

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



NÉGYÜTEMŰ MOTOROK SZELEPRENDSZERÉT KIVÁLTÓ ALTERNATÍV MEGOLDÁS VIZSGÁLATA

Tézis füzet

KÉSZÍTETTE

KOVÁCS LÁSZLÓ

Okleveles autógépész mérnök
Okleveles mérnök-tanár

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK SZAKTERÜLET
TRANSPORTFOLYAMATOK ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
DSc, Professor

TÉMATERÜLET VEZETŐ:

Prof. Dr. Páczelt István
akadémikus, a műszaki tudományok doktora, professor emeritus

TÉMAVEZETŐK:

Prof. Dr. Szabó Szilárd
a műszaki tudományok kandidátusa, professor emeritus

Dr. Bolló Betti

PhD, egyetemi docens

Miskolc
2023

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



NÉGYÜTEMŰ MOTOROK SZELEPRENDSZERÉT KIVÁLTÓ ALTERNATÍV MEGOLDÁS VIZSGÁLATA

Tézis füzet

KÉSZÍTETTE

KOVÁCS LÁSZLÓ

Okleveles autógépész mérnök
Okleveles mérnök-tanár

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPÉSZETI ALAPTUDOMÁNYOK SZAKTERÜLET
TRANSPORTFOLYAMATOK ÉS GÉPEIK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
DSc, Professor

TÉMATERÜLET VEZETŐ:

Prof. Dr. Páczelt István
akadémikus, a műszaki tudományok doktora, professor emeritus

TÉMAVEZETŐK:

Prof. Dr. Szabó Szilárd
a műszaki tudományok kandidátusa, professor emeritus

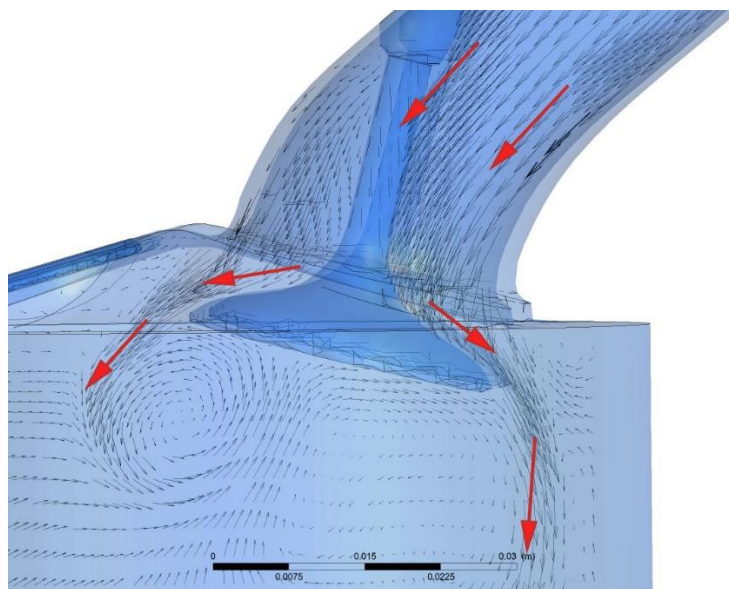
Dr. Bolló Betti
PhD, egyetemi docens

Miskolc
2023

1. BEVEZETÉS

1.1. Általános megfontolások

A belsőégésű motorok megjelenése óta számos töltetcsere vezérlési mód került kipróbálásra. Ezek közül az üléses szelep terjedt el legszélesebb körben. Legfontosabb jellemzője, hogy a tömítendő gázteret úgy zárja el, hogy a tömítő felületeket összeszorító erő arányos a tömítendő tér nyomásával. Vagyis minél nagyobb a gáztér nyomása, bizonyos határok között annál jobb tömítési hatás érhető el. Annak érdekében, hogy létrejöhessen az említett arányosság a tömítendő tér nyomása és a tömítő erő között, a szelepet úgy kell elhelyezni a töltetcsere szolgáló csatornában, hogy a szeleptányér gyakorlatilag zárja el az útját a tömítendő közegnek. Csakhogy ez az elrendezés azt is eredményezi, hogy a gázcsere szolgáló csatornát a szeleptányér akkor is részben zárja, amikor arra egyáltalán nincs szükség. Belsőégésű motor esetén a szívó és kipufogó ütemek alatt a szeleptányér tehát rontja az áramlási viszonyokat, mivel részben elzárja a szívó és kipufogó nyílásokat (1. ábra).



