megfigyelhető a terhelőnyomaték egyenlőtlenégi fokának (δ) növekedésével nagyobb periódus idő (T) esetén a fordulatszám ingadozása hamarabb kilép a regulátor érzéketlenségi zónájából.

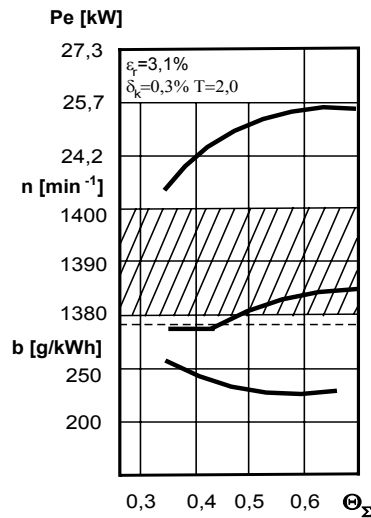


19. ábra. A terhelőnyomaték jellemzőinek hatása a főtengely fordulatszámának ingadozására.

A fogasléc belengése konstans δ és T értékek mellett a motor tehetetlenségi nyomatékának függvénye. Annak növelése esetén a fogasléc kitérésének mértéke csökken. Ezzel magyarázható, hogy a tehetetlenségi nyomaték növelése esetén csökken a teljesítmény veszteség mértéke. A teljesítmény csökkenés okai között lényeges különbség van attól függően, hogy a vizsgálati fordulatszám a regulátor érzéketlenségi zónáján belül vagy kívül esik. Az első esetben főleg a mechanikai hatások romlása okozza a teljesítmény csökkenését, míg a második esetben ehhez döntő súllyal a körfolyamat romlása járul. [40,41,72]

Szemléletesen mutatja az elmondottakat a 20. ábra. Látható, hogy amint a fordulatszám ingadozás kilép a regulátor érzéketlenségi zónájából, a teljesítmény rohamosan csökken, a fajlagos fogyasztás növekszik. Ezek alapján megállapítható, hogy a számottevő teljesítmény-csökkenés elkerülése érdekében a fordulatszám ingadozását a regulátor érzéketlenségi zónáján belül kell tartani. Ez konstrukciós oldalról kétféleképpen valósítható meg:

1. Kellően nagy tehetetlenségi nyomatékkal.
2. A regulátor érzéketlenségi fokának növelésével.



20. ábra. Az összehetelenségi nyomaték hatása egyes motorjellemezőkre.

A gép szükséges tehetetlenségi nyomatékának meghatározása konstrukciós feladat. A regulátor érzéketlenségi fokának növelése nem javasolt, mert ez esetben a regulátor késve reagál a terhelő nyomaték növekedésére. Ennek következtében csökken a motor terhelhetősége, növekszik a szögsebesség ingadozás mértéke is, ami a motor lefulladásához vezethet.

2.2.8. A traktormotor munkája a szabad ágon

A traktormotorok tartós üzemi terhelése a regulátoros jelleggörbe szabályozott ágára esik. Amennyiben a terhelés növekedése nagyobb, mint a teljesítmény tartalék, az üzemi fordulatszám csökkenésével együtt a munkapont a szabad ágra kerül. A teljesítmény csökken, a regulátor működésbe lépése többlet üzemanyag adagolást okoz. Növekszik a fajlagos fogyasztás értéke is. A munkapont szabad ágra kerülése így egy sor kedvezőtlen hatást eredményez [24,54,64].

Fekete a traktormotorok optimális terhelési tartományának vizsgálatával foglalkozó munkájában [19] utal a korábbi gépüzemeltetési javaslatra, mely szerint a motort a szabályozott működési tartományban kellett üzemeltetni egy sor, fent említett tényező miatt.

A szerző azonban megjegyzi, hogy a korszerű, nagy rugalmasságú, ún. kostans teljesítményű motorokat -melyek nyomatékrugalmassága meghaladja az 1,2 értéket- a szabályozatlan tartomány egy részén is tartósan lehet üzemeltetni a motor lefulladása nélkül. Ide vonatkozó, növekvő terhelési feltételek mellett végzett szántóföldi vizsgálatait azt mutatták, hogy túlterheléskor a motor fordulatszáma 2-3 másodperc alatt csökkent a névleges értékről a maximális nyomatékhoz tartozó értékre. Eredményei alapján megállapította, hogy a vizsgált gépcsoport 2-3 másodperc időtartamú túlterhelés esetén nem akadt el, a motor nem fulladt le. Adott típusra vonatkozó vizsgálati adatai szerint a traktormotor optimális terhelési tartománya a névleges nyomaték 93-108%-a.

Rázsó és Sitkei [55] szerint minél inkább közelít a közepes terhelőnyomaték értéke a névleges teljesítményhez tartozó motornyomatékhoz, annál valószínűbb a szabad ágra való időszakos átmenet. Ez esetben a terhelő nyomaték kiegyenlítése érdekében alacsonyabb sebességi fokozatot -nagyobb áttételt- kellene beállítani a nyomatékváltón. Ez elkerülhető kisebb terhelés beállításával, ez esetben azonban a teljesítmény kihasználása romlik.

Rugalmas motor esetén a nyomaték maximuma a regulálatlan szakaszba esik, így csökkenő teljesítményhez - egy bizonyos határig- növekvő nyomaték tartozik. A traktormotorok rugalmassága a korabeli motorokra vonatkozó adatok [40,71,73] szerint 1,0-1,05, ami korrekttal 1,05-1,15 értékre növelhető. Vas [75] szerint korszerű motorokra azonban ez az érték akár 1,5 fölé is növekedhet.

Agrotechnikai szempontból a különböző talajmunkák különböző haladási sebességet igényelnek. Az univerzális regulátor a gázkar állásától függően állítja a regulált szakasz helyét. Így csökkent hajtóanyag adagoláshoz a névleges fordulatszámnál (n_e) kisebb alkalmi névleges fordulatszám (n_{eA}) és a maximális fordulatszámnál kisebb alkalmi maximális fordulatszám (n_{0A}) tartozik. Ennek fő előnye, hogy a motor névleges teljesítményénél számottevően kisebb teljesítményigény esetén a motor alkalmi terhelési viszonya kedvező értéken tartható. Így a motor hajtóanyag fogyasztása kisebb lesz. További előny, hogy a sebesség a gázkarral szabályozható, miközben a motor üzeme regulált marad. [24,34,35]

Tibold és mtsai [73] az univerzális regulátor hátrányaként említik, hogy a motor rugalmassága csökken, vagy megszűnik. További hátrány, hogy a motorfordulattal arányos fordulatszámú teljesítmény-leadó tengellyel üzemeltetett munkagépek esetében előnyei nem használhatók ki, hiszen a motornak a névleges fordulatszám közelében kell működnie.

Rázsó és Sitkei [55] -lineáris változást feltételezve- megadja a motornyomaték (M_e) és a terhelőnyomaték (M_k) összefüggését a nem regulátoros ágon:

$$M_e + \frac{M_e \cdot (K-1)}{\omega_e \cdot (1-a_1)} \cdot (\omega_e - \omega) = M_k \cdot \left(1 + \frac{\delta_k}{2} \cdot \sin m \cdot t \right) + \Theta_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad /52/$$

Az egyenletben szereplő tagok gyakorlati értéke korábban már bemutatásra került. *Fekete [21]* a téma korábbi kutatási eredményeire hivatkozva az a_1 tényező 0,6-0,7értékét tartja kívánatosnak.

Élve az egyszerűsítéssel, miszerint a nyomatékgörbe a szabad ágon lapos, a szögsebesség az alábbiakban adható meg:

$$\omega = \omega_k \pm \frac{M_k \cdot \delta_k}{2 \cdot \Theta_\Sigma \cdot m} \cdot \left[\sin \left(m \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) + 1 \right] \quad /53/$$

A nyomatékgörbe maximum pontjához tartozó fordulatszámnál alacsonyabb fordulaterőkeken a görbe már labilis, a motor huzamosabban itt üzemelve lefulladhat. Így a közepes terhelő nyomaték maximális értéke kisebb kell legyen, mint a motor maximális nyomatéka. ($M_{kmax} < M_m$). Az üzemeltetés során tehát célszerű a közepes terhelőnyomaték változásának figyelemmel kísérése.

A motor lefulladásának határa a főtengely szögsebességével kifejezve:

$$\omega_{kmin} = \omega_M + \frac{M_{kmax} \cdot \delta_k}{\Theta_\Sigma \cdot m} \quad /54/$$

2.2.9. A fordulatszám ingadozása és a teljesítmény alakulása váltakozó jellegű terhelésnél

Üzemi körülmények között a traktormotort érő terhelőnyomaték folyamatos változása a főtengely fordulatszámának ingadozását eredményezi. A fordulatszám-ingadozás amplitúdója [55] nyomán:

$$\Delta n = \frac{9,55 \cdot M_k \cdot \delta_k}{2 \cdot \sqrt{\Theta_\Sigma^2 \cdot m^2 + \text{tg}^2 \beta}} \quad /55/$$

A β szög értelmezése a 15. ábrán látható. Stacioner terhelés mellett a motorteljesítmény [36] szerinti összefüggése:

$$P = A \cdot \frac{\eta_v \cdot \eta_i \cdot \eta_m \cdot \omega}{\alpha} \quad /56/$$

Instacioner terhelés mellett a motorteljesítmény a fenti összefüggéshez hasonlóan írható:

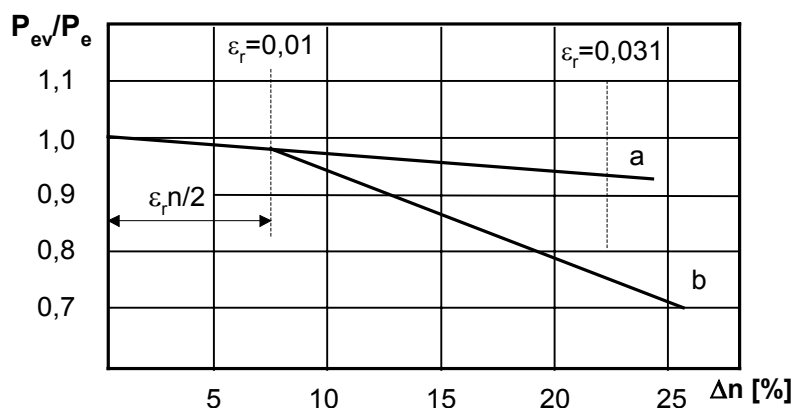
$$P' = A \cdot \frac{\eta_v' \cdot \eta_i' \cdot \eta_m' \cdot \omega}{\alpha'} \quad /57/$$

Tehát a teljesítmény változását a légviszony (α), a volumetrikus hatásfok (η_v), az indukált hatásfok (η_i) és a mechanikai hatásfok (η_m) megváltozása eredményezi. A képletben szereplő A tag motorkonstans.

A fordulatszám ingadozás teljesítmény-változásra gyakorolt hatását elemezve Rázsó és Sitkei [55] megállapítja, hogy a:

$$\frac{P'}{P} = f(\Delta n) \quad /58/$$

függvény a terheléstől független. Ezek alapján kijelenthető, hogy a terheléstől függetlenül a fordulatszám ingadozás mértékének megfelelően csökken a teljesítmény értéke. A 21. ábra a relatív teljesítmény csökkenést mutatja KD-35 típusú motoron a fordulatszám ingadozás függvényében [55].



21. ábra. Relatív teljesítmény csökkenés Rázsó és Sitkei [55] nyomán.

Amint az a 21. ábrán is látható, hogy a teljesítmény csökkenés igen számottevő lehet. Ezért adott M_k közepes terhelőnyomaték esetén a motor dinamikai jellemzőit úgy kell megállapítani, hogy a fordulatszám ingadozás hatására a munkapont ne lépjen ki a regulált ágon a regulátor érzéketlenségi zónájából. Mérési eredmények szerint [1,64,65] 10-15%-os fordulatszám ingadozás 8-10%-os veszteséget jelenthet a hasznos teljesítményben.

2.2.10. A traktormotor terhelési tényezője

A traktormotor terhelési tényező (τ) a közepes terhelőnyomaték (M_k) és a névleges teljesítményhez tartozó nyomaték (M_e) arányát mutatja.

$$\tau = \frac{M_k}{M_e} \quad /59/$$

A terhelőnyomaték adott komponensének ideiglenes lehetséges növekedése a korábban már bemutatott koefficienssel jellemezhető.

$$v = \frac{M_{kmax}}{M_k} \quad /60/$$

Behelyettesítve M_k értékét a /54/ egyenletbe:

$$\tau = \frac{1}{v} \cdot \frac{M_{kmax}}{M_e} = \frac{1}{v} \cdot \tau' \quad /61/$$

Az /61/ egyenletben bevezetett K' a redukált rugalmassági tényező. Mivel M_e a stacioner üzemi viszonyok mellett mért terhelés, így instacioner viszonyokra az egyenletet korigálni kell a váltakozó jellegű terhelés okozta teljesítménycsökkenés miatt. Így a motor tényleges terhelési tényezőjére Rázso és Sitkei [55] az alábbi összefüggést adja:

$$\tau = \frac{P'}{P} \cdot \frac{\tau'}{v} \quad /62/$$

Mivel a P'/P és τ' értékeit sok, korábban már bemutatott tényező befolyásolja, így a terhelési viszony is ezek függvénye:

$$\frac{P'}{P} = f(\delta_k; T; M_k; \Theta_\Sigma) \quad /63/$$

$$\tau' = f(K; a_1; v)$$

/64/

A terhelési tényező értékét döntően befolyásolja a motor rugalmassága. Adott terhelésen nagyobb motor-rugalmasság kisebb szögsebesség ingadozást eredményez.

2.3. Belsőégésű motorok üzemi jellemzői, vizsgálatuk jelentősége

2.3.1. Dízelmotorok üzemi jellemzői

Mivel kutatómunkám során foglalkoztam a motor üzemi paramétereinek mérésével és célként tűztem ki a kutatás alapját képező mérés technikai módszer felhasználásával egyes motorjellemző paraméterek (pl. teljesítmény, hajtóanyag-fogyasztás) meghatározására alkalmas modell kimunkálását, az eredmények alapján fedélzeti mérőműszer kifejlesztésének megalapozását, így célszerűnek tartom az eddig kidolgozott és alkalmazott eljárások illetve eszközök rendszerező áttekintését szakirodalmi források alapján.

A mezőgazdasági géppark összetételében a dízelmotor meghatározó erőforrás. *Szász és mtsai [69]* az alábbiakban határozzák meg a motor üzembiztonságát befolyásoló főbb tényezőket:

- a motor konstrukciója,
- gyártástechnológia,
- a javítás minősége,
- a bejáratás minősége,
- üzemeltetési körülmények.

A gépjárműüzemeltetés irányítójának a működést meghatározó paraméterek halmazából kell kiválasztania a legfontosabbakat, melyek az adott körülmények között jellemzik a folyamat lefolyását, esetleges torzulását, illetve támpontot adnak a beavatkozás módjának eldöntésére. Az erőgép üzemeltetéséhez kapcsolódó legfontosabb információk:

- motor üzemóra,
- terhelésarányos motorüzemóra,
- a rendelkezésre álló motorteljesítmény kihasználtsági foka (terhelés),
- hajtóanyag-fogyasztás,
- területteljesítmény (traktor-üzem),
- haladási sebesség (közúti szállítójármű).

A gépüzemeltetés irányítójának a működést meghatározó paraméterek halmazából kell kiválasztania a legfontosabbakat, melyek az adott körülmények között jellemzik a folyamat lefolyását, esetleges torzulását, illetve támpontot adnak a beavatkozás módjának eldöntésére.

Az erőgép üzemeltetéséhez kapcsolódó legfontosabb információk:

- motor üzemóra,
- a rendelkezésre álló motorteljesítmény kihasználtsági foka (terhelés),
- hajtóanyag-fogyasztás,
- területteljesítmény (traktor-üzem),
- haladási sebesség (közúti szállítójármű).

A működést jellemző paraméterek mérésére alkalmazható eszközök egyedi műszerek, vagy fedélzeti mérő, adatgyűjtő rendszerek. Az automatikus mérőeszközök feladata egyrészt az üzemeltető tájékoztatása a legfontosabb működési jellemzőkről, másrészt folyamatos adatgyűjtés az üzemeltetési folyamat irányítása számára [25,61,67].

2.3.2. A megfelelő műszaki állapot jelentősége

A gépüzemeltetés komplex rendszerében a géphasználati folyamatok műszaki kiszolgálási folyamatokat generálnak. A gép üzemeltetésével kapcsolatos kitűzött célok elérése érdekében az említett folyamatok megfelelő szintű irányítása szükséges. Így mind a géphasználati-, mind a műszaki kiszolgálási folyamatok irányítottak.

A gép műszaki állapota részegységeinek, elemeinek jellemzőivel (fizikai, kémiai, mechanikai, geometriai stb.) adható meg. Ezeknek a kiinduló vagy előírt állapotól való eltéréseinek meghatározott nagyságú változása teszi szükségessé a műszaki kiszolgálási folyamatok jelentős részét [32,37,58].

A műszaki kiszolgálás irányításával kapcsolatos részfeladatokat és azok eredményéről kapott információkat *Janik és mtsa* [32] az alábbiakban foglalja össze:

- bizonyos paraméterek figyelése mintavételes- vagy folyamatos méréssel,
- a kapott adatok szűrése, feldolgozása,
- összehasonlítás a normál állapot jellemzőivel,
- összehasonlítás a határértékekkel,
- értékelés, a vizsgált paraméterek változási tendenciájának megállapítása,

- megfelelő előrejelzési stratégia kialakítása:
 - a megbízhatóságra,
 - az élettartamra,
 - az elhasználódás fokára,
 - a közelgő hiba valószínűsítésére,
- a működési feltételek változásainak összesítése,
- döntés előkészítés, beavatkozás.

A gép műszaki állapota meghatározza a munkavégzés minőségét. *Faust és mtsa [18]* hangsúlyozza a műszaki állapottal illetve a terheléssel összefüggésbe hozható illetve azt meghatározó motorjellemzők folyamatos figyelemmel kísérésének fontosságát a működés alatt. *Szabó* vizsgálati eredményei [67] szerint ezáltal a ciklikus diagnosztikai vizsgálatokkal szemben a rendellenes működés, meghibásodás a felmerüléssel egyidőben jelezhető, a vizsgált paraméter értékének megengedettől való eltérése észlelésével. A motorüzem folyamatos figyelemmel kísérésének előnyei között említi:

- az anyag-, energia-, információ veszteséssel járó üzemeltetés elkerülését,
- üzemzavarok, illetve végzetes meghibásodás elkerülését,
- gépüzem-fenntartási költségek csökkenésének lehetőségét.

