

Razvoj inteligentnih elektromotornih pogonov za ventile

Marko Nerat¹, Damir Vrančič¹, Janko Petrovčič¹, Samo Krančan²

¹Institut Jožef Stefan (IJS), Ljubljana, Jamova 39

²Danfoss Trata d.o.o., Ljubljana, Ulica Jožeta Jame 16

E-pošta: Marko.Nerat@ijs.si

Development of intelligent electromotor-driven actuators for valves

The electromotor-driven actuator for driving hydraulic valves has been developed and tested successfully. The actuator basically consists of housing, electronics, brushless direct-current (BLDC) electromotor, reduction gearbox, spindle and movable shaft. The main development issues were to achieve accurate target force on moving shaft without on-line force measurements, smooth and accurate positioning, reduced oscillations due to instability of external control loop and consequently, reduced wear of mechanical parts, increased reliability and low cost.

The results showed that target force between 1kN to 5kN has been achieved within tolerance of $\pm 5\%$ even on rapid stops when touching rigid obstacles. Moreover, the implemented »soft stop« function reduced stress internal mechanical forces when BLDC-driven actuator approaches the target position.

Finally, oscillation-reduction function was implemented to prevent or reduce oscillations in the closed-loop system. The function properly detected oscillations in the system, reduced the loop gain in the working point and consequentially reduced or eliminated oscillations in the system.

1 Uvod

V sodobnem svetu si skoraj ne znamo predstavljati sistema ali procesa, ki ga ne bi bilo potrebno voditi avtomatsko, naj bo sistem npr. letalo [1] ali proces npr. ogrevanje zaprtih prostorov [2].

V pričujočem prispevku predstavljamo izvedbo nekaterih ključnih funkcij, ki so omogočile uspešno izvedbo družine pogonov za ventile proizvajalca Danfoss Trata. Tovrstni ventili se uporabljajo v industrijskih obratih, v kotlovnica stanovanjskih zgradb ter za krmiljenje ventilov v procesnih sistemih.

Slika 1 prikazuje pogon ventila v razvojni fazi, ki je zgrajen iz ohišja, elektronike, brezkrtačnega enosmernega elektromotorja BLDC (BrushLess Direct Current electromotor) [3], zobniškega prenosa in vretena za pretvorbo vrtenja v premo gibanje gredi za odpiranje in zapiranje ventila ter pritrdilnih nosilcev celotne konstrukcije [4].

Po postavljenih zahtevah mora biti aktuator sposoben premagovati največjo silo $F_{\max} = 5000$ N pri

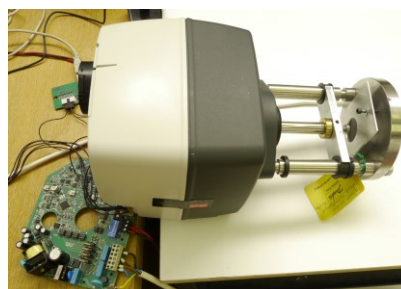
nazivni hitrosti pomikanja $v_{\text{naz}} = 0.5$ mm/s, pri čemer pa mora biti F_{\max} nastavljiva.

Poleg tega mora biti pogon imun na elektromagnetne motnje v industrijskem okolju ter sevati pod nivojem motenj, ki so dovoljene v stanovanjskem okolju. Aktuator deluje pri omrežni napetosti 230 V/50 Hz, zato vsebuje pretvornik 16 V/1.6 A DC, ki napaja motor BLDC in ostali del elektronike.

Jedro elektronike je mikrokrmilnik iz družine STM32F10x [5], ki skrbi za zajem, filtriranje in obdelavo vhodnih signalov. Npr. vhodni signal u v območju 0–10V služi kot referenca za odprtost oz. zaprtost ventila (0–100%).