1. ábra: Szeleptányér áramlásterelő hatása

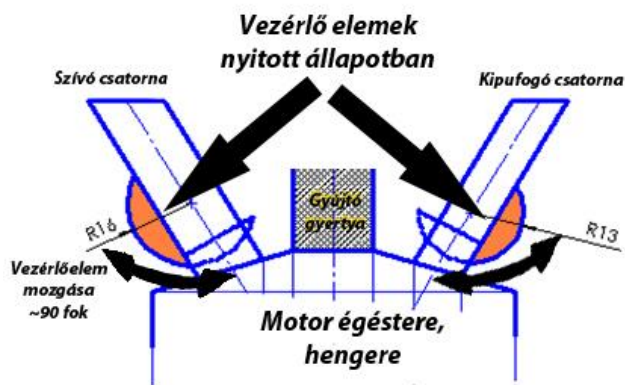
Ezzel egyidőben a szeleprugó-szelep-vezérmű bütyök alkatrész-együttes mozgásviszonyai behatárolják az erőforrás által elérhető fordulatszámot, valamint a szelepnitás karakterisztikáját [1]. Ez utóbbi a motor töltési fokát korlátozza, a kettő együtt pedig az elérhető teljesítményszintet [2]. A fent említett korlátok jelentős akadályt képeznek a motorok méretcsökkentését - népszerű idegen nevén „*engine downsizing*” – célzó fejlesztés folyamatában [S1], [3]. Természetesen, amint azt [2] is vázolja, kiegészítő szerkezetek, mint például turbótöltő alkalmazásával a probléma megoldható, de ez az út bonyolultabb szerkezetet, valamint magasabb költségeket eredményez

1.2. Célkitűzések

A bevezetésben vázolt korlátok kiküszöbölésére egy lengőszelepes konstrukciót alakítottam ki. E szerkezet lényege, hogy mind az üléses [4], mind a forgószelepes megoldások problémáit kiküszöböli. A forgó és üléses szelepek közös problémája, hogy a gázcsere folyamat alatt a hengertérbe belépő, illetve onnan távozó gázok hirtelen irányváltásra

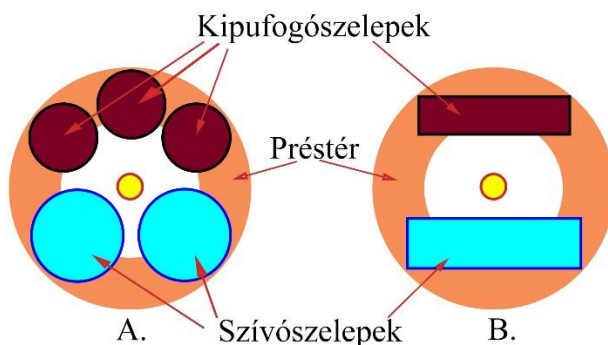
Négyütemű motorok szeleprendszerét kiváltó alternatív megoldás vizsgálata

kényszerülnek. Az ülékes szelepek estén a szeleptányért kell az áramlásnak megkerülnie, míg forgószelepes konstrukcióknál a folytonos mozgást végző szeleptest élei akadályozzák a veszteségmentes áramlást [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]. A lengőszelepek a már megvalósított forgószelepes konstrukcióktól eltérően nem végeznek folytonos forgó mozgást (2. ábra), hanem 90°-ot oda-vissza elfordulva nyitják, vagy zárják a szívó és kipufogó csatornákat. Ez a lehetőség számottevően javíthatja a belsőégésű motor töltési fokát, valamint a kipufogó ütem során befektetett – egyébként a jármű hajtására fordítható - kitolási munkát csökkentheti.



