

Elektromagnetno vodenje ventilov pri motorjih z notranjim zgorevanjem

Tomaž Munih, Tomaž Katrašnik, Damijan Miljavec

*Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: tomaz.munih@fe.uni-lj.si*

Povzetek. V članku so predstavljeni napredni elektromagnetni aktuatorji za individualno, variabilno in polno nastavljivo pomikanje ventilov pri motorjih z notranjim zgorevanjem (MNZ - motorji z notranjim zgorevanjem). Individualno, variabilno in predvsem polno nastavljivo krmiljenje ventilov je zanimivo zaradi izboljšanja izkoristka in razširitve območja in režimov delovanja MNZ-ja. Obstoječi napredni mehanski sistemi že omogočajo vodenje MNZ-jev z boljšim izkoristkom in optimalnejšo navorno karakteristiko. Pri uspešni implementaciji individualnega krmiljenja ventilov lahko omenjene karakteristike drastično izboljšamo, poleg tega pa lahko pridobimo režim regenerativnega zaviranja in učinkovitejšega izklapljanja valjev v primerih potreb po manjših močeh. Vsi predlogi naprednih aktuatorjev se na koncu tudi s stališča porabe moči primerjajo s konvencionalnim sistemom.

Ključne besede: elektromagnetni aktuator, ventili, motorji z notranjim zgorevanjem, zračni hibrid, izkoristek

Electromagnetic valve drive system for internal-combustion engines

The paper presents an overview of the existing solutions for advanced individual electromagnetic valve actuation systems in internal-combustion engines. An individual valve control is interesting in terms of the efficiency improvement of the internal-combustion engines and optional regimes of their operation. The existing conventional valve train systems enable control of the internal-combustion engines with an improved efficiency and better torque curve. An efficient implementation of the advanced individual valve control dramatically improves these characteristics as well as the regenerative breaking regime and effective cylinders deactivation in cases of a smaller power output. The advanced individual actuators are compared with the conventional systems from the perspective of their power consumption.

motorje prigradili zaganjalnik, alternator, grelne svečke in elektromagnetni ventil na dovodu goriva, v Ottove motorje pa še vžigalno tuljavo in svečke. Z razvojem elektronike smo prišli tako daleč, da sodobni MNZ nadzira in upravlja zmogljiv 32-bitni procesor, ki v realnem času obdeluje podatke iz več senzorjev, na podlagi česar tudi ustrezno regulira vse potrebne podsklope. V tem prispevku se bomo omejili na bistven podsklop MNZ-ja, ki skrbi za ustrezno izmenjavo delovne zmesi. Omenjeni podsklop sestavljajo ena ali več odmikalnih gredi ter več sesalnih in izpušnih ventilov. Želja pa je konvencionalni pogon ventilov z odmikalnimi gredmi nadomestiti z naprednim individualnim krmiljenjem posameznega ventila. S tem bi MNZ-ji pridobili precejšen razvojni potencial.

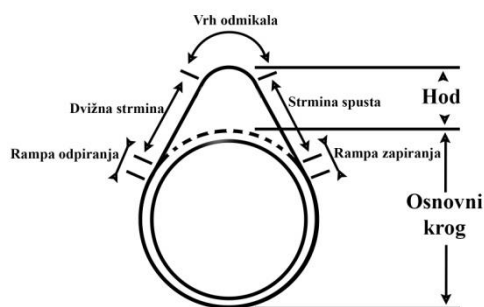
1 UVOD

Tako kot večina naprav se tudi motorji z notranjim zgorevanjem (MNZ - motorji z notranjim zgorevanjem) izboljšujejo s spoznavanjem novih materialov in z napredovanjem elektronike. Tako lahko vsak laik hitro opazi, da se danes že starodobniki in sodobni avtomobili precej razlikujejo, predvsem po količini elektronskih komponent. Sodobni avtomobili skoraj nimajo sklopa, ki ne bi vseboval vsaj ene elektronske komponente. Tudi če se omejimo samo na področje pogona in izvzamemo vozila, ki jih poganjajo elektromotorji, lahko opazimo veliko razliko. MNZ-ji starodobnikov za samo delovanje skoraj niso potrebovali električnih komponent. Z nadaljnjim razvojem so v dizelske