2 Programska oprema

Programska koda za mikrokrmilnik je napisana v programskem jeziku C/C++ in sestoji iz glavnega programa in prekinitvenih opravil. V glavnem programu se za potrebe konfiguriranja pogona izvaja komunikacija med mikrokrmilnikom in osebnim računalnikom prek povezave RS-232, npr. nastavitve proporcionalnega (K_P), integrirnega (K_I) in diferencirnega (K_D) ojačenja regulatorja PID [6, 7], ki služi za regulacijo hitrosti pogona, ter omejitve toka za nastavitve največje sile F_{\max} . Prekinitvena opravila se izvajajo periodično: 1) vsakih 25 μ s se izvede opravilo, ki nadzira izhode Hallovih senzorjev za dekodiranje položaja rotorja BLDC in v primeru spremembe opravi ustrezen preklop tranzistorjev MOS-FET, ki služijo kot električno stikalo navitij statorja BLDC, da se rotor zavrti v zeleno smer, 2) vsako milisekundo (ms) se izvede izračun referenčne hitrosti vrtenja, določi se omejitev toka, izvede se regulacija hitrosti – izhod regulatorja PID predstavlja krmilni signal PWM (pulzno širinska modulacija), ki določa tok skozi navitja statorja BLDC, 3) vsako milisekundo se izvede še analogno-digitalna (AD) pretvorba vseh vhodnih signalov, ki ji sledi še digitalno filtriranje in obdelava signalov.



Slika 1: Aktuator s pripadajočo prototipno elektroniko.

3 Funkcija zaustavljanja pri togem – trdem nasedu ventila

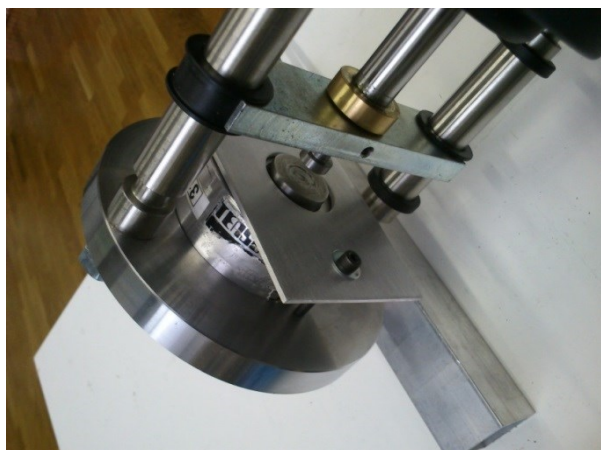
Izhodiščna varnostna zahteva je, da dejanska sila na gredi pogona pri popolnoma odprtem ali zaprtem ventilu ne sme odstopati več kot $\pm 5\%$ od želene (F_{\max}), vendar zaradi zmanjšanja stroškov vgradnje merilnega senzorja silo merimo posredno. V ta namen smo razvili poseben algoritem, ki na podlagi meritve električnega toka skozi statorska navitja motorja BLDC ugotovi, kdaj je prišlo do zaustavitve gredi zaradi trka v togo oviro.

Algoritem sproti izračunava spremembo toka, ki jo primerno filtrira in uporabi za zmanjševanje nastavljene vrednosti limite toka. S tem dosežemo, da se tok skozi navitja motorja BLDC zmanjša in proporcionalno temu se zmanjša tudi navor ter sila na gredi. Na ta način se v veliki meri izognemo nenadzorovanemu naraščanju sile zaradi inercije vrtečega se motorja BLDC pri togem nasedu ventila.

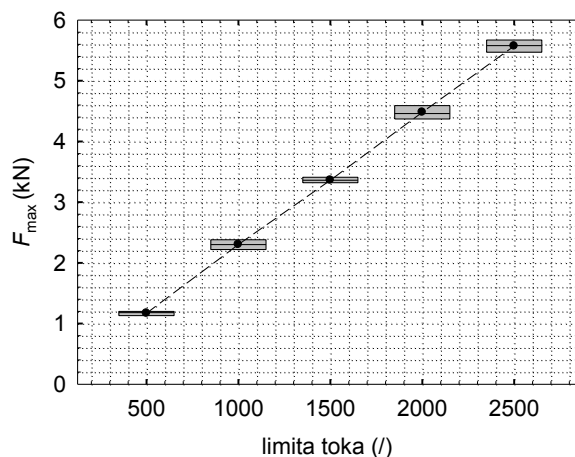
Meritev sile smo opravili z merilnim sistemom TENSO (merilnik tip T1/SK + merilna sonda za sile do 10 kN). Na Sliki 2 je prikazana namestitev merilne sonde na togo nosilno telo. Gred aktuatorja se pri nazivni hitrosti $v_{\text{naz}} = 0.5 \text{ mm/s}$ zaleti v okroglo kovinsko ploščo, ki je nameščena na sondi.

