

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

**Raziskava elektro-hidravličnega aktuatorja
mobilno hidravličnega ventila**

Zaključna naloga Univerzitetnega študijskega programa I. stopnje
STROJNIŠTVO

Uroš Adamlje

Ljubljana, september 2017

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

**Raziskava elektro-hidravličnega aktuatorja
mobilno hidravličnega ventila**

Zaključna naloga Univerzitetnega študijskega programa I. stopnje
STROJNIŠTVO

Uroš Adamlje

Mentor: doc. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž.

Ljubljana, september 2017

VLOGA ZA PREVZEM TEME ZAKLJUČNE NALOGE

Univerzitetni študijski program I. stopnje strojništvo

Št. zaključne naloge (izpolni študentski referat): UNI/900

Datum prejema vloge v ŠR: 17.8.2017

Podatki o študentu:

Ime in priimek: **Uroš Adamlje**

Vpisna št.: **23130457**

Datum, kraj rojstva: **13.10.1994, Ljubljana**

Podatki o zaključni nalogi:

Naslov zaključne naloge (slovenski):

Raziskava elektro hidravličnega aktuatorja mobilno hidravličnega ventila

Naslov zaključne naloge (angleški):

Research of electro-hydraulic actuator for mobile hydraulic valve

Mentor na FS: **doc. dr. Franc MAJDIČ**

Somentor na FS: _____

Veljavnost naslova teme je 6 mesecev od oddaje Vloge za prevzem.

Podpis študenta:

Podpis mentorja:

Zahvala

Zahvaljujem se svojemu mentorju doc. dr. Francu Majdiču za pomoč pri zaključni nalogi. Brez njegovih predlogov bi bil uspeh moje zaključne naloge veliko težji.

Prav tako se zahvaljujem svojim najbližnim, ki so mi v času pisanja zaključne naloge stali ob strani in tako s svojo vztrajnostjo pripomogli svoj delež pri pisanju zaključne naloge.

Izjava

1. Spodaj podpisani Uroš Adamlje, rojen 13. 10. 1994 v Ljubljani, študent Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, izjavljam, da sem zaključno nalogo z naslovom Zasnova predloge za zaključne naloge na Fakulteti za strojništvo, izdelal samostojno v sodelovanju z mentorjem doc. dr. Francem Majdičem.
2. Izjavljam, da je zaključna naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.
3. Izrecno izjavljam, da v skladu z določili Zakona o avtorski in sorodnih pravicah (Ur. l. RS, št. 21/1995 s spremembami) dovolim objavo zaključne naloge na spletnih straneh Fakultete in Univerze v Ljubljani.
4. S podpisom se strinjam z javno objavo svoje zaključne naloge na straneh na svetovnem spletu preko Repozitorija Univerze v Ljubljani.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo besedilo rezultat izključno mojega lastnega raziskovalnega dela;
- je predloženo besedilo jezikovno korektno in tehnično pripravljeno v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih del, kar pomeni, da sem:
 - poskrbel(-a), da so dela in mnenja drugih avtorjev oziroma avtoric, ki jih uporabljam v zaključni nalogi, citirana oziroma navedena v skladu z Navodili za izdelavo zaključnih del, in
 - pridobil(-a) vsa dovoljenja za uporabo uporabljenih podatkov in avtorskih del, ki so v celoti (v pisni ali grafični obliki) uporabljena v tekstu, in sem to v besedilu tudi jasno zapisal(-a);
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del (v pisni ali grafični obliki) kot mojih lastnih – kaznivo po Kazenskem zakoniku (Ur. l. RS, št. 55/2008 s spremembami);
- se zavedam posledic, ki bi jih na osnovi predložene zaključne naloge dokazano plagiatorstvo lahko predstavljalo za moj status na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani v skladu z relevantnim pravilnikom.

V Ljubljani, dne 13. 09. 2017

Podpis avtorja: _____

Izvleček

UDK 621.22:681.586(043.2)

Tek. šte.: UN I/900

Raziskava elektro-hidravličnega aktuatorja mobilno hidravličnega ventila

Uroš Adamlje

Ključne besede: hidravlika
 elektro-hidravlični aktuatorji
 digitalna hidravlika
 preizkuševališča
 diagnostika
 delovanje

Elektro-hidravlični aktuatorji se uporabljajo za proporcionalno regulacijo pretoka mobilnih ventilov z velikimi kapacitetami. Uporaba mobilno hidravličnih ventilov zaradi enostavnosti ter relativno nizke cene narašča. S pogostostjo uporabe se pojavljajo tudi napake katere je treba zaznati in če je možno tudi odpraviti. Delovanje ventila je odvisna od več faktorjev, eden izmed pomembnejših je tudi pravilno delovanje elektro-hidravličnega aktuatorja. Raziskava je sestavljena iz teoretičnega dela v katerem je predstavljena digitalna hidravlika ter podroben opis delovanja obravnavanega aktuatorja. S pomočjo razstavljanja in rekonstrukcije obravnavanega aktuatorja je podrobneje opisana njegova zgradba in delovanje. Rezultati rekonstrukcije so predstavljeni slikovno, detajlno razumevanje delovanja aktuatorja pa je bilo v pomoč pri zasnovi preizkuševališča.

Abstract

UDC 621.22:681.586(043.2)

No.: UN I/900

Research of electro-hydraulic actuator for mobile hydraulic valve

Uroš Adamlje

Key words: hydraulics
 electro-hydraulic actuators
 digital hydraulics
 tests
 diagnostics
 operation

Electro-hydraulic actuators are used for proportional regulation of the flow of mobile valves with high capacities. Mobile hydraulic valves are used because of their simplicity and relatively low price increases. Frequency of use also causes errors which must be detected and, if possible, eliminated. The operation of valve depends on several factors, one of the most important is proper functioning of the electro-hydraulic actuator. The research consists of a theoretical part in which the digital hydraulics and a detailed description of the operation of actuator are presented. With the help of dismantling and reconstruction of the considered actuator, its structure and operation are described in more detail. Results of the reconstruction are presented with a picture, and a detailed understanding of the actuator's operation was helpful in designing the test station.