2 POGON VENILOV

Sistem sesalnih ventilov regulira dotok ustrezne količine sveže delovne zmesi v valje MNZ-ja, sistem izpušnih ventilov pa skrbi za ustrezno odvajanje zgorele snovi iz valjev. Posamezni sistem je krmiljen z odmikalno gredjo, ki je navadno prek verižnega ali jermenskega prenosa v ustreznem prestavnem razmerju povezana z glavno gredjo. Sodobni sistemi pogonov ventilov omogočajo že precej široko območje prilagajanja zahtevanim obratovalnim razmeram. To pomeni, da lahko reguliramo glavne parametre pogona, ki so: čas odpiranja (kdaj se bo ventil odprl), hod (koliko se bo ventil odprl) in trajanje (koliko časa bo ventil odprt). S spreminjanjem teh parametrov lahko zagotavljamo

optimalne obratovalne razmere MNZ-ja na pretežnem območju vrtilnih frekvenc v odvisnosti od obremenitve. Današnji sistemi pogona ventilov omogočajo že precej široko območje prilagajanja obratovalnim razmeram. Slabost je, da se posamezni ventili v sesalnem ali izpušnem sistemu ne morejo individualno prilagajati in regulirati, saj so ventili posameznega sistema krmiljeni prek skupne odmikalne gredi. Na odmikalni gredi nad posameznim ventilom je ustrezno oblikovano odmikalo, ki pretvarja rotacijo gredi v linearen odmik ventila. Kontura odmikala je sestavljena iz delov krivulj, s katerimi določamo že omenjene glavne parametre krmiljenja ventila (slika 1). Sama kontura je optimizirana na izbrano delovno točko.



Slika 1: Glavni parametri krmiljenja ventilov

Konvencionalni sistemi krmiljenja ventilov že omogočajo spreminjanje faznega zamika odmikalne gredi (v relaciji do ročične gredi) ter prilagajanje hoda ventila. S tem se optimizirana delovna točka obratovanja (za katero je optimizirano odmikalo) lahko raztegne tudi na nekoliko širši del obratovalnega območja.

2.1 Možnosti izboljšave sistema pogona ventilov

Znatno izboljšanje krmiljenja ventilov bi pridobili, če bi se znebili odmikalne gredi in vsak ventil krmilili posamično. To bi lahko dosegli s primernim aktuatorjem na posameznem ventilu. S krmiljenjem aktuatorja bi tako določali in sproti prilagajali glavne parametre krmiljenja ventila, ki so sicer fiksno določeni z obliko odmikala. Poleg tega velja poudariti, da je v tem primeru teoretično mogoče strmine odpiranja in zapiranja precej približati zelenemu odzivu stopnice, česar ni mogoče izvesti z mehanskim pogonom z odmikalnimi gredmi. V praksi je naklon omejen s hertzovo kontaktno napetostjo, koeficientom vzmeti ventila, oljnim filmom in vsoto mas, ki sledijo odmikalu vključno z ventilom. S takšnim naprednim individualnim, variabilnim in polno nastavljivim krmiljenjem ventilov bi pridobili tudi veliko izboljšav pri obratovanju MNZ-ja.

2.1.1 Izboljšanje karakteristik MNZ

V laboratorijskih analizah se individualno, variabilno in polno nastavljivo krmiljenje ventilov odraža v precejšnjih prednostih MNZ-ja [1][2][3]. Ker imamo popoln nadzor nad posameznim ventilom, lahko tudi natančno določamo dotok sveže delovne zmesi v posamezen valj, kar pri Ottovih motorjih pomeni, da se lahko znebimo sesalne lopute. Pri tem pa znatno zmanjšamo sesalne izgube [3]. Z nadzorom zapiranja sesalnega ventila se izboljša tudi dejanski srednji tlak motorja (BMEP - brake mean effective pressure) v celotnem predelu vrtilnih frekvenc [3, 4].

Pri dizelskih motorjih lahko s krmiljenjem izpušnega ventila nadziramo zaostale pline v valju, pri čemer zmanjšujemo nastanek NO_x . Izboljšamo tudi izkoristek delovanja katalizatorja [3]. Z optimalnejšim polnjenjem valjev zmanjšujemo tudi količino delcev v izpuhu. Pri vseh MNZ-jih je omogočena učinkovita deaktivacija odvečnih valjev pri obratovalnih stanjih z manjšo potrebno močjo [3]. Z optimalnim zapiranjem sesalnega ventila in zapiranjem izpušnega ventila izboljšamo tudi izkoristek turbopolnilnika [3]. Minimalne povečave izkoristkov pri normalnih vozniških ciklih so od 15 % naprej do ocenjenih potencialnih izboljšanj 20 % [3].