Grevis [25] szerint motor terhelésének folyamatos ellenőrzése, üzemeltetési szempontból optimális szinten (85-88%) tartása az alábbiak megelőzése érdekében kívánatos:

A műszaki kiszolgálás oldaláról:

- élettartam csökkenés,
- javítási gyakoriság növekedése (javítási ciklusidő csökkenése),
- megbízhatóság romlása.

A folyamatos terhelésellenőrzés céljai a géphasználati folyamat oldaláról:

- gazdaságosság, illetve költségminimumra törekvés (pl. a fajlagos hajtóanyag-fogyasztás optimalizálása),
- az adott feltételek között időegység alatt elvégezhető munka maximálása,
- környezetvédelmi előírások, követelmények betartásának elősegítése,
- túlzott füstölés (a kibocsátott szilárd szennyezőanyag tartalom) megelőzése,
- a füstgázban lévő egyéb szennyező anyagok növekedésének megelőzése.

A füstgázban lévő szennyezőanyagok környezetterhelését hangsúlyozza *Vas és mtsa* is munkájában [76,77]. Több motortípuson végzett méréseik során részletesen vizsgálták

a befecskendezés és égés valamint egyes konstrukciós kialakítások hatását a dízelmotor környezetkárosításának csökkentésére.

2.3.3 A dízelmotorok teljesítményének meghatározása

2.3.3.1 A motorvizsgálatok jelentősége

A motorvizsgálatok a gép életciklusának több szakaszában is hangsúlyos szerepet kapnak. Ezen vizsgálatok céljukban, az alkalmazott módszerben, illetve a vizsgálati körülményekben bizonyos sajátossággal bírnak.

A tervezés-fejlesztés fázisában:

- a korábbi vizsgálati adatokból, üzemeltetési tapasztalatokból kiindulva általában a prototípuson végzett illetve a modellalkotásra, a számítógépes szimulációra épülő vizsgálatok,
- a vizsgálatok az esetek nagy részében laboratóriumi körülmények között folynak.

A gyártási folyamatban:

- a minőségellenőrzéshez kapcsoltnak, illetve a bejáratás, a gyári üzembe helyezés folyamatában kap szerepet a motorvizsgálat,
- szinte kizárólag laboratóriumi körülmények között történik a vizsgálat.

A gépüzemeltetés fázisában:

- elsődleges cél a géphasználat energetikai jellemzésére alkalmas mutatók mérése, illetve a használatból eredő műszaki állapotváltozások diagnosztikai feltárása,
- a vizsgálatok gyakran üzemi körülmények között zajlanak erre alkalmas eszközzel (pl. mobil fékpad).

A géphasználat során a traktormotor terhelése a munka jellegének megfelelően változó. A pillanatnyi terhelési szint lehetőség szerinti folyamatos figyelemmel kísérése több szempontból is kívánatos. Ezek között említhető az erő- és munkagép optimális energetikai illesztésének állandó fenntartása, illetve ökonómiai szempontból a gazdaságos működés biztosítása. (pl. optimális fajlagos hajtóanyag-fogyasztás elérése) [28].

A traktormotor üzemközbeni folyamatos figyelemmel kísérését fontosnak tartom az alábbiak szerint:

Műszaki diagnosztikai célzattal:

- A belsőégésű motor, mint energiaforrás előírás szerinti működésének folyamatos ellenőrzése a géphasználat során.
- Működési rendellenességek kiváltó okának feltárása.

Energetikai célzattal:

- a pillanatnyi terhelési szint kijelzése,
- a géphasználati folyamat terhelési szintek szerinti elemzése,
- integrált energiafelhasználás technológiai megvalósítása,
- az energiafelhasználás technológiai folyamatokra , részfolyamatokra bontott folyamatos ellenőrzése (hasonlóan a villamos fogyasztókhoz).

A traktormotorok ellenőrzésének, műszaki állapota meghatározásának vizsgálati módszereit a vonatkozó szakirodalom [3,4,6,33] szerint elsősorban a mérőeszközök műszaki színvonala határozza meg. A motorteljesítmény mérésen alapuló meghatározása a vizsgálat helyét és időpontját tekintve többféle formában történhet:

- munkavégzés közben, folyamatos ellenőrzés,
- felújításhoz, gyári bejáratáshoz kapcsoltan, laboratóriumi körülmények között, stabil fékpadon végezve,
- diagnosztikai vizsgálatokhoz kapcsolódva, mobil fékpad segítségével.

A vizsgálatok jellegét tekintve az alábbi módszerek terjedtek el:

3. Közvetlen motorteljesítmény-meghatározás
 - e) a motor kiserelésével stabil fékpadon végzett mérések,
 - f) teljesítmény leadó tengellyel ellátott erőgépek mobil fékpadon mérése.
4. A motorteljesítmény meghatározása közvetett módon
 - a) belső terheléssel végzett vizsgálatok
 - i) hengerkiiktatással előidézett belső terhelés,
 - ii) kifuttatásos vizsgálat,
 - iii) felgyorsulási képesség mérése.
5. Modellalkotáson alapuló motorteljesítmény meghatározás

2.3.3.2. Külső terheléssel végzett vizsgálatok

Mivel a külső terhelésre alapozott közvetlen teljesítmény meghatározás módszerei jól kidolgozottak, ismertek és a műszaki kiszolgálás rendszerében gyakorta alkalmazottak, így ezek részletes bemutatásától eltekintek.

2.3.3.3. A motorteljesítmény meghatározása közvetett módon

Hengerkiiktatással előidézett belső terhelés

A hengerkiiktatással nyerhető belső terhelés a dízelmotor mechanikai veszteségeiből származik. A módszerrel részletesen foglalkozik *Boór [3]*. A módszer lényege, hogy azonos számú henger kiiktatásával különböző mérési időpontokban közel konstans a belső terhelés. A terhelés az indikált vagy effektív középnyomáshoz hasonlóan szintén középnyomással fejezhető ki.

Az összes veszteségi munka középnyomása:

$$p_{gv} = p_r + p_{gw} + p_{ki} + p_n + p_{di} + \Delta p_s \quad /65/$$

ahol:

- p_r - A súrlódási munka középnyomása (az összes veszteség 60-70%-a) [Pa]
- p_{gw} - Negatív munkaterület (kitolási munka) [Pa]
- p_{ki} - A gázközeg és a hengerfal közötti hőcsereveszteségek középnyomása [Pa]
- p_{di} - A henger-dugattyú tömítetlenségi veszteség középnyomása [Pa]
- p_n - A segéd szerkezetek hajtásához szükséges munkából adódó középnyomás [Pa]
- Δp_s - A hengerkiiktatásból adódó súrlódási munka középnyomása [Pa]

A súrlódási munka középnyomása több paraméter függvénye:

$$p_s = f(p_a; \frac{p_{max}}{p_{min}}; n; t; c) \quad /66/$$

ahol:

- p_a - A hengertérben uralkodó átlagnyomás [Pa]
- n - A főtengely fordulatszáma [min^{-1}]
- t - Motorhőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
- c - Motorkonstruktív paraméter

A felsorolt veszteségek elemzése a kiiktatott hengernél:

- A súrlódási munka középnyomása alacsony, mivel a hengerben uralkodó átlagnyomás is alacsony értékű.

- A henger-dugattyú egység kopásával a tömítettség romlik, így:
 - a hengerben uralkodó átlagnyomás csökken, maga után vonva a sűrűlési középnyomás csökkenését,
 - megnövekszik a résveszteség, mivel a sűrítési munka a távozó levegőből nem térül meg,
- A nem működő henger falának hőmérséklete csökken, így a sűrűlési középnyomás ugyan kis mértékben, de növekszik.

A vizsgálat során a kiiktatott hengert korábban terhelő veszteség a működő hengerekre hárul. Ennek legyőzése a hajtóanyag-fogyasztás növekedését eredményezi, amely az átlagnyomás és a sűrűlési középnyomás emelkedését idézi elő.

Boór vizsgálatai [3] szerint négyhengeres motor esetén egy henger kiiktatása 25%-s, míg két henger kiiktatása 76%-os terhelést jelent. A hajtóanyag fogyasztás arányai összhangban állnak a fékezéssel és hengerkiiktatással kapott terhelési viszonyokkal.

Kifuttatásos vizsgálat

A belsőégésű motor komplex állapotának meghatározása belső terheléssel más megközelítésben a motor energetikai egyensúlya ismeretében történik. A motor energetikai egyensúlyát *Faust és mtsa [18]* az alábbiakban adja meg:

$$M_i \pm \Theta \cdot \frac{d\omega}{dt} - M_{\text{mech}} = 0 \quad /67/$$

ahol:

- M_i - A motor indikált forgató nyomatéka [Nm]
- Θ - A motor mozgó részeinek a forgattyústengely középvonalára redukált tömeg-tehetetlenségi (inercia) nyomatéka [kgm^2]
- ω - A motor főtengelyének szögsebessége [s^{-1}]
- t - Idő [s]
- M_{mech} - A belső mechanikai veszteségek legyőzésére fordított nyomaték [Nm]

A teljesítmény hengerenkénti meghatározása két fázisban történik. Első lépésben a belső veszteségek legyőzéséhez szükséges nyomaték- illetve teljesítményigényt kell meghatározni. Ehhez a rendszer működéséhez szükséges energia bevitelt meg kell szüntetni a hajtóanyag bevitel gyors, teljes kikapcsolásával. Ekkor a /67/ egyenlet a következőképpen módosul:

$$M_i = 0; \Theta \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{mech}} \quad /68/$$

Az M_{mech} terheli a továbbiakban külön-külön vizsgált hengereket. M_{mech} meghatározása tehát az energia-bevitel teljes megszüntetése alapján teljes kifuttatással történik.

A mérés második fázisában az energia bevitelt a vizsgált henger kivételével kell megszüntetni, ezzel részleges kifuttatást megvalósítva. A vizsgált (n-edik) henger indikált nyomatéka:

$$M_{\text{in}} \pm \Theta \cdot \frac{d\omega}{dt} - M_{\text{mech}} = 0 \quad /69/$$

Természetesen itt is rögzíteni kell az $\omega = f(t)$ függvényt, melynek segítségével a szükséges differenciálhányados az adott szögsebesség értéknél meghatározható. A motor teljes nyomatékának számítása a részeredmények ismeretében az alábbiak szerint történik:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i - M_{\text{mech}} \quad /70/$$

A továbbiakban a motor teljesítménye a fordulatszám ismeretében számítható.

A felgyorsulási képesség mérésén alapuló teljesítmény meghatározás

A módszer hazai kutatásában jelentős eredményt ért el *Boór és Németh [4]*. Vizsgálataikkal kimutatták, hogy a motor műszaki állapotának egyik jellemzője a forgattyústengely szöggyorsulása az üresjárat fordulatszámról a maximális fordulatszámra történő felgyorsulási folyamat alatt. A szöggyorsulás nagysága kifejezi, hogy az égési folyamatból származó munka a motor forgó- és alternáló mozgást végző tömegét milyen mértékben gyorsítja. Ebből következik, hogy a motor jó műszaki állapotában magasabb szöggyorsulási értékek adódnak és a műszaki állapot romlásával ezek egyre csökkennek.

A módszer lényege, hogy a felgyorsítási folyamat alatt a motor forgó részeinek tehetetlensége adja a terhelést. A motor gyorsítása során tetszőleges időpontban a tömeg nem állandósult mozgásakor a mozgatóerők (energia) kiegyenlítődnek a tehetetlenségi

erők és a mechanikai (belső) veszteségek által. A felgyorsulás rövid időtartama alatt a motor a tehetetlenségi erők és a belső veszteségek által keltett terhelőnyomatékokat annál gyorsabban győzi le, minél nagyobb az általa kifejtett forgatónyomaték. A nyomatékegyenlet alapján az effektív teljesítmény (P_e) egyenletét [Boór és mtsa, 1983] az alábbiak szerint adja meg:

$$P_e = (M_i - M_{\text{mech}}) \cdot \omega = I \cdot \omega \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad /71/$$

ahol:

- M_i - Indikált nyomaték [Nm]
- M_{mech} - Mechanikai munkából számított nyomaték [Nm]
- ω - Főtengely-szögsebesség [s^{-1}]
- I - A motor mozgó részeinek a főtengelyre redukált tömegtehetlenségi nyomatéka [kgm^2]

Hasonló vizsgálatokat folytatott 6 hengeres Rába-M.A.N. motorokon Tárnok [70]. Vizsgálati eredményei alapján megállapította, hogy jó műszaki állapot esetén a felgyorsulás mérésével kapott jelleggörbék a motor nyomaték görbéjéhez hasonló lefutást mutatnak.

Megítélésem szerint a módszer előnye, hogy egyszerű és viszonylag gyorsan elvégezhető. A tényleges effektív teljesítmény és a bemutatott módszerrel meghatározható motorteljesítmény eltérhet egymástól abban az esetben, ha a vizsgált motor tömegtehetlenségi nyomatéka a típusra jellemző átlagos értéktől eltér. A módszer e miatt elsősorban tájékoztató jellegű a teljesítmény értékére és a műszaki állapotra vonatkozóan. Az értékelő paraméter-rendszernek tartalmaznia kell a vizsgálati fordulatszámokat és az üzemeltetési határállapothoz tartozó referencia értékeket. A vizsgálatot célszerű kiegészíteni a lassulásgörbék felvételével, mivel ezek jól kiegészítik a gyorsulásgörbék információ tartalmát. Leginkább a súrlódási ellenállások nagyságára és a motor kompressziós állapotára vonatkozóan szolgáltatnak információt.

2.3.3.4. Modellezésen alapuló motorteljesítmény meghatározás

A motorteljesítmény munkavégzés közbeni, közvetett úton történő meghatározására Kománcsi újszerű módszert dolgozott ki [42], amely traktorüzemben a regulátoros ágon dolgozó dízelmotorok teljesítményének és kipufogógáz hőmérsékletének kapcsolatán alapul. Hasonló módszert alkalmaznak Zoerb és mtsai [81] a dízelmotorok hajtóanyag-fogyasztásának meghatározására, szintén a kipufogógáz-hőmérséklet mérése alapján.

A kísérleti eredmények alapján e módszerek jól alkalmazhatók fordulatszám szabályozóval felszerelt dízelmotorokra, azonban nem adnak kielégítő eredményt gépjárműüzemben, széles fordulatszám tartományban működő dízelmotorokra. Traktor és gépjárműüzemben felvett féktermi vizsgálatok alapján *Kiss és mtsai [38]* továbbfejlesztették *Komándi* módszerét. Mindkét motorüzemben alkalmazható, matematikai modellalkotásra épülő teljesítmény meghatározást dolgoztak ki. A teljesítmény meghatározást a kipufogógáz hőmérsékletének- és a főtengely fordulatszámának mérésére vezetik vissza.

A mérés eredményeként kapott paraméterek felhasználásával, többparaméteres függvény illesztést végeztek. Matematikai statisztikai módszereket alkalmazva, a teljesítmény megadására a következő kiinduló egyenletet állították fel:

$$P_{\text{mot}} = a \cdot n + b \cdot t_k + c \cdot n^2 + d \cdot t_k^2 + e \cdot n \cdot t_k + f \quad /72/$$

ahol:

- P_{mot} - Motorteljesítmény [kW]
- n - Fordulatszám [min^{-1}]
- t_k - A kipufogógáz hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]
- a, b, c, d, e - Az egyenlet együtthatói
- f - Konstans tag

Vizsgálatai tapasztalataik szerint a kiinduló egyenlet minden motortípusnál módosul, a végleges formát a paraméterek statisztikai próbáinak eredményeként lehet felírni. Az egyes motortípusokat tehát nem ugyanazok a tagok írják le. Az egyenletek felépítését motortípusonként kell optimalizálni.

2.4. Dízelmotor terhelésjelzése és –szabályozása

A terhelés folyamatos ellenőrzése különösen fontos a gépüzemeltetés információs rendszerében, hiszen a jó műszaki állapotú motor optimális terhelése megfelelő teljesítmény kihasználást és gazdaságos gépüzemeltetést eredményez. A motor pillanatnyi terhelésének folyamatos ellenőrzése esetén a kívánt terhelés bizonyos folyamatváltozók (munkamélység, haladási sebesség) lehetőség szerinti módosításával az üzemelés teljes időtartama alatt biztosítható.

A téma hazai kutatását tekintve *Fekete* a gyakorlati gépüzemeltetés számára hasznosítható megoldást bemutatva, részletesen foglalkozik a traktoros gépcsoport terhelésszabályozásával [21]. A motorterhelés befolyásolása érdekében megvalósítható fontosabb beavatkozási lehetőségeket az alábbiakban foglalja össze:

- a töltés változtatása,
- sebességváltás,
- a gumibroncs töltőnyomásának változtatása menet közben,
- a járószerkezet terhelésének változtatása,
- a függesztőmű helyzetének szabályozása,
- a munkamélység változtatása,
- a munkaszélesség változtatása

Az említett szerző munkájában összefoglaló rendszerezést ad a terhelésarányos üzemóra számlálására kifejlesztett mérőeszközökről, berendezésekről. A legtöbb műszer a kipufogógáz hőmérsékletének a terheléssel való összefüggése alapján működik. Így a Renault *ACET*, a CASE IH *Tractor-terminal*, a Massey Ferguson *Datronic*, vagy a Steyr *Informat* típusjelű műszerei.

A hazai kutatások között számottevő az *ELKON SD-303* terhelésarányos üzemóra számláló melyet *Komándi és mtsai* fejlesztettek ki 1987-ben. Beállítási értékét több motoron végzett vizsgálat eredményeként határozták meg új és használt motorokra.

Hasonló elven működik a hazai piacon jól ismert *Texocomp 1600* típusú műszer mely a haladási sebességet, szlipet és a gépi munka mennyiségét is méri.