2. ábra: Lengőszelep rendszer kialakításának elvi vázlata

A lengőszelep alacsony tehetetlensége miatt a szelep mozgatas által felemészített veszteség teljesítmény is csökkenhet. Amint az a [1] szakirodalomban olvasható, a szelepvezérlés által felemészített teljesítmény az összes súrlódási veszteség közel 18%-át teszi ki.



3. ábra: Az ülékes szeleplű motor (A) és a lengőszelepes motor (B) hengerfejében kialakítható préstér méretének összehasonlítása (a sárga kör a gyújtógyertyát jelöli).

Termodinamikailag közelítve a kérdést az ülékes szeleplű motorok égésterének formai kialakítása kompromisszum a minél hatékonyabb égésfolyamatot eredményező geometria és a megfelelő áteresztőképességet biztosító szelepméret között. A minél nagyobb teljesítménysűrűség elérése érdekében a négszelepes szelepelrendezés bizonyult a legmegfelelőbbnek, de a szeleptányérok által elfoglalt felület a hengerfej szélein kialakítható préstér felületét csökkenti. Erre a csökkentésre Yamaha és Audi által alkalmazott ötszelepes rendszer a legeggyértelműbb, bár extrém példa (3. ábra). Nagyobb préstér felület javítja az égési folyamat hatásfokát, csökkenti a detonációs égés veszélyét, hiszen a töltet nagyobb része ég el a legkisebb égéstér térfogat mellett.

A prés-hatás (*squish*) előnye abban rejlik, hogy az intenzív gázmozgás létrehozása közvetlenül a friss keverék meggyújtása előtt következik be.

A henger szimmetriasíkjára merőleges (*swirl*) és azzal párhuzamos (*tumble*) örvénylési rendszerek alkalmazása ugyan megfelelő eredményt adhat, de az örvénytér létrehozásához szükséges áramlás csak a szívó csatorna formájának megfelelő kialakításával érhető el, ami

Négyütemű motorok szeleprendszerét kiváltó alternatív megoldás vizsgálata

rendszerint csökkenti a henger töltési fokát [14], [15], [16]. Lengőszelep alkalmazásával a préstér méretét értelemszerűen nem korlátozza a szeleptányér mérete, valamint a kívánatos swirl és tumble örvények létrehozása érdekében a csatorna kialakítás is szabadabban választható meg.

Lengőszeleppel nem kell tartani a forró kipufogószelep-tányér okozta öngyulladásos égés bekövetkezésétől sem. Mivel intenzívebb prés-hatás alakítható ki a detonációs égés veszélye is kisebb, az égés határfoka jobb. E két körülmény lehetővé teszi, hogy az ülékes szeleppel szerelt motorhoz képest nagyobb kompresszió viszony kerüljön kialakításra, azonos kompresszió tűrésű tüzelőanyag használatával, ami a motor hatásfokát javítja, fajlagos fogyasztását csökkenti. Az 1. táblázatban összefoglaltam., hogy egy ülékes szeleppel rendelkező erőforráshoz viszonyítva milyen előnyök várhatók, illetve valósíthatók meg lengőszelep alkalmazásával.