2.1.2 CAI- controlled auto-ignition

Procesi zgorevanja, ki temeljijo na nadzorovanem samovžigu [5–8], zahtevajo zelo natančno krmiljenje temperature in sestave zmesi v valjih. Najširše raziskani predstavniki CAI so HCCI (ang. Homogenous Charge Compression Ignition), PCCI (ang. Premixed Charge Compression Ignition) in RCCI (ang. Reactivity-Controlled Compression Ignition). Zato je popoln nadzor posamičnega ventila zelo pomemben za zagotovitev stabilnega in učinkovitega delovanja MNZ v režimu CAI v širokem območju delovanja.

2.1.3 Zračni hibrid

Ob ustrezni krmilni strategiji ventilov in z dodanim zračnim zalogovnikom pridobimo tudi možnost regenerativnega zaviranja, pri čemer motor deluje v kompresorskem režimu. V tem primeru regenerativno zaviramo tako, da komprimiramo zrak v valjih in ga shranjujemo v temu namenjen zalogovnik. Komprimiran zrak iz zalogovnika pozneje porabimo za zračni pogon. Lahko ga tudi dodajamo pri normalnem obratovanju motorja v valje in s tem nadomeščamo ali pomagamo turbopolnilniku. Po študiji [9] lahko takšen hibrid konkurira električnim hibridom, analiziranim v viru [10], le da je pnevmatski hibrid precej preprostejši in s tem znatno cenejši. Poleg tega pa tudi ne potrebuje dragih baterij, ki jih je treba po določenem številu ciklov zaradi iztrošenosti zamenjati.

2.1.4 Spreminjanje taktnosti motorja

Pri krmiljenju posameznega ventila in neposrednem vbrizgu goriva v valj imamo možnost uporabiti še dodaten obratovalni režim. Tako lahko spreminjamo med samim obratovanjem taktnost delovanja motorja, s čimer lahko pri nižjih vrtilnih frekvencah pridobimo precej višjo navorno karakteristiko MNZ [11].

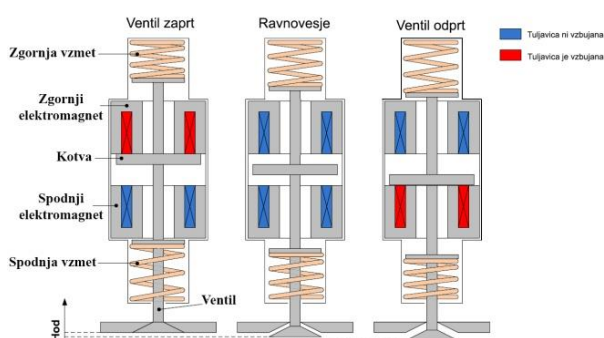
2.2 Napredni sistemi krmiljenja ventilov

Pristopov k individualnemu krmiljenju ventilov je več in jih glede na pregledano dostopno literaturo lahko v osnovi razdelimo na hidravlične, pnevmatske in elektromagnetne. Zaradi same preprostosti sistema in našega področja dela smo se usmerili predvsem v elektromagnetne sisteme.

Ne glede na zgornjo delitev so zahteve, ki naj bi jih izpolnjeval polno nastavljiv napredni sistem, enotne. Takšen sistem mora pri uporabi v MNZ za osebna vozila z delovnimi prostorninami na valj do približno $0,5 \text{ dm}^3$ omogočati maksimalen hod ventila najmanj 8 mm. Trajanje odpiranja ventila do maksimalnega hoda mora biti enako ali krajše od 3 ms. Poleg tega mora omogočati poljuben čas odpiranja ventila, poljuben hod (v območju do maksimalnega hoda), poljubno trajanje odprtega ventila. Hitrost naseda pri zapiranju ventila mora biti dovolj majhna, da se ne poškoduje ventil ali sedišče. Pomembna je tudi sama velikost, saj so ventili in pogon le-teh nameščeni nad motorjem. Z velikostjo in maso teh sistemov bi se znatno povešalo tudi težišče samega vozila, kar pa ni dopustno.