2.5. Az irodalmi áttekintés alapján levonható következtetések

A kutatási témához kapcsolódó szakirodalom áttekintése után az alábbi következtetések vonhatók le:

- A gépi talajmunkák végzése során a terhelőnyomaték folyton változó. Ebből a szempontból a legkedvezőtlenebb talajmunka a szántás.
- A motor dinamikai jellemzői közül a K rugalmassági tényező valamint a névleges- és a maximális nyomaték helyét megadó ún. a_1 tényező különös jelentőséggel bír.
- A váltakozó jellegű terhelés a motor szögsebesség ingadozását okozza, mely ha kilép a regulátor érzéketlenségi zónájából a motor teljesítményének jelentős csökkenését vonja maga után. Ezzel együtt jár a fajlagos fogyasztás növekedése.
- A regulátor érzéketlenségi fokát és a motor össztehetetlenségi nyomatékát úgy kell megállapítani, hogy a főtengely szögsebesség ingadozása még a legnehezebb, legszélsőségesebb munkáknál se lépjen ki ebből a zónából.
- A tehetetlenségi tényező növelése motorteknikai szempontból is kedvezőbb, mint a regulátor érzéketlenségi fokának növelése.
- Meghatározó jelentőségű a motor járásának egyenlőtlenségi foka, mely többek között a lendkerékkel kapcsolatos konstrukciós jellemző.
- Amennyiben az érzéketlenségi fok értéke alacsony a regulátor a legkisebb ingadozásra is reagál. A gyakori beavatkozás a szerkezeti elemek intenzívebb kopása mellett túlregulálást is eredményez és a motor lefulladhat.
- A külső terheléssel végzett motorvizsgálatoknak számos előnye és hátránya van. Utóbbiak között említhető, hogy vagy csak laboratóriumi körülmények között hajthatók végre, vagy olyan konstrukciós kialakítást feltételeznek, mely lehetővé teszi a fékberendezés főtengelyhez való csatlakoztatását. Elvégzésük szerelés- és időigényes, mely időtartam alatt a gép a termelési folyamatból kivonásra kerül. További hátrányként említhető, hogy egyes esetekben a mért teljesítmény, hajtóanyag-fogyasztás értékek a műszaki állapotot, a beállítás helyességét csak viszonylag nagy bizonytalanság mellett tükrözik.

- A gépüzemeltetés során a motor műszaki állapotának, terhelésének folyamatos figyelemmel kísérése mind műszaki, mind ökonómiai szempontból kívánatos. A traktoros gépcsoport akkor üzemeltethető hatékonyan, ha a motor a névleges nyomatékkal, vagy az optimális terhelési tartományban üzemel, ami célszerűen a traktormotor terhelésszabályozásával, vagy terhelésjelzésével valósítható meg.

3. VIZSGÁLATI ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. A vizsgálatok előzménye

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 munkaszakaszonként elemzem. Munkaszakasz alatt értem a munkaciklus tartamának egy hengerre jutó részét, négyütemű négyhengeres motor esetében 180 fok főtengely-szögelfordulást. 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 módszer gyakorlati hasznosíthatóságát az adja, hogy a szögsebesség ingadozásának vizsgálatán keresztül lehetőség nyílik az üzemi viszonyok folyamatos figyelemmel kísérésére valamint a megbontás nélküli motordiagnosztikai vizsgálatok továbbfejlesztésére.

3.2. Vizsgálati módszer

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 a 2.1.1.2 pontban az égés folyamatát, a 2.1.2 pont alatt a tömegek hatásait leíró, az irodalomban fellelhető összefüggéseket tekintetem át. Ezekből különösen a 8. ábrán bemutatott tangenciális diagram és a 10. ábrán látható, az erők függvény-harmonikusait ismertető diagram mutat szoros összefüggést az általam végzett, később ismertetendő 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 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:

6. **Külső terhelés mellett**, fékpadi mérésekhez kapcsolódóan négyhengeres, négyütemű soros PERKINS 1004-4T típusú dízelmotorokon. A fékpadi mérések során felvettem a vizsgált motor regulátoros jelleggörbéjét 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.
7. **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.

Mivel munkám elsődleges célja a módszer gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálata a motor üzemi viszonyaiban beállt változások egyidejű követésére, valamint a gépüzemeltetés számára fontos egyes energetikai jellemzők meghatározására, így a továbbiakban részletesen az 1. pontban említett vizsgálatokat mutatom be.

3.3. 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 mérés technikai 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.

3.3.1. A főtengely szögsebesség-változásának vizsgálata optikai jeladóra épülő mérőrendszerrel.

A szögelfordulás mérésére kis méreteik és nagy felbontásuk következtében előnyösen alkalmazhatók az optoelektronikus megoldások. Az alkalmazott kód szerint inkrementális (növekményes) és abszolút rendszereket lehet megvalósítani.

Abszolút rendszer esetén minden mérési pozícióhoz egy-egy binárisan kódolt szám hozzárendelése történik.

Az inkrementális elv inkrementumok –mérőlépések- irányhelyes megszámlolásán alapul. A kimeneten megjelenő jel lehet négyzet-, vagy szinuszhullám. A szinusz jel analóg osztásával négyzetimpulzus nyerhető.

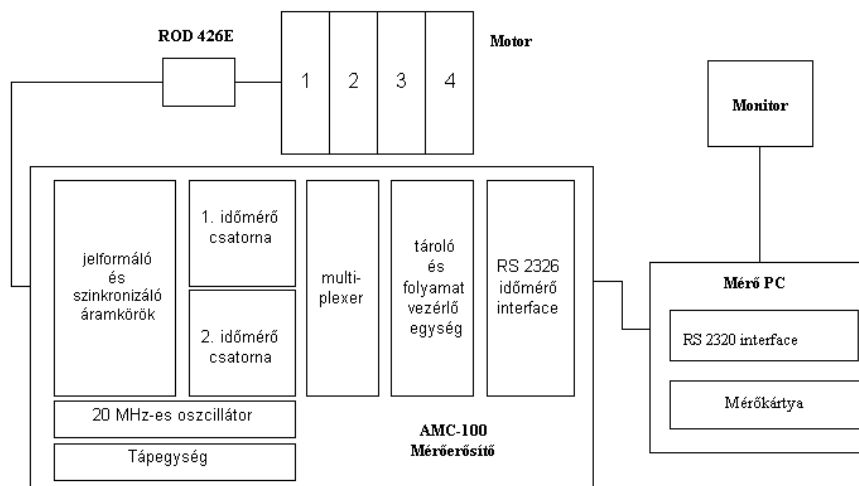
Az optoelektronikus fordulat-jeladóra épülő kísérleti mérőrendszer (22. ábra) elemei:

1. Nagyfelbontású inkrementális optoelektronikus jeladó.
Típus: ROD 426 E 1000
2. Két csatornás nagysebességű időmérő interface , V. 24 , soros asszinkron csatornával
Típus: RS 2326
3. PC + mérőkártya
4. Mérőerősítő

Jeladó

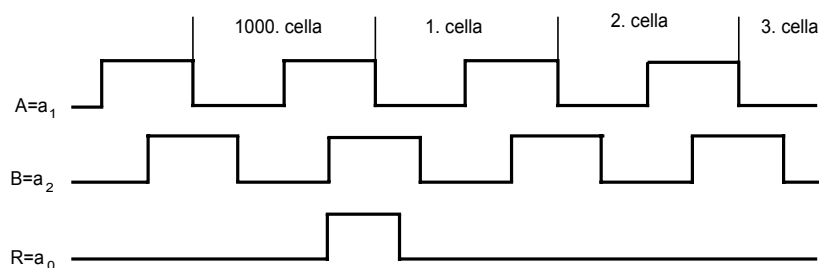
A műszer forgó üvegtárcsája fordulatonként 1000 jelet ad. Ez a felbontás biztosítja, hogy a főtengely kismértékű elfordulásához tartozó pillanatnyi szögsebesség is mérhető, így a motorban lejátszódó átmeneti folyamatok hatása is érzékelhető.

A 23. ábra szerinti számláló egység a_0 csatornája fordulatonként egy jelet ad. Ez arra használható, hogy a mérések adott szöghelyzethez szinkronizálva, mindig állandó fázisban kezdődjenek.



22. ábra. Méréselrendezési vázlat optoelektronikus jeladó esetén.

Az a_1 és a_2 csatornák jelei azonosak, csupán fázishelyzetük más. Mindkét számlálócsatornán fordulatonként 1000 impulzus áll elő. A csatornák frekvenciája a főtengely fordulatszámából meghatározható (pl. 3000 min^{-1} esetén 50 kHz). Ez esetben két jel beérkezése közötti un. cellaidő $20 \mu\text{s}$. Az időmérő csatornáknak ezt az intervallumot kell a kívánt pontossággal mérni.



23. ábra. Mérőimpulzusok megjelenítése.

Időmérés

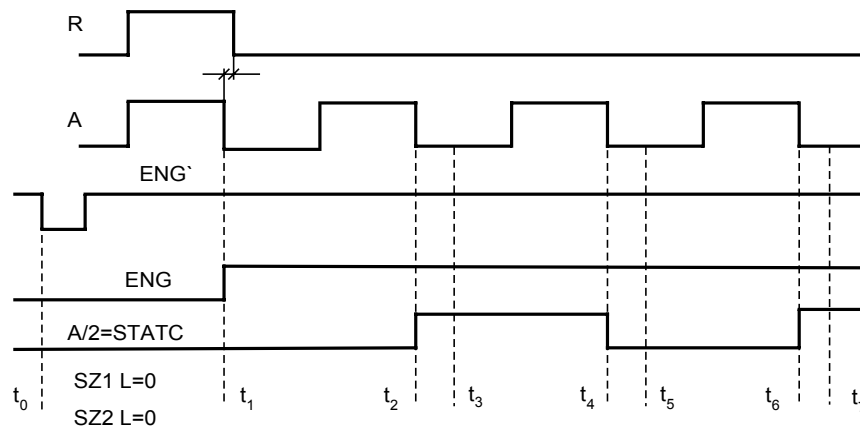
Az időmérés 20MHz frekvenciával működő órajel-generátor mérőjelével történt. Ez 50 ns időkvantumot határoz meg. A példaként említett 20 μ s cellaidő esetén így:

$$N = \frac{20 \cdot 10^3}{50} = 400$$

időkvantum megszámlálása válik lehetővé.

A pontosabb számolás érdekében a két bemenő jel (*A* és *R*) mindenkori állapotát az óragenerátor lefutó élével mintavételezzük. A számlálócsatornában az óragenerátor felfutó élével valósul meg a számolás. A számlálócsatornák első fokozata a nagy számlálási sebesség miatt TTL számlálókból lett kialakítva. Az első fokozat a számlálók típusától függően BC vagy BCD kialakítású lehet.

A második fokozat 100-zal vagy 256-tal leosztott órajelet kap. Az első fokozatok szelektálását TTL multiplexer biztosítja, amely azonos vezérlő jelet kap a számláló csatornákkal. Így a kimenetén mindig egy nyugalomban lévő számláló érték jelenik meg, ami ebben az állapotban PIO porton keresztül beolvasható. A vezérlő jelet az *A* csatorna jeléből állítja elő. A számláló csatornák kialakítását a 24. ábra mutatja.



24 ábra. Számlálócsatornák kialakítása.

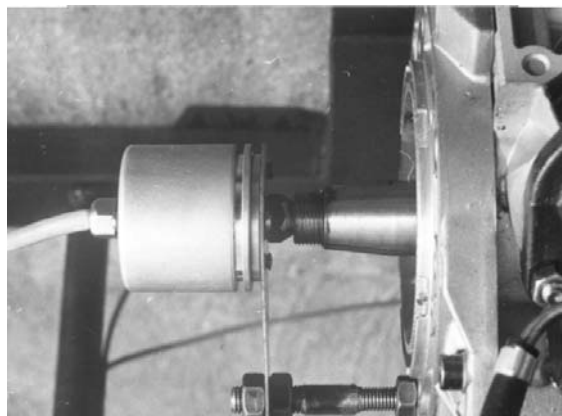
A 24. ábrán látható, hogy a t_1 időpillanat előtt mindkét számláló csatorna kisebb helyértékű byte-ja nulla értékre állítása történik. A beállítást az *ENG'* jel *L* (low) szintű állapota generálja. Ekkor mindkét számláló nyugalmi helyzetbe kerül és állapota leolvasható. A számláló csatornák *A/2* állapotának függvényében t_1 időponttól kezdve

felváltva számolnak. $A/2=L$ állapota mellett $SZ2$ számol, míg $A/2=H$ (high) esetén $SZ1$ számol. A számlálók értéke az elmondottak szerint szinkronizáltan leolvasható és tárolható. Így a $STATC$ jel figyelésével a PIO port egy bemeneti csatornáján érzékelhető az állapotváltozás illetve a pillanatnyi érték. A mérőberendezés vezérlését processzoros vezérlőegység végzi, amely egyúttal a mért adatok kódolását és továbbítását is megvalósítja.

A berendezés alapegysége a SZIE Rendszertechnika Intézet által kifejlesztett AMC-100 mérőszámítógép központi egysége. Ez tartalmazza mind a számláló csatornákat, mind a kommunikációs részegységeket. Mind a processzor, mind a számláló 4MHz frekvenciával működnek. A kísérleti mérőrendszer hitelesítését egy 220 V-os szinkronmotor által 1:2 áttétellel hajtott forgótárcsa segítségével végeztem el 1500 min^{-1} és 3000 min^{-1} fordulatszámokon.

Az inkrementális jeladóra épülő mérőrendszer mérési, működési elvéből adódó hibalehetőségei a vizsgálati eredményeket befolyásoló hatásuk miatt említendők. A forgásjeladó technológiai és komparálási hibái a leginkább jellemzőek. Technológiai hibát okozhat egyszeres kiértékelésnél a forgó üvegtárcsa osztáshibája, kétszeres kiértékelésnél további hibát az azonos csatornához tartozó impulzusok 0,5-től eltérő kitöltési tényezője, négyszeres kitöltésnél a hibát tovább növeli a második csatorna 90 foktól eltérő fáziseltolása. A technológiai hibákon kívül a jelfeldolgozó elektronikából származó komparálási hibák is fellépnek.

Elővizsgálatok tapasztalatai azt mutatták, hogy a jeladó üzem közbeni rezgési állapota befolyásolja a mérési cél által meghatározott paraméterek mért értékét. A jeladó rögzítésének a mérési eredményekre gyakorolt hatása vizsgálatára több rögzítési megoldással végeztem próbaméréseket. A lehetséges rögzítési megoldások közül a mérés pontossága szempontjából egy bizonyult megfelelőnek. Ez esetben a jeladó tengelyét egy kúpos központosító-szorító csavarral kapcsoltam a vizsgált motor főtengetyéhez, míg a jeladó házát kötőcsavarokkal rögzítettem a motorblokkhoz. A jeladó rögzítését a 25. ábra mutatja.



25. ábra. Az inkrementális jeladó rögzítése.

3.3.2. A főtengely szögsebesség-változásának vizsgálata Hall-jeladóval

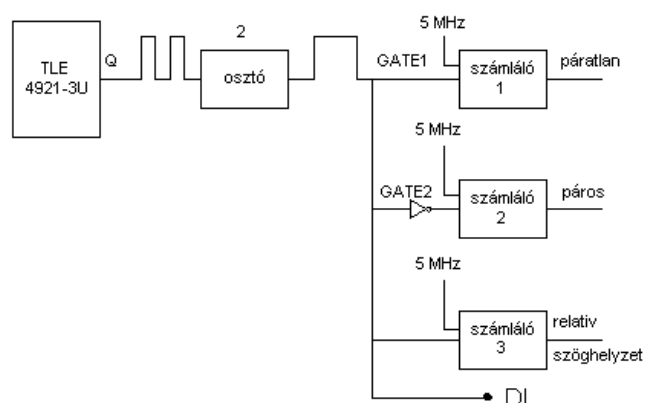
Az inkrementális jeladóval végzett vizsgálatok eredménye ismeretében célul tűztem ki egy olyan mérési elrendezés vizsgálatát, amely a vizsgált motor szerkezeti elemeinek felhasználásával is működőképes. Az előzőekben ismertetett inkrementális optikai jeladó felszerelése mindenkor a motor körülményes 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.

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.

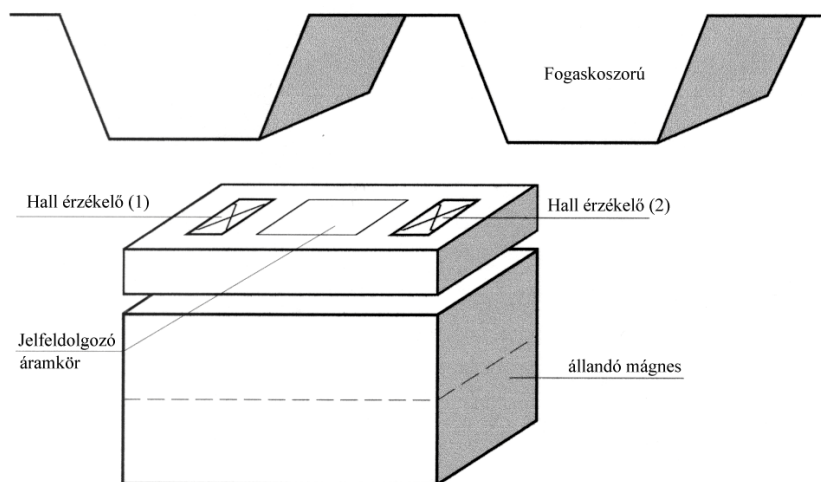
A méréselrendezési vázlatot a 26. ábra mutatja.



26. ábra. Méréselrendezési vázlat Hall-jeladó esetén.

A jeladó Hall-szonda egy kis méretű félvezető lapka, amelyet a lendkerék fogaskoszorú fölött 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-IC egy zárt elektronikus kapcsolás, erősítővel rendelkező Hall-rétegből áll. A Hall szonda kivezetésein át áramot vezetve a lapra merőleges mágneses indukció komponens hatására ún. Hall-feszültség jön létre. A mágnes tér irányváltásakor a feszültség ugrásszerűen előjelet vált. A méréshez alkalmazott TLE 4921-3U típusú jeladó működési elvét a 27. ábra mutatja.



27. ábra. TLE 4921-3U típusú Hall-jeladó működési elve.

A Hall-feszültség erősítését az erősítő és szűrőegység végzi. A szűrés a zajelnyomás 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 ún. 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 2 teljes főtengely elfordulás (720 fok) 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 üzemállapotban 15 db mintát vettem. Mivel a vizsgált motorok fogaskoszorúján 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. Dolgozatomban a 2.2. pont alatt áttekintettem a motor változó terhelés mellett mutatott viszonyairól rendelkezésre álló forrásokat. Az ebben az összefüggésben elemzett szögsebesség változások időállandói zömmel másodperc nagyságrendűek (*lásd 16. ábra*), ami a terhelések, illetve az ezek hatását kiküszöbölni hivatott szabályozókörök jellegéből adódik.

A munkaszakaszok néhány 10 ms időállandóihoz képest a motor üzemviszonyainak változásából adódó szögsebesség változások hosszabb idejű tranziens jelenségként lépnek fel. A mérések során a rendelkezésemre álló külső műszerek segítségével, szemrevételezés alapján megállapított állandósult üzemállapotban kezdtem meg a mintavételezést. Az ennek ellenére maradó tranziens hatások kiszűrésére matematikai statisztikai módszert alkalmaztam.