Kazalo

Kazalo slik	xi
Kazalo preglednic	xiii
Seznam uporabljenih simbolov	xiv
Seznam uporabljenih okrajšav	xv
1. Uvod.....	1
1.1. Ozadje problema	1
1.2. Cilji.....	2
2. Teoretične osnove in pregled literature	3
2.1. Primerjava ventilov	4
2.1.1. Konvencionalni ventili.....	4
2.1.2. Proporcionalni ventili	5
2.1.3. Servo ventili.....	6
2.1.4. Digitalni ventili	6
2.2. Primerjava digitalne in klasične hidravlike	8
2.3. Električno krmiljenje digitalnih ventilov	8
2.3.1. PWM.....	9
2.3.2. PCM.....	9
2.3.3. PNM.....	10
2.3.4. PFM	11
2.3.5. PAM.....	11
2.3.6. PPM	11
2.4. Stanje tehnike.....	13
2.4.1. Mehatronski načrt digitalnega hidravličnega mikro ventila	13
2.4.2. Naslednja generacija hidravličnih sistemov	13
2.4.3. Aktivno zniževanje vibracij v gradbeni mehanizaciji.....	13
2.4.4. Načrt hidravličnega servo-aktivnega pomika iz regenerativnega zavornega sistema	13
2.5. Delovanje PVE modula	14
2.5.1. PVB modul	15
2.5.2. PVP modul.....	16
2.5.3. PVE modul.....	16
2.6. PVE modul podrobneje.....	16

2.7.	Pretok skozi 2/2 potni ventil	18
2.8.	Električni Aktuator	18
3.	Metodologija raziskave.....	21
4.	Rezultati	27
4.1.	Koncept 2/2 potnega ventila.....	27
4.2.	Zasnova preizkuševališča.....	30
4.2.1.	Diagnostika napak na ventilu.....	31
5.	Zaključki	33
5.1.	Predlog za nadaljno delo.....	34
6.	Literatura.....	35

Kazalo slik

Slika 1.1: Gozdarski procesor [2].....	1
Slika 1.2: Hidravlična stiskalnica [3].	2
Slika 2.1: Spreminjanje volumskega pretoka od vrste ventila [5].....	4
Slika 2.2: Simbol konvencionalnega ventila.	5
Slika 2.3: Simbol proporcionalnega ventila.	6
Slika 2.4: Simbol servo ventila.	6
Slika 2.5: Primer digitalnega ventila [5].	7
Slika 2.6: Graf odvisnosti pretoka glede na stanje [5].	7
Slika 2.7: Prikaz delovanja preklopno vodenega dvopoložajnega ventila [7].....	9
Slika 2.8: Vzporedna povezava dvostopenjskih ventilov [7].	10
Slika 2.9: Razlika med ločljivostjo PNM in binarnega kodiranja [7].	10
Slika 2.10: Občutljivost v primeru napake [7].	11
Slika 2.11: Razlika med posameznimi modulacijami digitalnega kodiranja [11].	12
Slika 2.12: Simbol predstavlja dvostopenjski 4/3 potni ventil v srednji poziciji v kateri je pretok skozi priključke blokiran. Prikazani ventil je elektro-hidravlično kontroliran.	14
Slika 2.13: Sestav PVG hidravličnega ventila z vsemi podrobnostmi [1].	15
Slika 2.14: Hidravlična shema PVE modula [1].	16
Slika 2.15: 4d model "on/off" ventilov, eni so za normalno odprte in eni za normalno zaprte [1]...	18
Slika 2.16 Shema, ki prikazuje povratni nadzor PVE modula z zaprto zanko [1].	19
Slika 2.17: Graf, ki prikazuje delovni cikel za komoro A in komoro B kot funkcija napake in pozicije [1].....	20
Slika 3.1: Aktuator (priključna stran).....	21
Slika 3.2: Aktuator (tloris).	22
Slika 3.3: Prikaz prve faze demontaže.	22
Slika 3.4: Aktuator po odstranitvi hidravlično povezovalnega segmenta.	23
Slika 3.5: Odstranjeni 2/2 potni ventili.	23
Slika 3.6: Tuljava v prerezu.	24
Slika 3.7: Deformirano ohišje.	24
Slika 3.8: Hidravlično povezovalni ventil z jedrom LVDT-ja.	25
Slika 3.9: Elektronika ventilskega modula PVE	25
Slika 3.10: NC pred rezajem.	26
Slika 3.11: NC po rezanju.	26
Slika 3.12: NO pred rezanjem.	26
Slika 3.13: NO po rezanju.	26
Slika 4.1: Normalno odprt ventil.....	27
Slika 4.2: Normalno odprt ventil v prerezu (aktivno stanje).	28
Slika 4.3: Normalno odprt ventil v prerezu (normalno stanje).....	28
Slika 4.4: Normalno zaprt ventil.	28

Slika 4.5: Normalno zaprt ventil v prerezu (normalno stanje).	28
Slika 4.6: Normalno zaprt ventil v prerezu (aktivno stanje).	28
Slika 4.7: Normalno odprta ventila vstavljena v hidravlično povezovalni segment.	29
Slika 4.8: Normalno zaprta ventila vstavljena v hidravlično povezovalni segment.....	29
Slika 4.9: Graf pozicije in relativnega signala.	30
Slika 4.10: Primer preizkuševališča.	31
Slika 4.11: Skica sestave preizkuševališča [16].	31
Slika 4.12: Merilnik magnetnega polja [17].....	32

Kazalo preglednic

Preglednica 2.1: Primerjava digitalne in klasične hidravlike glede na različne lastnosti [5].	8
---	---

