Izvirni znanstveni članek

Krmiljenje hidravličnega konvencionalnega ventila s pulznoširinsko modulacijo

Amar Kujraković, Jan Pustavrh, Rok Jelovčan, Franc Majdič

Izvleček:
Zaradi naraščajočih potreb po zmanjšanju stroškov v hidravliki se za proporcionalno krmiljenje aktuatorjev raziskujejo cenovno ugodnejše metode krmiljenja. Eno izmed možnosti bi lahko predstavljali konvencionalni potni ventili. Ta prispevek obravnava možnost krmiljenja konvencionalnega 2/2-potnega sedežnega ventila s pulznoširinsko modulacijo (PWM) z namenom doseganja kvaziproporcionalnega povprečnega pretoka. Izdelani so bili matematični popis ventila, hidravlično preizkuševališče in krmilni program za izvajanje stopničastih in PWM-meritev. Eksperimentalno so bili ovrednoteni vplivi frekvence, razmerja vklopa, tlaka in temperature. Ugotovljeno je bilo, da je nadzor povprečnega pretoka mogoč v omejenem območju parametrov, pri čemer odziv omejujejo preklopni časi ventila in obratovalni pogoji.

Ključne besede:
pulznoširinska modulacija, konvencionalni potni ventili, elektromagnetno krmiljenje, časovni odziv, razmerje vklopa

1 Uvod

Proporcionalni in servoventili omogočajo zvezno nastavljanje hidravličnega pretoka, vendar so zaradi zahtevnejše zasnove in krmilne elektronike občutno dražji od konvencionalnih vklopno-izklopnih ventilov. Pri digitalni hidravliki se zato preučujejo možnosti, pri katerih se povprečni pretok uravnava s časovnim krmiljenjem preklopnih elementov. Med pomembnejšimi načini je pulznoširinska modulacija (PWM), pri kateri se z razmerjem časa vzbujanja in celotne periode določa energija oziroma povprečni hidravlični učinek [1, 2].

Številne objavljene raziskave obravnavajo predvsem hitre preklopne ventile, njihove električne pogone in kompenzacijo zakasnitev [3–5,7]. Pri počasnejšem konvencionalnem sedežnem ventilu pa izmerjeni časovni zamiki postavljajo bistveno strožjo omejitev frekvenci: če se ventil v posamezni periodi ne utegne odpreti in zapreti, zveza med električnim razmerjem vklopa in hidravličnim pretokom ne sledi več idealiziranemu zakonu. Zato rezultatov za visoko odzivne digitalne ventile ni mogoče neposredno prenesti na običajen vložni 2/2-ventil.

Namen raziskave je bil eksperimentalno preveriti, ali je mogoče s PWM-krmiljenjem doseči kvaziproporcionalno nastavljanje povprečnega pretoka skozi konvencionalni 2/2-sedežni vložni ventil. Težišče članka predstavljajo trije sklopi meritev: vpliv tlačne razlike in temperature olja na časovni odziv ter vpliv frekvence in razmerja vklopa na povprečni pretok. Ob tem so ocenjene meje uporabnega območja krmiljenja in zanesljivost uporabljenega merilnega postopka.

Amar Kujraković, **mag. inž.**, **Jan Pustavrh**, **mag. inž.**, **Rok Jelovčan**, inž., **izr. prof. dr. Franc Majdič**, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

© The Authors 2026. CC-BY 4.0

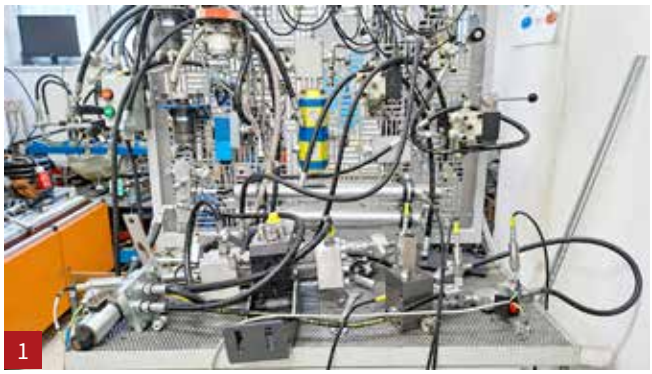
https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-5.32

2 Metodologija raziskave

2.1 Obravnavani ventil in preizkuševališče

Preizkušen je bil elektromagnetno krmiljeni, normalno zaprti, pilotno vodeni 2/2-sedežni vložni ventil Winner Hydraulics EP-08W-2A-31-M-05 z nazivnim pretokom 40 L/min. Na ventil je bila nameščena elektromagnetna tuljava EC-04W-200-H-D z nazivno napetostjo 24 V DC, podano upornostjo hladne tuljave 28,6 Ω ± 7 % in nazivno močjo 20 W [8, 9]. Pilotno in glavno gibanje skupaj določata zunanje zaznani hidravlični odziv; neposredni položaj zapornega elementa ni bil merjen.