2.3 Elektromagnetni sistemi

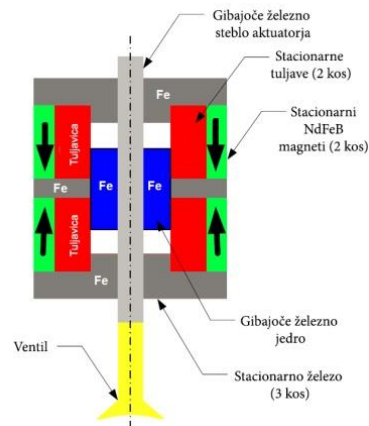
Večini elektromagnetnih sistemov je skupna osnova tako imenovanega sistema »vrzi in ujemi« (slika 2) [12]. Takšen sistem sestavlja med dvema vzmetema prednapeta kotva. Na vsaki strani kotve je elektromagnet.



Slika 2: Osnova sistema, imenovanega »vrzi in ujemi« [12]

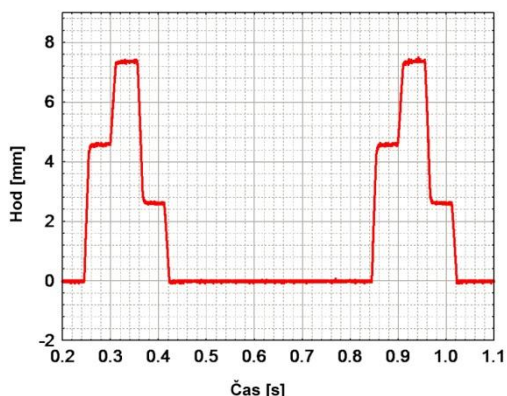
Takšen sistem ima tedaj, ko ni napajanja, nevtralno lego na sredini med obema elektromagnetoma. Tako je pred uporabo potrebna zagonška procedura, ki poskrbi, da se kotva z vsiljenim nihanjem postavi v eno od skrajnih leg. Navadno je to lega zaprtega ventila. Tako je sistem tudi pripravljen za obratovanje. Prednost takšnega sistema je, da se večina energije za odpiranje ali zapiranje hrani v eni od vzmeti. Krmilni sistem dovaja samo energijo, potrebno za pokrivanje izgub. Žal pa ima sistem več slabosti. Prva je, da sistem ne omogoča zahtevanih postankov v vmesnih legah, saj lahko kotva potuje izključno od ene skrajne lege do druge. Pri morebitnem izpadu električnega napajanja ali morebitne druge napake ventil obstane v napol odprtem položaju, kar privede do trka med batom in ventilom ter s tem do mehanskih poškodb. Zaradi narave privlačnih magnetnih sil na železo in zaradi same zasnovane s takšnim aktuatorjem ne moremo zaustavljati ventila pred skrajno lego. Posledično prihaja do prehitrih naletov ventila ob sedišče, s tem pa do hrupnega delovanja in kar je še hujše, poškodb ventila in njegovega sedišča.

Iz patentiranih nadgradenj te osnove izhaja tudi aktuator podjetja »Engineering matters, Inc«, ki izpolnjuje vse zastavljene zahteve (slika 3) [4]. Aktuatorju so dodali trajne magnetne. To aktuatorju doda pomembno lastnost lažje in boljše regulacije. Tako so kljub prednapetima vzmetema na voljo poleg skrajnih leg tudi vse vmesne lege. Poleg tega je iz poljubne lege ventila omogočen hod v poljubni smeri osi ventila.



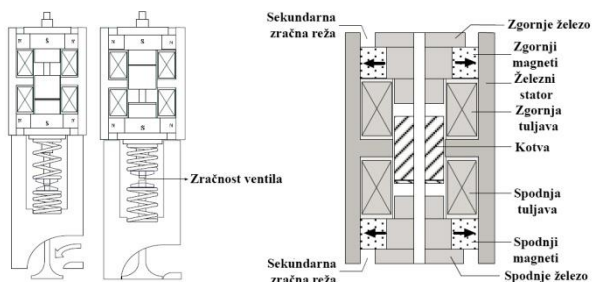
Slika 3: Nadgrajena različica aktuatorja podjetja »Engineering matters, Inc« [4]

Avtorji so z generiranjem poljubnega profila pri enem odpiranju ventila dokazali izjemno prilagodljivost in nastavljivo vodljivost aktuatorja z odzivi, prikazanimi na sliki 4.