Seznam uporabljenih simbolov

Oznaka	Enota	Pomen
A	m^2	Površina
Cd	/	sprostitveni koeficient (0.6)
DT	%	delovni cikel
t	s	Čas
P	Pa, bar	Tlak
Q	l/min	volumski pretok
T	°C, Kelvin	Temperatura
V	m^3	Volumen
V	/	signal
X	mm	Pozicija
B	bar	bulkov modul (stisljivost)
φ	kg/ m^3	gostota

Indeksi	
m	glavni bat (ang. <i>main spool</i>)
NC1	normalno zaprt ventil 1
NC3	normalno zaprt ventil 3
NO2	normalno odprt ventil 2
NO4	normalno odprt ventil 4
pp-A	od mesta protipovratnega ventla do mesta A
pp-B	od mesta protipovratnega ventla do mesta B
rel	relativna
set	nastavljen

Seznam uporabljenih okrajšav

Okrajšava	Pomen
DFCU	digitalna kontrolna enota pretoka (ang. <i>digital flow control unit</i>)
LVDT	linearno pomično zaznavalo (ang. <i>linear variable differential transformer</i>)
PAM	pulzno amplitudna modulacija (ang. <i>pulse amplitude modulation</i>)
PCM	pulzno kodna modulacija (ang. <i>pulse code modulation</i>)
PFM	pulzno frekvenčna modulacija (ang. <i>pulse code modulation</i>)
PNM	pulzno numerična modulacija (ang. <i>pulse numeric modulation</i>)
PPM	pulzno pozicijska modulacija (ang. <i>pulse position modulation</i>)
PVB	glavnotočni del mobilno hidravličnega ventila
PVE	krmilni del mobilno hidravličnega ventila
PVG	digitalni proporcionalni ventil
PVP	tlačni del mobilno hidravličnega ventila
PWM	pulzno širinska modulacija (ang. <i>pulse wight modulation</i>)

1. Uvod

1.1. Ozadje problema

S hidravličnimi sistemi se srečamo skoraj na vsakem koraku, naj gre za mobilno hidravliko ali industrijsko hidravliko. Neodvisno od vrste vedno izkoriščamo glavno prednost hidravlike, to je sposobnost prenašanja energije preko kapljevine. O mobilni hidravliki govorimo, kadar je hidravlični sistem postavljen in zgrajen v objekt, ki je zmožen menjavati lokacije (npr. bager). Pri mobilni hidravliki ima kompaktnost sistema bistven pomen, saj smo s prostorom ponavadi omejeni. Za industrijsko hidravliko pa je značilno, da je hidravlični sistem fiksni na določenem območju (npr. stiskalnica). Poleg tega kompaktnost pri industrijski hidravliki ni ključna, saj so običajne sestavine medseboj oddaljene tudi po več 10m, ključna je zanesljivost sistema in možnost hitrega menjavanja delov v primeru okvar, da ne pride do ustavitve proizvodnje. V primeru uporabe hidravličnih kapljev, kot so olje in njegove vodne alternative velja, da so tekočine nestisljive. Posledično lahko na ta način v zaključenih hidravličnih krogih pretvarjamo delo elektro ali bencinskega agregata preko hidravlične črpalke in ventilov v linearno usmerjeno silo (hidravlični valj) ali v moment (hidravlični motor). Zato se hidravlika uporablja v večini gradbene mehanizacije, kmetijske mehanizacije, gozdarstvu (slika 1.1), ladjarstvu, dvigalih, proizvodnih linijah (slika 1.2), avtomobilski industriji in tako dalje [1].



Slika 1.1: Gozdarski procesor [2].



Slika 1.2: Hidravlična stiskalnica [3].

1.2. Cilji

V obratovalni dobi kateregakoli strojnega elementa, kot tudi pri digitalnemu hidravličnemu ventilu lahko pride do nepredvidljivih napak oziroma okvar. Ključnega pomena pri odpravljanju teh napak je prepoznavanje mesta okvare. Namen naše zaključne naloge je narediti diagnostiko elektro-hidravličnega aktuatorja. Zato smo si v našem raziskovalnem delu zastavili sledeče cilje:

- Pregled literature ter razumevanje delovanja dotičnega digitalnega ventila.
- Demontaža elektro-hidravličnega aktuatorja in analiza koncepta delovanja 2/2 potnih ventilov.
- Zasnova preprostega preizkuševališča za evaluacijo delovanja elektro-hidravličnega aktuatorja.

2. Teoretične osnove in pregled literature

Prvi zametki hidravlike so se pojavili že pred tisočletji, ko so ljudje izkoriščali vodni potencial v svojo korist. Pri hidravličnem zakonu je prvi napisal Pascal leta 1650 (Pascalov zakon). Glavni razvoj hidravlike je potekal v času med 1. in 2. svetovno vojno, ko je bilo učinkovito krmiljenje predvsem v letalstvu velika prednost v vojni. Zaradi velikih potencialov hidravlike se je njena uporaba hitro razširila na vse industrijske panoge in tudi danes temelji na enakih principih le da se razvoj usmerja na še boljše vodenje in nadziranje ter na še manjše razmerje prenosa moči glede na velikost sestavin.

Alternativa hidravličnim sistemom so pnevmatični ter električni sistemi. Pnevmatični sistemi so v grobem identični hidravličnim samo, da se pri pnevmatiki kot prenosno sredstvo uporablja zrak, ki pa je stisljiv in s tem povzroča nevšečnosti predvsem v nadziranju sistemov. Pnevmatika je cenejša in okolju bolj prijazna od hidravlike, vendar z njo ne uspemo prenašati velikih sil in navorov kot pri hidravliki. Električni sistemi temeljijo na drugih zakonih, vendar ravno tako lahko zagotovijo linearno silo (elektromagnet), kot tudi moment (elektromotor). Sila, ki jo prenašamo s pomočjo električnih sistemov je primerljiva hidravličnim ter cenejša, ampak je za enako funkcijo v primeru uporabe električnih sistemov potrebno veliko več prostora kot pri hidravliki.

