

Robusten elektromotorni pogon za hidravlične ventile

Marko Nerat^{a)}, Janko Petrovčič^{a)}, Samo Krančan^{b)}, Damir Vrančič^{a)}

^{a)}Institut Jožef Stefan, Jamova 39, 1000, Ljubljana, Slovenija

**^{b)}Danfoss Trata d.o.o., Ulica Jožeta Jame 16, 1000, Ljubljana, Slovenija
marko.nerat@ijs.si, janko.petrovcic@ijs.si, samo.krancan@danfoss.com,
damir.vrancic@ijs.si**

A heavy-duty electromotor-driven actuator for hydraulic valves

A heavy-duty electromotor-driven actuator for hydraulic valves, that is used in heat, ventilation and air-conditioning (HVAC) systems, is presented in this paper. The main development goals were achieving accurate and repetitive force on the actuator's shaft, without measurements with load cell, smooth and accurate positioning, reduced speed oscillations at linear movement of the shaft, reduced wear of mechanical parts, increased reliability of operation, and reduced production price. The "hard stop" algorithm is developed and tested under real situation when the moving part of the valve hits into the rigid wall. The results show that the algorithm allows accurate adjustment of the force. The "soft stop" algorithm is implemented and used to gradually reduce the speed of the shaft as it is approaching to the desired position. The mechanical wear should be reduced since the forces are reduced during the deceleration. The "speed smoothing" algorithm is used at nominal positioning speed to reduce speed oscillations. All the presented algorithms contribute that brushless direct current (BLDC) motor runs smoothly and silently, and also, the wear of the other mechanical parts of the actuator is reduced.

Kratek pregled prispevka

V prispevku je predstavljen robusten elektromotorni pogon za hidravlične ventile, ki se uporabljajo v sistemih za ogrevanje, prezračevanje in hlajenje (HVAC - heating, ventilation and air conditioning). Glavni cilji razvoja so bili doseganje točne in ponovljive sile na gredi pogona brez merjenja sile z merilno celico, gladko in natančno pozicioniranje, zmanjšanje oscilacij hitrosti pri linearnem pomikanju gredi, zmanjšanje obrabe mehanskih delov, povečanje zanesljivosti delovanja, in znižanje proizvodne cene pogona. Razvit algoritem "hard stop" je bil preizkušen pri togem nasedu ventila. Rezultati kažejo, da je mogoče z njim natančno nastaviti želeno silo na gredi. Implementiran je tudi algoritem "soft stop", ki postopoma zmanjšuje hitrost pomikanja, ko se gred približuje zeleni poziciji, s čimer se bistveno zmanjšajo pojemki pri zaustavitvi, in s tem obraba mehanskih delov. Algoritem za glajenje izmerjene hitrosti se uporablja pri nazivni hitrosti pozicioniranja, s čimer se zmanjšajo oscilacije hitrosti. Vsi predstavljeni algoritmi prispevajo k tišjemu teku brezkrtačnega enosmernega motorja in manjši obrabi ostalih mehanskih delov pogona.

1 Uvod

V sodobnem svetu imajo že preproste naprave vgrajeno regulacijo delovanja [1–3]. Glavni izziv za načrtovalce je izdelati robustne in cenovno ugodne naprave, ki so namenjene določeni uporabi v industriji, pisarnah, ali doma. Ena izmed takšnih naprav je elektromotorni pogon za ventil, ki uravnava pretok tekočine ali plina skozi cev z odpiranjem ali zapiranjem lopute. Takšen pogon je sestavljen iz mehanskih in elektronskih komponent. Elektronika običajno sestoji iz mikrokrmilniškega sistema, na katerem se izvaja programska koda, in poskrbi za optimalno in predvsem varno delovanje pod različnimi pogoji. Do sedaj je bilo izvedenih že veliko raziskav, ki so se osredotočale predvsem na modeliranje in brezsenzorsko nadziranje elektromagnetnih pogonov ventilov [1, 2]. Modeli upoštevajo nelinearnosti, kot so npr. histereza, nasičenje in medsebojna induktivnost, in se uporabljajo namesto senzorjev hitrosti in položaja [2]. Ideja takšnega vodenja je povsem drugačna od predstavljene v tem prispevku. Premik gredi elektromotornega pogona mora biti zelo natančen, ne glede na njen položaj, zato se uporablja brezkrtačni enosmerni (brushless direct current - BLDC) elektromotor. V njem so vgrajeni Hallovi sensorji za zaznavanje zasuka rotorja, zato ni potrebno imeti dodatnih senzorjev položaja in hitrosti gredi. V našem primeru je potrebno pozicijo gredi nastavljanje na nekaj deset mikrometrov (μm) natančno, kar znaša približno 0.1% njenega celotnega hoda, saj mora biti pretok skozi ventil natančno nastavljen. Poleg natančnosti mora biti pogon tudi dovolj robusten, da njegov nadzorni sistem zazna preobremenitev na gredi, ki se pojavi ob trčenju čepa ventila v njegovo skrajno lego ali v nepredvideno oviro. Nadzorni algoritem mora zaznati porast sile posredno prek merjenja toka skozi motor BLDC, brez sensorja sile, in zaustaviti pogon preden bi se zgodila poškodba ventila ali pogona samega.