Slika 4: Odzivi aktuatorja podjetja »Engineering matters, Inc« [4]

Po poročanju vira [13] ima ta aktuator težavo z razmagnetenjem uporabljenih trajnih magnetov. V istem viru so se avtorji soočili s težavo in predlagali ponovno preoblikovano verzijo aktuatorja, ki naj bi bila manj občutljiva na razmagnetenje (slika 5). Bistvena sprememba, ki jo predlagajo, je ta, da se pri aktuatorju na sliki 3 magnetno polje tuljav zaključuje prek trajnih magnetov, medtem ko se pri predlagani zadnji različici aktuatorja na sliki 5 magnetno polje tuljav zaključuje prek sekundarnih zračnih rež mimo trajnih magnetov.



Slika 5: Zadnja predlagana verzija izboljšave aktuatorja [13]

Poudariti je treba, da so na mestu ventilov že v osnovi precej visoke temperature in intenzivne mehanske vibracije. Poleg tega razmeroma majhni aktuatorji delujejo z relativno velikimi tokovnimi gostotami, kar pomeni še dodatno segrevanje. Zato je treba za zanesljivo obratovanje aktuatorjev, ki vsebujejo trajne magnetne, poskrbeti tudi za njihovo učinkovito hlajenje. Vir [14] navaja tudi električne izgube zadnje predlagane različice aktuatorja pri različnih vrtilnih frekvencah MNZ-ja. [14]

V članku [14] lahko razberemo, da so skupne izgube 16 ventilov pri povprečni vrtilni frekvenci MNZ-ja 2500 vrt/min približno 1,3 kW. To je tudi v okvirih poročanja virov drugih zasnov aktuatorjev, ki pa ne omogočajo takšne nastavljenosti [15–19].

2.4 Primerjava energijske bilance

Za konvencionalne sisteme krmiljenja ventilov se zaradi raznolikosti izvedb MNZ-jev največkrat splošno navajajo povprečne vrednosti izkoristkov MNZ. Avtorji v viru [20] navajajo, da pri avtomobilu srednjega razreda pri urbanem ciklu samo 12 % energije goriva preide v koristno pogonsko. Samo za mehanske izgube se porabi 15 % energije goriva in to so večinoma izgube trenja v MNZ. Inštitut Ricardo [21] na podlagi testiranja pokaže, da podsklopu ventilov pripada pri vrtilni frekvenci 1000 vrt/min 35-odstotni delež, pri vrtilnih frekvencah 6000 vrt/min pa 10-odstotni delež vseh mehanskih izgub. Avtorji vira [22], ki tudi navajajo, da pomenijo izgube pogona ventilov 15-odstotni delež vseh mehanskih izgub, te tudi naprej razčlenijo in so prikazane na sliki 7.



Slika 6: Primer razdelitve izgub pogona ventilov pri večjem dizelskem motorju z zgornjim krmiljenjem ventilov [22]

Iz slike 6 je razvidno, da največji delež trenja pogona ventilov odpade na trenje med odmikalom in dročnikom. Zaradi Stribeckovega pojava pa to trenje po določeni vrtilni frekvenci MNZ-ja, ko preide mazanje v hidrodinamski režim, najprej upade in nato z nadaljnjim višanjem vrtilne frekvence ponovno zmerno linearno narašča. Pri konvencionalnih sistemih lahko govorimo o regenerativnem delovanju, dokler se ventil (dročnik) ne odlepi od odmikala. Tako moč, vložena v stiskanje vzmeti ventila, pri zapiranju pomaga poganjati odmikalno gred. To pride še bolj do izraza pri večvaljnih motorjih, kjer potrebno moč za odpiranje ventila na enem valju kompenzira moč zapirajočega se ventila na enem od preostalih valjev, ki jih poganja ista odmikalna gred.

Enačba za silo, potrebno za linearni pogon posameznega ventila, lahko zapišemo kot (enačba 1) [22],

$$F = m(a - g) + k(I_1 + l) \mp (F_T + F_V) \quad (1),$$

kjer je m masa celotnega sistema, a pospešek dročnika, g gravitacijski pospešek, k konstanta vzmeti, I_1

prednapetost vzmeti, I hod ventila, F_T trenje med dročnikom in njegovim vodilom in F_V pa trenje med ventilom in njegovim vodilom. Pri tem se predznak spreminja glede na to, ali se ventil odpira (-) ali zapira (+) [22].