Az egyes üzemállapotokra 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:

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\delta_x \cdot \delta_y} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2\right)}} \quad /73/$$

ahol:

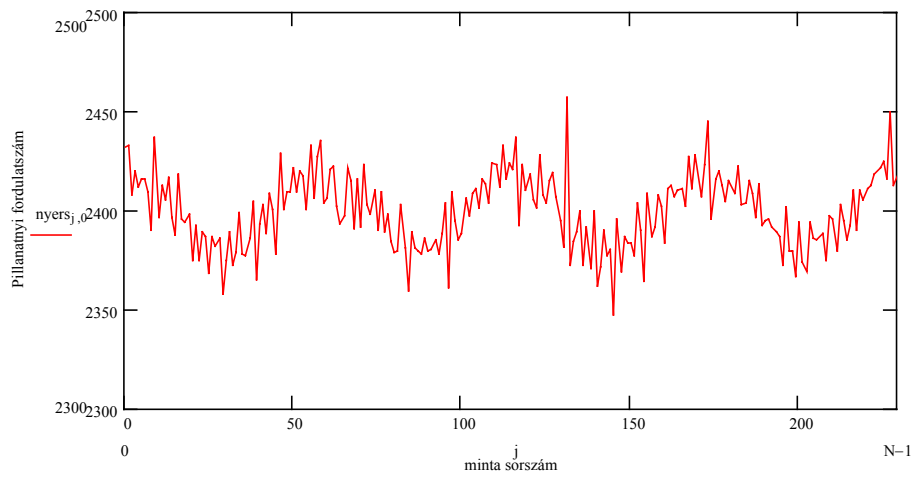
- $\rho_{x,y}$ - Korrelációs együttható
- n - A vizsgált adatpárok száma
- δ_x, δ_y - Az x és y értékek szórása
- n - Az adatpárok száma

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 üzemállapotot jellemző reprezentatív mintaként azt az egyet választottam, melynek adatai a legkisebb szórásúak.

A vizsgálati adatok matematikai statisztikai jellemzőit a PERKINS 1004-4T motoron terhelés mellett végzett vizsgálatokra –melyek eredményét az alábbiakban mutatom be- az *M3.1.*, *M4.1.*, *M5.1.* és az *M6.1. táblázatok* tartalmazzák.

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.

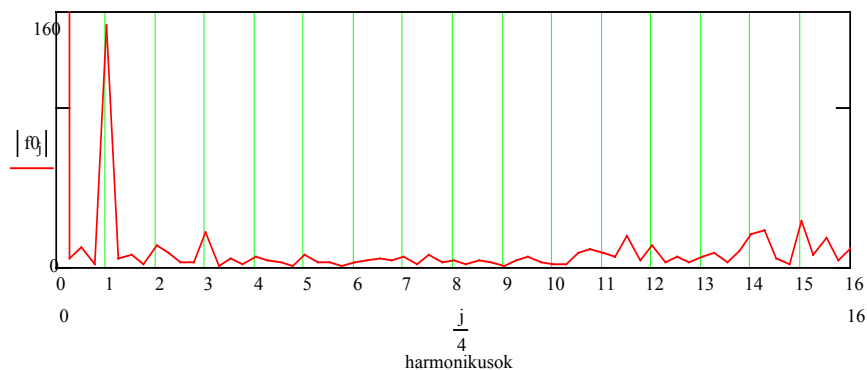
A *28. ábra* nyers adatsort mutat $n=2400 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámon a terhelési jelleggörbe egy pontjában.



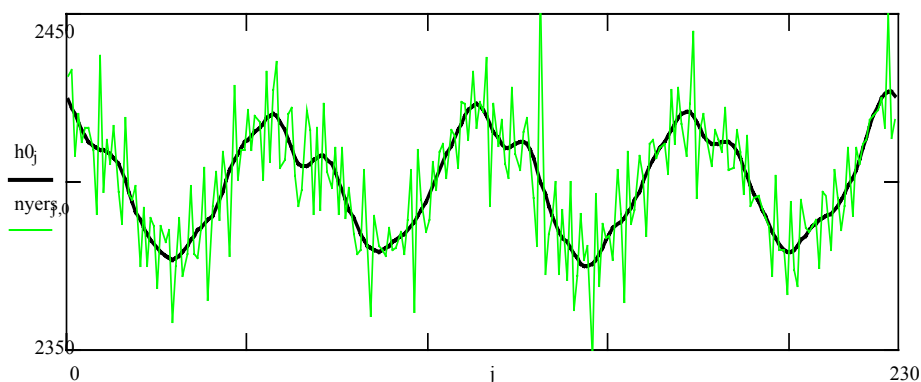
28. ábra. Nyers adatsor ($n_{\text{átlag}}=2400 \text{ min}^{-1}$, $F=49,05\text{N}$).

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

29. ábra. A Fourier transzformáció harmonikusai.



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 30. ábra magasvágó szűrés után előálló adatsort mutat, vízszintes tengelyen a minta sorszámát, a függőleges tengelyen a pillanatnyi fordulatszám értékét min^{-1} -ben feltüntetve.

30. ábra. Magasvágó szűréssel 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 fordulatszám %-os értékének változása 720 fok főtengely szögelfordulás alatt a PERKINS 1004-4T motor esetén az *M3.-M6. Mellékletek* ábráin látható.

A továbbiakban a főtengelyen mérhető, fordulaton belüli szögsebesség változás eddigiekben bemutatott módon meghatározott időfüggvénye, valamint egyes, az üzemeltetés szempontjából fontos, a későbbiekben részletesen ismertetett motorjellemző paraméterek közötti összefüggés keresését kíséreltem meg. A mérések elvégzése és az adatok előzetes feldolgozása után a *30. ábrán* láthatóhoz hasonló függvények a fékpadon beállított üzemállapotok mindegyikére vonatkozóan rendelkezésemre álltak.

A mért függvények számos paraméterét megkíséreltem kapcsolatba hozni a motorüzemállapot jellemzőkkel, hogy a következtetésre legalkalmasabb függvény jellemzőt megtaláljam. Többek között vizsgáltam a kapcsolat szorosságát a motorjellemzők 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 motorjellemzők között találtam szoros kapcsolatot, így a további munkát ezzel végeztem.

A regressziós egyenes meredekségét az alábbiak szerint határoztam meg:

$$m = \frac{n \cdot \sum x \cdot y - (\sum x) \cdot (\sum y)}{n \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad /74/$$

ahol:

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

3.4. Vizsgálati körülmények

Az alábbiakban ismertetem az elvégzett motorvizsgálatok körülményeit. A vizsgálatok a SZIE Rendszertechnika Intézet valamint a Járművek és Hőtechnikai Tanszék laboratóriumában az MSZ 1658/1970 fékpadi mérésekre vonatkozó szabvány szerint folytak.

Átlagos atmoszférikus adatok:

- a környezeti levegő hőmérséklete: 20 [°C]
- légnyomás: 980 [mbar]

A vizsgálat során alkalmazott hajtóanyag:

- gázolaj: Az Msz 1627-60 szabványnak megfelelő minőség
- sűrűség: 0,830 [kg/dm³]

A mérések megkezdése előtt az alábbi előkészületek kerültek elvégzésre:

- a fékpad és a motor megfelelő összekapcsolása kardántengellyel,
- a kardántengely védőburkolatának rögzítése,
- a szelephézag ellenőrzése, beállítása,
- a szelepek nyitási- és zárási helyzetének ellenőrzése,
- előbefecskendezési szög mérése, beállítása,
- a befecskendező fűvóka statikus nyitónyomásának ellenőrzése, beállítása,
- kenési rendszer, olajnyomás ellenőrzése.

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

- a főtengely fordulatszáma [min^{-1}], szögsebessége [s^{-1}],
- a beállított terhelés nagysága (terhelőerő) [kN],
- az adott fordulatszámhoz tartozó előbefecskendezési szög [fok],
- a hűtővíz be- és kimenő hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$],
- kipufogógáz hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$],
- a hűtőlevegő kimenő hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$],
- motorolaj hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$],
- motorolaj nyomás [bar],
- 100 g hajtóanyag elfogyasztásának időtartama [s],
- a fogaskoszorú két egymást követő foga elfordulása közötti időtartam [s].

3.5. A PERKINS 1004-4T motor bemutatása

A PERKINS 1004-4T típusú motor vízhűtéses, álló soros elrendezésű, négyhengeres, négyütemű, feltöltött rendszerű. Névleges teljesítménye 78,5 kW. Kenési rendszere nyomó olajozású, a főáramkörben elhelyezett olajsűrővel. Hűtési rendszere kényszer keringetéses, termosztáttal ellátott.

A vizsgált motor adatait az *1. táblázat* tartalmazza.

1. táblázat. A PERKINS 1004-4T motor műszaki adatai.

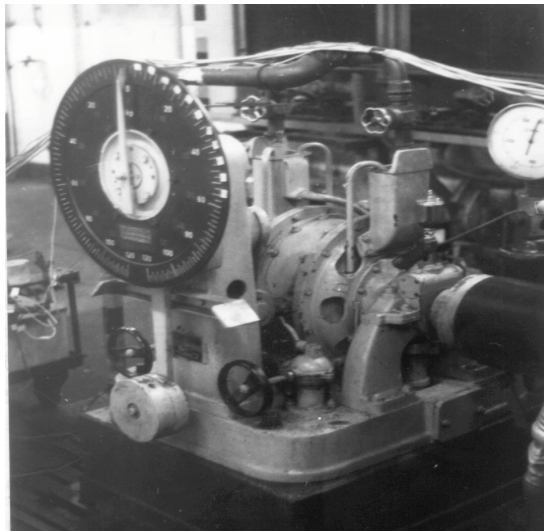
Megnevezés	Mértékegység	Adatok
Típus:		Perkins 1004-4T
Gyártó:		Perkins Engines Ltd., Peterborough, U.K.
Motorszám:		AB 50442*U665256Y
Hengerszám/ütemszám:		4/4
Hengerelrendezés:		soros
Összlökettérfogat:	cm ³	4000
Kompresszió térfogat:	cm ³	66,5-62,3
Kompresszióviszony:		16,0:1
Égési sorrend:		1-3-4-2
Névleges teljesítmény: (DIN 6271, ISO3046/1)	kW	78,5
Keverékképzés:		Közvetlen befecskendezés
Legnagyobb nyomaték:	Nm	343 (1500 min ⁻¹)
Üresjárat legnagyobb fordulatszám:	min ⁻¹	2600
Üresjárat legkisebb fordulatszám:	min ⁻¹	1000
Névleges fordulatszám:	min ⁻¹	2240
Adagoló szivattyú típusa:		LUCAS CAV 609
Porlasztó nyitónyomás (statikus)	bar	220
Előbefecskendezési szög (alapjárat)	fok	11
A forgattyúmű geometriai adatai		
Forgattyú sugár (a löket fele):	mm	63,5
Forgattyú kar	mm	219
Henger átmérő:	mm	100
Szelepvezérlés		
Szívószelep nyit:	fok	8, FHP előtt
Szívószelep zár	fok	40, AHP után
Kipufogószelep nyit:	fok	46,3, AHP előtt
Kipufogószelep zár:	fok	17.7, FHP után
A szelepek geometriai adatai		
szívószelep átmérője:	mm	44
szívószelep max. lökete:	mm	8,7
kipufogó szelep átmérője:	mm	37
kipufogó szelep max. lökete	mm	8,8
Szelephézag (hideg motor)		
Szívószelep:	mm	0,2
Kipufogószelep:	mm	0,4
Befoglaló méretek		
hosszúság:	mm	711
szélesség:	mm	614
magasság:	mm	767
Tömeg:	kg	279
Tömeg/teljesítmény arány:	kg/kW	3,6

3.6. A fékpadi vizsgálatok során alkalmazott mérőeszközök bemutatása

Fékpád

A fékpadi méréseket D-4 típusú vízörvényes, szöges fékpádon végeztem. Jellemző műszaki adatai:

- P_{\max} - a mérhető maximális motorteljesítmény: 257 [kW]
- n_{\max} - maximális motor-főtengely fordulatszám: 4500 [min^{-1}]
- m - a fékpád tömege: 660 [kg]



31. ábra. D-4 típusú vízörvényes fékpád.

Fordulatszám mérés

A JHTT saját fejlesztésű optocsatolás jeladóval felszerelt mérőkészüléke fékpadi tartozékként állt rendelkezésre. Mérési elve alapján egy, a műszer részét képező 60 fogú tárcsa két egymást követő foga jeladó feletti elhaladásának időtartamát méri.

- Mérési pontossága: 1 [min^{-1}]

Előbefecskendezési szög mérése

Az előbefecskendezési szög ellenőrzésére az ELKON SD-102 típusú mérőkészüléket alkalmaztam, amely fordulatszám mérő funkcióval is bír. A készülék 12 V tápfeszültséggel, 30 W max. teljesítmény felvétellel üzemel. Jellemzői a következők:

Fordulatszám mérő egység:

- A vizsgálható motor hengerszáma: 2,4,6,8
- Méréshatár: 300-1000 [min⁻¹] és 300-3000 [min⁻¹]
- Mérési pontosság: ±2%

Előbefecskendezési szög-mérő egység:

- A vizsgálható motor hengerszáma: 2,4,6,8
- Méréshatár: 0-30 [fok] és 0-100 [fok]
- Mérési pontosság: ±2°

Időmérés (hajtóanyag fogyasztáshoz)

100 g hajtóanyag elfogyasztásának időtartamát a fékpadhoz tartozó beépített elektromos mérőóra méri.

- Mérési tartomány: 0-1800 [s]
- Mérési pontosság: 0,01 [s]
- Tápfeszültség igény: 220 [V]

Olajnyomás mérés

A motorolaj üzem közbeni nyomása megfelelő műszaki állapot mellett állandó esetleg kis mértékben, lassan változó. Mérésére TGL típusú Bourdon-csőves manométer állt rendelkezésre.

- Mérési tartománya: 0-16 [bar]

Hőmérséklet mérés

A környezeti levegő, a hűtővíz be- és kimenő hőmérsékletének, valamint a kipufogógáz hőmérsékletének mérésére a fékpadhoz tartozó hőmérséklet érzékelőt használtam. A magyar gyártmányú GANZ TKCF típusú hőérzékelő:

- mérési tartománya: 0-750 [°C]
- mérési pontossága: ±0,5 [°C]

Porlasztó nyitónyomás mérés

A statikus nyitónyomás ellenőrzését MIRKÖZ SUPER V típusú porlasztóvizsgáló készülékkel végeztem.

4. EREDMÉNYEK

4.1. A PERKINS 1004 4T típusú motor vizsgálati eredményei

4.1.1. A fékpadi mérések eredménye

A PERKINS 1004-4T típusú motoron a Vizsgálati anyag és módszer c. fejezetben leírtak szerint végzett fékpadi mérések eredményeit az *M2. melléklet* tartalmazza. Az *M2.1. táblázat* a regulátoros jelleggörbe felvételéhez végzett vizsgálatok adatait foglalja össze. A táblázat utolsó oszlopában az adott beállítás mellett rögzített, a főtengely szögsebesség-változását regisztráló mérési adatfájl azonosító jele található.

A méréssel meghatározott paraméterekből további motorjellemzők számíthatók az alábbi összefüggések szerint:

$$M = F \cdot r \quad /75/$$

ahol:

M - A motor nyomatéka [Nm]

F - Terhelőerő [N]

r - A fékkar sugara /0,716 m/

$$P = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M}{60 \cdot 1000} \quad /76/$$

ahol:

P - Effektív teljesítmény [kW]

n - Fordulatszám [min^{-1}]

M - Nyomaték [Nm]

$$B = \frac{3600 \cdot q}{t \cdot 1000} \quad /77/$$

ahol:

B - Órákenti hajtóanyag-fogyasztás [kg/h]

q - Egységnyi hajtóanyag mennyiség /100 g/

t - 100 g hajtóanyag elfogyasztásának időtartama [s]

$$b = \frac{B \cdot 1000}{P} \quad /78/$$

ahol:

- b - Fajlagos hajtóanyag-fogyasztás [g/kWh]
- B - Órákénti hajtóanyag-fogyasztás [kg/h]
- P - Effektív teljesítmény [kW]

$$p_e = 120 \cdot 10^4 \cdot \frac{P}{V_h \cdot n} \quad /79/$$

ahol:

- p_e - Effektív középnyomás [MPa]
- V_h - Összlökettérfogat [cm³]
- P - Effektív teljesítmény [kW]
- n - Fordulatszám [min⁻¹]

A vizsgált PERKINS 1004-4T motor regulátoros jelleggörbáját az *M2.1. ábra* mutatja.

Az ábrán a fordulatszám függvényében a teljesítmény (P), nyomaték (M), óránkénti hajtóanyag-fogyasztás (B) és a fajlagos hajtóanyag-fogyasztás (b) értékei vannak feltüntetve.

A terhelési jelleggörbék felvételéhez végzett vizsgálati adatokat a *M2. melléklet M2.2.-M2.4. táblázatok* tartalmazzák. A vizsgálati adatokból készült terhelési jelleggörbék a *M2.2.-M2.4. ábrákon* láthatók.

Az *M3.-M6. mellékletek* a mérési pontokban felvett főtengely-szögsebesség változás vizsgálati adatokat tartalmazzák.

4.1.2. A motorjellemező paraméterek és a főtengely szögsebesség-változása közötti összefüggések meghatározása

A Vizsgálati anyag és módszer c. fejezetben bemutatott elvek szerint a mérőprogram segítségével a fékpadon beállított üzemállapotokhoz -mint mérési pontokhoz- a főtengely szögsebesség-ingadozását 720 fok főtengely elfordulás alatt mértem és rögzítettem. A mérési görbék alapján azonosítható volt az azonos hengerekhez tartozó görbeszakasz, amelyet kiválasztva minden mérési pontban –a korábban már említett módon-meghatároztam a munkaszakaszokhoz tartozó görbék gyorsuló ágára simuló egyenes meredekségét (a továbbiakban meredekség, m). Az adatokat a 2. táblázat tartalmazza.

A Fourier-sorok felharmonikusai számának megváltoztatásával négyhengeres motornál $k=1,2,3$ alap-felharmonikusok egész számú többszöröseivel más szűrők állíthatók be, amivel a működésből adódó hengerenkénti különbségek is megjeleníthetők. Ennek a módszer diagnosztikai célú felhasználásánál van kiemelt jelentősége.