Nekatere značilnosti hidravlike:

- Prenos velikih sil oziroma moči pri majhnih gabaritnih merah (visoki tlaki).
- lahka in enostavna sprememba smeri gibanja elementov v sistemu,
- ekonomičnost med obratovanjem,
- slabša učinkovitost glede na električne elemente,
- velika prožnost glede lokacije agregata in posameznih krmilnih ter izvršilnih sistemov,
- možna popolna avtomatizacija,
- enostavna regulacija hitrosti krmiljenja in izvršilnih elementov,
- široko območje v katerem je možno izbirati hitrosti in sile ter
- Zmanjšana obraba na gibljivih delih zaradi:
 - kontrola pospeška ter ustavitve brez udarcev,
 - avtomatskega izpusta olja pod tlakom zaradi preobremenitve,
 - odprava vibracij,
 - mazanje,
 - lahka in enostavna sprememba smeri gibanja elementov v sistemu,
 - ekonomičnost med obratovanjem in
 - slabša učinkovitost glede na električne elemente.

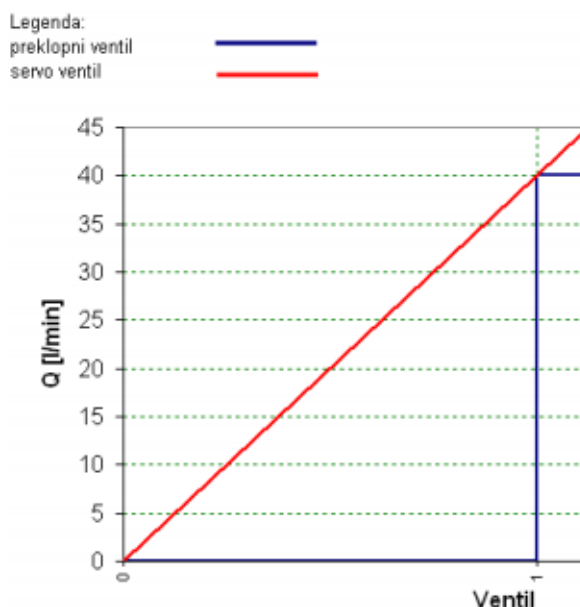
2.1. Primerjava ventilov

V hidravličnih sistemih izkoriščamo Pascalov zakon s katerim vemo, da je tlak v zaprtem sistemu enak na vsej površini sistema. Generator visokega tlaka olja je v hidravličnih sistemih ponavadi črpalka iz katere preko cevi in ventilov dovedemo tok na izvrševalne elemente. Za regulacijo pretoka olja na izvršilnih sestavnih delov sta možna dva načina. Prvi način je uporaba črpalke s spremenljivo stisnino. Drugi, ki pa je bolj pogosto izvajen je tako da z uporabo potnega ventila s spreminjanjem toka kapljevine pod tlakom reguliramo smer in hitrost hidravličnega valja ali hidravličnega motorja. Potni ventili se ločijo po številu vhodov in izhodov, najbolj pa se razlikujejo po načinu delovanja.

Potne ventile ločimo na:

- Zvezno delujoče, pri katerih se tok preko ventila lahko spreminja zvezno.
- Konvencionalne (nezvezne), pri katerih se tok preko ventila spreminja skočno.

Pod zvezno delujoče ventile spadajo proporcionalni ventili, servo ventili ter digitalni ventili, med nezvezno delujoče pa uvrščamo konvencionalne ventile. Na sliki 2.1 je prikazana spreminjanje volumnskega toka po času glede na vrsto ventila. Pri servo ventilu tok narašča zvezno, pri preklonem vetilu, tipičnemu predstavniku konvencionalnih ventilov pa je pretok skočen [4].



Slika 2.1: Spreminjanje volumnskega pretoka od vrste ventila [5].

2.1.1. Konvencionalni ventili

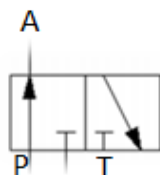
Konvencionalni 3/2 potni ventil, ki je prikazan na sliki 2.2 deluje kot stikalo. Potni ventil sestavljajo ohišje in pomični bat. S premikanjem položaja bata v izvrtini reguliramo povezave med vhodnimi in izhodnimi tokovnimi vodi. Konvencionalne ventile lahko krmilimo z ročico ali pa z elektromagnetom. Za preklopne ventile je značilno, da imajo samo dva možna položaja; zaprto (0) in odprto (1).

Prednosti:

- cenenost,
- enostavnost.

Slabosti

- samo dve možni poziciji stanja hidravlične tekočine,
- ni možna uporaba zaznaval za doseganje hidravličnih veličin,
- povečana izguba energije,
- majhna fleksibilnost hidravličnega sistema.



Slika 2.2: Simbol konvencionalnega ventila.

2.1.2. Proporcionalni ventili

V primeru ko želimo s skočnimi ventili v hidravličnem sistemu zagotoviti več različnih smeri in pretokov, sistemi pogosto nastanejo komplicirani in neobvladljivi. Tehnološka rešitev tem kompleksnim sistemom je bil razvoj proporcionalnih ventilov, primer je prikazan na sliki 2.3. Ti revolucionarni ventili dovolijo neskončno možnosti pozicije pomičnega bata, kar pomeni možnost zveznega spreminjanja pretoka skozi ventil. Proporcionalni ventili za premikanje glavnega bata uporabljajo tako imenovane aktuatorje, to so lahko; potopna tuljava, torzijski motor, proporcionalni magnet, linearni motor, elektrokemični aktuatorji in piezoaktuatorji. Vse te možne oblike ventila omogočajo regulacijo pretokov in tudi smeri v enem samem ventilu. Dodatno se proporcionalni ventili sinhrono odzivajo dobljenemu električnemu signalu in s spreminjanjem le tega, zagotovimo različne hitrosti, kot tudi mehko končno in začetno gibanje. S temi prijemi lahko zagotovimo varno delovanje hidravličnega sistema navkljub povečani hitrosti ter znatno povečani produktivnosti.