Hidravlično preizkuševališče (*slika 1*) je vključevalo nastavljanje obratovalnega tlaka, tlačni tipali pred ventilom in za njim, hitro odzivni merilnik pretoka za zaznavo preklopov, merjenje



1

Hidravlično preizkuševališče za meritve odziva ventila

temperature olja ter hidravlični valj z merjenjem pomika LVDT. Uporabljeno je bilo hidravlično olje razreda ISO VG 46. Frekvenco, razmerje vklopa, amplitudo in število PWM-ciklov je določal program TwinCAT s panelnim računalnikom Beckhoff CP6606, spojnikom EK1100 in izhodnim terminalom EL2535 [10].

Tlačna razlika je bila določena iz hkratnih meritev tlakov pred ventilom in za njim. Izmerjena napetost je služila kot dejanska električna referenca; hitro odzivni pretok je služil izključno za zaznavo časa začetka naraščanja oziroma padanja pretoka. Povprečni pretok ni bil določen iz amplitude tega hitro odzivnega merilnika, ampak iz integriranega volumetričnega učinka pomika hidravličnega valja.

2.2 Določanje časovnega odziva

Najprej je bil ventil vzbujen s stopničastim napetostnim signalom. Časovni zamik odpiranja je bil določen kot čas med električnim vklopom in zaznanim začetkom naraščanja pretoka, zamik zapiranja pa kot čas med električnim izklopom in zaznanim začetkom padanja pretoka (enačba (1 in 2)). Trenutek vklopa je bil določen s tangentno metodo na strmem naraščajočem robu napetosti. Zaradi počasnejšega upada napetosti ob izklopu je bila referenca pri zapiranju določena s prehodom skozi 50-odstotno raven. Spremembe pretoka so bile zaznane s filtriranim signalom, njegovim odvodom in pragi zaznavanja.

$$t_{\mathrm{odp,eksp}} = t_{Q,\uparrow} - t_{u,\uparrow} \tag{1}$$

$$t_{\mathrm{zap,eksp}} = t_{Q,\downarrow} - t_{u,\downarrow} \tag{2}$$

Takšna definicija pomeni operativni hidravlični časovni zamik celotnega merilnega sklopa. Ne daje neposredno začetka oziroma konca gibanja krmilnega bata. Pri preizkusu vpliva tlaka se je Δp spreminjal med 20 bar in 100 bar v korakih po 10 bar pri 40 °C; pri temperaturnem preizkusu pa se je temperatura olja spreminjala med 25 °C in 50 °C v korakih po 5 °C pri sistemskem tlaku 60 bar.

2.3 Parametri PWM in določanje povprečnega pretoka

Električni signal PWM določajo frekvenca, perioda (enačba (3)) in razmerje vklopa (enačba (4)). Njihove zveze in idealno časovno povprečenje pretoka so podani v enačbi (5). V realnosti čas odpiranja in zapiranja zavzema del periode, poleg tega sta časovna zamika različna, zato je dejanski pretočni impulz zamaknjen glede na električni impulz in običajno ni pravokotne oblike [4–6].

$$T = \frac{1}{f} \tag{3}$$

$$D = \frac{t_{\mathrm{vklop}}}{T} \tag{4}$$

$$Q_{\mathrm{pov,ideal}} = DQ_{\mathrm{odp}} \tag{5}$$

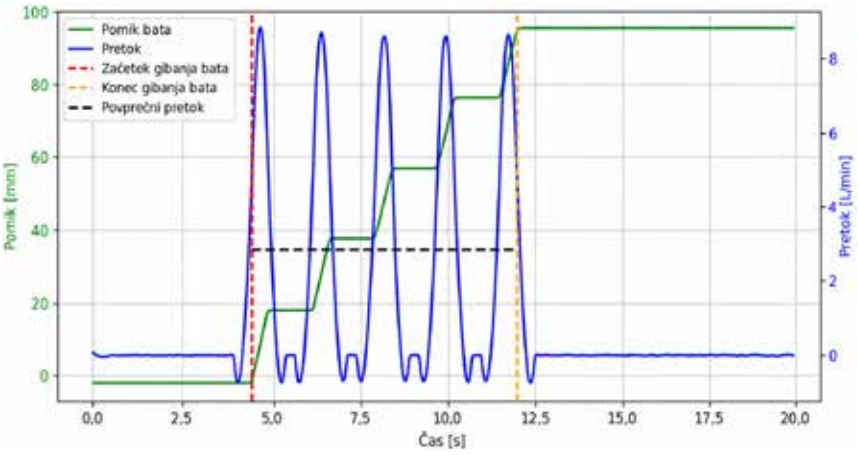
Za določanje dejanskega povprečnega pretoka je bil uporabljen pomik bata hidravličnega valja v merilnem intervalu, ki je zajemal N zaporednih period PWM. Ob znani efektivni površini bata valja in spremembi njegovega pomika v času merilnega intervala je bila uporabljena enačba (6).

$$Q_{pov,\mathrm{LVDT}} = A_{\mathrm{c,ef}} \frac{x_c(t_0+NT) - x_c(t_0)}{NT} \tag{6}$$

Merilni interval je bil izbran tako, da zajame reprezentativno zaporedje period. S tem se zmanjša občutljivost na šum, ki bi ga povzročilo numerično odvajanje pomika. Pri 60 bar je bila iz preklopnega odziva ocenjena največja frekvenca 1,87 Hz; za nadaljnji preizkus so bile na tej podlagi izbrane tri frekvence: 0,56 Hz, 1,13 Hz in 1,60 Hz. Pri vsaki frekvenci so bila sistematično spreminjana razmerja vklopa ter izmerjeni pripadajoči povprečni pretoki.