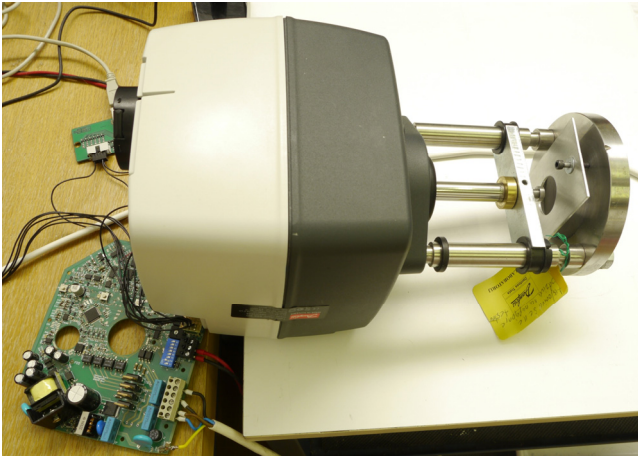
Neposredni pogon ventila z ultrazvočnim motorjem je bil že razvit, optimiziran in uspešno preizkušen [3]. Natančnost položaja gredi je dobra, vendar je potisk opisanega pogona premajhen za zastavljeni cilj, saj je sila na gredi znašala vsega 140 N, kar je odločno premalo za robusten elektromotorni pogon. Sila mora biti tudi povsem neodvisna od položaja gredi, zato je uporaba pogona z elektromotorjem BLDC neizogibna. Pred kratkim je podjetje Danfoss Trata d.o.o. razvilo serijo robustnih elektromotornih pogonov za hidravlične ventile [4]. Pogoni morajo zadostiti vsem prej opisanim zahtevam, vključno z doseganjem sile 5000 N na gredi pri hitrosti premikanja 0.5 mm/s. Razvitih je bilo kar nekaj inovativnih algoritmov za vzdrževanje konstantne hitrosti, točnih končnih sil in zanesljivega premika ter zaustavitve pogona. Najzanimivejši med njimi bodo predstavljeni v nadaljevanju prispevka.

2 Opis elektromotornega pogona

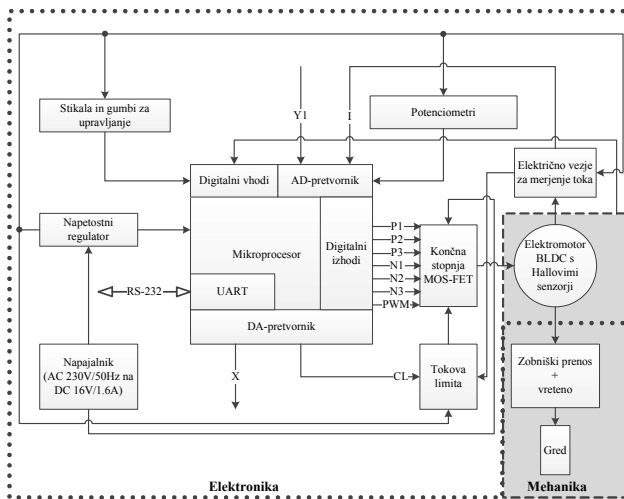
Obstoječi robusten elektromotorni pogon sestoji iz treh sklopov različnih komponent:

- mehanskih,
- elektronskih in
- programskih.

Mehanske komponente pogona so: brezkrtačni enosmerni motor (BLDC), zobniški prenos, vreteno, varnostna vzmet (ni prisotna v vseh pogonih), gibljiva gred in dve nosilni nepremični gredi za pritrditev pogona na ventil, kot je nazorno prikazano na Sliki 1. Elektronske komponente so: napajalnik, napetostni regulator, potenciometri, vezje za merjenje in omejevanje toka, gonilnik motorja BLDC s tranzistorji MOS-FET, in mikrokrmilnik, ki sestoji iz mikroprocesorja, analogno-digitalnega (A/D) in digitalno-analognega (D/A) pretvornika, univerzalnega serijskega asinhronnega vmesnika (UART) in digitalnih vhodno-izhodnih (I/O) priključkov, kot lahko vidimo na Sliki 2.



Slika 1: Robusten elektromotorni pogon za hidravlične ventile s prototipno elektroniko.



Slika 2: Shematski prikaz električnih vezij in komponent povezanih z mehanskimi deli pogona.