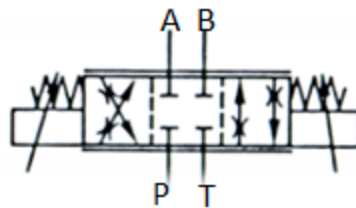
Prednosti:

- zvezno delovanje,
- dobra odzivnost,
- večja varnost in produktivnost,
- zmanjšanje števila hidravličnih sestavnih delov.

Slabosti:

- veliko dražji od skočnih ventilov (zahteva po visokih tolerancah) in

- občutljivost na nečistočo olja [4, 6].



Slika 2.3: Simbol proporcionalnega ventila.

2.1.3. Servo ventili

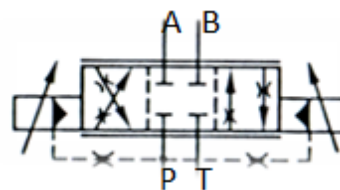
Servo ventili ne predstavljajo nove tehnologije, saj so bili razviti že okoli leta 1940. Servo ventil na sliki 2.4 deluje z zelo veliko natančnostjo in visoko ponovljivostjo ter z nizko histerezo. Delovanje servo ventila poteka v soodvisnosti z delovanjem elektronike. Ponavadi se za enako aplikacijo namesto servo ventila raje uporabi proporcionalni ventil z bolj dodelanim vhodnim signalom.

Prednosti:

- izjemna natančnost,
- visoka odzivnost, in
- majhna histereza.

Slabosti:

- visoka cena, in
- zahteve po visoki čistoči olja [4].



Slika 2.4: Simbol servo ventila.

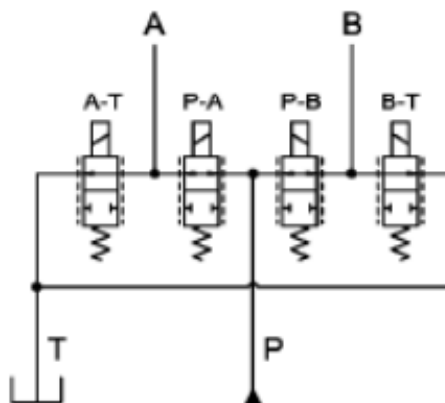
2.1.4. Digitalni ventili

Koncept digitalne hidravlike je bil razvit že pred tehnologijo proporcionalnih ventilov, vendar je zaradi pomanjkanja programske in elektronske opreme postal nezanimiv. Sedaj se digitalna hidravlika uvaja kot cenejša alternativa proporcionalnim kot tudi servo ventilom predvsem, ker imamo opredek z velikimi pretoki hidravlične kapljevine. V digitalni hidravliki se uporablja več masovno proizvedenih skočnih ventilov, ki se jih

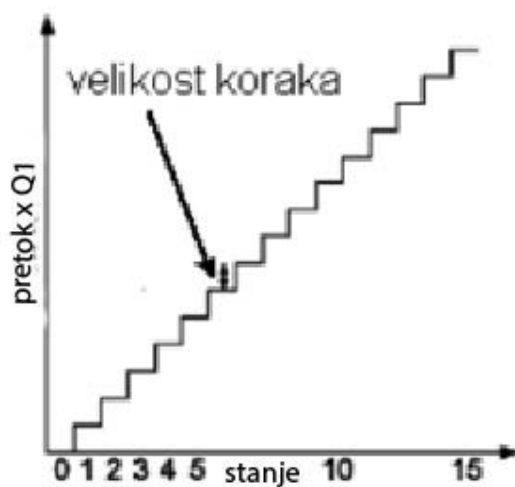
paralelno grupira, kot je prikazano na sliki 2.5. Njihovo delovanje se elektronsko kontrolira preko krmilnika. Pretok pa je odvisen od stanja aktivnih ventilov, kar je vidno na sliki 2.6.

Prednosti digitalnih ventilov:

- cenenost,
- natančna kontrola pretoka,
- zanesljivost,
- enostavnost,
- večja produktivnost,
- manjša poraba energije,
- veliki možni pretoki [5].



Slika 2.5: Primer digitalnega ventila [5].



Slika 2.6: Graf odvisnosti pretoka glede na stanje [5].

2.2. Primerjava digitalne in klasične hidravlike

V preglednici 2.1 je prikazana razlika v lastnostih proporcionalnih in servo ventilov v primerjavi z digitalnim reguliranjem pretoka.

Preglednica 2.1: Primerjava digitalne in klasične hidravlike glede na različne lastnosti [5].

Lastnosti	Proporcionalni in servo ventili	Digitalni ventili s PNM kodiranjem signala
Število komponent	Ena sama	Veliko število
Vrsta ventila	Zvezno delujoč	Diskretni "On/off"
Krmilni signal	Analogni	Digitalni
Zapletenost krmilja	Zapleteno	PNM enostavna regulacija ali kombinacija BINARNE in PNM.
Vrsta aktuacije	Proporcionalni magnet, linearni motor, torzijski motor	Proporcionalni magnet, linearni magnet, piezo element.
Odzivni čas	10 ms	1 ms
Poraba energije	Velika	Do 50 % zmanjšanje porabe energije.
Cena izdelava	Visoka	V protitipni fazi visoka, v velikoserijski proizvodnji nizka.

2.3. Električno krmiljenje digitalnih ventilov

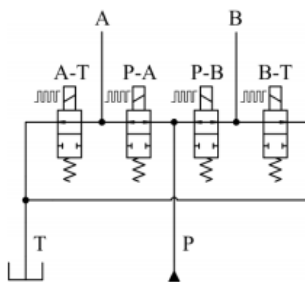
Pojem digitalna hidravlika je težko definirati v grobem smislu, ko imamo opravka s sistemom dveh dvostopenjskih ventilov brez kakršne koli inteligenčne podpore in to ni mišljeno kot digitalni sistem. Kadar imamo pulzno moduliran enojni sestavni del z električno generiranim preklonim generatorjem, pa je sistem že smatran kot digitalen.