2. táblázat. A vizsgált munkaszakaszok gyorsuló ágának meredeksége a mérési pontokban.

n=2400 [min ⁻¹] ω=251,3274 [s ⁻¹]		n=2000 [min ⁻¹] ω=209,4395 [s ⁻¹]		n=1600 [min ⁻¹] ω=167,5516 [s ⁻¹]		Regulátoros jelleggörbe	
mérési pont	m	mérési pont	m	mérési pont	m	Mérési pont	m
1.	0,5786	1.	0,4391	1.	0,2461	1.	0,6272
2.	0,5563	2.	0,4191	2.	0,2316	2.	0,5565
3.	0,5312	3.	0,3932	3.	0,2081	3.	0,4721
4.	0,5041	4.	0,3725	4.	0,1823	4.	0,4296
5.	0,4685	5.	0,3538	5.	0,1643	5.	0,3379
6.	0,4491	6.	0,3296	6.	0,1347	6.	0,2687
7.	0,4394	7.	0,3115	7.	0,1171	7.	0,1717
		8.	0,2771	8.	0,1048	8.	0,0642

9.	0,2497	9.	0,0792
10.	0,2157	10.	0,0575

Az alábbiakban a bemutatott terhelési jelleggörbék egyes mérési pontjaiban meghatározott motornyomaték (M), hajtóanyag fogyasztás (B), motorteljesítmény (P) és a munkaszakaszok gyorsuló ágának meredeksége (m) közötti összefüggéseket elemzem. Az egyes üzemi paraméterek közötti függvénykapcsolat meghatározására regresszió analízist végeztem. A vizsgálatok minden esetben lineáris összefüggést mutattak.

A hajtóanyag fogyasztás (B) - terhelő nyomaték (M) összefüggéseit leíró egyenletek:

$$B_{(n1600)} = 32,8991 \cdot 10^{-3} \cdot M + 1,4548 \text{ [kg/h]} \quad /80/$$

$$r^2 = 0,9960$$

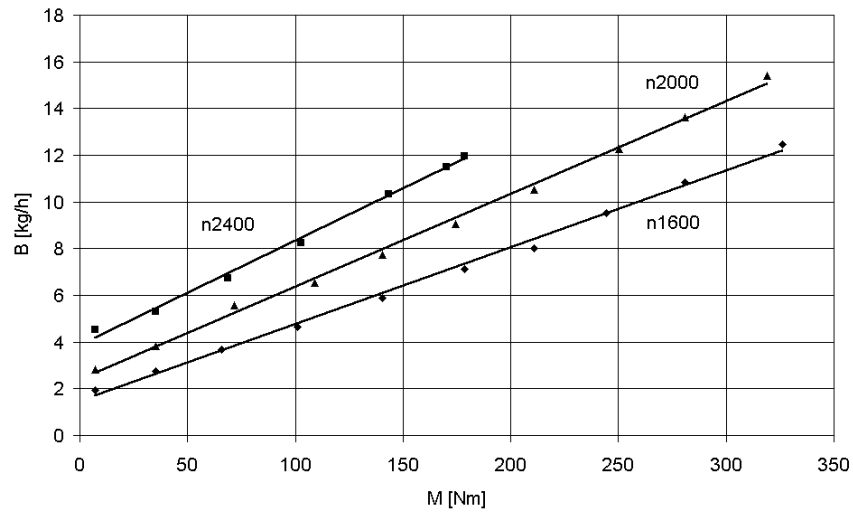
$$B_{(n2000)} = 38,6898 \cdot 10^{-3} \cdot M + 2,3941 \text{ [kg / h]} \quad /81/$$

$$r^2 = 0,9970$$

$$B_{(n2400)} = 44,5791 \cdot 10^{-3} \cdot M + 3,8866 \text{ [kg/h]} \quad /82/$$

$$r^2 = 0,9954$$

A /80/, /81/, /82/ egyenletek összefüggéseit a 32. ábra mutatja.



32. ábra. Hajtóanyag-fogyasztás a terhelőnyomaték függvényében

Merekség (m) - terhelő nyomaték (M) összefüggéseit leíró egyenletek:

$$m_{(n1600)} = -59,8646 \cdot 10^{-5} \cdot M + 0,2477 \quad /83/$$

$$r^2 = 0,9960$$

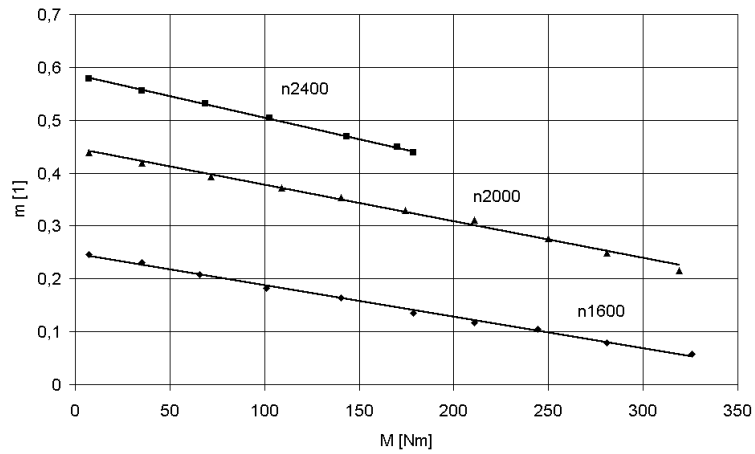
$$m_{(n2000)} = -69,2223 \cdot 10^{-5} \cdot M + 0,4467 \quad /84/$$

$$r^2 = 0,9937$$

$$m_{(n2400)} = -80,8336 \cdot 10^{-5} \cdot M + 0,5853 \quad /85/$$

$$r^2 = 0,9983$$

A /83/, /84/, és /85/ egyenletek összefüggéseit a 33. ábra mutatja:



33. ábra. Görbe-meredekség a terhelőnyomaték függvényében.

Az előzőek alapján a terhelőnyomaték - hajtóanyag fogyasztás viszonylatában megállapítható, hogy magasabb vizsgálati fordulatszámon a terhelés növelése esetén a fordulatszám állandó értéken tartásához egyre intenzívebben hajtóanyag adagolás szükséges. Tehát a hajtóanyag-fogyasztás görbéjének meredeksége egyre nagyobb.

Ez a megállapítás érvényes a terhelő nyomaték és a szögsebesség-változás munkaszakaszonkénti alakulását leíró görbék gyorsuló ágának meredeksége közötti összefüggésekre is. Magasabb vizsgálati fordulatszámon a terhelő nyomaték növelésével a meredekség -hasonlóan a hajtóanyag-fogyasztás görbék meredekségéhez- egyre intenzívebben növekedik.

Az előzőekben közölt egyenletekben a terhelőnyomaték (M) együtthatója a vizsgálati fordulatszám változásával az alábbiak szerint változik a hajtóanyag fogyasztás görbe esetében:

$$\frac{38,6891}{32,8991} = 1,174 \text{ illetve } \frac{44,5791}{38,6891} = 1,152 \quad /86/$$

A szögsebesség-változást leíró görbék meredekségének aránya:

$$\frac{-69,2223 \cdot 10^{-5}}{-59,8646 \cdot 10^{-5}} = 1,156 \text{ illetve } \frac{-80,8336 \cdot 10^{-5}}{-69,2223 \cdot 10^{-5}} = 1,166 \quad /87/$$

Az 1,174 és 1,156 illetve az 1,152 és 1,166 viszonyszámok egymáshoz közeli értékei azt mutatják, hogy a terhelés változása függvényében a főtengely szögsebesség-változását leíró görbék meredeksége és a hajtóanyag fogyasztás közel azonos mértékben változik, így megállapítható a közöttük lévő szoros összefüggés azzal együtt, hogy a terhelés növelésével a hajtóanyag fogyasztás természetesen növekedik, a szögsebesség-változás görbék meredeksége azonban csökken.

A hajtóanyag fogyasztás (B) - teljesítmény (P) összefüggéseit leíró egyenletek:

$$B_{(n1600)} = 0,1964 \cdot P + 1,4546 \text{ [kg/h]} \quad /88/$$

$$r^2 = 0,9960$$

$$B_{(n2000)} = 0,1895 \cdot P + 2,3941 \text{ [kg/h]} \quad /89/$$

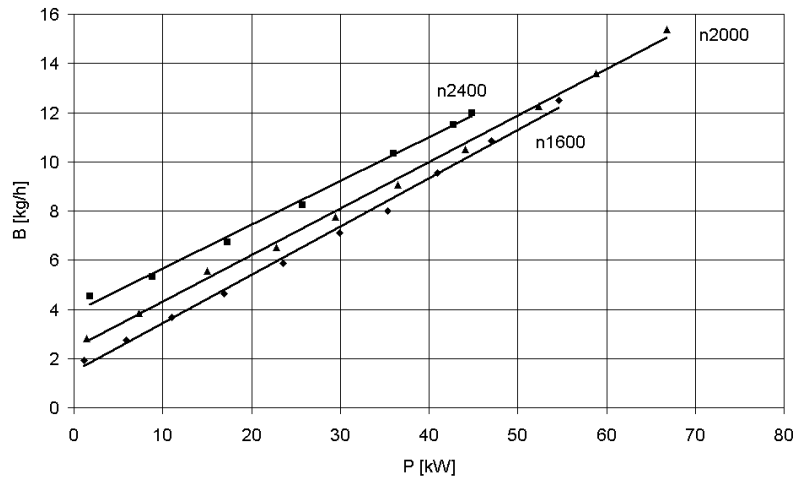
$$r^2 = 0,9970$$

$$B_{(n2400)} = 0,1774 \cdot P + 3,8866 \text{ [kg/h]} \quad /90/$$

$$r^2 = 0,9954$$

Az összefüggések közös diagramban ábrázolva a 34. ábrán is megfigyelhetők. A terhelési jelleggörbék felvételéhez kapcsolódó mérési adataim alapján más szerzőkhöz [Jurek 1961; Dezsényi, 1983] hasonlóan megerősítem, hogy a teljesítmény növeléséhez

alacsonyabb értéken tartott fordulatszám esetében intenzívebb hajtóanyag adagolás szükséges.



**34. ábra Hajtóanyag-fogyasztás a teljesítmény függvényében.
Merekség (m) –teljesítmény (P) összefüggést leíró egyenletek:**

Az alkalmazott vizsgálati módszerrel az is kimutatható, hogy a munkaszakaszok gyorsuló ágának mereksége a hajtóanyag-fogyasztás görbék merekségével arányos, amit a motorteljesítmény és a munkaszakaszok gyorsuló ágának mereksége közötti összefüggés is igazol. Ez esetben ugyanis megállapítható, hogy nagyobb -állandó értéken tartott- fordulatszámra a teljesítmény növelésével az általam felvett szögsebesség-változás görbék mereksége –hasonlóan a fogyasztás görbééhez- enyhébben növekszik. Így tehát a munkaszakaszok gyorsuló ágának mereksége tükrözi a hajtóanyag adagolás intenzitásának megfelelő gázerők alakulását a hengertérben.

Az alábbiakban közlöm a teljesítmény (P) és a munkaszakaszok gyorsuló ágának meredeksége (m) összefüggéseit leíró egyenleteket, melyeket a korábbiakhoz hasonlóan lineáris regresszió analízissel határoztam meg. Az összefüggéseket a 35. ábra mutatja.

$$m_{(n1600)} = -35,7290 \cdot 10^{-4} \cdot P + 0,2477 \quad /91/$$

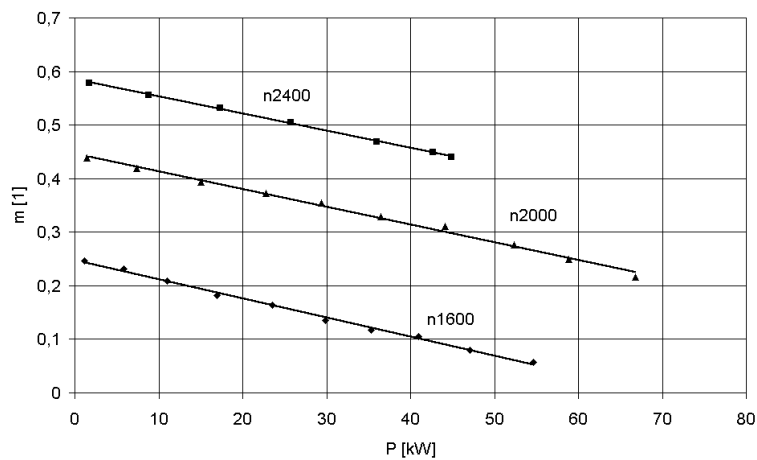
$$r^2 = 0,9960$$

$$m_{(n2000)} = -33,0512 \cdot 10^{-4} \cdot P + 0,4467 \quad /92/$$

$$r^2 = 0,9937$$

$$m_{(n2400)} = -32,1627 \cdot 10^{-4} \cdot P + 0,5853 \quad /93/$$

$$r^2 = 0,9983$$



35. ábra. Meredekség a teljesítmény függvényében.
Nyomaték (M) – meredekség (m) összefüggései:

$$M_{(n1600)} = -1663,8244 \cdot m + 412,8414 [\text{Nm}] \quad /94/$$

$$r^2 = 0,9960$$

$$M_{(n2000)} = -1435,5976 \cdot m + 642,3380 \text{ [Nm]} \quad /95/$$

$$r^2 = 0,9937$$

$$M_{(n2400)} = -1236,2773 \cdot m + 723,6813 \text{ [Nm]} \quad /96/$$

$$r^2 = 0,9983$$

Teljesítmény (P) - meredekség (m) összefüggései:

$$P_{(n1600)} = -278,7764 \cdot m + 69,1722 \text{ [kW]} \quad /97/$$

$$r^2 = 0,9960$$

$$P_{(n2000)} = -300,6709 \cdot m + 134,5309 \text{ [kW]} \quad /98/$$

$$r^2 = 0,9937$$

$$P_{(n2400)} = -310,7103 \cdot m + 181,8809 \text{ [kW]} \quad /99/$$

$$r^2 = 0,9983$$

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

$$B_{(n1600)} = -46,7143 \cdot m + 12,5754 \text{ [kg/h]} \quad /100/$$

$$r^2 = 0,9936$$

$$B_{(n2000)} = -57,1914 \cdot m + 27,9598 \text{ [kg/h]} \quad /101/$$

$$r^2 = 0,9982$$

$$B_{(n2400)} = -55,1805 \cdot m + 36,1821 \text{ [kg/h]} \quad /102/$$

$$r^2 = 0,9972$$

A regulátoros jelleggörbe szabályozott szakaszának mérési pontjaiban a munkaszakaszok gyorsuló ágának meredeksége (m) az egyes motorjellemzőkkel a következő összefüggéseket mutatja:

$$P = -247,576 \cdot m + 155,210 [\text{kW}] \quad /103/$$

$$r^2 = 0,9980$$

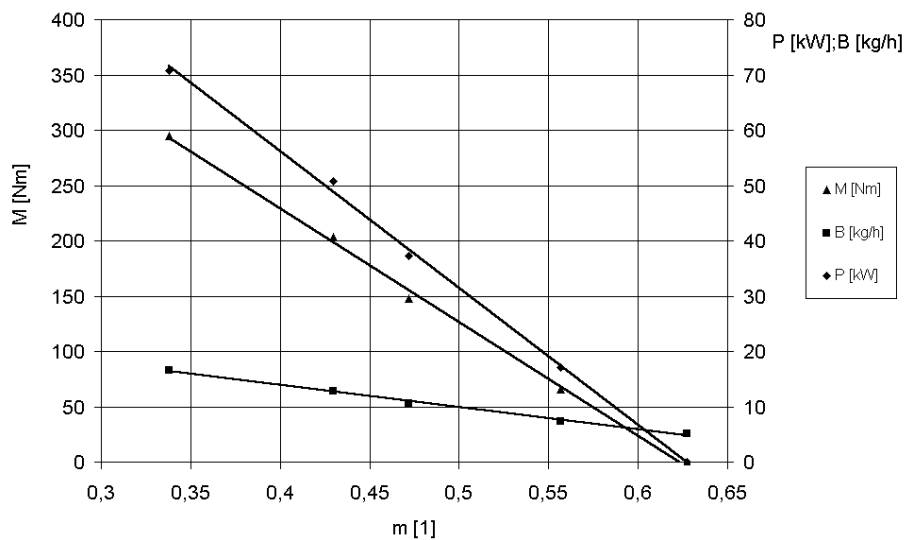
$$M = -1028,77 \cdot m + 640,976 [\text{Nm}] \quad /104/$$

$$r^2 = 0,9979$$

$$B = -40,0591 \cdot m + 29,8967 [\text{kg/h}] \quad /105/$$

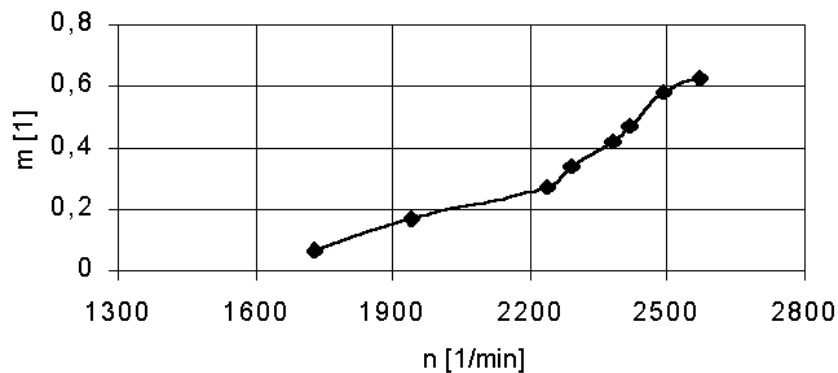
$$r^2 = 0,9951$$

Az összefüggések a 36. ábrán tanulmányozhatók.



36. ábra. Motorjellemzők a meredekség függvényében.

A mikroszögsebesség-változás vizsgálatában a munkaszakaszok gyorsuló ágának meredeksége lineárisan követi a fordulatszám alakulását, azonban mint ahogyan az a 37. ábrán látható, a névleges fordulatszámra a görbe menetében töréspont van. Így az ábrán látható módon jól elkülöníthető a regulátor működési tartománya és a szabad ág.



37. ábra. Motorfordulatszám - meredekség összefüggései.

4.2. A motorteljesítmény meghatározása a főtengely szögsebesség-változása alapján többparaméteres felületillesztéssel

4.2.1. Matematikai modellalkotás a részleges üzemi tartományra

A különböző fordulatszámokon ($n_1=1600 \text{ min}^{-1}$, $n_2=2000 \text{ min}^{-1}$, $n_3=2400 \text{ min}^{-1}$) felvett terhelési jelleggörbék egyes üzemállapotaihoz tartozó teljesítményértékek pontjaira felületillesztést végeztem azzal a céllal, hogy feltárjam a főtengely szögsebessége, a munkaszakaszok gyorsuló ágának meredeksége és a pillanatnyi teljesítmény közötti matematikai összefüggéseket.