Z merilnikom smo merili največjo doseženo silo F_{\max} petkrat zapored pri različnih nastavitvah limite toka (mikrokrmilniku nastavimo ustrežno vrednost prek komunikacijskega vmesnika): 500, 1000, 1500, 2000 in 2500. Slika 3 prikazuje raztros doseženih sil F_{\max} pri različnih nastavitvah limite toka.

Iz prikazanih rezultatov lahko vidimo, da smo dosegli ponovljive sile F_{\max} na gredi aktuatorja, katerih vrednosti se da uravnati s programsko nastavitvijo limite toka. Raztros sil kaže na enakomerno porazdelitev (siva področja na Sliki 3). Največje relativno odstopanje sile F_{\max} od povprečne vrednosti vseh izmerkov pri enaki nastavitvi limite toka ne presega $\pm 5\%$, s čimer smo izpolnili izhodiščno zahtevo po doseganju točne sile F_{\max} brez neposredne meritve sile, temveč posredno z merjenjem električnega toka skozi statorska navitja motorja BLDC.



Slika 2: Namestitev merilne sonde na togo nosilno telo.



Slika 3: Raztros doseženih sil F_{\max} kot funkcija nastavljene limite toka.

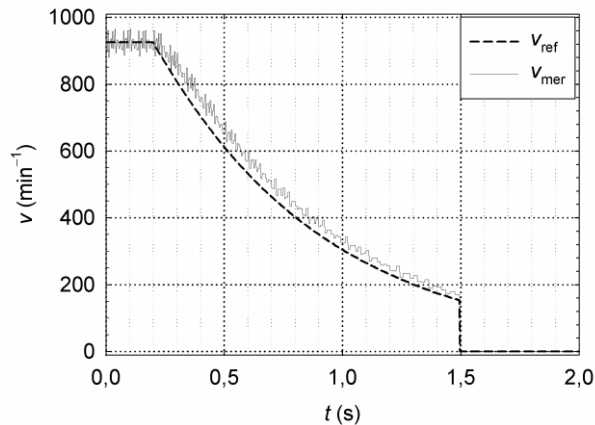
4 Funkcija »mehkega« zaustavljanja pri približevanju željeni poziciji

V primeru, da prekinemo komutacijo toka skozi statorska navitja motorja BLDC, ko je dejanska pozicija enaka željeni, se ta skoraj trenutno zaustavi, kar povzroča veliko mehansko obremenitev pogonskega sklopa. Algoritem za »mehko« zaustavljanje gibanja gredi pri približevanju željeni poziciji smo razvili zato, da čim bolj omejimo sile, ki delujejo na zobnike in vreteno aktuatorja ob nenadni zaustavitvi vrtenja motorja BLDC. Značilnost algoritma je v tem, da začne postopoma zmanjševati referenčno vrednost hitrosti, ko se približamo željeni poziciji. Motor začne upočasnjevati, ko je razlika med dejansko in želeno pozicijo manjša od 0,3 mm, oziroma 10 polnih vrtljajev (360 korakov – prehodov signalov iz Hallovih senzorjev) rotorja motorja BLDC.

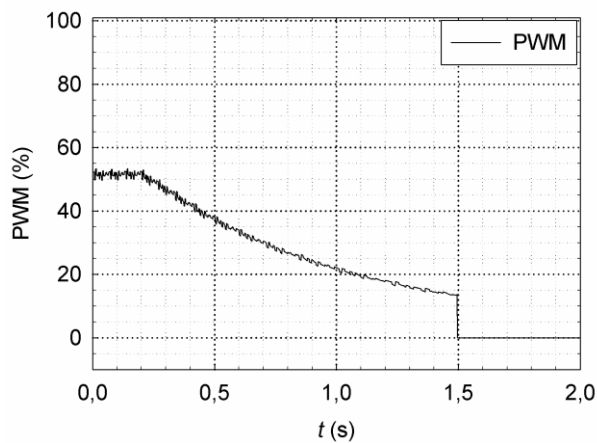
Referenčna vrednost hitrosti se izračuna kot: $v_{\text{ref}} = \text{abs}(Y_{\text{ref}} - Y_{\text{pos}}) \times (v_{\text{max}} - v_{\text{min}}) / 360 + v_{\text{min}}$, pri čemer je Y_{ref} referenčna pozicija pogona podana v številu korakov, Y_{pos} dejanska pozicija pogona (odprtost ventila), v_{max} in v_{min} pa največja (nazivna) in najmanjša hitrost vrtenja motorja BLDC v vrtljajih na minuto (min^{-1}).