Digitalno hidravlično moč sestavlja hidravlični in pnevmatski sistem, ki ima diskretne vrednosti posameznih sestavnih delov kateri aktivno kontrolirajo izhodni signal sistema. Za digitalno upravljanje hidravličnih sistemov poznamo dva osnovna načina, ki sta lahko izvedena z večimi različicami, katerih karakteristike so predstavljene na sliki 2.11. Kombinacijski način ima množico vezanih sestavnih elementov katerih izhodni signal se obvladuje s spreminjanjem kombinacij odprtih in zaprtih ventilov. Tak sistem ima določeno število diskretnih izhodnih vrednosti in nima potrebe po preklapljanju za vzdrževanje konstantnega izhodnega signala. Preklopna tehnologija uvaja hitro in konstantno preklapljanje enega ali več ventilov ter se tako izhodni signal kontrolira z obsegom pulza.

2.3.1. PWM

Pulzno širinska modulacija ali PWM (ang. *pulse wight modulation*)

Shema na sliki 2.7 predstavlja delovanje preklopno vodenega dvopoložajnega ventila. Pri PWM metodi nadziramo povprečno pretočno območje z visoko frekvenčnim moduliranjem, kar je v tej tehniki najpogostejši pristop. V teoriji imamo lahko pri kakršnem koli ventilu poljubno pretočno območje. Končna dinamika ventila je odvisna od najmanjšega oziroma največjega delovnega cikla. Sposobnost nadziranja je odvisna tudi od same preklopne frekvence, saj manjša frekvenca izboljša nadzor nad povprečnim pretočnim območjem istočasno pa poveča tlačne udarce. Zaradi glasnih tlačnih udarcev je pogosto potreben pravilen konstrukcijski pristop, da z ohišjem ventila znižamo oddajanje hrupa v okolico.

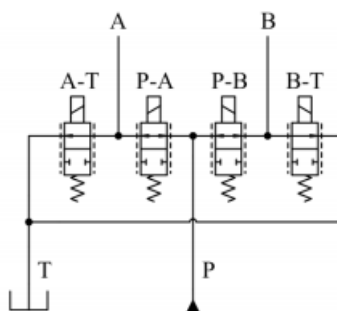


Slika 2.7: Prikaz delovanja preklopno vodenega dvopoložajnega ventila [7].

2.3.2. PCM

Pulzno kodna modulacija ali PCM (ang. *pulse code modulation*)

Shema na sliki 2.8 prikazuje vzporedno povezavo dvostopenjskih ventilov. Glavni člen za nadziranje PCM modulacije je DFCU. Pretočno območje DFCU enote je seštevek posameznih območij odprtih ventilov. Karakteristiko vezja determinirata dva ključna faktorja. Prvi faktor je število vzporedno vezanih ventilov N , drugi pa je relativna pretočnost posameznega ventila. Binarno kodiranje je najpogostejše uporabljena metoda pri kateri so pretočne kapacitete v radiju (1:2:4:8). DFCU ima 2^N možnih kombinacij, ki jih imenujemo stanja DFCU, ki imajo vsaka zase svoje pretočno območje. Poleg tega DFCU ni preklopna metoda, zato za samo vzdrževanje stanja ne potrebuje nobenega preklapljanja odprtih ventilov in s tem se življenjska doba komponente bistveno podaljša, zmanjša se ji hrupnost, a slabša je resolucija izhodnega signala. Preklapljanje ventilov je potrebno zgolj takrat, ko se stanje izhodnega signala spremeni.

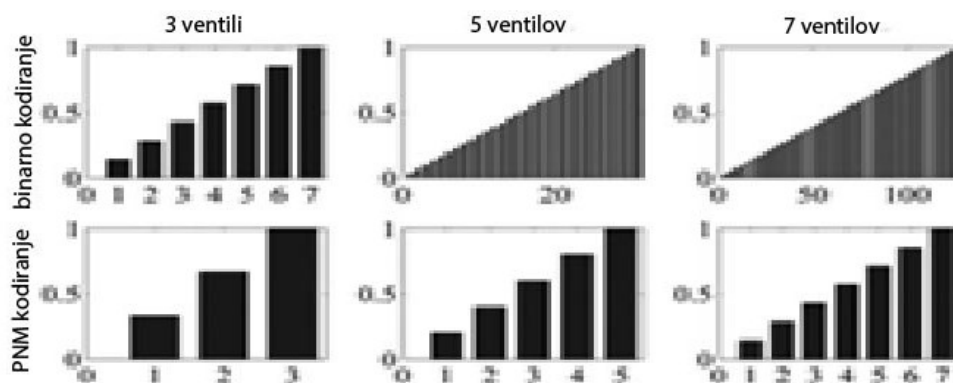


Slika 2.8: Vzporedna povezava dvostopenjskih ventilov [7].

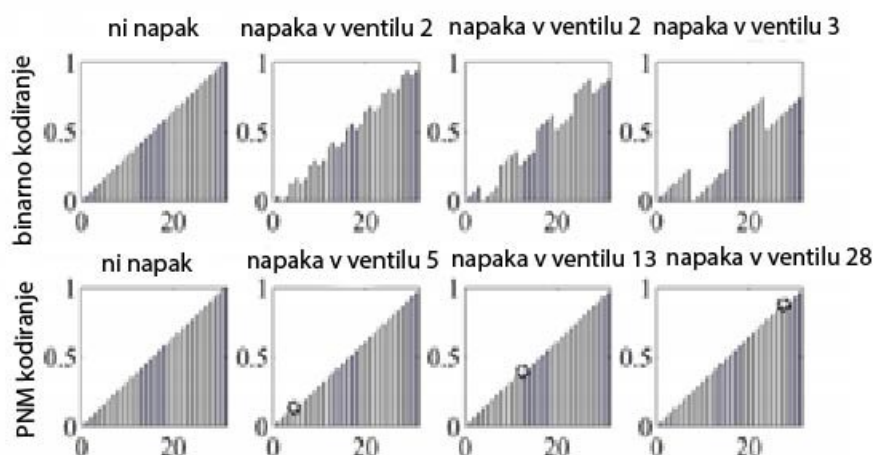
2.3.3. PNM

Pulzno numerična modulacija ali PNM (ang. *pulse numeric modulation*)