Pri naprednih individualnih sistemih navadno ni dročnika, tako da se masa celotnega gibljivega sistema v tem primeru zmanjša za tretjino ali pa do polovice. Poleg tega odpade trenje dročnika F_T . Trenje zaradi stebila ventila, ki nam ostane, pa znaša po sliki 7 le 2 % vsega trenja pogona ventilov. V viru [23] ocenjujejo delo, potrebno za premagovanje tega trenja pri enem prehodu ventila, na 100 mJ, za celoten cikel (odpiranje in zapiranje) pa 200 mJ (za motor Ford Duratec 2.3L, 4 valjni, 16 ventilov).

Avtorji v virih [23–25] navajajo, da se moč, potrebna za pogon ventila, večja s tretjo potenco vrtilne frekvence MNZ-ja. To izhaja iz enačbe 2,

$$P = mav \quad (2),$$

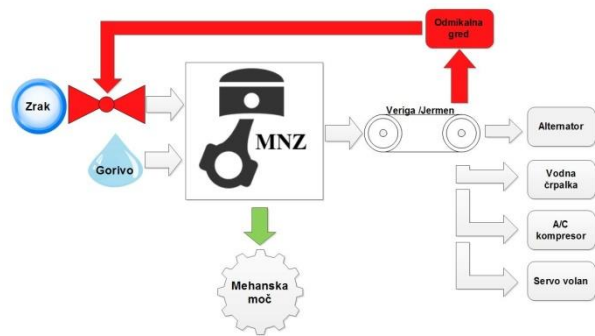
kjer je P moč, potrebna za odpiranje ventila, m masa ventila, a pospešek ventila in v hitrost ventila, in drži v primeru posnemanja poteka odpiranja ventila klasičnega sistema. Hitrost odpiranja (in zapiranja) ventila v tem primeru linearno narašča z vrtilno frekvenco MNZ-ja, pri tem pa pospešek z drugo potenco ter moč s tretjo potenco vrtilne frekvence MNZ-ja.

Če bi takšen elektromagnetni ventil odpirali pri vseh vrtilnih frekvencah MNZ-ja z maksimalno hitrostjo, ki jo omogoča (3 ms), bi bili hitrost, pospešek in moč odpiranja ventila na celotnem območju vrtilne frekvence MNZ-ja konstantni.

Ne glede na to, da je v osnovi želja po čim hitrejšem odpiranju ventila, kar elektromagnetni aktuatorji tudi omogočajo, je vprašanje, ali je takšno odpiranje tudi v vseh obratovalnih stanjih MNZ-ja, smotno.

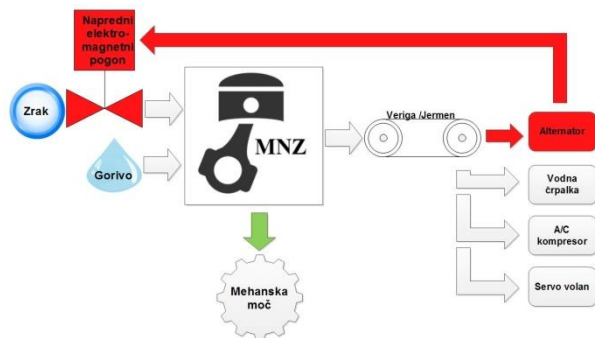
V viru [23] so avtorji pokazali, da je povprečna moč odpiranja ventila z njihovim aktuatorjem 188 W (6000 obratih/minuto, 3,3 ms prehodu, konstanten pospešek), s pospeševanjem po rampi so dosegli le moč 133 W, če pa so dodali še vzmet za pomoč pri zapiranju, se je povprečna moč zmanjšala na 68 W.

Torej je treba pri strategijah vodenja ventila upoštevati potrebno hitrost in pospešek odpiranja ventila, ki je ovrednotena tudi s stališča celotnega izkoristka MNZ-ja. Ne glede na vse navedeno pa je smiselno energijsko bilanco pogledati na najosnovnejši ravni. Pretok moči MNZ-ja s konvencionalnim pogonom ventilov je prikazan na sliki 7. Zgornja povratna veja od verižnega/jermenskega prenosa naprej pomeni pretok moči, potreben za pogon ventilov, ki, kot je bilo že omenjeno, znaša 1,5 – 3 kW, za MNZ-je osebnih vozil.