Független változónak az adott terheléshez tartozó állandó szögsebességet (ω) és az M3-M6. mellékletekben bemutatott szögsebesség-ingadozást leíró görbék munkaszakaszonkénti gyorsuló ágának meredekségét (m) választottam.

Így a mérési pontokra illesztett felület egyenletének megadásával felállított matematikai modell e két paraméter ismeretében számítja a motor pillanatnyi üzemi teljesítményét.

Az illesztett felület egyenlete:

$$P = a + b \cdot \omega + c \cdot m + d \cdot \omega^2 + e \cdot m^2 + f \cdot \omega \cdot m \quad /106/$$

ahol:

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

A felületillesztés statisztikai jellemzőit a 3. táblázat közli. A statisztikai próba eredményét a 4. táblázat mutatja. Az 5. táblázat a felületillesztés eredmény táblázata.

3. táblázat. A felületillesztés statisztikai jellemzői a részleges üzemi tartományra.

Maradékok összege:	$-2,7089 \cdot 10^{-12}$
Maradékok átlaga:	$-1,0033 \cdot 10^{-13}$
Maradék négyzetösszeg:	35,9887
Standard hiba:	1,3091
R²:	0,9961
R_a² (%):	99,61

4. táblázat. A statisztikai próba eredménye a részleges üzemi tartományra.

Változó	Érték	Standard hiba	t-érték	Prob. (t)
a	-365,9228	31,5877	-11,5843	0,0
b	3,6257	0,4292	8,4482	0,0
c	-349,0711	84,1196	-4,1497	$45 \cdot 10^{-5}$
d	$62,1789 \cdot 10^{-4}$	$14,9260 \cdot 10^{-4}$	-4,1658	$44 \cdot 10^{-5}$
e	-123,8341	71,8647	-1,7231	$99,55 \cdot 10^{-3}$
f	0,6348	0,6203	1,0235	0,31772

5. táblázat. A felületillesztés eredménye a részleges üzemi tartományra.

s.sz.	ω	m	$P_{\text{mért}} [\text{kW}]$	$P_{\text{számít}} [\text{kW}]$	d	d%
1	251,3274	0,5786	1,7653	1,4545	0,3108	17,6074
2	251,3274	0,5563	8,8266	8,8105	0,0160	0,1817
3	251,3274	0,5312	17,3001	16,9432	0,3568	2,0626
4	251,3274	0,5041	25,7736	25,5706	0,2030	0,7875
5	251,3274	0,4685	36,0124	36,6098	-0,5974	-1,6588
6	251,3274	0,4491	42,7206	42,4815	0,2391	0,5597
7	251,3274	0,4394	44,8390	45,3674	-0,5284	-1,1784
8	209,4395	0,4391	1,4711	1,9436	-0,4725	-32,1191
9	209,4395	0,4191	7,3555	8,3741	-1,0186	-13,8482
10	209,4395	0,3932	15,0052	16,5657	-1,5605	-10,4000
11	209,4395	0,3725	22,8020	23,0278	-0,2258	-0,9903
12	209,4395	0,3538	29,4219	28,7315	0,6904	2,3466
13	209,4395	0,3296	36,4831	36,0023	0,4809	1,3180
14	209,4395	0,3115	44,1328	41,3755	2,7574	6,2479
15	209,4395	0,2771	52,3710	51,3154	1,0556	2,0156
16	209,4395	0,2497	58,8438	59,0130	-0,1693	-0,2876
17	209,4395	0,2157	66,7877	68,3253	-1,5376	-2,3022
18	167,5516	0,2461	1,1769	-0,2279	1,4048	119,3681
19	167,5516	0,2316	5,8844	4,1767	1,7077	29,0213
20	167,5516	0,2081	11,0130	11,1403	-0,1273	-1,1561
21	167,5516	0,1823	16,9470	18,6433	-1,6963	-10,0096
22	167,5516	0,1643	23,5375	23,8053	-0,2677	-1,1375
23	167,5516	0,1347	29,8926	32,0683	-2,1757	-7,2782
24	167,5516	0,1171	35,3063	36,8913	-1,5850	-4,4894
25	167,5516	0,1048	40,9553	40,2219	0,7333	1,7906
26	167,5516	0,0792	47,0750	47,0243	0,0508	0,1079
27	167,5516	0,0575	54,6070	52,6516	1,9554	3,5809
átlag			28,8262	28,8262	0,0000	3,7089
szórás (s)			18,9808	18,9443	1,1765	25,2824

Megjegyzés: d - a mért és számított teljesítményértékek különbsége

Mint látható a méréssel és számítással meghatározott teljesítmény %-os eltéréseinek szórása meghaladja a 25%-ot. Az is látszik a közölt adatokból, hogy a mért és számított értékek közötti jelentős eltérés az alacsony terhelési szinteken jelentkezik, ami annak tudható be, hogy a fékpad mérési pontatlansága illetve a terhelő erő leolvasási

pontatlansága az alacsony terhelési szinteken jellemző. Ezt igazolja a fékpad üzemi karakterisztikája is.

Az előzőek alapján az alacsony terhelési szintek mérési adatainak elhagyásával módosított felületillesztést végeztem. Négy mérési pont (az $n=1600 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámon az első két pont, az $n=2000 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámon az első és az $n=2400 \text{ min}^{-1}$ fordulatszámon szintén az első pont) elhagyásával 23 mérési pontra újra elvégeztem a felületillesztést.

A módosítással az illesztett felület egyenlete:

$$P = a + b \cdot \omega + c \cdot m + d \cdot \omega^2 + e \cdot m^2 + f \cdot \omega \cdot m \quad /107/$$

ahol:

- P - Motorteljesítmény [kW]
- ω - A főtengely szögsebessége [s^{-1}]
- m - Szögsebesség-ingadozás görbék meredeksége [1]
- a,b,c,d,e,f - Az egyenlet változói

A felületillesztés statisztikai jellemzőit a 6. táblázat közli. A statisztikai próba eredményét a 7. táblázat mutatja. A 8. táblázat a felületillesztés eredmény táblázata.

6. táblázat. A módosított felületillesztés statisztikai jellemzői a részleges üzemi tartományra.

Maradékok összege:	$6,5424 \cdot 10^{-10}$
Maradékok átlaga:	$2,8445 \cdot 10^{-11}$
Maradék négyzet-összeg:	22,5951
A becslés standard hibája:	1,1528
R²:	0,9963
R_a² (%):	99,63

7. táblázat. A módosított felületillesztés statisztikai próbája a részleges üzemi tartományra.

Változó	Érték	Standard hiba	t-érték	Prob. (t)
a	-456,4758	41,7630	-10,9301	0,0
b	4,7922	0,5596	8,5628	0,0
c	-554,4555	108,8935	-5,0917	9·10 ⁻⁵
d	-99,8061·10 ⁻⁴	19,0244·10 ⁻⁴	-5,2462	7·10 ⁻⁵
e	-254,0219	87,1550	-2,9146	9,66·10 ⁻³
f	1,9919	0,7751	2,5697	1,988·10 ⁻³

8. táblázat. A módosított felületillesztés eredménye a részleges üzemi tartományra.

s.sz.	ω	m	$P_{\text{mért}}$ [kW]	$P_{\text{számít}}$ [kW]	d	$d_{\%}$
1	251,3274	0,5563	8,8266	8,9493	-0,1227	-1,3902
2	251,3274	0,5312	17,3001	17,2304	0,0697	0,4030
3	251,3274	0,5041	25,7736	25,8337	-0,0601	-0,2331
4	251,3274	0,4685	36,0124	36,5502	-0,5378	-1,4932
5	251,3274	0,4491	42,7206	42,1077	0,6128	1,4345
6	251,3274	0,4394	44,8390	44,8010	0,0380	0,0847
7	209,4395	0,4191	7,3555	7,2575	0,0980	1,3319
8	209,4395	0,3932	15,0052	16,1457	-1,1406	-7,6011
9	209,4395	0,3725	22,8020	23,0413	-0,2393	-1,0496
10	209,4395	0,3538	29,4219	29,0381	0,3838	1,3045
11	209,4395	0,3296	36,4831	36,5544	-0,0712	-0,1952
12	209,4395	0,3115	44,1328	42,0119	2,1210	4,8058
13	209,4395	0,2771	52,3710	51,8759	0,4951	0,9453
14	209,4395	0,2497	58,8438	59,2932	-0,4494	-0,7637
15	209,4395	0,2157	66,7877	67,9850	-1,1973	-1,7927
16	167,5516	0,2081	11,0130	9,3459	1,6671	15,1376
17	167,5516	0,1823	16,9470	17,5926	-0,6456	-3,8094
18	167,5516	0,1643	23,5375	23,1727	0,3648	1,5500
19	167,5516	0,1347	29,8926	31,9361	-2,0435	-6,8361
20	167,5516	0,1171	35,3063	36,9494	-1,6431	-4,6538
21	167,5516	0,1048	40,9553	40,3651	0,5902	1,4410
22	167,5516	0,0792	47,0750	47,2178	-0,1427	-0,3032
23	167,5516	0,0575	54,6070	52,7542	1,8528	3,3930
átlag			33,3917	33,3917	$-8,69 \cdot 10^{-10}$	0,0743
szórás (s)			16,6737	16,6428	1,0134	4,3933
s^2			268,1963	276,9827		

Megjegyzés: d - a mért és számított értékek különbsége

A modell helyességének ellenőrzésére a Fisher-próbát alkalmaztam.

$$F = \frac{s^2_{\text{számított}}}{s^2_{\text{mért}}} = \frac{276,9627}{268,1963} = 1,032 \quad /108/$$

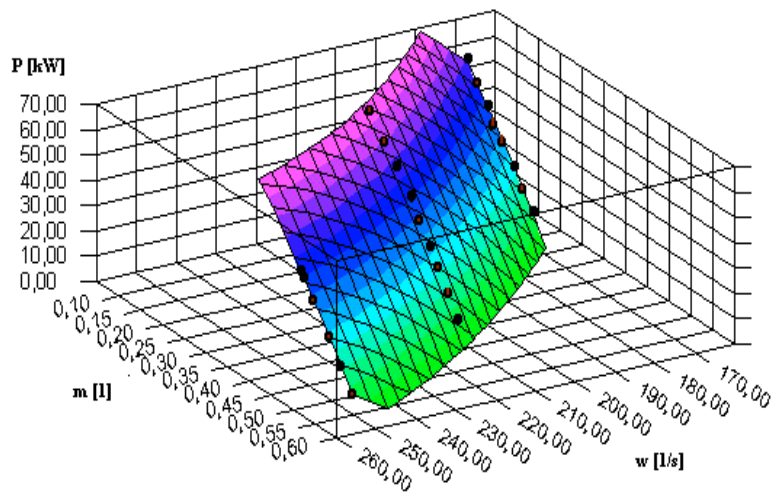
A számlálóra és a nevezőre egyaránt 23 szabadságfokra $P=5\%$ szinten megadott táblázati érték: $F_{\text{tábl.}}=2,0$. Mivel $F < F_{\text{tábl.}}$, a két szórás szignifikánsan azonosnak tekinthető.

Megállapítható, hogy a felállított matematikai modell a terhelési jelleggörbékhez tartozó

mérési pontokkal adott működési tartományban a következő pontossággal számítja a motor teljesítményét:

$$d_{\% \text{átl}} \pm D = d_{\% \text{átl}} \pm \frac{2 \cdot s_{d\%}}{\sqrt{n}} = 0,07434 \pm \frac{2 \cdot 4,3933}{\sqrt{23}} = 0,07434 \pm 1,8321\% \text{ /109/}$$

Az illesztett felületet a 38. ábra mutatja.



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

4.2.2. Matematikai modellalkotás a teljes üzemi tartományra

A teljesítmény számítására a motor tágabb üzemi tartományára megfelelő matematikai modell felállításához a terhelési görbék 23 mérési pontját a regulátoros jelleggörbe szabályozott szakaszának 5 mérési pontjával kibővítve felületillesztést végeztem. Ennek eredményeként a korábbiakhoz képest módosult az egyenlet fajtája az alábbiak szerint:

$$P = a + b \cdot \log \omega + c \cdot \log \omega^2 + d \cdot \log \omega^3 + e \cdot \log m + f \cdot \log m^2 + g \cdot \log m^3 \quad /110/$$

ahol:

- P - Motorteljesítmény [kW]
 ω - A főtengely szögsebessége [s⁻¹]
m - Szögsebesség-ingadozás görbék meredeksége
a,b,c,d,e,f,g - Az egyenlet változói

A felületillesztés statisztikai jellemzőit a 9. táblázat közli. A statisztikai próba eredményét az 10. táblázat mutatja. A 11. táblázat a felület illesztés eredmény táblázata.

9. táblázat

Maradékok összege:	2,8522·10 ⁻⁸
Maradékok átlaga:	1,0186·10 ⁻⁹
Marad. négyzet-össz.:	50,0465
Standard hiba:	1,5437
R ² :	0,9946
R _a ² (%):	99,46

10. táblázat

Változó	Érték	Standard hiba	t-érték	Prob (t)
a	68,471·10 ³	36,6492·10 ³	1,8683	0,07574
b	-39,5047·10 ³	20,6504·10 ³	-1,9130	0,06948
c	7,5219·10 ³	3,8773·10 ³	1,9399	0,06593
d	-474,0211	242,5757	-1,9541	0,06413
e	-287,0487	15,1790	-18,9108	0,0
f	-108,3557	9,6730	-11,2018	0,0
g	-15,0760	1,8695	-8,0638	0,0

11. táblázat. A felületillesztés eredménye a teljes üzemi tartományra.

s.sz.	ω	m	P _{mért} [kW]	P _{számít} [kW]	d	d%
1	269,1298	0,6272	0,0000	-0,5358	0,5358	0,0000
2	260,8569	0,5565	17,1458	16,5625	0,5833	3,4020
3	253,1076	0,4721	37,3342	37,6555	-0,3214	-0,8608
4	249,5472	0,4296	50,8315	48,2620	2,5694	5,0548
5	240,0177	0,3379	70,8067	68,5830	2,2237	3,1406
6	251,3274	0,5563	8,8266	9,5611	-0,7346	-8,3222
7	251,3274	0,5312	17,3001	17,4872	-0,1871	-1,0815
8	251,3274	0,5041	25,7736	26,0878	-0,3142	-1,2191
9	251,3274	0,4685	36,0124	37,3893	-1,3769	-3,8235
10	251,3274	0,4491	42,7206	43,5385	-0,8179	-1,9146
11	251,3274	0,4394	44,8390	46,5961	-1,7571	-3,9187
12	209,4395	0,4191	7,3555	7,7304	-0,3750	-5,0979
13	209,4395	0,3932	15,0052	15,9134	-0,9083	-6,0530
14	209,4395	0,3725	22,8020	22,4639	0,3381	1,4828
15	209,4395	0,3538	29,4219	28,3108	1,1111	3,7764
16	209,4395	0,3296	36,4831	35,8446	0,6386	1,7503
17	209,4395	0,3115	44,1328	41,4621	2,6708	6,0517
18	209,4395	0,2771	52,3710	51,9354	0,4356	0,8317
19	209,4395	0,2497	58,8438	60,0807	-1,2369	-2,1020
20	209,4395	0,2157	66,7877	69,9048	-3,1171	-4,6671
21	167,5516	0,2081	11,0130	11,2583	-0,2454	-2,2279

22	167,5516	0,1823	16,9470	18,3519	-1,4049	-8,2902
23	167,5516	0,1643	23,5375	23,1656	0,3719	1,5799
24	167,5516	0,1347	29,8926	30,7935	-0,9009	-3,0138
25	167,5516	0,1171	35,3063	35,3031	0,0032	0,0090
26	167,5516	0,1048	40,9553	38,5541	2,4012	5,8630
27	167,5516	0,0792	47,0750	46,3352	0,7398	1,5715
28	167,5516	0,0591	54,6070	55,5319	-0,9248	-1,6936
átlag			33,7188	33,7188	9,46·10⁻¹⁰	-0,7061
szórás (s)			18,47094	18,4207	1,3615	3,8967
s²			341,1741	339,3221		

Megjegyzés: d - a mért és számított értékek különbsége

A modell helyességének ellenőrzésére a Fisher-próbát alkalmaztam.

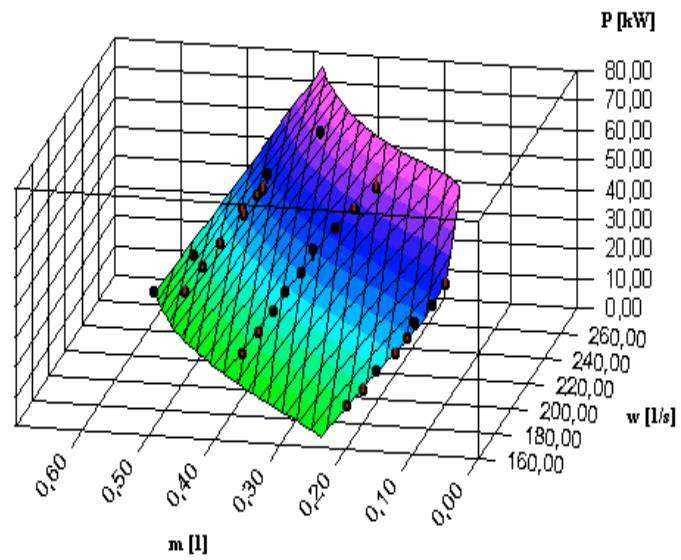
$$F = \frac{s^2_{\text{mért}}}{s^2_{\text{számított}}} = \frac{341,1741}{339,3221} = 1,005 \quad /111/$$

A számlálóra és a nevezőre egyaránt 28 szabadságfokra P=5% szinten megadott táblázati érték: $F_{\text{tábl.}}=1,87$. Mivel $F < F_{\text{tábl.}}$, a két szórás szignifikánsan azonosnak tekinthető.

Megállapítható, hogy az alkalmazott matematikai modell a terhelési jelleggörbékhez és a regulátoros jelleggörbe szabályozott szakaszára meghatározott mérési pontokkal adott működési tartományban az alábbi pontossággal számítja a motor teljesítményét:

$$d_{\% \text{átl}} \pm D = d_{\% \text{átl}} \pm \frac{2 \cdot s_{d\%}}{\sqrt{n}} = -0,7061 \pm \frac{2 \cdot 3,8967}{\sqrt{28}} = -0,7061 \pm 1,4728\% \quad /112/$$

A motor teljesítményét a teljes üzemi tartományra leíró felület a 39. ábrán látható.