2.4 Merilni kriteriji in ločitev časovnih ter volumetričnih veličin

Na *sliki 2* je razvidno, zakaj sta bila za dva cilja raziskave uporabljena različna merilna signala. Povečanje pomika valja je stopničasto, saj je pomik kumulativni učinek več posameznih pretočnih impulzov. Hitroodzivni merilnik pretoka lahko zazna začetni porast ali upad pretoka, vendar bi izračun povprečja iz njegove časovne amplitude zahteval posebno preverjanje natančnosti pri hitro spreminjajočem se pretoku. Nasprotno LVDT podaja bolj neposredno zvezo s pretečeno prostornino, a pomik ni primerna referenca za natančen začetek preklopnega dogodka zaradi vztrajnosti valja in elastičnosti hidravličnega sklopa.



2

Primer časovnega poteka pomika bata valja in pulzirajočega pretoka pri PWM-krmiljenju

Pri zaznavanju časov so pomembni oblika električnega signala, prag pretoka in uporabljen filter. Odvajanje signala izpostavi spremembe, vendar lahko poudari tudi merilni šum. Operativna definicija zamika je bila zato pri vseh tlačnih in temperaturnih točkah enaka. Rezultati ne predstavljajo celotnega časa mehanskega pomika krmilnega bata in tudi ne vključujejo neposredne meritve položaja njegovega sedeža. Za numerično primerjavo različnih ventilov bi bilo treba poročati še o frekvenci vzorčenja, ponovitvah in vrednostih pragov; sam podatek o povprečnem zamiku za takšno primerjavo ni zadosten.

Obdelava PWM-serij je sledila enotnemu zaporedju: iz stopničastega odziva je bila določena groba frekvenčna meja, nato so se pri treh izbranih frekvencah preizkušale kombinacije razmerij vklopa, nazadnje pa se je iz skupnega pomika valja določil pripadajoči povprečni pretok. Pri tem so bile meje razmerij vklopa opredeljene glede na zaznan hidravlični odziv in ponovljivo delovanje. Zato je treba razlikovati med strogo modelno omejitvijo, ki temelji na izmerjenem časovnem zamiku, ter območjem dejansko uporabljenih nastavitev v preskusu.

3 Rezultati

3.1 Vpliv tlačne razlike na časovni odziv

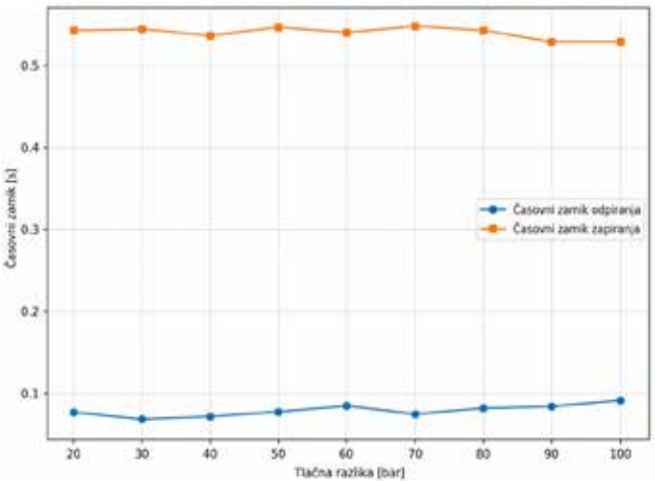
Pri temperaturi olja 40 °C je časovni zamik odpiranja med 20 bar in 100 bar ostal med 0,072 s in 0,092 s. Največja razlika med izmerjenimi vrednostmi je znašala 0,020 s, največji čas odpiranja pa je bil zaznan pri 100 bar. Vrednosti ne kažejo stroge monotone odvisnosti od tlačne razlike; prisotna so manjša lokalna nihanja. Časovni zamik zapiranja je znašal od 0,529 s do 0,548 s s celotnim razponom 0,019 s. Najnižja vrednost je bila izmerjena pri 90 bar in pri 100 bar. Odvisnost obeh časovnih zamikov od tlačne razlike prikazuje *slika 3*.

Najizrazitejša značilnost rezultatov je asimetrija: čas zapiranja je približno šest- do sedemkrat daljši od časa odpiranja. Sprememba tlačne razlike je glede na to razliko povzročila le manjše odstopanje. Z vidika PWM je zato izklopni interval glavni omejitveni dejavnik pri izbiri frekvence, ne pa razmeroma majhne spremembe odziva s tlakom.