Slika 7: Diagram poteka moči pri motorju s konvencionalnim sistemom pogona ventilov

Na sliki 8 je prikazan pretok moči pri motorju z naprednim individualnim sistemom krmiljenja ventilov. Tu se povratna veja razlikuje po tem, da se moč za pogon ventilov odjema iz alternatorja in prenaša na napredni elektromagnetni pogon ventilov, kar pomeni, da v daljši verigi energijskih pretvorb nastane več izgub.



Slika 8: Diagram poteka moči pri motorju z elektromehanskim sistemom pogona ventilov

Na videz nepomembna, a potrebna je sprememba odjemnega mesta energije za pogon elektromagnetnih ventilov (slika 9). Pokažemo pa lahko, da razlika ni tako zanemarljiva, kot deluje na prvi pogled. Citirani viri navajajo, da se moči naprednih elektromagnetnih pogonov ventilov lahko približajo in primerjajo s konvencionalnim sistemom (1,5–3 kW). Smiselno pa je, da primerjamo pretoke moči na istem mestu, torej od verižnega/jermenskega prenosa naprej. Moč, ki jo avtorji navajajo, je električna. To je torej moč, ki prihaja iz alternatorja. Povprečni izkoristki alternatorjev pa so, kot vemo, zelo slabi in znašajo 55 % [26]. To pomeni, da je moč, potrebna za napredni elektromagnetni pogon ventilov od verižnega/jermenskega prenosa naprej, približno za 180 % večja in znaša od 2,7 do 5,45 kW (za MNZ-je osebnih vozil).

3 SKLEP

Pokazali smo, da je za korektno primerjavo moči konvencionalnih in naprednih individualnih pogonov ventilov treba upoštevati pretoke moči na istih odjemnih mestih. Avtorji virov navajajo električne moči in jih hkrati primerjajo z močmi konvencionalnih sistemov. Pri tem se zanemari bistveni člen, to je alternator z zelo slabim izkoristkom, je pa nujno potreben za delovanje naprednega elektromagnetnega pogona ventilov. Tako je smiselno razmisliti o smotrnosti prizadevanj za zmanjšanje izkoristkov naprednih elektromagnetnih sistemov, če bo ostal v verigi člen s tako slabim izkoristkom. Četudi smo pokazali, da je moč naprednih individualnih elektromagnetnih pogonov ventilov, ki se navaja, zavajajoča in bistveno večja, še ne pomeni tudi, da so takšni sistemi nepotrebni in neučinkoviti. Koristi in prednosti takšnega sistema naprednega krmiljenja so bistveno večji, kot se poveča izgubna moč za napredno individualno, variabilno in polno nastavljivo krmiljenje ventilov.