1. táblázat: Lengőszelep alkalmazásával elérhető előnyös működési paraméterek

Külön igazolást nem igénylő, a szeleprendszer eltérő kialakításából adódó előnyök	Várható járulékos előnyök	A dolgozatban is vizsgálandó előnyös tulajdonságok
Nagyobb felületarányú préstér alakítható ki	Kedvezőbb teljesítmény-motortömeg arány érhető el	Jobb hengertöltési fok érhető el
A forró kipufogószelep-tányér hiánya miatt magasabb kompresszió viszony alkalmazható	Elektronikus szelepvezérléssel Miller és Atkinson működési folyamatok is megvalósíthatók, különböző üzemállapotokban.	Kisebb áramlási veszteségek a szívó és kipufogószelep környezetében
A dugattyútetőn nem kell szelepzebekeket kialakítani, így az égési folyamatot hatékonyabbá tevő égéstér kialakítása lehetséges	Nagyméretű szelepek mellett is magasabb lehet a maximális motorfordulat	Lengőszeleppel a friss töltet bukóörvénylese (tumble) hatékonyabban kontrolálható
Azonos hengermétek mellett nagyobb csatorna keresztmetszetek alkalmazhatók	A hatékonyabb égés miatt a káros emissziók aránya csökkenhet	Tökéletesebb henger-öblítés érhető el
A kipufogószelep nyitási erőszükséglete független a hengertér nyomásától		Tökéletesebb és könnyebben kontrollálható réteges töltés kialakítása
A nagyobb felületarányú préstér miatt az égési folyamat hatékonyabb		

Jelen munka keretein belül vizsgálandó lengőszelepes gázcsere vezérléssel - a konstrukciós elrendezéséből adódóan - sokkal jobb töltési fok várható, illetve jóval magasabb fordulatszám érhető el, hozzáadott külső rendszerek nélkül is. E két paraméter javítása az adott erőforrás teljesítmény-sűrűségét emeli, amely az általános méretcsökkentési törekvések (engine downsizing) alapvető célja.

2. A KUTATÁSI PROGRAM ISMERTETÉSE

A vizsgálataim során a következő kérdésekre kerestem a választ:

- Megvizsgálni, hogyan aránylik a leadott teljesítmény és nyomaték a hagyományos szelepvezérléssel rendelkező motorokhoz képest.
- Az erőforrások méretcsökkentését célzó törekvések („*Engine Downsizing Concept*”) megvalósításába milyen fokig integrálható az új szeleprendszer.
- Bizonyítani, hogy a konstrukció alkalmazható-e réteges működési mód esetén.
- Igazolni, hogy kiváltható-e vele költségesebb, bonyolultabb teljesítmény fokozó megoldás (pl. turbótöltés).

3. MUNKAMÓDSZEREK

Annak érdekében, hogy a lengőszelep rendszer tulajdonságait a kellő pontossággal tudjam meghatározni, illetve összevetni a hagyományos szeleprendszert alkalmazó erőforrással, a kutatási feladatokat a következőképpen rendszereztem:

- Irodalomkutatás elsődleges célja a kísérleti kutatómunka elméleti háttérének megismerése és részletes célkitűzések megfogalmazása volt. Ennek érdekében először tanulmányoztam a már megvalósított nem hagyományos elven működő szelep-, és vezérlésirendszerek tulajdonságait, lehetséges felhasználási módjait.
- Ezt követően meghatároztam a fejlesztés alapjául szolgáló erőforrás motorikus paramétereit, amelyekhez a kutatásom eredményeit viszonyítani tudtam.
- A paraméterek rögzítése után feltérképeztem az ülékes szeleppel szerelt eredeti hengerfej vezérlési rendszerének jellemzőit és áramlástanai tulajdonságait. A vizsgálat során meghatározott szelepemelési pontokban a szűkítési tényező értéke megállapításra került.
- Annak érdekében, hogy a lengőszelepes koncepció közvetlenül összehasonlítható legyen egy ülékes szeleppel és az összehasonlítás megfelelően pontos legyen, a megtervezendő lengőszelepes hengerfej alapjaként az eredeti ülékes rendszert használtam fel. Ezért létrehoztam az ülékes szeleppel szerelt hengerfej CAD modelljét.
- Létrehoztam az eredeti konfigurációjú motor 0D/1D motormodelljét, amelyet a korábban végzett vizsgálatok eredményei alapján validáltam.
- Az eredetileg létrehozott ülékes szeleppel szerelt hengerfej CAD modelljének a lehető legkisebb mértékű módosításával megalkottam a lengőszelepes hengerfej CAD modelljét. A korábbi kutatási fázis mérési eredményei alapján meghatároztam a lengőszelepek méreteit és a CAD modell alapján legyártásra került egy lengőszelepes hengerfej is.
- Ezután kerülhetett sor annak vizsgálatára, hogy azonos áramlási keresztmetszeten hatékonyabb gázcsere-t biztosít-e a lengőszelep? Az elkészített, szerelhető elemekből felépített lengőszelepes hengerfejet áramlástanai vizsgálatnak vettem alá. Az áramlástanai kísérletek eredményeit a számítógépes motormodellben használtam fel a későbbiek folyamán.
- Az előző kutatási fázisok eredményeit felhasználva létrehoztam a lengőszelepes rendszer 0D/1D motormodelljét. A motormodell futtatás eredményeit összevettem az ülékes hengerfejjel szerelt motor validált, szimulált paramétereivel.