Napajalnik pretvori vhodno izmenično napetost (AC 100–240 V, 50–60 Hz) v enosmerno (DC 16 V), ki je potrebna za napajanje motorja BLDC. Napetostni regulator zniža in dodatno stabilizira enosmerno napetost za napajanje elektronike (5 V) in mikrokrmilnika (3.3 V). Mikrokrmilnik predstavlja jedro elektronike. Uporablja se za zajemanje, filtriranje in obdelavo vhodnih signalov (npr. vhodnega signala Y1, katerega predvideni napetostni obseg je med 0 V in 10 V, in predstavlja referenčni položaj gredi pogona), ter za generiranje izhodnih signalov za krmiljenje gonilnika motorja BLDC (npr. signali P1–P3 in N1–N3 za preklapljanje tranzistorjev MOS-FET, pulzno-širinsko

moduliran (PWM) signal za nastavitev hitrosti vrtenja motorja BLDC in signal tokove omejitve (CL) za nastavitev največjega toka). Vhodni in izhodni signali so prenapetostno zaščiteni in digitalno filtrirani. Za pretvorbo analognih vrednosti napetosti ali toka na vhodih v digitalne poskrbi analogno-digitalni pretvornik, za generiranje analognih signalov (npr. napetosti za nastavitev reference tokove omejitve) iz digitalnih vrednosti pa poskrbi digitalno-analogni pretvornik mikrokrmilnika. Digitalna povezava z osebnim računalnikom je lahko vzpostavljena prek serijskega protokola RS232, RS422 ali RS485.

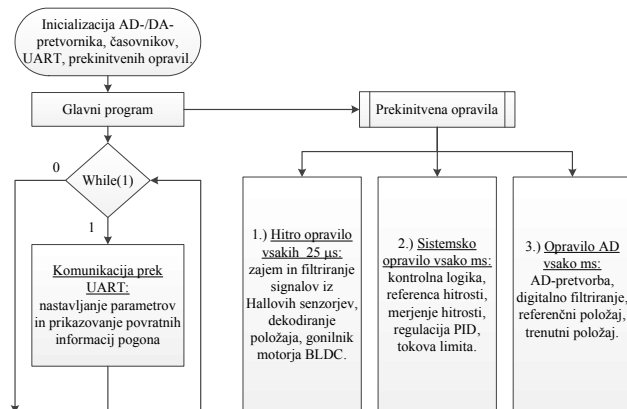
Programska koda, ki se izvaja na mikrokrmilniku, in je shematično prikazana na Sliki 3, sestoji iz neskončne zanke za komunikacijo s pogonom (za nastavljanje parametrov in prikazovanje povratnih informacij pogona prek UART) in treh prekinitvenih opravil:

1. Hitro opravilo se izvaja vsakih 25 μ s za zaznavanje prehodov signalov iz Hallovih senzorjev, ki so vgrajeni v motor BLDC, in za generiranje krmilnih signalov tranzistorjev MOS-FET v primernem vrstnem redu, da se motor zavrti v zeleno smer.
2. Sistemsko opravilo se izvaja na vsako milisekundo za izračun referenčne in izmerjene rotacijske hitrosti iz časa med spremembami nivojev signalov iz Hallovih senzorjev. Izračuna se tudi izhodni signal regulatorja PID, ki se pretvori v razmerje PWM, in tokova omejitve. Glavna kontrolna logika se prav tako izvaja v tem opravilu.
3. Opravilo analogno-digitalne pretvorbe se sproži znotraj systemskega opravila. Namenjeno je zajemanju in filtriranju analognih vhodov.

Poleg algoritmov za natančno pozicioniranje, regulacijo hitrosti, varnostne funkcije in javljanje napak pri delovanju pogona, smo vgradili še nekaj naprednih algoritmov.

Glavni cilj pri razvoju teh je bil zmanjšati obremenitev mehanskih komponent med delovanjem v industrijskem okolju in s tem podaljšati življenjsko dobo pogonov. Algoritem

toge zaustavitve ali »hard stop« zmanjšuje silo na gredi, če se ta trenutno zaustavi, npr. zaradi ovire znotraj ventila. Algoritem mehke zaustavitve ali »soft stop« postopoma zmanjšuje hitrost premikanja, ko se gred približuje zelenemu položaju. Algoritem glajenja hitrosti ali »speed smoothing« zmanjšuje oscilacije izmerjene hitrosti vrtenja in posledično s tem tudi krmilnega signala PWM iz regulatorja PID.

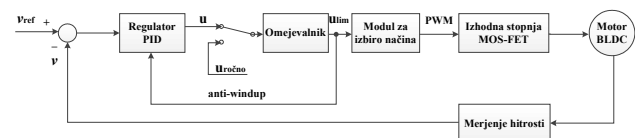


Slika 3: Blokovna shema programske kode.