39. 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]

4.3. A hajtóanyag-fogyasztás meghatározása a főtengely szögsebesség-változása alapján többparaméteres felületillesztéssel

A hajtóanyag fogyasztás számítására alkalmas matematikai modell felállításához a 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 szögsebessége (ω) és a munkaszakaszok gyorsuló ágának meredeksége (m) ismeretében számítja a motor óránkénti hajtóanyag-fogyasztását.

Az illesztett felület egyenlete:

$$B = a + \frac{b}{\omega} + c \cdot m + \frac{d}{\omega^2} + e \cdot m^2 + f \cdot \frac{m}{\omega} \quad /113/$$

A felületillesztés statisztikai jellemzőit a 12. táblázat közli. A statisztikai próba eredményét az 13. táblázat mutatja. A 14. táblázat a felületillesztés eredményét foglalja össze.

12. táblázat. A felületillesztés statisztikai jellemzői a hajtóanyag-fogyasztás meghatározására.

Maradékok összege:	$-6,5503 \cdot 10^{-13}$
Maradékok átlaga:	$-2,0469 \cdot 10^{-14}$
Maradék négyzet-összeg:	2,7839
A becslés standard hibája:	0,3272
R^2 :	0,9940

13. táblázat. A statisztikai próba eredménye a hajtóanyag-fogyasztás meghatározására.

Változó	Érték	Standard hiba	t-érték	Prob. (t)
a	158,3688	19,7366	8,0241	0
b	$-3,6237 \cdot 10^4$	6060,7817	-5,9789	0
c	-157,7682	31,6355	-4,9871	$3,00 \cdot 10^{-5}$
d	$2,0687 \cdot 10^6$	$4,6907 \cdot 10^5$	4,4101	$1,60 \cdot 10^{-4}$
e	40,9323	13,5176	3,0281	$5,50 \cdot 10^{-3}$
f	$1,5227 \cdot 10^4$	4708,9694	3,2336	$3,31 \cdot 10^{-3}$

14. táblázat. A felületillesztés eredménye a hajtóanyag-fogyasztás meghatározására.

s.sz.	ω	m	$B_{\text{mért}}$ [kg/h]	$B_{\text{számít.}}$ [kg/h]	d	$d\%$
1	251,3274	0,5786	4,5317	4,4119	0,1198	2,6438
2	251,3274	0,5563	5,3191	5,5425	-0,2233	-4,1989
3	251,3274	0,5312	6,7327	6,8637	-0,1310	-1,9452
4	251,3274	0,5041	8,2493	8,3519	-0,1026	-1,2435
5	251,3274	0,4685	10,3330	10,3954	-0,0624	-0,6040
6	251,3274	0,4491	11,5016	11,5503	-0,0487	-0,4233
7	251,3274	0,4394	11,9760	12,1362	-0,1601	-1,3370
8	209,4395	0,4391	2,8072	3,0541	-0,2468	-8,7931
9	209,4395	0,4191	3,8396	4,0502	-0,2106	-5,4850
10	209,4395	0,3932	5,5771	5,3903	0,1867	3,3481
11	209,4395	0,3725	6,5312	6,5069	0,0243	0,3725
12	209,4395	0,3538	7,7536	7,5382	0,2155	2,7788
13	209,4395	0,3296	9,0520	8,9183	0,1337	1,4772
14	209,4395	0,3115	10,5202	9,9879	0,5322	5,0593
15	209,4395	0,2771	12,2741	12,0852	0,1889	1,5394
16	209,4395	0,2497	13,6106	13,8226	-0,2121	-1,5580
17	209,4395	0,2157	15,3978	16,0684	-0,6706	-4,3551
18	167,5516	0,2461	1,9330	1,8006	0,1324	6,8505
19	167,5516	0,2316	2,7483	2,4913	0,2570	9,3521
20	167,5516	0,2081	3,6859	3,6371	0,0488	1,3244
21	167,5516	0,1823	4,6314	4,9494	-0,3180	-6,8655
22	167,5516	0,1643	5,8708	5,9018	-0,0310	-0,5280
23	167,5516	0,1347	7,1104	7,5162	-0,4058	-5,7070
24	167,5516	0,1171	8,0142	8,5126	-0,4983	-6,2177
25	167,5516	0,1048	9,5390	9,2251	0,3138	3,2897
26	167,5516	0,0792	10,8401	10,7461	0,0940	0,8673
27	167,5516	0,0575	12,4827	12,0747	0,4080	3,2685
28	269,1298	0,6272	5,1122	4,9236	0,1886	3,6884
29	260,8569	0,5565	7,3770	7,2201	0,1570	2,1276
30	253,1076	0,4621	10,5696	11,1307	-0,5611	-5,3088
31	249,5472	0,4296	12,7705	12,3690	0,4015	3,1437
32	240,0177	0,3379	16,5822	16,1021	0,4801	2,8952
átlag			8,2898	8,2898	-5,937·10⁻¹²	-0,0170
szórás (s)			3,8435	3,8318	0,2997	4,2194
s²			14,6957	14,6826		

Megjegyzés: d - a mért és számított eltérések különbsége

A modell helyességének ellenőrzésére a Fisher-próbát alkalmaztam.

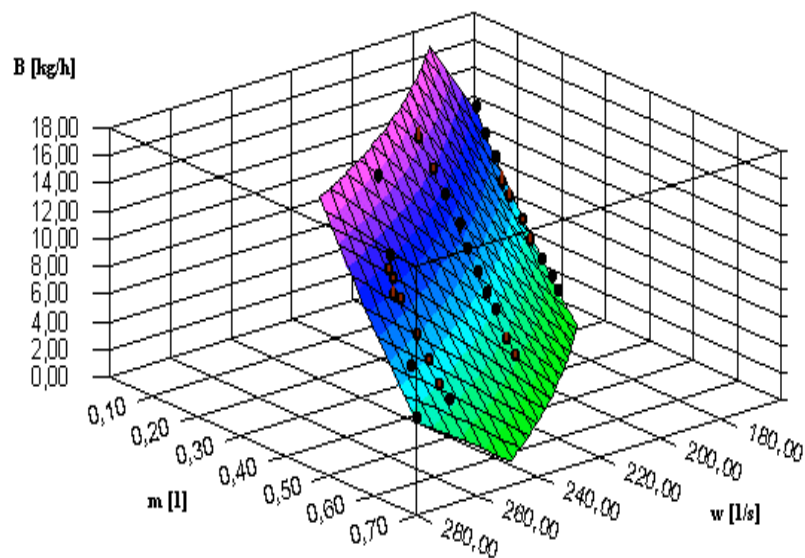
$$F = \frac{s^2_{\text{mért}}}{s^2_{\text{számított}}} = \frac{14,6957}{14,6826} = 1,0008 \quad /114/$$

A számlálóra és a nevezőre egyaránt 32 szabadságfokra P=5% szinten megadott táblázati érték: $F_{\text{tábl.}}=1,82$. Mivel $F < F_{\text{tábl.}}$, a két szórás szignifikánsan azonosnak tekinthető. A fenti adatok alapján megállapítható, hogy a modell

$$d_{\% \text{átl}} \pm D = d_{\% \text{átl}} \pm \frac{2 \cdot s_{d\%}}{\sqrt{n}} = -0,017 \pm \frac{2 \cdot 4,2194}{\sqrt{32}} = -0,017 \pm 1,4918\% \quad /115/$$

pontossággal számítja az óránkénti hajtóanyag-fogyasztás értékét.

Az illesztett felület térbeli alakja a 40. ábrán látható.



40. 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]

4.4. OETL ADN 60W típusú motor vizsgálati eredményei

Kutatómunkám elsődleges célja a bemutatott módszer alkalmazhatóságának vizsgálata a dízelmotor üzemében beállt változások követésére, a gépüzemeltetési szempontból lényeges energetikai jellemzők egyidejű meghatározása. Azonban megelőző kutatásaim eredménye igazolta, hogy a módszer alkalmas lehet egyes szerkezeti elemek műszaki állapotában beállt változások követésére is.

A Vizsgálati anyag és módszer c. fejezetben leírtak szerint több méréssorozatot végeztem a bemutatott Hall jeladóra épülő mérőrendszerrel, melyek során vizsgáltam a mérőrendszer és a mérési módszer motordiagnosztikai célú alkalmazhatóságát. Ezen vizsgálatok elvégzéséhez egy OETL ADN 60W típusú egyhengeres dízelmotor állt rendelkezésemre.

A vizsgált motoron az alábbi mesterségesen előidézett, különböző mértékű műszaki állapot változtatásokat eszközöltem:

8. Porlasztó nyitónyomásának megváltoztatása:

- 125 bar (p_1)
- 205 bar (p_2)

9. Levegőszűrő fojtása:

- 100%-os fojtás (a_1)
- 50%-os fojtás (a_2)

– fojtás nélkül (a_3)

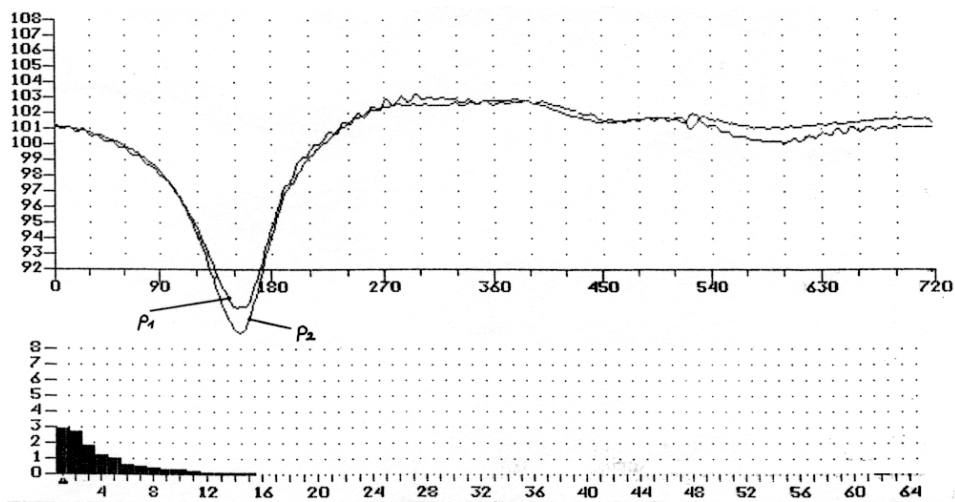
A fent említett műszaki állapotváltozások bekövetkezése a gépüzemeltetési gyakorlatban a legjellemzőbbek közé tartozik, ilyen értelemben indokoltnak tartom a diagnosztikai alkalmazhatósági vizsgálatok ezirányú kiterjesztését.

Az adatok értékelése a korábban bemutatott szűrési- és matematikai statisztikai módszerek szerint történt. A műszaki állapotváltozásokkal kapcsolatos főtengeley mikrosögsebesség-változás vizsgálata során felvett görbéket a 41., 42. ábrák mutatják. Az ábrák vízszintes tengelyén a Fourier-együtthatók, míg a függőleges tengelyen a pillanatnyi fordulatszám %-os változása figyelhető meg.

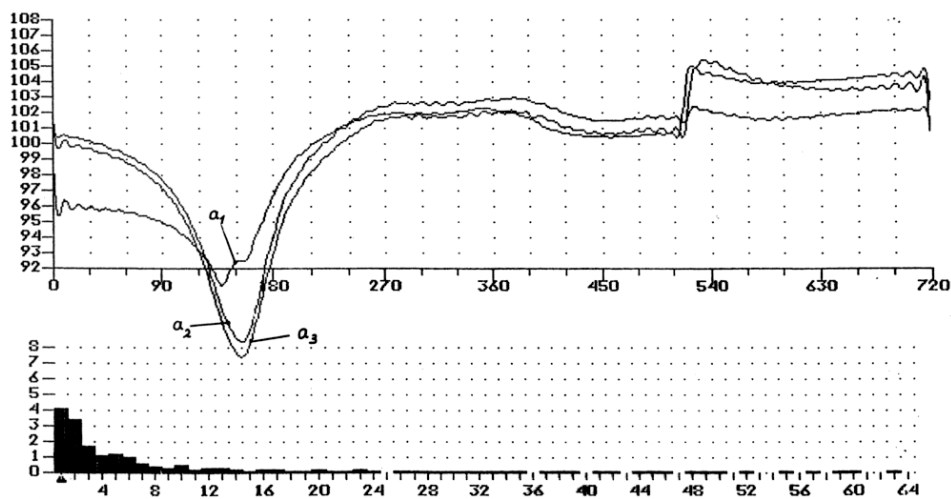
A fenti vizsgálatok alapján a motordiagnosztikai célú kutatási eredményeket az alábbiakban összegzem:

- A vizsgálati módszerrel a főtengely szögsebesség-változásán keresztül a motor műszaki állapotában bekövetkezett változások megjeleníthetők. A beállítások és különböző üzemállapotok hatása érzékelhető, amit a vizsgálati adatokból felvett diagramok szemléltetnek. Így megállapítható a módszer alkalmazásának lehetősége a célkitűzések szerinti diagnosztikai jellegű információ szerzésre a gépüzemeltetésben.
- A görbék matematikai analízise eredményeként a levegőszűrő fojtásával végzett vizsgálatok esetében a görbe jellemzői közül az amplitúdó nagyságában figyelhető meg jellemző változás. A fojtás nélküli állapothoz képest 50%-os fojtásnál 8%-os, míg 90%-os fojtásnál közel 40%-os amplitúdó csökkenés mérhető.
- A porlasztó nyitónyomásának változtatásakor az előírt értékhez képest 40%-al alacsonyabb nyitónyomás esetén szintén a görbe amplitúdójának méretében van jelentős változás, 20%-os méretcsökkenés mérhető.

A módszer diagnosztikai célú alkalmazásához az egyes szerkezeti elemek műszaki állapota és a főtengely szögsebesség-változás közötti kapcsolat mélyebb feltárása, a konkrét összefüggések kimunkálása további vizsgálatokat igényel, melyek meghaladják jelen dolgozat kereteit.



41. ábra. A főtengely szögsebesség-változása a porlasztó különböző nyitónyomásán.



42. ábra. A főtengely szögsebesség-változása a levegőszűrő különböző mértékű fojtása mellett.

4.5. Új tudományos eredmények

Munkámban belsőégésű motorok mikroflowamatait 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.

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:

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

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:

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

melynek együtthatói:

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

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

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

- motornyomaték és a munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége,
- motorteljesítmény és a munkaszakaszokon belüli szöggyorsulás meredeksége,
- 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 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:

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

$$r^2 = 0,9960$$

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

$$r^2 = 0,9937$$

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

$$r^2 = 0,9983$$

Teljesítmény (P) - meredekség (m) összefüggései:

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

$$r^2 = 0,9960$$

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

$$r^2 = 0,9937$$

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

$$r^2 = 0,9983$$

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

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

$$r^2 = 0,9936$$

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

$$r^2 = 0,9982$$

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

$$r^2 = 0,9972$$

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

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

$$r^2 = 0,9980$$

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

$$r^2 = 0,9979$$

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

$$r^2 = 0,9951$$

4. Saját mérési eredményekre alapozott matematikai modellalkotással többparaméteres motorteljesítmény meghatározási módszert dolgoztam ki a teljes üzemi tartományra. A modell a motorteljesítmény, a főténgely 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 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:

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

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

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 az alábbi függvénykapcsolatot szerint:

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

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 |

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, nevezetesen a levegőszűrő és a porlasztó esetében megállapítottam, hogy a rendellenes műszaki állapot hatása

szignifikánsan jelentkezik a főtengely szögsebesség-változását leíró grafikon menetében.

- A vizsgált szerkezeti egységek előírtasos műszaki állapotában valamint a rendellenes működési állapotban felvett szögsebesség-változást leíró görbék jellemzőit összehasonlítva, kimutatható eltérést tapasztaltam.
- 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.
- 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.

Az előzetes vizsgálati eredmények alapján megállapítottam, hogy a módszer lehetőséget ad a kutatások diagnosztikai célú továbbvitelére.

5. 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:

- Különböző dízelmotorokon végzett, az értekezésben részletesen bemutatott vizsgálataim eredménye alapján kijelenthető, hogy a módszer és a mérőrendszer alkalmas belsőégésű motorok főtengely-szögsebesség változásának munkaszakasonkénti vizsgálatára, a működési jellegzetességek által meghatározott mikrofolyamatok elemzésére.
- 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.
- A mérési eredmények alapján egyértelmű összefüggés mutatható ki a belsőégésű motor főtengelyének szögsebesség-változását leíró függvény grafikonjának egy jellemzője, a munkaszakason belüli szöggyorsulás meredeksége, valamint a motor pillanatnyi teljesítménye között. Ez irányú vizsgálataim eredményei alapján igazolást nyert a módszer alkalmassága a motorteljesítmény meghatározására.
- A mérési eredmények alapján egyértelmű összefüggés mutatható ki a belsőégésű motor főtengely-szögsebesség változását leíró függvény grafikonjának egy jellemzője, a munkaszakason belüli szöggyorsulás meredeksége, valamint a motor hajtóanyag-fogyasztása között. Így megállapítható, hogy a vizsgálati módszer alkalmas a belsőégésű motor hajtóanyag-fogyasztásának meghatározására.
- 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.

- 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.
- 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.
- 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.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkámban belsőégésű motorok mikrofolymatait vizsgáltam laboratóriumi körülmények között különböző, állandó nagyságú terhelés melletti üzemi állapotokban, illetve a motor egyes szerkezeti egységeinek különböző műszaki állapotában.

A mikrofolymatokat a belsőégésű motor egy munkaciklusára eső főtengelyszögsebesség változásokon keresztül tanulmányoztam és elemeztem. A vizsgálatok elvégzésére dízelmotort választottam. Választásomat indokolja, hogy a mezőgazdaság erőgép rendszerének döntő részét dízelmotorok alkotják, ezen túl a haszongépjárművek körében is az ilyen működési elvű motorok meghatározóak.

A motor üzemi állapotaira irányuló vizsgálataimat állandó terhelésen, a műszaki állapotban beállt változások kimutatására irányuló vizsgálatokat terhelés nélkül végeztem.

Munkám elméleti hipotézise, hogy a motor működésének mikrofolymata visszatükrözi a terhelési viszonyokat, a pillanatnyi üzemi állapotot, valamint az egyes szerkezeti elemek műszaki állapotát. A vizsgálati módszer így lehetővé teszi a motor gazdaságos működésének üzemi közbeni folyamatos ellenőrzését, a műszaki állapot kedvezőtlen változásának észlelését a gépüzemeltetés során.