Fundamentalna karakteristika vzporednih sistemov pomeni, da je izhodni signal kvantiziran. Če je sistem sestavljen iz N paralelno povezanih komponent in ima vsaka dve stanji, je torej skupno število kombinacij 2^N . Vsaka kombinacija ima lahko različno izhodno stanje, število izhodnih kombinacij pa je odvisno od modulacije. Na sliki 2.9 je prikazano različno število uporabljenih ventilov. Najmanjše število možnih izhodov je tako $N+1$ in ta metoda je znana kot PNM. Modulacija ima zelo slabo resolucijo, ima pa tudi nekaj prednosti. Pri binarnem kodiranju se v primeru okvare enega od ventilov, napaka zelo močno opazi in je ni možno programsko kompenzirati ravno v primeru napak PNM modulacija najmanj občutljiva prikazano na sliki 2.10 [7].



Slika 2.9: Razlika med ločljivostjo PNM in binarnega kodiranja [7].



Slika 2.10: Občutljivost v primeru napake [7].

2.3.4. PFM

Pulzno frekvenčna modulacija ali PFM (ang. *pulse code modulation*).

Teoretično se pojavlja prednost, da je primernejše uporabiti enake vse ventile. Toda kadar uporabljamo enake ventile moramo za boljšo resolucijo izhodnih signalov uporabiti preklopno metodo. Pri visokih pretokih je najbolj primerna PFM metoda, ki je modulatorska metoda upodobitve analognega signala z uporabo zgolj dveh stanj 1 in 0. Razlika med PWM in PFM metodo je v tem, da se pri PWM spreminja širina pulza pri isti frekvenci, medtem ko PFM metoda spreminja frekvenco pri enakih širinah in amplitudah pulzov[8].

2.3.5. PAM

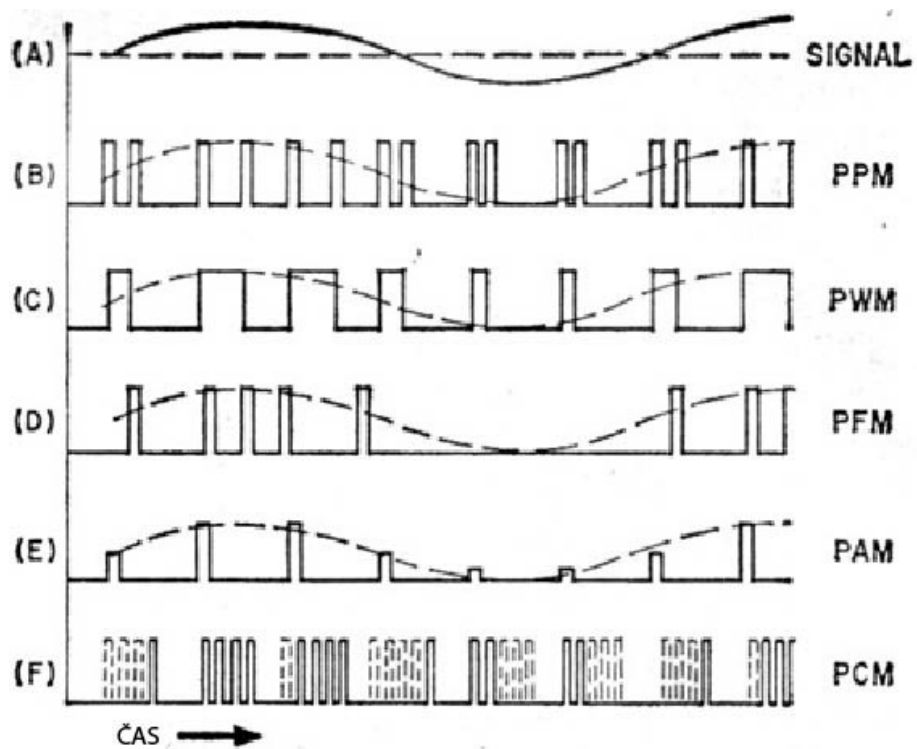
Pulzno amplitudna modulacija ali PAM (ang. *pulse amplitude modulation*).

PAM je oblika digitalne modulacije analognega signala, kjer se informacija pretvarja v amplitudo zaporednih pulzov. Demodulacija vhodnega analognega signala je izvedena z zaznavanjem vrednosti amplitud v vsakem pulzu in amplitudni sinhronizaciji izhodnega signala [9].

2.3.6. PPM

Pulzno pozicijska modulacija ali PPM (ang. *pulse position modulation*).

PPM modulacija je oblika moduliranja signala pri katerem je M bitov informacije kodirano z enim pulzom v eni od 2^M možnih časovnih stopnjah. Postopek modulacije se ponovi vsakih T sekund [10].



Slika 2.11: Razlika med posameznimi modulacijami digitalnega kodiranja [11].

2.4. Stanje tehnike

2.4.1. Mehatronski načrt digitalnega hidravličnega mikro ventila

Digitalni ventili so dokaj nov koncept v hidravliki, ponavadi so sestavljeni iz 4 do 6 vzporedno vezanih 2/2 potnih ventilov na krmilni rob kar pomeni 16 do 24 možnih konfiguracij. Članek predstavi možnost uporabe 128 miniaturnih 2/2 potnih ventilov, ki že lahko zamenjajo tradicionalne servo ventile. S pomočjo elektromagnetne optimizacije in mehatronskega dizajna je bil razvit prototip, ki na testu kaže prednost digitalne hidravlike pred tradicionalnimi 4 smernimi kontrolnimi ventili [12].