Nadzorni algoritem za pozicioniranje nastavi način delovanja in smer vrtenja motorja BLDC glede na razliko med referenčnim in dejanskim položajem gredi. Regulacijo hitrosti izvaja algoritem regulatorja PID, katerega podrobnosti lahko najdemo opisane v različnih virih [5, 6]. Kot je bilo že omenjeno, se algoritem regulacije PID izvaja vsako milisekundo. Izhodni signal regulatorja PID se pretvori v pulzno-širinsko moduliran (PWM) signal. Frekvenca signala PWM znaša 20 kHz z razločljivostjo 1200 nivojev. Digitalni signal PWM se lahko shrani v 16-bitni register in njegova razločljivost je ustrezna za stabilno regulacijo hitrosti. Izhodni signal PWM je torej omejen na 1200 nivojev. Omejitev izhodnega signala regulatorja zahteva, da uporabimo ustrezno zaščito v regulacijski zanki. V ta namen je uporabljena tako imenovana zaščita pred integralskim pobegom (anti-windup) [7]. Parametri regulatorja PID so bili izbrani ročno za optimalen odziv pogona pri določeni obremenitvi na gredi ($F = 2000 \text{ N}$).

Parametri, ki se uporabljajo pri vseh nadaljnjih poskusih, so: $K_P = 1.5$ (proporcionalno ojačenje), $K_I = 10$ (integrirno ojačenje), $K_D = 0$ (diferencirno ojačenje). Slika

4 prikazuje blokovno shemo hitrostne regulacijske zanke PID. Preklapljanje tranzistorjev MOS-FET se nastavi glede na kontrolne signale: način ali »mode« (vrtenje ali ustavljeno), smer ali »direction« (naprej ali nazaj) in »pwm« (poganjanje ali zaviranje, odvisno od predznaka izhodnega signala iz regulatorja PID). Motor BLDC mora biti sposoben poganjati ali zavirati premično gred v smeri naprej ali nazaj, ali jo držati na mestu, zato so vgrajeni štiri načini za premikanje in en način za držanje gredi.



Slika 4: Blokovna shema hitrostne regulacijske zanke.

3 Algoritem »hard stop«

Namen algoritma je, da se pogon v trenutku zaustavi, če sila na gredi preseže predpisano. Hitra reakcija je pomembna, da se preprečijo preobremenitve mehanske konstrukcije, saj se trk, ko gibajoči se del zadane ob steno ventila, zgodi v trenutku. Velik izziv je namreč doseči v naprej predpisano in ponovljivo silo na gredi brez uporabe senzorjev sile. Sila mora biti čimbolj točna ne glede na različno trdoto materialov, ki se uporabljajo za izdelavo sestavnih delov za ventile. Navor motorja BLDC, in posledično sila na gredi, je premosorazmeren srednji vrednosti toka skozi navitja statorja. Ideja pri reševanju omenjenega izziva je bila dodati električno vezje, ki omeji tok motorja. Tokova omejitev je nastavljena tako, da je navor motorja zadosten za premagovanje največje zelene sile na gredi pri nazivni hitrosti premikanja.

Težava nastane takrat, ko se premični del ventila zaleti v togo oviro, saj zaradi vztrajnosti lahko sila pri trku naraste precej nad nastavljeno silo. Edini način za zmanjšanje sile pri trku je zmanjšati tokovo omejitev. Algoritem »hard stop« izračunava spremembo izmerjenega toka skozi motor po času in jo hkrati filtrira z digitalnim nizkoprepustnim filtrom prvega reda

s časovno konstanto 100 ms. Dejanska tokova omejitev se nato določi kot razlika med nastavljeno omejitvijo za nazivno hitrost premikanja in trenutno izhodno vrednostjo filtra, ki je pomnožena z ustreznim faktorjem, tako imenovanim »speed compensation factor« (SCF), katerega vrednost se nastavi eksperimentalno:

$$i_{LIM2} = \begin{cases} i_{LIM} - i_v \times SCF; & i_v > 0 \\ i_{LIM} & ; i_v \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

pri čemer je i_v filtrirana sprememba toka skozi motor BLDC, i_{LIM} in i_{LIM2} sta nastavljena in dejanska tokova omejitvev.

3.1 Meritev sile pri togem nasedu

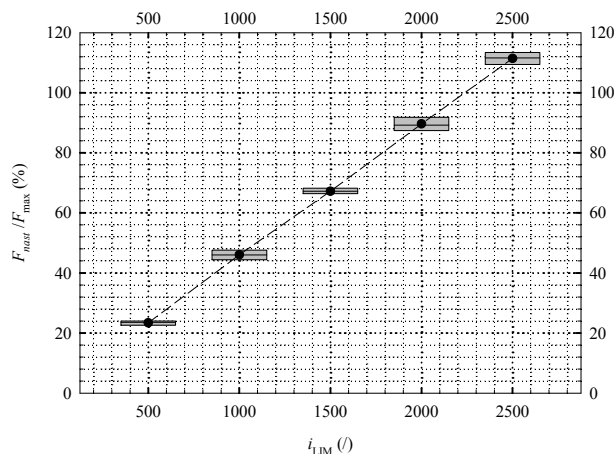
Sile so bile izmerjene z merilno celico TENSO T1/SK, ki je bila nameščena na trdni jekleni plošči. Plošča je bila pritrjena na dveh jeklenih gredeh za pritrnitev pogona na ventil, kot je prikazano na Sliki 5.