Na Sliki 4 je prikazan primer zaustavljanja na željeni poziciji, pri katerem smo merili hitrost vrtenja rotorja motorja BLDC v odvisnosti od časa t pri zaviranju. Prikazan je še potek referenčne hitrosti v_{ref} kot vhoda in krmilnega signala (razmerje PWM na Sliki 5) kot izhoda regulatorja PI s parametroma $K_p = 0.5$ in $K_i = 1$.

Opazimo lahko, da začne hitrost motorja (v_{mer}) eksponencialno upadati pri $t = 0.2 \text{ s}$, ko smo dovolj blizu referenčne pozicije. Hitrost upada vse do $t = 1.5 \text{ s}$, ko je dosežena referenčna pozicija ($Y_{\text{pos}} = Y_{\text{ref}}$). Najmanjša hitrost vrtenja rotorja motorja BLDC pred zaustavitvijo znaša približno eno petino največje hitrosti, nakar algoritem za pozicioniranje nastavi referenčno hitrost na nič ($v_{\text{ref}} = 0$).



Slika 4: Potek hitrosti vrtenja rotorja motorja BLDC (v_{mer}) in referenčne hitrosti (v_{ref}) kot funkcija časa (t).



Slika 5: Potek razmerja pulzno širinske modulacije (PWM) kot funkcija časa (t).

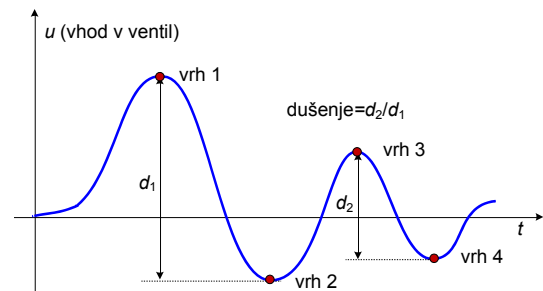
Z opisanim algoritmom bistveno zmanjšamo mehanske obremenitve pri zaustavljanju, saj smo na ta način zmanjšali pojemek za faktor 25 (upoštevati je potrebno, da je začetna hitrost 5-krat manjša in da se rotor BLDC zaustavi v enem koraku).

5 Funkcija za zmanjševanje oscilacij

V zaprtzančnih regulacijskih sistemih pogosto prihaja do pojava oscilacij. Kot primer lahko vzamemo temperaturno regulacijsko zanko v stanovanjskem prostoru, kjer je regulirana veličina temperatura prostora, regulirna veličina pa odprtost ventila radiatorja (izhod regulatorja). Zaradi zakasnitev v sistemih ogrevanja ter v primeru previsokih ojačenj regulatorja lahko pride do oscilacij pri zaprtzančnem vodenju. Oscilacije v sistemu pa povzročajo mehansko obrabo pogona in ventila. V ta namen smo razvili poseben algoritem za zmanjševanje oscilacij, ki zazna in zmanjša neželene oscilacije regulirne veličine in posledično tudi mehansko obrabo [8].

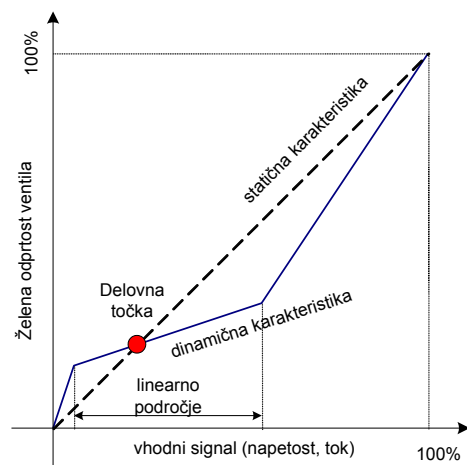
Algoritem najprej ugotovi, ali prihaja do oscilacij in na podlagi amplitude dušenega nihanja adaptivno določi dinamično ojačenje na ustreznem delu vhodno-izhodne

karakteristike ventila. Slika 6 prikazuje primer dušenega nihanja vhodnega (regulirnega) signala u . Na osnovi merjenja amplitud d_1 in d_2 med zaporednimi vrhovi signala (vrh 1–4) se izračuna faktor dušenja: d_1/d_2 .