3.2 Vpliv frekvence in razmerja vklopa na povprečni pretok

Na podlagi analitičnega preračuna časovnih mej so bila določena pričakovana območja razmerja vklopa, nato so bila pri izbranih frekvencah eksperimentalno uporabljena območja od 5 % do 72 %, od 9 % do 45 % in od 12 % do 23 %. *Preglednica 1* primerja izračunane in eksperimentalno uporabljene meje, *slika 4* pa prikazuje uporabljene meje pri posameznih frekvencah. Pri najvišji frekvenci je uporabno območje zelo ozko, meje eksperimentalno uporabljenega območja pa opazno odstopajo od preprostega časovnega preračuna.

Širina uporabljenega območja se je z naraščanjem frekvence z 0,56 Hz na 1,60 Hz zmanjšala s 67 % na 11 %. Obenem se je spodnja meja povečala s 5 % na 12 %, zgornja pa zmanjšala z 72 % na 23 %. To je neposredna posledica krajšanja periode pri



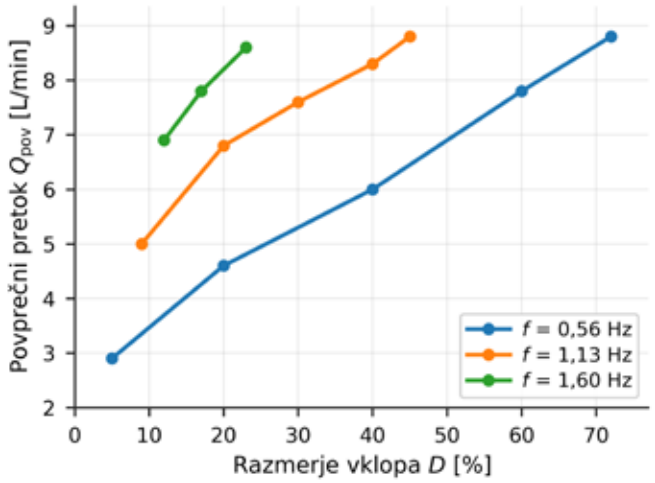
3 *Vpliv tlačne razlike od 20 bar do 100 bar na časovni zamik odpiranja in zapiranja pri 40 °C*

skoraj nespremenjenih preklopnih časih. Pri frekvenci 1,60 Hz je perioda znašala le 0,625 s, kar je primerljivo z vsoto značilnih zakasnitev odpiranja in zapiranja.

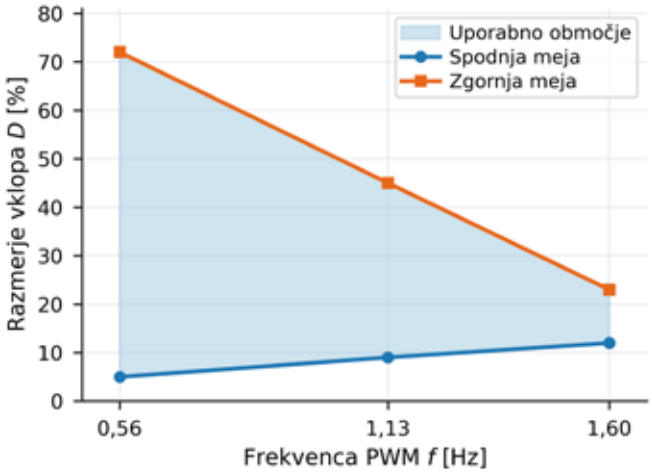
Pri vseh treh frekvencah se je povprečni pretok z večanjem razmerja vklopa povečal, kar prikazujeta *slika 5* in *preglednica 2*. Pri 0,56 Hz se je Q_{pov} povečal z 2,9 L/min pri razmerju (*D*) 5 % ter na 8,8 L/min pri razmerju (*D*) 72 %. Pri 1,13 Hz se je povečal s 5,0 L/min pri razmerju (*D*) 9 % ter na 8,8 L/min pri razmerju (*D*) 45 %. Pri 1,60 Hz se je ob razmerju (*D*) od 12 % do 23 % pretok spreminjal med 6,9 in 8,6 L/min. Z večanjem frekvence se je to-

Preglednica 1 : *Primerjava preračunanih in eksperimentalno uporabljenih območij razmerja vklopa*

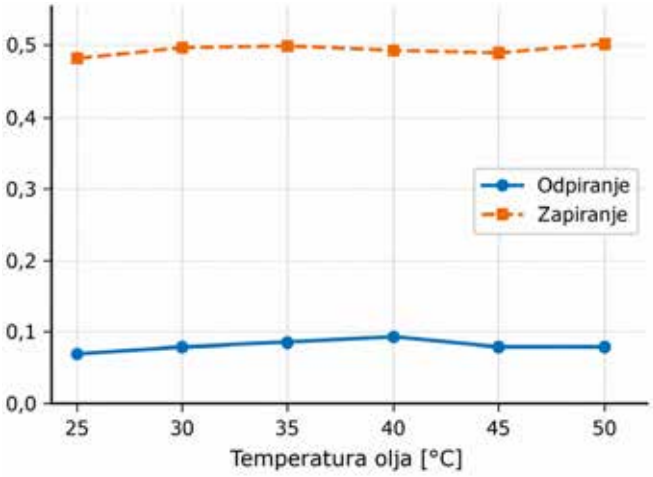
f [Hz]	Izračunano *D* [%]	Uporabljeno *D* [%]	Širina uporabl. [%]
0,56	1,97–72,29	5–72	67
1,13	3,97–44,09	9–45	36
1,60	5,62–20,83	12–23	11