Slika 5: Merilna celica na jekleni plošči.

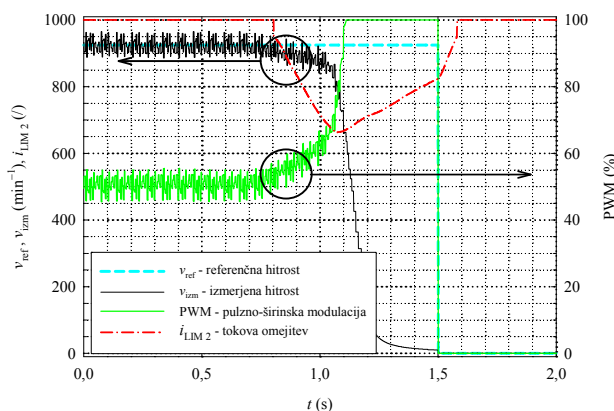
Poskus je bil sledeč: tokova omejitvev (i_{LIM}) je bila nastavljena na pet različnih vrednosti, da bi dosegli pet različnih sil na gredi pogona. Parameter SCF je bil v vseh primerih nastavljen na 0.1. Motor BLDC je poganjal gred s hitrostjo približno 0.5 mm/s, kar je ekvivalentno hitrosti vrtenja motorja 925 min^{-1} , nakar je gred trčila v trden kovinski čep, ki je bil nameščen na merilni celici. Pet ponovitev enakega poskusa je bilo izvedenih za vsako izmed petih nastavitvev i_{LIM} . Slika 6 prikazuje relativno silo (F_{nast}/F_{max}) kot

funkcijo tokove omejitve (i_{LIM}). F_{nast}/F_{max} je bila znotraj tolerance $\pm 5\%$, s čimer smo dosegli zastavljeni cilj.



Slika 6: Relativna sila (F_{nast}/F_{max}) kot funkcija tokove omejitve (i_{LIM}).

Hitrost motorja BLDC in signal PWM iz regulatorja PID sta bila izmerjena, ko je gred trčila v trdno oviro (trden kovinski čep, nameščen na merilni celici). Digitalni vrednosti hitrosti in PWM sta bili pridobljeni prek serijske povezave RS232. Vzorci so se generirali vsako milisekundo in shranjevali v tekstovno datoteko na osebni računalniku.



Slika 7: Referenčna hitrost (v_{ref}), izmerjena hitrost (v_{izm}), razmerje PWM in tokova omejitve (i_{LIM2}) kot funkcija časa t pri trku gredi v togo oviro.

Slika 7 prikazuje referenčno hitrost (v_{ref}), izmerjeno hitrost (v_{izm}), razmerje pulzno-širinske modulacije (PWM) in tokovo omejitvev (i_{LIM2}) kot funkcijo časa t . Referenčna hitrost je

bila nastavljena na 925 min^{-1} . Največji tok motorja je določen z i_{LIM2} pri $i_{LIM} = 1000$ (1). Tokova omejitve i_{LIM2} pade na približno dve tretjini nastavljene vrednosti, ko razmerje PWM doseže svoj vrh pri $t = 1.1 \text{ s}$.

Upad tokove omejitve zmanjša silo, ko gred trči v togo oviro, saj je navor motorja BLDC sorazmeren srednji vrednosti toka skozi motor. Sedaj razumemo, zakaj je potreben algoritem »hard stop«. Signal PWM iz regulatorja PID doseže največjo vrednost, ko se hitrost zmanjša, in gre v območje nasičenja (PWM = 100%). Ker je hitrost vrtenja manjša od referenčne hitrosti (v_{ref}), je lahko srednja vrednost toka skozi motor BLDC precej večja (zaradi zmanjšane inducirane napetosti V_{emf} , ki je enaka produktu neke konstante motorja BLDC, k_{BLDC} , in dejanske hitrosti vrtenja, v) kot bi bila, če bi bila dejanska hitrost blizu referenčne. To pomeni, da bi motor BLDC deloval z večjim navorom (z večjo silo na gred), kot je nastavljen s tokovo omejitvijo (i_{LIM}) za razmere pri nazivni hitrosti, če ne bi bilo kompenzacije tokove omejitve z algoritmom »hard stop«. Na Sliki 7 lahko opazimo, da hitrost pade od 90% nazivne vrednosti na nekaj več kot 0% v le 0.3 s, zato je časovni interval od 1.0 s do 1.3 s ključen za zmanjševanje tokove omejitve na 65% do 75% njene nazivne vrednosti. Padec tokove omejitve je eksperimentalno določen, da ostane največja sila pri trku v togo telo znotraj tolerance $\pm 5\%$, tako kot je bilo prikazano na Sliki 6. Tolikšna toleranca je še sprejemljiva za praktično uporabo z upoštevanjem varnostnih zahtev.