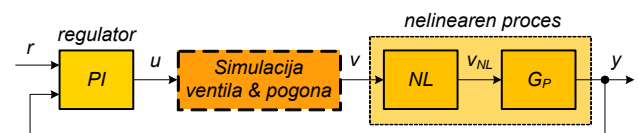


Slika 6: Primer dušenega nihanja vhodnega signala u kot funkcija časa t .

Izračunan faktor dušenja se nato uporabi pri adaptivnem določanju dinamičnega ojačenja vhodno-izhodne karakteristike aktuatorja na delu karakteristike, kjer prihaja do oscilacij (okrog delovne točke aktuatorja). Na ta način dobimo odsekoma linearno dinamično vhodno-izhodno karakteristiko, katere namen je zmanjšati odzivnost izhoda aktuatorja (dejansko premika gredi, ki odpira in zapira ventil) na spremembe vhodnega regulirnega (napetostnega ali tokovnega) signala u v določeni delovni točki. Na Sliki 7 je prikazana statična in dinamična vhodno-izhodna karakteristika vključno z delovno točko aktuatorja.



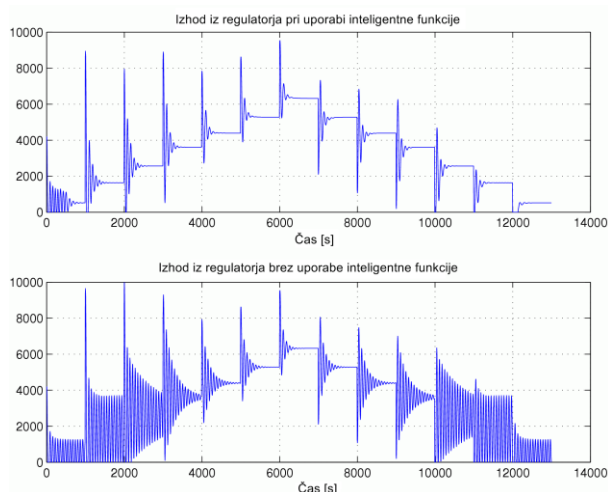
Slika 7: Statična in dinamična vhodno-izhodna karakteristika vključno z delovno točko: u je vhodni signal aktuatorja, Y_{pos} je izhod aktuatorja (želen pomik gredi oziroma odprtost ventila).



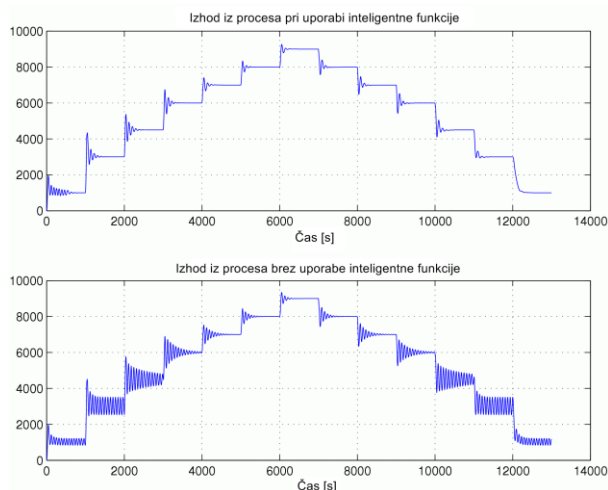
Slika 8: Simulacija delovanja funkcije za zmanjševanje oscilacij v zaprti zanki.

Razviti sistem smo preizkusili na modelu sistema ogrevanja, kjer smo opravili primerjalno analizo med običajnim (linearnim) pogonom ter pogonom pri katerem smo uporabili funkcijo za zmanjševanje oscilacij. Slika 8 prikazuje zaprto zanko z regulatorjem

PI, modelom ventila in pogona ter modelom nelinearnega procesa, ki ima višje ojačenje v spodnjem delu karakteristike (običajno pri večini ventilov).



Slika 9: Želena odprtost ventila (izhod iz regulatorja) pri uporabi funkcije za zmanjševanje oscilacij (zgoraj) ter običajnega pogona (spodaj) kot funkcija časa t .