Értekezésemben ismertettem a belsőégésű motorok főtengely szögsebesség-változás elemzéséhez szükséges forgattyúmű-elméleti kérdéseket. A fellelhető szakirodalom alapján tárgyaltam a motor változó terhelés melletti üzemi viszonyait, összefoglaló áttekintést adtam a téma kutatásában elért hazai- és nemzetközi tudományos eredményekről. Bemutattam a belsőégésű motorok üzemi jellemzőinek mérésére alkalmazott módszereket, a vizsgálatok jelentőségét.

Részletesen ismertettem a gépüzemeltetés információs rendszerében fontos szerepet betöltő, a motor üzemi meghatározó energetikai paraméterek újszerű meghatározását célzó fejlesztési megoldást, az elért gyakorlati és tudományos eredményeket.

Értekezésem célkitűzéseit az alábbiak szerint valósítottam meg:

10. Mérési, adatfeldolgozási módszert dolgoztam ki belsőégésű motorok működési mikrofolyamatainak elemzésére a főtengely-szögsebesség változásának vizsgálata alapján.
11. A mérési módszernek megfelelő pontosságú mérőrendszert és mérőprogramot állítottam össze belsőégésű motorok főtengely-szögsebesség változásának vizsgálatára.
12. A mikrofolyamat elemzési módszerre építve meghatároztam a főtengely szögsebesség-változása valamint az alapvető motorjellemzők (nyomaték, fordulatszám, teljesítmény, hajtóanyag-fogyasztás) közötti összefüggéseket.
13. A belsőégésű motor teljesítményének a főtengely szögsebesség-változásán alapuló meghatározására alkalmas matematikai modellt állítottam fel. Mérési eredményeimen keresztül vizsgáltam a modell pontosságát.
14. Belsőégésű motorok hajtóanyag-fogyasztásának a főtengely szögsebesség-változásán alapuló meghatározására alkalmas matematikai modellt állítottam fel. Mérési eredményeimen keresztül vizsgáltam a modell pontosságát.
15. A vizsgálati módszer műszaki diagnosztikai alkalmazhatóságának megítélésére megvizsgáltam a belsőégésű motor főtengelyének szögsebesség-változása és a műszaki állapot közötti lehetséges összefüggéseket.
16. A mérési, adatfeldolgozási módszer kidolgozásával, a kísérleti mérőrendszer összeállításával, valamint a módszer gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálata céljával lefolytatott mérésekkel megalapoztam egy többfunkciós fedélzeti mérőberendezés kifejlesztését a belsőégésű motorok energetikai jellemzőinek folyamatos, üzem közbeni egyidejű mérésen alapuló meghatározására.

SUMMARY

Within the frame of my research work I have examined the micro-processes of the internal combustion engines in laboratory circumstances, in several operating orders respectively in several technical conditions of certain operational units of the engine.

I have examined and analysed the micro-processes through the fluctuation of the angle velocity of the crankshaft during a whole working cycle. I took diesel engines to carry out the intended tests, because this kind of internal combustion engines constitute notable proportion of the agricultural and industrial engines.

All the tests intent on the examination of the operating terms were carried out on permanent load. The examined engine was not loaded when the research aim was to demonstrate the changes of the technical conditions.

The theoretical hypothesis of my research work is that the micro-processes of the operating engine reflect the loading conditions, operational terms and the technical conditions of some structural devices as well. Because of this the investigation method gives possibility for continuous control of the economical operation and the undesirable change of the technical condition of the engine.

In my dissertation I have explained the principle of the crank operation that is needed for understanding and analysing the fluctuation of the angle velocity of the crank shaft. Based on the technical literature I have discussed the operational conditions of the tractor engines within altering loading conditions. I have given a comprehensive review of the national and international scientific accomplishments of the topic research. I have discussed the applied methods for measuring the most important operational parameters of the internal combustion engines and the importance of the investigations as well.

I have given detailed explanation of my development resort that aims a novel measurement of those energetic parameters that determine the operation of the engine and also play an important role in the information system of the machinery management. My dissertation contains the scientific and practical results of my examinations.

The realised aims of my research work are the followings:

17. I have developed a measuring and data processing method for analysing the micro-processes of the international combustion engines based on the examination of the angle velocity fluctuation of the crank shaft.
18. I have prepared a measuring system and a computer programme for examining the angle velocity fluctuation of the crank shaft of the international combustion engines.
19. Based on the micro-process analysis method I have determined connections between the crank shaft fluctuation and the essential engine parameters (as torque, speed, performance, fuel-consumption).
20. I have established a mathematical model for determining the performance of the internal combustion engines based on the examination of the angle velocity fluctuation of the crank shaft.
21. I have established a mathematical model for determining the fuel-consumption of the internal combustion engines based on the examination of the angle velocity fluctuation of the crank shaft.
22. I have examined the possible connections between the angle velocity fluctuation of the crank shaft and the technical conditions of the engine in order to adjudicate the applicability of the measuring method for diagnostic purpose.
23. Working out the measuring and data processing method and preparing the measuring system I have established the development of a multiple functioned equipment for measuring energetic parameters of the international combustion engines continuously during the operation.

M1.

Irodalomjegyzék

1. Bedri, A. R.: Tractor performance monitor based on a single chip microcomputer ASAE-St. Joseph, 1981. p. 81/1549.
2. Berecz E. (szerk.): Kémia műszakiaknak
Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 1992.
3. Boór F.: Traktormotorok diagnosztikai vizsgálata
[Budapest: Akadémiai Kiadó, 1980.] (A mezőgazdaság műszaki fejlesztésének tudományos kérdései)
4. Boór F.-Németh I.: Dieselmotorok műszaki állapot-meghatározásának vizsgálata a forgattyústengely gyorsulás- és lassulásmérése alapján (jelentés)
Gödöllő: MÉM.M.I., 1983.
5. Boór F.-Németh I.: IFA tehergépkocsi karbantartása (jelentés)
Gödöllő: MÉM.M.I., 1984.
6. Boór F.-Németh I.: A mezőgazdasági gépkarbantartás és diagnosztizálás eszközei, berendezései
Budapest: Mezőgazdasági Kiadó, 1989.
7. Boros A.: Villamos mérések a gépészetben
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1982.
8. Boros A.: Mérésértékelés
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1982.
9. Borucki, L.-Dittman, J.: Bevezetés a digitális mérés technikába
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1975.
10. Bronstein, J.N.-Szemengyajev, K.A.: Matematikai zsebkönyv
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1987.
11. Carnegie, W.D.-Pasricha, M.S.: Effect of Forcing Terms and General Characteristics of Torsional Vibrations of Marine Engine Systems with Variable Inertia.
In: *Journal of Ship Research*, 18/1974.
12. Csorba L. (szerk.): Bevezetés a kutatásba
Gödöllő: GATE Gépészmérnöki Kar, 1998.
13. Dezsényi Gy.: Gépjárművek tervezése és vizsgálata. VII. Belsőégésű motorok forgattyús hajtóművei
Budapest: Tankönyvkiadó, 1983.
14. Dezsényi Gy. A belsőégésű motorok forgattyús tengelyén fellépő csavarólengések gerjesztőhatásai
In: *Járművek, Mezőgazdasági Gépek*, 1961., VIII. évf. 6.sz., p.418-420.
15. Dezsényi Gy.-Emőd I.-Liviu, F.: Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata
Budapest: Tankönyvkiadó, 1992.

16. Emőd I. Belsőégésű motorok forgattyús hajtóművének optimális tömegkiegyenlítése
In: *Járművek, Mezőgazdasági Gépek*, 1969., XVI. évf. 11.sz., p.418-420.
17. Farkas F.: Repceolaj-származékokkal működtetett D-240 típusú motor féktermi vizsgálata
In: *Mezőgazdasági Technika*, 1993., XXXIV. évf. 12.sz., p.27.
18. Faust D.- Szabó J.: Módszer és mérőeszköz a beépített dízelmotorok teljesítményének meghatározására
In: *Energiagazdálkodás*, 1985. 1-2. sz. p. 9-11.
19. Fekete A.: Traktormotor optimális terhelési tartománya
In: *Járművek, Mezőgazdasági Gépek*, 1987., XXXIV. évf. 8. sz. p. 289-291.
20. Fekete A.: Függesztőmű-szabályozás hatása a vonóerőre és munkamélységre
In: *Járművek, Mezőgazdasági Gépek*, 1987., XXXIV. évf. 10. sz. p. 365-367.
21. Fekete A.: Traktoros gépcsoport terhelésszabályozása [Budapest: Akadémiai Kiadó, 1990.] (A mezőgazdaság műszaki fejlesztésének tudományos kérdései)
22. Finichiu, L.: Négyhengeres motor forgattyús hajtóművének csavarólengéseinek számítása mátrix módszerrel.
In: *Járművek, Mezőgazdasági Gépek*, 1973., XX. évf. 6.sz., p.218-221.
23. Flamisch O.: Gépjármű diagnosztika. Módszerek és eljárások rejtett hibák feltárására
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1980.
24. Forgó S.: Dieselmotorok szerkezete és üzeme I.
Budapest: Tankönyvkiadó, 1963.
25. Grevis, I. W.-Bloome, P. D.: Tractor power monitor
In: *ASAE Transactions*, 3/1982. p. 595-597.
26. Grone, H.: Belsőégésű motorok mérési módszerei
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1982.
27. Hafner, K.E.-Maass, H.: Torsionsschwingungen in der Verbrennungskraftmaschine
Wien: Springer-Verlag, 1985.
28. Hambright, R. N.-Wood, C. D.: Vehicle diagnostic system: How soon?
In: *Agricultural Engineering*, 11/1973. p. 12-15.
29. Hofman, D.: Az ipari mérés technika
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1982.
30. Hohenberger, J. G.-Alexander, P.G.: Microprocessor based data acquisition system for mobile equipment
ASAE, St. Joseph, 1981. 81/1569.

31. Inozemcev. N.V.-Koskin, V.K.: A motorok égésfolyamatai
Budapest: Akadémiai Kiadó, 1952.
32. Janik J.-Juhász B.: Hibaelemzés és megbízhatóság
Gödöllő: GATE Mezőgazdasági Gépészmérnöki Kar, 1981.
33. Jánosi L.: Mobil fékpadok szerepe a traktorok diagnosztizálásában
In: *Mezőgazdasági Technika*, 1978., XIX. évf. 4.sz., p.26-27., 30-32.
34. Jurek A.: Belsőégésű motorok
Budapest: Tankönyvkiadó, 1961.
35. Jurek A.: Diesel-motorok II.
Budapest: Tankönyvkiadó, 1962.
36. Kármán T.-Biot A. M.: Matematikai módszerek műszaki feladatok megoldására
Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1967.
37. Kertész F.-Zombor I.: Mezőgazdasági erőgépek diagnosztikai vizsgálata
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1979.
38. Kiss P.-Jánosi L.-Jancsók P.: Dízelmotorok teljesítményének közvetett meghatározása
In: *Járművek, Építőipari és Mezőgazdasági Gépek*, 1997., XLIV. évf. 5. sz. p. 167-171.
39. Kocsis K.: Irányítástechnika
Gödöllő: ATE Mezőgazdasági Gépészmérnöki Kar, 1980.
40. Kománde Gy.-Várad J.: Autó és traktormotorok
Budapest: Mezőgazdasági Könyvkiadó, 1978.
41. Kománde Gy. (szerk.): Traktorok-autók II. (Motorok vizsgálata)
Gödöllő: Tankönyvkiadó, 1983.
42. Kománde Gy: Indirect Measurement of Compression Ignition Engines Power by a Multiparameters method
ISTVS 3. European Conference Warsawa, 1986.
43. Kománde Gy.: Zur Bewertung des Energieeinsatzes und der Maschinenauslastung im landwirtschaftlichen Produktion-prozess
In: *Deutsche Agrartechnik*, 4/1986, p. 157-159.
44. Kománde Gy.: Traktorok és munkagépek optimális kapcsolata talajművelésnél
In: *Járművek, Mezőgazdasági gépek*, 1987., XXXIV. Évf. 2.sz. p.43-47.
45. List, H.: Die Verbrennungskraftmaschine, Bd. 2. Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine
Wien: Springer-Verlag, 1939.
46. Ludvig Gy.: A gépek dinamikája
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1983.

47. Maass, H.-Klier, H.: Kräfte, Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschine
Wien: Springer-Verlag, 1981.
48. Mészáros I.-Sitkei Gy.: A mezőgazdasági gépek vizsgálata
Budapest: Akadémiai Kiadó, 1965.
49. Nagy L.-Ivanics L.: Digitális szögsebesség és szöggyorsulásmérési eljárások hibaanalízise
In: *Mérés és Automatika*, 1987., XXXV.évf., 10.sz. p. 353-362.
50. Натанзон, В.: Труды ЦИИМ
1936.
51. Pattanyús Á.G.: A gépek üzemtana
Budapest: Műszaki könyvkiadó, 1983.
52. Pischinger, A.: Zur Mechanik der Druckeinspritzung
ATZ Beihefte, 1935.
53. Pischinger, A.: Gemischbildung und Verbrennung im Dieselmotor
Wien: Springer-Verlag, 1957.
54. Rázsó I.-Kománci Gy.-Sitkei Gy.: Mezőgazdasági traktorok elmélete és szerkesztési irányelvei
Budapest: Tankönyvkiadó, 1964.
55. Rázsó I.-Sitkei Gy.: Traktorok üzemi viszonyai változó jellegű terhelésnél
Budapest: I.k. 1960.
56. Rejtő M.-Pach Zs. P.-né-Révész P.: Matematika
Budapest, Mezőgazdasági Kiadó, 1972.
57. Remsei N.: A mezőgazdasági gépek hibamegelőző javításának tervezése [Budapest: Akadémiai Kiadó, 1977.] (A mezőgazdaság műszaki fejlesztésének tudományos kérdései)
58. Ricardo, H. R.: The high speed internal combustion engine
London: Blackie and Sons, 1953.
59. Schafer, R. L.: Control concepts for tillage systems
ASAE, St. Joseph, 1981. p. 81/1601.
60. Schiroslawski, W.: Einzelzylinderbeschleunigung als Diagnoseparameter für den Dieselmotor
In: *Agrartechnik*, 9/1990., p. 418-421.
61. Schnell L. (szerk): Jelek és rendszerek mérés technikája
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1985.
62. Sembery P.: Mérés technika
Gödöllő: ATE Mezőgazdasági Gépészmérnöki Kar, 1980.

63. Sitkei Gy.: A keverékképzés és égés lefolyása diesel-motorokban
Budapest: Akadémiai Kiadó, 1960.
64. Smith, L. A.-Berker, G. L.-Colwick, R. F.: Instrumentation used to monitor energy requirements for agricultural field operations
ASAE, St. Joseph, 1981. p. 81/1043.
65. Stange K.: Portable instrumentation package for measuring tractor work.
ASAE, St. Joseph, 1982. p. 82/5516.
66. Sváb J.: Biometriai módszerek a kutatásban
Budapest: Mezőgazdasági Kiadó, 1981.
67. Szabó J.: Gépüzemeltetési jellemzők mérése és regisztrálása a mezőgazdasági termelőfolyamatokban (doktori értekezés)
Gödöllő: GATE Gépészmérnöki Kar, 1986.
68. Szabó S.: Hathengeres Csepel-motor torziós lengésvizsgálata
In: *Témák az 1959.-évi munkaprogramból*, Budapest: Járműfejlesztési Intézet, 1960.
69. Szász J. (szerk.): Mezőgazdasági gépek karbantartása
Budapest: Mezőgazdasági Kiadó, 1973.
70. Tárnok K.: A Rába M.A.N. D 2156 HM 6U típusjelű Diesel-motorok üzemi vizsgálata
In: *Járművek, Mezőgazdasági Gépek*. 1983., XXX. évf. 10.sz., p. 384.
71. Ternai Z.: Gépjárműmotorok méretezése
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1967.
72. Terplán S.: Dieselmotorok Vizsgálata II.
Budapest: Tankönyvkiadó, 1963.
73. Tibold V. (szerk.): Gépek üzemeltetése a mezőgazdaságban
Budapest: Mezőgazdasági kiadó, 1977.
74. Varga V.: Dízelmotorok tartóteljesítményének meghatározása a dugattyú hőterhelésének figyelembevételével (doktori értekezés)
Gödöllő: GATE Gépészmérnöki Kar, 1977.
75. Vas A. (szerk.): Belsőégésű motorok az autó- és traktortechikában.
Budapest: Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 1997.
76. Vas A.-Varga V.: Dízelmotorok környezetszennyező hatása és vizsgálatának tapasztalatai
In: *Járművek, Építőipari és Mezőgazdasági Gépek*. 1994., XLI. évf. 6.sz., p. 219-222.

77. Vas A.-Varga V.: Environmental polluting effect of diesel engines and the experiences with their examinations (társszerzővel).
In: *Hungarian Agricultural Engineering*, 7/1994., p. 54-56.
78. Váradi J.-Kománci Gy.: Traktorok-autók
Budapest: Mezőgazdasági Kiadó, 1980.
79. Vibe, I.I.: Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren
Berlin: Veb Verlag Technik, 1970.
80. Wehrmann, W.: Korrelációs technika
Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1983.
81. Zoerb, G.C.-Pang, S.N.-Wang, G.: Measuring fuel Consumption Indirectly.
In: *Agricultural Engineering*, 11/1984 p.

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, Horvátország: 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*, 11/1998., p. 62-63.
8. **Bártfai, Z.-Török, S.:** Cavitation and transient process of gear pumps.
In: *Hungarian Agricultural Engineering*, 12/1999., p. 73-74.
9. **Bártfai Z.:** Belsőégésű motor terhelésvizsgálata a főtengely szögsebesség-változásának mérésével.
In: *Járművek* 1999., XLVI. évf., 4. sz. p. 15-17.
10. **Bártfai, Z.:** Egyhengeres dízelmotor műszaki állapotának ellenőrzése a főtengely szöggyorsulásának mérésével
In: *Mezőgazdasági Technika* 2000., XLI. évf., 4. sz. p. 2-3.
11. **Bártfai, Z.:** Diagnostics of quality in operation of diesel engines
Nyitra, Szlovákia: 4th Conference on Quality and Realibility of Machines, 1999.
12. **Bártfai Z. et al.:** A működési mikrofolyamat-elemzés alkalmazása a hidraulika rendszerek diagnosztizálásában.
Gödöllő: MTA Agrár-Műszaki Bizottság Kutatási és Fejlesztési Tanácskozása, 1991.
13. **Bártfai Z. et al.:** 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
Bet Dagan, Izrael: *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.