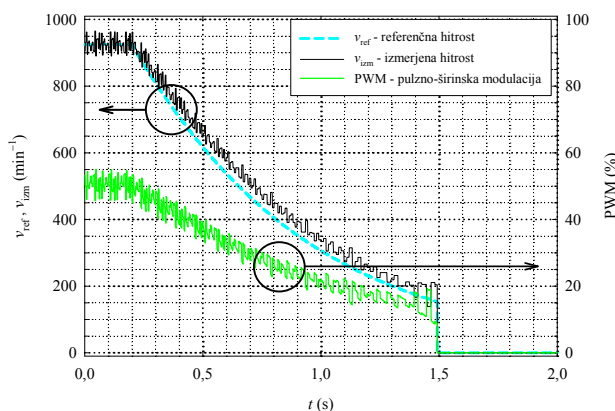
4 Algoritem »soft stop«

Algoritem mehke zaustavitve ali »soft stop« postopoma zmanjšuje referenčno hitrost, ko se gred približuje zelenemu položaju. Referenčna hitrost (v_{ref}) se izračuna po enačbi (2):

$$v_{ref} = direction \times \left(\frac{|Y_{ref} - pos| \times (v_{max} - v_{min})}{BRAKING_STEPS_MAX} + v_{min} \right), \quad (2)$$

pri čemer je smer (*direction*) odvisna od smeri vrtenja motorja BLDC, Y_{ref} je referenčni položaj, pos je dejanska pozicija, v_{max}/v_{min} je največja/najmanjša hitrost vrtenja (925 min^{-1} /

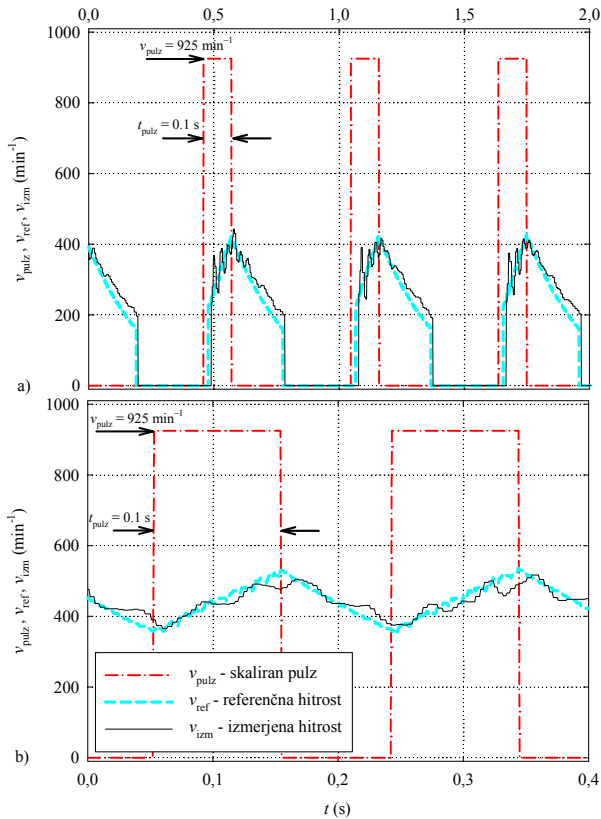
150 min^{-1}) motorja, in parameter *BRAKING STEPS MAX* = 360 je izbran eksperimentalno, da dosežemo mehko zaustavitev pogona. Na Sliki 8 se začne referenčna hitrost v_{ref} zmanjševati, ko je razlika med zeleno in dejansko pozicijo manjša od nastavljenega parametra *BRAKING STEPS MAX*. V primeru, da bi se vrtenje motorja BLDC zaustavilo v enem samem koraku motorja BLDC, bi se pojemek pri zaustavitvi povečal za približno 40-krat (kvadrat razmerja med hitrostjo zaustavitve 925 min^{-1} in 150 min^{-1}). Sile, ki delujejo na mehanske komponente, so zmanjšane sorazmerno z zmanjšanjem pojemka pri uporabi algoritma mehke zaustavitve. Pričakujemo, da se z omenjenim algoritmom življenjska doba mehanskih komponent elektromotornega pogona podaljša.



Slika 8: Referenčna hitrost (v_{ref}), izmerjena hitrost (v_{izm}) in razmerje PWM kot funkcija časa t pri preizkušanju algoritma mehke zaustavitve.