4 *Eksperimentalno uporabljene meje razmerja vklopa pri treh frekvencah PWM*



5 *Povprečni pretok v odvisnosti od razmerja vklopa pri treh frekvencah PWM.*



6 *Izmerjena časovna zamika odpiranja in zapiranja pri različnih temperaturah olja in sistemskem tlaku 60 bar*

Preglednica 2 : *Eksperimentalno določeni pretoki in uporabne meje razmerja vklopa*

f [Hz]	*D* [%]	Q_{pov} [L/min]	Razpon *Q* [L/min]
0,56	5; 20; 40; 60; 72	2,9; 4,6; 6,0; 7,8; 8,8	2,9–8,8
1,13	9; 20; 30; 40; 45	5,0; 6,8; 7,6; 8,3; 8,8	5,0–8,8
1,60	12; 17; 23	6,9; 7,8; 8,6	6,9–8,6

rej zmanjševal ne le obseg razmerij vklopa, temveč tudi razpon doseženega povprečnega pretoka.

Pri primerjavi enakih razmerij vklopa med frekvencami ni mogoče uporabiti ene univerzalne linearne kalibracije. Na primer pri razmerju (*D*) 20 % je povprečni pretok pri 0,56 Hz znašal 4,6 L/min, pri 1,13 Hz pa 6,8 L/min. Dodatno je razvidno, da pri najvišji frekvenci spodnji del pretočnega območja ni bil več dosežen, čeprav se je razmerje vklopa zniževalo. Dobljena kvaziproporcionalna funkcionalnost je torej odvisna od para krmilnih parametrov (*f*, *D*), ne zgolj od razmerja vklopa.

3.3 Vpliv temperature hidravličnega olja

Pri sistemskem tlaku 60 bar in temperaturi hidravličnega olja od 25 °C do 50 °C je bil časovni zamik odpiranja med 0,069 s in 0,091 s, časovni zamik zapiranja pa med 0,482 s in 0,502 s. Najdaljši čas odpiranja je bil ugotovljen pri 40 °C, najdaljši čas zapiranja pa pri 50 °C. Čeprav so bile med posameznimi merilnimi točkami opazne razlike, ni bil ugotovljen enosmeren oziroma monotono naraščajoč ali padajoč temperaturni trend. Vrednosti so zbrane v preglednici 3, njihov potek pa prikazuje *slika 6*.

Preglednica 3 : *Izmerjeni časovni zamiki pri različnih temperaturah olja pri tlaku 60 bar*

Temperatura [°C]	Odpiranje [s]	Zapiranje [s]
25	0,069	0,482
30	0,078	0,495
35	0,084	0,497
40	0,091	0,493
45	0,078	0,490
50	0,077	0,502

Povprečni zamik odpiranja v šestih temperaturnih točkah je znašal 0,080 s, zamik zapiranja pa 0,493 s. Razpona meritev sta bila 0,022 s za odpiranje in 0,020 s za zapiranje. Spremembe niso bile niti po smeri niti po velikosti dovolj konsistentne, da bi iz teh meritev samih potrdili izrazito odvisnost funkcionalnega časovnega odziva od temperature olja.

3.4 Povzetek eksperimentalne odvisnosti med obratovalnimi pogoji in odzivom

V treh serijah meritev so bili vplivi namenoma ločeni. V tlačni seriji se je pri 40 °C spreminjala tlačna razlika, pri čemer sta časovna zamika ostala v ozkih intervalih okoli značilne vrednosti za posamezno smer preklopa. V temperaturni seriji se je pri 60 bar spreminjala temperatura olja, pri čemer se prav tako ni pokazal enosmeren trend. Nasprotno pa sta frekvenca PWM in razmerje vklopa neposredno določala razpoložljivo časovno strukturo pulzirajočega pretoka in sta izrazito vplivala na izmerjeni povprečni pretok. S tem je bila ugotovljena razlika med vplivi obratovalnih pogojev na časovni odziv in vplivi krmilnih parametrov na volumetrični učinek skozi več period.

Tudi znotraj frekvenčne serije je razvidno, da položaja merilnih točk pri različnih frekvencah ni mogoče povzeti z eno funkcijo razmerja vklopa. Pri 20-odstotnem razmerju vklopa sta bili izmerjeni vrednosti 4,6 L/min in 6,8 L/min, kar predstavlja pomembno razliko kljub enakemu deležu napajalnega cikla. Največji pretok 8,8 L/min je bil dosežen pri prvih dveh frekvencah, najvišja merjena frekvenca pa je dosegla 8,6 L/min. Zato se razlike med delovnimi točkami nanašajo tako na spodnjo mejo pretoka kot na zgornjo vrednost, ki jo je bilo mogoče doseči v uporabljenem območju.