Négyütemű motorok szeleprendszerét kiváltó alternatív megoldás vizsgálata

- Megalkottam mindkét szeleprendszer statikus és dinamikus CFD modelljét. A numerikus modellek futtatása során szerzett adatokat a két szeleprendszer viszonylatában összehasonlító elemzésnek vettem alá.
- A vizsgálatok eredményeképpen létrehozott modellek nagy pontossággal adják vissza a valós működés paramétereit és lehetőséget biztosítottak a lengőszelepes vezérlési rendszer kvázi működő motoron történő tesztelésére, így az eredmények összehasonlító elemzésével, értékelésével végrehajtottuk a célul kitűzött kutatási feladatokat.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK-TÉZISEK

- T1. A hagyományos ülékes szelepek elemzése és szakirodalmi adatok alapján kifejlesztettem egy újdonság jelleggel bíró lengőszelepes hengerfejet. Mérésekkel és szimulációval bizonyítottam, hogy az ülékes és egyéb forgószelepes megoldásokkal elérhető gázcsere jellemzőket az új konstrukció jelentősen javítja azáltal, hogy a szeleptest a szelep teljes nyitásának állapotában a lehető legkisebb mértékben kényszeríti irányváltatásra a hengerbe beömlő, illetve onnan kilépő gázáramot. [S1] [S2] [S5]
- T2. Kidolgoztam egy komplex mérési és modellezési eljárást, amelynek segítségével nagy pontosságú számítógépes motormodellek hozhatók létre. A mérés és modellezés figyelembe veszi a belsőégésű motor áramlási viszonyait, a szeleprendszer kinematikáját és dinamikáját, ezáltal az erőforrás motorikus paramétereinek a szakirodalomban közölt adatoknak megfelelő vagy azoknál nagyobb pontosságú reprezentációját valósítja meg. [S3] [S4] [S6] [S7] [S8]
- T3. A kidolgozott komplex vizsgálati eljárás alkalmazásával lefolytatott összehasonlító elemzés eredményeképpen bizonyítottam, hogy egy olyan elrendezés, amelyben a szívó- és kipufogónyílásokat lengőszelep vezérli, a szívórendszer tekintetében 34,07%-kal a kipufogószelepeknél pedig 21,5%-kal kedvezőbb áramlási feltételeket teremt a motor gázcserefolyamatai szempontjából. További vizsgálataim során alkalmazott validált 0D/1D motormodell segítségével megállapítottam, hogy egy olyan erőforrás, amely lengőszelepeket használ 59%-kal kedvezőbb hengertöltöttséget érhet el, miközben a forgatónyomaték 15%-kal, a teljesítmény pedig 32%-kal növekszik, az összehasonlítás alapját képező azonos lökettérfogatú ülékes szeleppel szerelt motorhoz viszonyítva. A bemutatott eredmények alapján kijelenthető, hogy egy lengőszelepes rendszerű motor sokkal nagyobb teljesítménysűrűséget képes elérni, mint egy azonos lökettérfogatú, de ülékes szeleppel szerelt motor. [S2] [S3] [S4] [S7]
- T4. A CFD modellezés eredményeképpen igazoltam, hogy az áramlási struktúrák a két vizsgált szelepnél teljesen eltérőek. Az áramlási vektorok, valamint az egyirányú mozgást végző töltet részek együttes ábrázolásával a hengertérben megjelenített forgó gáztömegek világosan reprezentálják, hogy a szívóütem végére a lengőszelepes rendszerrel kevésbé turbulens, rendezett örvényrendszer alakul ki. Bizonyítottam, hogy a beömlés során a réteges töltésű működéshez kedvezőbb örvénystruktúrák jönnek létre örvénykeltő segédberendezések alkalmazása nélkül. [S8], [S10]