Prednost uporabe algoritma mehke zaustavitve se izkaže še posebej v primeru, ko pogon deluje v tritočkovnem režimu (naprej, nazaj, ustavljen). Premikanje gredi krmilita dva digitalna vhodna signala (DI). Referenčni položaj (Y_{ref}) se povečuje ali zmanjšuje sorazmerno z integralom skaliranih pulzov z amplitudo, ki je enaka nazivni hitrosti vrtenja (v_{pulz}), če je prisoten eden izmed signalov DI (naprej - DI1, nazaj - DI3). Slika 9 prikazuje skalirane pulze (v_{pulz}), referenčno hitrost (v_{ref}) in izmerjeno hitrost vrtenja (v_{izm}) pri dveh različnih periodah pulzov: a) 0.6 s in b) 0.2 s. Trajanje pulza je približno 0.1 s v obeh

primerih. Pulz se skalira in integrira po času, tako da se referenčna pozicija Y_{ref} povečuje (zmanjšuje) linearno s časom, če je DI1 (DI3) na visokem nivoju. Referenčna hitrost v_{ref} se prav tako postopoma povečuje do nazivne hitrosti vrtenja $v_{ref,max} = 925 \text{ min}^{-1}$.



Slika 9: Skalirani pulzi (v_{pulz}), referenčna (v_{ref}) in izmerjena hitrost vrtenja (v_{izm}) pri dveh periodah pulzov: a) 0,6 s in b) 0,2 s. Čas pulza (t_{pulz}) je približno 0,1 s.

Če je signal DI1 (in DI3) na nizkem nivoju, ostane referenčna pozicija Y_{ref} konstantna, in dejanski položaj gredi se približuje Y_{ref} . Zato se referenčna hitrost v_{ref} postopoma zmanjšuje premo sorazmerno z razliko med referenčno (Y_{ref}) in dejansko pozicijo (pos). Kot lahko vidimo na Sliki 9a, je površina pod signalom v_{izm} enaka površini pod signalom v_{pulz} , ker je dejanski položaj gredi po vsakem pulzu dosegel referenčni položaj. Na Sliki 9b je ponavljanje pulzov tako hitro, da vedno obstaja majhna napaka položaja. Izmerjena hitrost vrtenja v_{izm} se počasi spreminja okoli povprečne vrednosti v_{pulz} , namesto neprestanih zagonov in

zaustavitev motorja BLDC, kar je dobro za zmanjševanje mehanske obremenitve in podaljšanje življenjske dobe pogona.

5 Algoritem »speed smoothing«

Na Sliki 7 se krmilni signal PWM spreminja, tudi če je referenčna hitrost konstantna ($t = 0 - 0,7$ s). Glavni vzrok za spreminjajoči se signal PWM je šum v izmerjeni hitrosti (v_{izm}). Šum pri meritvi hitrosti vrtenja nastane zaradi nehomogenega magnetnega polja trajnega magneta v rotorju in nenatančne postavitve Hallovih senzorjev na statorju motorja. Slika 10 prikazuje izmerjeno hitrost vrtenja v_{izm} in signal PWM v ustaljenem stanju, ko je dosežena nazivna hitrost vrtenja $v \approx 925 \text{ min}^{-1}$. Opazimo lahko zaporedje 18 vzorcev hitrosti (in PWM), ki se ponavlja periodično. Način za zmanjšanje šuma v krmilnem signalu (PWM) je očitno zmanjšanje šuma v izmerjenem signalu, zato je bil v programski kodi implementiran poseben filter, katerega izhod je tekoča povprečna vrednost 18 vzorcev izmerjene hitrosti vrtenja. Filter deluje tako, da je vrednost izhoda nič, če je vhod nič. Če je hitrost različna od nič, je prvih 17 vzorcev izhod enak vhodu. Po zajetem 18. vzorcu se izhod iz filtra izračuna kot tekoča povprečna vrednost hitrosti po enačbi (3):

$$v_a[n] = \frac{1}{18} \sum_{i=n-17}^n v_{meas}[i] \quad (3)$$

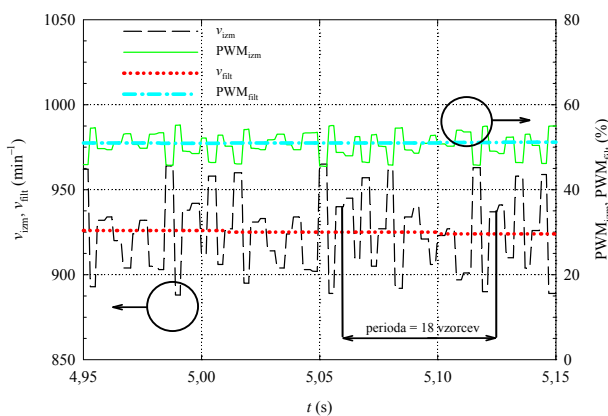
pri čemer sta $v_{meas}[i]$ in $v_a[n]$ izmerjena in povprečna hitrost.