4 Diskusija

4.1 Asimetrija preklopa in razmerje med idealnim ter dejanskim PWM-signalom

Rezultati kažejo, da pri obravnavanem ventilu prenos električnega signala PWM v hidravlični pretok odločilno oblikujeta dolga zakasnitev zapiranja in končni čas odpiranja. Idealni model, podan z enačbo (5), predpostavlja, da je povprečni pretok neposredno sorazmeren električnemu deležu vklopa, vendar pri realnem ventilu hidravlični pretočni impulz zaradi elektromagnetnih, mehanskih in pretočnih prehodnih pojavov traja drugače kot električni impulz. Magnetno polje se po izklopu napajanja zaradi induktivnosti ne izklopi v trenutku, zato pretok lahko ostaja prisoten še po izklopu električne napetosti na tuljavi ventila [4, 6].

Razlika med zmogljivostjo pri frekvenci (f) 0,56 Hz in pri frekvenci (f) 1,60 Hz je zato fizikalno pričakovana. Pri nižji frekvenci ostaja dovolj časa za večino kombinacij kratkega oziroma dolgega vzbujanja; pri visoki frekvenci razpoložljiv izklopni del periode omejuje dolg zapiralni zamik. Izračunana zgornja meja D zato ni zgolj električna nastavitev, temveč praktičen pogoj za ponovno vzpostavitev zaprtega stanja. Če je izklop prekratek, pretok med periodami ne upade na nič in spodnji del obvladljivega pretočnega območja izgine.

Ob tem ni mogoče trditi, da je bilo doseženo pravo proporcionalno krmiljenje lege krmilnega bata. Ventil med preizkusom ni vzdrževal stabilnega vmesnega položaja, ampak je z izmeničnim odpiranjem in zapiranjem ustvaril različne časovno povprečne pretoke. Rezultati dokazujejo kvaziproporcionalno nastavljanje povprečja v omejenem območju in pri značilno pulzirajočem trenutnem pretoku. Aplikacije z zahtevami po gladkem takojšnjem pretoku in hitri regulaciji zato niso samoumevno primerne.

4.2 Razlike med izračunanimi in uporabljenimi mejami

Preglednica 1 opozarja, da izračunane in eksperimentalno uporabljene meje razmerja vklopa niso enake. Primer je frekvenca (f) 1,60 Hz, kjer je preračunani spodnji rob 5,62 %, eksperimentalno uporabljeni pa 12 %. Pri tej frekvenci že majhen absolutni premik časa zaznave povzroči veliko spremembo izračunanega deleža periode. Poleg tega časovni zamik, določen na podlagi prve zaznane spremembe pretoka, ne označuje nujno popolnega mehanskega odprtja ali dokončnega zaprtja. Od idealiziranega preračuna je treba razlikovati operativno merilo za zanesljivo preklapljanje pri več zaporednih ciklih.

Drugi razlog za neskladje je eksperimentalna diskretizacija razmerja vklopa: meja je določena na osnovi preizkušenih nastavitev in merila zaznanega pretoka, zato dejanska meja lahko leži med dvema nastavitvama. Brez ponovitev pri gosto razporejenih vrednostih D in brez neposredne meritve notranjega pomika ventila ni mogoče pripisati razlik enemu samemu fizikalnemu vzroku. Pri izbiri krmiljenja je zato primerno, da se teoretični izračun uporabi kot začetna orientacija, uporabno območje pa se preveri eksperimentalno.

4.3 Vpliv tlaka in temperature

V tlačni seriji je razlika med najkrajšim in najdaljšim zamikom odpiranja 0,020 s, med zamikoma zapiranja pa 0,019 s. Tak rezultat je skladen z možnostjo, da je pilotno krmiljen ventil v preizkušenem območju delno tlačno uravnotežen oziroma da sprememba nominalne tlačne razlike ne povzroči sorazmerno velike spremembe rezultante sil na gibljivi element. Toda izmerjeni tlaki pred ventilom in za njim ne podajajo neposredno porazdelitve tlakov znotraj pilotnih komor, zato trditve o posameznih silah ostajajo interpretacija, ne pa neposredni eksperimentalni dokaz [6].

Podobna previdnost velja za temperaturo. Sprememba temperature olja lahko prek viskoznosti, gostote in pretočnega koeficienta spremeni tokovne in dušilne razmere, hkrati pa se lahko zaradi segrevanja spreminjata upornost tuljave in magnetna sila. Ker sta bila neposredno spremljana le temperatura olja in zunanja napetostna ter pretočna odziva, ne pa temperatura tuljave, tok in notranji pomik, obeh vplivnih poti ni mogoče razločiti. Meritve zato ne dokazujejo odsotnosti vsakega temperaturnega vpliva; kažejo, da v razponu med 25 °C in 50 °C pri 60 bar ni bil opažen izrazit enosmeren učinek na uporabljeno definicijo časovnega zamika.