T5. Az áramlástani értékek elemzése alapján megállapítottam, hogy az örvényekben résztvevő közeg mozgását jellemző Relatív Bukóörvénylési Arány a lengőszelepes rendszer tekintetében 13,1-szeres mértékben kedvezőbbnek mutatkozott, amely egy réteges töltési folyamatot megvalósító, Otto-rendszerű motor szempontjából rendkívül előnyös működési körülményeket teremt. [S9], [S10]

5. KUTATÁSI TERÜLETHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

- [S1] Kovács, L., Szabó, Sz.: „Challenges of Engine Downsizing” microCAD 2013 : XXVII. International Scientific Conference, Miskolc, Magyarország, Miskolci Egyetem, Paper: N-2 , 6 p., 2013
- [S2] Kovács, L. „Steady State Airflow Characteristics of a Dual Port Cylinder Head of a High Speed IC Engine”, 28th microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference 2014.04.10. - 2014.04.11. Miskolci Egyetem, Paper D2-18., pp. 12, 2014a
- [S3] Kovács, L., Szabó, Sz.: „Test validated 0D/1D engine model of a swinging valve internal combustion engine”, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem Közleménye 11 : 4 pp. 266-277., 12 p, 2021
- [S4] Kovács, L., Szabó, Sz., „Comparative study on the improvement of the gas exchange process of a high speed IC engine using swinging valve”, *Analecta Technica Szegedinensia*, Vol. 13, No. 2, ISSN: 2064-7964, DOI: 10.14232/analecta.2019.2.28-37, pp. 28-37, 2019
- [S5] Kovács, L.: „Magas fordulátú belsőégésű fordulatú belsőégésű motor szelepvezérlési rendszerének elemző vizsgálata”, *GÉP (0016-8572)*: 2014/1, pp. 28-33, 2014b
- [S6] Kovács, L., Szabó, Sz.: „Belsőégésű motor töltéscsere vizsgálata 0D/1D motormodell segítségével”, *GÉP (0016-8572)*: 2014/8., pp. 25-30, 2014c
- [S7] Kovács, L., Szabó, Sz.: „Improving the power characteristics of an Internal Combustion Engine with the help of a 0D/1D engine model”, *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, ISSN:1584-2665 e-ISSN: 1584-2673, Fascicule 2, pp. 83-88, 2015
- [S8] Kovacs, L., Szabo, Sz., Bolló B. „Bukóörvénylési-arány vizsgálata két eltérő motor szelepvezérlés esetén”, *GÉP (0016-8572)*: LXXIII 2, pp. 5-10, 2022a
- [S9] Kovacs, L., Szabo, Sz., Bolló B. „Numerical simulation of different engine valve constructions on in-cylinder flow behaviour”, *Vadászné Bognár Gabriella (Szerkesztő), Piller Imre (Szerkesztő), Doktoranduszok fóruma 2021 - Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa*, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország: Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, ISBN: 9789633582602, pp. 62-67, 2022b
- [S10] Kovacs, L., Szabo, Sz., Bolló B. „A complex comparative study of two dissimilar engine valve constructions on in-cylinder flow behaviour of a high speed, IC engine”, *Acta Polytechnica Hungarica*, ISSN 1785-8860, Közlésre elfogadva, megjelenés előtt.