Za ohranitev hitre reakcije pri nenadnih spremembah hitrosti postane izhod filtra enak vhodu, če se izmerjena hitrost razlikuje od povprečne za več kot približno 10% nazivne hitrosti vrtenja. To razliko definiramo s konstanto $DIFF_{max}$ in uporabimo v programski kodi kot dodaten pogoj pri filtriranju (4):

$$v_{fil}[n] = \begin{cases} v_a[n]; & |v_a[n] - v_{meas}[n]| \leq DIFF_{max} \\ v_{meas}[n]; & |v_a[n] - v_{meas}[n]| > DIFF_{max} \end{cases} \quad (4)$$

Slika 10 prikazuje PWM signala iz regulatorja PID pri uporabi nefiltriranih in filtriranih vrednosti izmerjene hitrosti. Šum signala PWM iz regulatorja PID se močno

zmanjša, če uporabimo filtrirano hitrost. Oscilacije se zmanjšajo za faktor 10, iz približno 5% na 0.5%. Oscilacije izmerjene hitrosti vrtenja ostanejo na približno enakem nivoju, medtem ko je vrednost filtrirane hitrosti praktično konstantna. Oscilacije so lahko posledica netočne postavitve Hallovih senzorjev, ne pa dejanske oscilacije hitrosti, saj motor BLDC teče precej bolj mirno in tiho pri uporabi filtrirane hitrosti kot pri uporabi izmerjene hitrosti. Lahko zaključimo, da je uporaba filtrirane hitrosti namesto izmerjene hitrosti smiselna in koristna pri zmanjševanju oscilacij krmilnega signala. Najpomembnejše je, da zmanjšamo mehanske obremenitve zaradi zmanjšanih pospeškov in pojemkov, saj je krmilni signal precej bolj gladek.



Slika 10: Izmerjena (v_{izm}) in filtrirana hitrost (v_{filt}) s pripadajočim razmerjem PWM_{izm} in PWM_{filt} kot funkcija časa t v ustaljenem stanju.

6 Povzetek

Predstavljen je robusten elektromotorni pogon za hidravlične ventile. Opisani so algoritmi za preprečevanje preobremenitve pri togem nasedu ventila, mehko zaustavitev in glajenje hitrosti. Meritve sile na gredi z uporabo algoritma »hard stop«, ko gred pogona trči v togo oviro, so pokazale dobro ponovljivost in majhna

odstopanja od nastavljene sile kljub posrednemu merjenju sile prek toka motorja. Algoritem »soft stop« postopoma zmanjšuje hitrost vrtenja motorja, ko se dejanski položaj gredi približa zelenemu, in s tem prispeva k manjši obremenitvi mehanskih delov pogona. Algoritem »speed smoothing« učinkovito zmanjšuje oscilacije hitrosti v ustaljenem stanju, kar pomeni zmanjšanje pospeškov in pojemkov pri delovanju pogona z nazivno hitrostjo. Posledično se motor BLDC vrti enakomernje in tišje, po pričakovanjih pa sta zmanjšana tudi obremenitev in obraba mehanskih delov pogona.

7 Literatura

- [1] Y. Wang, T. Megli, M. Haghgoie, K.S. Peterson, A.G. Stefanopoulou, *Modeling and Control of Electromechanical Valve Actuator*, Society of Automotive Engineers, vol. 1, pp. 1106–1116 (2002).
- [2] P. Eyabi, G. Washington, *Modeling and sensorless control of an electromagnetic valve actuator*, *Mechatronics*, vol. 16, no. 1, pp. 159–175 (2006).
- [3] S. Wu, Z. Jiao, L. Yan, R. Zhang, J. Yu, C-Y. Chen, *Development of a Direct-Drive Servo Valve With High-Frequency Voice Coil Motor and Advanced Digital Controller*, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 3, pp. 932–942 (2014).
- [4] Danfoss Trata, *Motorized Control Valves*, http://www.trata.danfoss.com/Content/6542f01c-3a99-429b-8ca4-2ec50a35c82d_MNU17545039_SIT265.html.
- [5] D.Q. Truong, K.K. Ahn, *Force control for hydraulic load simulator using self-tuning grey predictor – fuzzy PID*, *Mechatronics*, vol. 19, no. 2, pp. 233–246 (2009).
- [6] B. Lennartson, B. Kristiansson, *Evaluation and tuning of robust PID controllers*, *IET Control Theory and Applications*, vol. 3, no. 3, pp. 294–302 (2009).
- [7] Y. Peng, D. Vrančić, R. Hanus, S.S.R. Weller, *Anti-Windup Designs for Multivariable Controllers*, *Automatica*, vol. 34, no. 12, pp. 1559–1565 (1998).