Med serijama meritev je pomembna še razlika pri nominalno enakem pogoju 60 bar in 40 °C: v tlačni seriji je zamik zapiranja 0,54 s, v temperaturni pa 0,493 s. Ta razkorak presega spremembe med sosednjimi točkami znotraj serije. Možni vzroki so različni začetni pogoji, merilni šum, filtriranje in postopek zaznavanja robov. Primerjava ne dopušča sklepov o statistični značilnosti manjših učinkov brez ponovljenih meritev z negotovostmi. Za nadaljnje raziskave je zato ponovljivost merilnega postopka enako pomembna kot povečanje števila delovnih točk.

4.4 Merjenje povprečnega pretoka in uporabnost rešitve

Volumetrična metoda, pri kateri povprečni pretok sledi spremembi pomika LVDT-valja, je za počasen pulzirajoč signal primerna, ker upošteva skupni prečrpani volumen skozi več period. Ta rezultat je manj občutljiv na lokalni visokofrekvenčni šum kot neposreden odvod pomika. Vendar mora biti za pravilen preračun znana efektivna površina ustrezne komore, časovno okno pa mora zajeti reprezentativne periode; pojav puščanja, stisljivosti olja in trenja tesnil ostaja vir negotovosti.

Za praktično uporabo rezultati nakazujejo prednost nižje frekvence, kadar je bistveno širše območje nastavljivega povprečnega pretoka. Pri 0,56 Hz je bil razpon povprečnega pretoka (Q_{pov}) 5,9 L/min, pri 1,60 Hz pa le 1,7 L/min. Ta kompromis spremlja večje časovno valovanje trenutnega pretoka pri nizki frekvenci, zato je izbira frekvence odvisna tudi od hidravlične kapacitivnosti, vztrajnosti aktuatorja in zahtev procesa. Na podlagi razpoložljivih meritev ni mogoče oceniti kakovosti zaprtozančne regulacije ali energetske prednosti v primerjavi s proporcionalnim ventilom, ker takšna primerjava ni bila izvedena.

4.5 Predlogi za nadaljnje delo

Pri nadaljnjem preskušanju bi bilo smiselno za vsako frekvenco opraviti gostejši pregled okolice obeh mej razmerja vklopa, posebej pri frekvenci 1,60 Hz, kjer celotno uporabljeno območje meri samo 11 %. Koristno bi bilo večkrat ponoviti enake kombinacije (f, D) in dodati statistično razpršenost povprečnega pretoka. Tak pregled bi pokazal, kako občutljivo je doseganje želenega pretoka na majhna odstopanja nastavljenega razmerja vklopa in koliko varnostnega odmika od mej je pri načrtovanju potrebno zagotoviti.

Meritvam toka skozi tuljavo in neposrednega pomika krmilnega bata bi bilo treba dati prednost pred dodatnim povečevanjem števila nominalnih tlačnih točk. Ti dve veličini bi omogočili jasno razlikovanje med električno zakasnitvijo, začetkom gibanja glavnega elementa in dejanskimi spremembami pretoka, na kar vplivajo tudi stisljivost olja in merilna veriga. Nadzor temperature tuljave je prav tako pomemben, saj segrevanje tuljave med zaporednimi cikli lahko vpliva na elektromagnetni odziv neodvisno od merjene temperature olja.

Za uporabo krmiljenja v industrijskem aktuatorju bi bilo treba poleg statične kalibracijske krivulje $Q_{pov}(f, D)$ oceniti še nihanje trenutnega pretoka, odziv celotnega aktuatorja in energijske izgube. Podatki iz raziskave te primerjave ne vključujejo. Zato je mogoče ugotoviti možnost uravnavanja povprečnega pretoka, ne pa tudi univerzalne nadomestljivosti proporcionalnega ventila. Morebiten razvoj zaprtozančnega regulatorja bi moral temeljiti na neposredni povratni informaciji o pretoku ali položaju aktuatorja in eksperimentalno preverjenih mejah PWM.

5 Zaključki

Eksperimentalni rezultati potrjujejo, da je mogoče s pulznoširinsko modulacijo pri konvencionalnem 2/2-sedežnem vložnem ventilu v določenem območju doseči postopno nastavljanje povprečnega pretoka. Pri vseh treh frekvencah 0,56 Hz, 1,13 Hz in 1,60 Hz se je povprečni pretok z večanjem razmerja vklopa povečeval, vendar se je uporabni razpon razmerja vklopa pri višji frekvenci izrazito skrčil: s 67 % na 11 %. Tudi dosegljivi razpon pretoka se je zmanjšal z 2,9 L/min na 8,8 L/min, pri 0,56 Hz pa s 6,9 L/min na 8,6 L/min pri 1,60 Hz.

Časovni odziv je bil izrazito asimetričen. Pri tlačnih razlikah med 20 bar in 100 bar in temperaturi olja 40 °C so bili zamiki odpiranja med 0,072 s in 0,092 s, zamiki zapiranja pa med 0,529 s in 0,548 s. V tem območju ni bil ugotovljen močen ali monoton vpliv tlačne razlike. Prav tako sprememba temperature olja med 25 °C in 50 °C pri tlaku 60 bar ni pokazala izrazitega enosmernega vpliva na odziv. Za preskušeni ventil in merilne pogoje je omejitvena veličina predvsem dolg zamik zapiranja.