LITERATURA

- [1] L. V. Dat, L. N. Anh and T. A. Tuan, "A Design Of Novel Valve Train System For Cylinder Deactivation in SI Engines," vol. 3, pp. 17–21, 2015.
- [2] A. Clenci, A. Biziac, P. Podevin, G. Descombes et al., "Idle Operation with Low Intake Valve Lift in a Port Fuel Injected Engine," *Energies*, vol. 6, no. 6, pp. 2874–2891, Jun. 2013.
- [3] M. Pournazeri, "Development of a New Fully Flexible Hydraulic Variable Valve Actuation System," 2012.
- [4] C. J. Corcoran, K. A. Pasch and D. M. Fischer, "Outline • Benefits of Variable Valve Actuation • New Camless Fully Flexible Valve Actuator (FFVA)."
- [5] H. I. Sherazi and Y. Li, "Homogeneous Charge Compression Ignition engine: A Technical Review," no. x, pp. 315–320, 2010.
- [6] E. Hellström and A. G. Stefanopoulou, "Modeling Cyclic Dispersion in Autoignition Combustion," pp. 6834–6839, 2011.
- [7] S. Karagiorgis, N. Collings, K. Glover and T. Petridis, "Dynamic Modeling of Combustion and Gas Exchange Processes for Controlled Auto-Ignition Engines," pp. 1880–1885, 2006.
- [8] E. Hellström, A. G. Stefanopoulou and L. Jiang, "Cyclic Variability and Dynamical Instabilities in Autoignition Engines With High Residuals," vol. 21, no. 5, pp. 1527–1536, 2013.
- [9] S. Trajkovic and D. Thesis, *The Pneumatic Hybrid Vehicle*.
- [10] D. Nedeljković, "Analiza hibridnih in električnih vozil z uporabo faktorja Pihef," vol. 80, no. 3, pp. 73–79, 2013.
- [11] "Case Study: Stroke of genius for gasoline downsizing," *Q3, 2008 RICARDO QUARTERLY REVIEW*, pp. 8–14, 2008.
- [12] R. Wislati and H. Haase, "Design and Simulation of an Electromagnetic Valve Actuator Using COMSOL Multiphysics," no. 3, pp. 3–6, 2008.
- [13] R. E. Clark, G. W. Jewell, S. J. Forrest, J. Rens et al., "Design features for enhancing the performance of electromagnetic valve actuation systems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 3, pp. 1163–1168, Mar. 2005.
- [14] J.-J. Liu, P.-H. Lu, Y.-P. Yang, D.-H. Ye et al., "Energy compensation method for soft-landing control in camless engine with electromagnetic valve actuator," *2011 Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, pp. 1–6, Aug. 2011.
- [15] J. Zhao and R. J. Seethaler, "A Fully Flexible Valve Actuation System for Internal Combustion Engines," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 16, no. 2, pp. 361–370, Apr. 2011.
- [16] A. Gaeta, L. Glielmo, S. Member, V. Giglio et al., "Modeling of an Electromechanical Engine Valve Actuator Based on a Hybrid Analytical – FEM Approach," vol. 13, no. 6, pp. 625–637, 2008.
- [17] L. Liu and S. Chang, "Improvement of valve seating performance of engine's electromagnetic valvetrain," *Mechatronics*, vol. 21, no. 7, pp. 1234–1238, Oct. 2011.
- [18] A. Fabbri, D. Doretto, S. Braune, a. Garulli et al., "Optimal trajectory generation for camless internal combustion engine valve control," *2008 34th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron.*, pp. 303–308, Nov. 2008.
- [19] S. Di Gennaro, B. C. Toledo and M. D. Di Benedetto, "Nonlinear Regulation of Electromagnetic Valves for Camless Engines," *Proc. 45th IEEE Conf. Decis. Control*, pp. 3577–3582, 2006.
- [20] M. Priest and C. Taylor, "Automobile engine tribology — approaching the surface," *Wear*, vol. 241, no. 2, pp. 193–203, Jul. 2000.
- [21] M. Calabretta, D. Cacciatore, A. Lamborghini, P. Carden et al., "Valvetrain Friction - Modeling , Analysis and Measurement of a High Performance Engine Valvetrain System," 2010.
- [22] A. Comfort, "An Introduction to Heavy-Duty Diesel Engine Frictional Losses And Lubricant Properties Affecting Fuel Economy – Part I," 2003.
- [23] D. Cope and A. Wright, "Electromagnetic Fully Flexible Valve Actuator," 2006.
- [24] D. Cope, A. Wright, C. J. Corcoran, K. Pasch et al., "Fully Flexible Electromagnetic Valve Actuator : Design , Modeling , and Measurements," 2008.
- [25] D. Cope, A. Wright, C. J. Corcoran, K. Pasch et al., "Fully Flexible Electromagnetic Valve Actuator : Design , Modeling , and Measurements Fully Flexible Electromagnetic Valve Actuator : Design , Modeling , and Measurements," no. APRIL 2008, 2015.
- [26] M. Bradfield, "Improving Alternator Efficiency Measurably Reduces Fuel Costs BY."

Tomaž Munih je diplomiral leta 2012 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo električne in toplotne batne stroje.

Tomaž Katrašnik je doktoriral leta 2004 na Fakulteti za strojništvo, kjer je trenutno zaposlen kot izredni profesor. Raziskovalno se ukvarja z motorji z notranjim zgorevanjem, alternativnimi gorivi, izpusti onesnažil in hibridnimi pogonskimi sistemi vozil.

Damijan Miljavec je leta 1999 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen. Raziskovalno se ukvarja z modeliranjem in oblikovanjem elektromehanskih pretvornikov in z uvajanjem novih materialov na področje elektromagnetnih struktur.