6. A TÉZISFÜZETBEN HIVATKOZOTT IRODALOM

- [1] Wang, Y. „*Introduction to Engine Valve Trains*”, SAE International, Warrendale (PA), USA, 2007
- [2] Kovács, L., Szabó, Sz.: „*Challenges of Engine Downsizing*” microCAD 2013 : XXVII. International Scientific Conference, Miskolc, Magyarország, Miskolci Egyetem, Paper: N-2 , 6 p., 2013
- [3] Stephenson, M. „*Engine Downsizing - An Analysis Perspective*”, SIMULIA Customer Conference, London, England, May 2009, pp. 321 – 338, 2009
- [4] Blair, G.P. „*Design and Simulation of Four Stroke Engines*”, SAE international, ISBN-10: 0768004403, 1999
- [5] Hunter, M.C.I. „*Rotary Valve Engines*”, London, UK, Hutchinson’s Scientific and Technical Publications, 1946
- [6] Douglas, S. „*Museum of Retro Technology: Power Generation, Unusual Internal Combustion Engines: Rotary Valve IC Engines*”, elérhető: <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/unusualICeng/RotaryValveIC/RotaryValveIC.htm>, (utolsó letöltés: 2023.01. 24.)
- [7] Wood, J. „*Aspin Rotary Valve Engines*”, elérhető: <http://www.aspin.info>, (utolsó letöltés: 2023. 01.09.)
- [8] Peliks, B., Suh N. P. „*Rotary Valve Revolution*”, 2005 SAE World Congress, Detroit, Michigan, April 11-14, 2005, SAE International, ISSN 0148-7191, 2005
- [9] Wallis, T. „*The Bishop Rotary Valve*”, AutoTechnology, Special 2007, FISITA, 2007
- [10] Horrocks, G. „*A Numerical Study of Rotary Valve Internal Combustion Engine*”, Unpublished PhD Dissertation, The University of Technology, Sydney, 2001
- [11] Grimonprez, D. „*The story of Guy Nègre and MDI*”, Available at: <http://users.telenet.be/sarahgrimonprez/didier/aircars/html/Guy%20NegreENG.html> (utolsó letöltés: 2019. 01.09.)
- [12] Garrett, N., Uddin, M., Bergman, M., Purvis, G., Vaseleniuck, D., Cordier, D., „*Development of a Rotary Valve Engine for Handheld Equipment*,” SAE Technical Paper 2022-32-0028, 2022, <https://doi.org/10.4271/2022-32-0028>, 2022
- [13] Coates International, Ltd. *The Coates Spherical Rotary Valve (CSR) System*, elérhető: <http://www.coatesengine.com>, (utolsó letöltés: 2023. 03. 29.)
- [14] Falfari, S., Brusiani, F., Pelloni, P. „*3D CFD analysis of the influence of some geometrical engine parameters on small PFI engine performances – the effects on the tumble motion and the mean turbulent intensity distribution*”, 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2013, 11-13 September 2013, Bologna, Italy, 2014. Energy Procedia 45, pp. 701 – 710, 2013
- [15] Bozza, R., De Bellis, V., Fantoni, S. and Colangelo, D. „*CFD 3D Analysis of Charge Motion and Combustion in a Spark-Ignition Internal Combustion Engine under Close-to-Idle Condition*”, E3S Web of Conferences 197, 75° National ATI Congress – #7 Clean Energy for all (ATI 2020), 2020. Rome, Italy, September 15-16, 2020
- [16] Falfari, S., Brusiani, F., Bianchi, G. M. „*Numerical analysis of in-cylinder tumble flow structures – parametric 0D model development*”, 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2013, Energy Procedia 45, pp. 987 – 996, 2014