Na podlagi rezultatov je bila hipoteza o približanju proporcionalnemu krmiljenju povprečnega pretoka podprta, hipoteza o majhnem vplivu tlačne razlike skladna z meritvami, hipoteza o znatnem vplivu temperature olja pa v preizkušenem območju ni bila potrjena. Sklepe je treba razumeti kot omejene na konkretni ventil, razpone parametrov in način posrednega merjenja časovnih zamikov. Nadaljnje delo naj vključuje ponovitve z merilno negotovostjo, sočasno merjenje toka in temperature tuljave ter neposredno spremljanje pomika krmilnega bata. S tem bi bilo mogoče razviti zanesljivejši eksperimentalno umerjeni model za izbiro PWM-parametrov in načrtovanje morebitne zaprtozančne regulacije.

Odprti raziskovalni podatki: Raziskovalni podatki, ki podpirajo ugotovitve tega članka, so odprto dostopni v repozitoriju Zenodo [22].na naslovu https://doi.org/10.5281/zenodo.19401806

Literatura

[1] Q. Zhang, X. Kong, B. Yu, K. Ba, Z. Jin, Y. Kang: Review and Development Trend of Digital Hydraulic Technology. Applied Sciences 10(2) (2020) 579. DOI: 10.3390/app10020579.

[2] F. Sciatti, P. Tamburrano, P. De Palma, A. R. Plummer, E. Distaso, R. Amirante: Digital Hydraulic Valves: Advancements in Research. Heliyon 10 (2024) e27264. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27264.

[3] O. Keles, Y. Ercan: Theoretical and Experimental Investigation of a Pulse-Width Modulated Digital Hydraulic Position Control System. Control Engineering Practice 10(6) (2002) str. 645–654. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00021-7.

[4] M. Taghizadeh, A. Ghaffari, F. Najafi: Modeling and Identification of a Solenoid Valve for PWM Control Applications. Comptes Rendus Mécanique 337(3) (2009) str. 131–140. DOI: 10.1016/j.crme.2009.03.009.

[5] I. Schepers, D. Schmitz, D. Weiler, O. Cochoy, U. Neumann: A Novel Model for Optimized Development and Application of Switching Valves in Closed Loop Control. International Journal of Fluid Power 12(3) (2011) str. 31–40. DOI: 10.1080/14399776.2011.10781035.

[6] P. Opdenbosch, N. Sadegh, W. Book, T. Murray, R. Yang: Modelling an Electro-Hydraulic Poppet Valve. International Journal of Fluid Power 10(1) (2009) str. 7–15. DOI: 10.1080/14399776.2009.10780963.

[7] Q. Gao, J. Wang, Y. Zhu, J. Wang, J. Wang: Research Status and Prospects of Control Strategies for High Speed On/Off Valves. Processes 11(1) (2023) 160. DOI: 10.3390/pr11010160.

[8] Winner Hydraulics Corp.: Pilot-Operated Double-Lock, Bi-directional Flow Energized, W Cavity: EP-08W-2A-31-Z-05. Tehnični podatki izdelka. Dostopno na: https://www.winnerhydraulics.com/Double-Lock/EP-W-31-Poppet-2-Way-Double-Lock/code/EP-08W-2A-31-Z-05.html, ogled: 28. 7. 2026.

[9] Winner Hydraulics Corp.: EC-04W-200-H-Z Continuous Duty Coil. Tehnični podatki izdelka. Dostopno na: https://www.winnerhydraulics.com/Without-TVS-Diodes/EC-04W-200-H-Z/code/EC-04W-200-H-Z.html, ogled: 28. 7. 2026.

[10] Beckhoff Automation GmbH & Co. KG: EL2535 – EtherCAT Terminal, 2-channel PWM output, 24 V DC, 1 A, current-controlled. Beckhoff Automation. Dostopno na: https://www.beckhoff.com/en-en/products/i-o/ethercat-terminals/el-ed2xxx-digital-output/el2535.html, ogled: 18. 8. 2026.

Control of a conventional hydraulic valve using pulse-width modulation

Abstract:
Due to the growing need to reduce costs in hydraulic systems, more cost-effective control methods are being investigated for proportional control of actuators. Conventional directional control valves could represent one such alternative. This paper investigates the feasibility of controlling a conventional 2/2-way poppet valve using pulse-width modulation (PWM) to achieve quasi-proportional control of the average flow rate. A mathematical model of the valve, a hydraulic test bench, and a control program for conducting step-response and PWM measurements were developed. The effects of PWM frequency, duty cycle, pressure, and temperature were experimentally evaluated. The results demonstrate that control of the average flow rate is achievable within a limited range of operating parameters, with performance constrained by valve switching times and operating conditions.

Keywords:
pulse-width modulation, conventional directional control valves, solenoid actuation, response time, duty cycle