Slika 10: Izhod iz procesa (temperatura prostora) pri uporabi funkcije za zmanjševanje oscilacij (zgoraj) ter običajnega pogona (spodaj) kot funkcija časa t .

Proces predstavlja sobo, kjer je vhod odprtost ventila grelne naprave, izhod pa merjena temperatura sobe. Spreminjali smo referenčno vrednost v regulator (želena temperatura prostora) in dobili rezultate, ki so prikazani na Sliki 9 in 10. Sistem za zmanjševanje oscilacij uspešno stabilizira regulacijski krog in s tem izloči ali zmanjša oscilacije v sistemu. Sistem je bil preizkušen in implementiran v podjetju Danfoss Trata in je že vgrajen v nekatere serije pogonov omenjenega proizvajalca.

6 Povzetek

Na kratko smo predstavili razvoj in testiranje inteligentnih elektromotornih pogonov za ventile

vključno z opisom nekaterih pomembnih algoritmov v programski kodi mikrokrmilnika STM32F10x, ki skrbi za zajem, filtriranje in obdelavo vhodnih signalov, ter generiranje izhodnih krmilnih signalov.

Programska oprema omogoča nastavitve parametrov za delovanje inteligentnega aktuatorja prek povezave RS-232. Z nastavitvijo parametra tokove limite smo dosegli ponovljivost največje sile F_{\max} na gredi aktuatorja znotraj $\pm 5\%$. Aktuator je tudi zmožen premikati gred z nazivno hitrostjo $v_{\text{naz}} = 0.5 \text{ mm/s}$ vse do sile $F_{\max} = 5000 \text{ N}$.

Predstavili smo algoritem za »mehko« zaustavljanje gredi aktuatorja, pri katerem se sproti izračunava referenčna hitrost, katere vrednost se po absolutni vrednosti postopoma zmanjšuje od največje v_{\max} do najmanjše nastavljene hitrosti v_{\min} , če se dejanska pozicija gredi približa referenčni na manj kot 0,3 mm. S tem smo bistveno zmanjšali mehansko obremenitev pogonskega sklopa.

Nazadnje smo predstavili algoritem za zmanjševanje oscilacij v regulacijskem sistemu. Algoritem temelji na zaznavanju vrhov oscilirajočega vhodnega signala in izračunu faktorja dušenja. Na podlagi faktorja dušenja algoritem adaptivno določi dinamično ojačenje vhodno-izhodne karakteristike v delovni točki aktuatorja. Inteligentna funkcija tako zmanjša oscilacije v regulacijskem sistemu in s tem tudi zmanjša mehansko obrabo pogonskega sklopa aktuatorja.

Literatura

- [1] Q. Wang, K. Wu, T. Zhang, Y. Kong, W. Qian: Aerodynamic Modeling and Parameter Estimation from QAR Data of an Airplane Approaching a High-altitude Airport. Chinese Journal of Aeronautics 25 (2012), Pages 361–371.
- [2] M. Anderson, M. Buehner, P. Young, D. Hittle, C. Anderson, J. Tu, D. Hodgson: An experimental system for advanced heating, ventilating and air conditioning (HVAC) control. Energy and Buildings, Volume 39, Issue 2, February 2007, Pages 136–147.
- [3] <http://www.shinano.com/motors/brushless.html> DR-38312, accessed July 12th 2013.
- [4] http://www.trata.danfoss.com/Content/6542f01c-3a99-429b-8ca4-2ec50a35c82d_MNU17545039_SIT265.html, Motorized Control Valves, accessed July 12th 2013.
- [5] <http://www.st.com/web/catalog/mmc/FM141/SC1169/SS1031/LN775>, accessed July 12th 2013.
- [6] Y. Peng, D. Vrančič, R. Hanus, Steven S.R. Weller: Anti-Windup Designs for Multivariable Controllers. Automatica, Volume 34, Issue 12, December 1998, Pages 1559–1565.
- [7] D. Vrančič, S. Strmčnik, Đ. Juričić: A magnitude optimum multiple integration method for filtered PID controller. Automatica 37, (2001), Pages 1473–1479.
- [8] D. Vrančič, J. Petrovič, Z. Šaponja, S. Krančan in S. Kojić: Nadgradnja inteligentnega motornega pogona. Zbornik konference AiG'13, 4.-5. april 2013, Maribor, <http://www.aig.si/13/>.