2.4.2. Naslednja generacija hidravličnih sistemov

V zadnji polovici stoletja je bilo razvito veliko število energijsko učinkovitih hidravličnih sestavnih delov, kljub temu je velika večina od uporabljenih hidravličnih sistemov zelo neučinkovitih. Nemški institut (IFAS) je eden promotorjev spreminjanja trenda slabe učinkovitosti hidravličnih sistemov v namen ohranitve sistemov v industriji. IFAS se ni osredotočil samo na razvoj stroškovno učinkovitejših sestavnih delov, temveč je tudi predstavil strategijo uporabe atributov hidravličnih sistemov, ki so bili prej mišljeni bolj slabost kot prednost v nadaljnjem razvoju predvsem v načinih pridobivanja energije s pomočjo valov, vetra, morskih tokov in tako dalje [13].

2.4.3. Aktivno zniževanje vibracij v gradbeni mehanizaciji

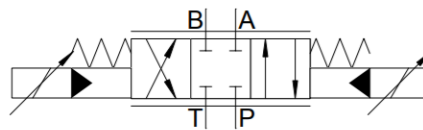
Hidravlično mehanski sistemi so podvrženi močnim nihanjem zaradi zmožnosti hidravlične kapljevine, da shrani potencialno energijo. Ta nihanja lahko negativno vplivajo na stabilnost sistemov kot tudi na samo lagodje operatorja. Za dotičen primer gradbene mehanizacije je bilo razvitih več aktivnih in pasivnih sistemov tako, da zmanjšajo efekt premikanja tovora na stroj [14].

2.4.4. Načrt hidravličnega servo-aktivnega pomika iz regenerativnega zavornega sistema

Orodji, ki sta ponavadi napajani skozi mehansko povezavo na motor z notranjim izgorevanjem imata slabo učinkovitost. V takem primeru je predlagana inovativna rešitev uporabe zavorne energije. Za to rešitev je bil zasnovan prototip katerega rezultati preizkusov kažejo na pomemben prispevek k boljši učinkovitosti [15].

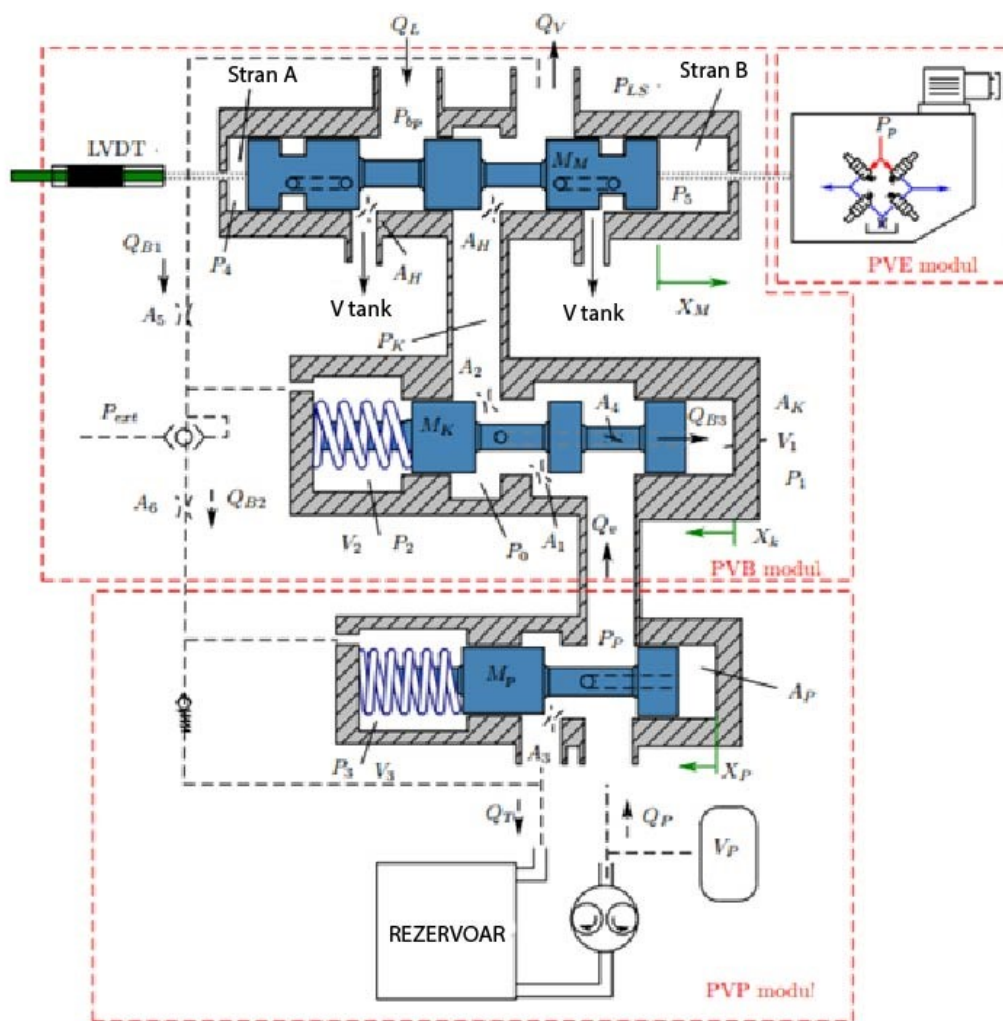
2.5. Delovanje PVE modula

PVE modul je krmilni hidravlični sklop, ki se uporablja za krmiljenje proporcionalnih ventilov, primer je prikazan na sliki 2.12. Ti ventili nadzirajo smer in količino pritoka hidravlične kapljevine od črpalke do bremena. Glavni del proporcionalnega ventila je glavni bat, ki se premika znotraj ohišja in s tem odpira in zapira oziroma regulira pretok olja na določenem priključku. Priključki, ki izhajajo iz ventila so lahko vezani na različne hidravlični elementi kot so izvor, rezervoar, različna bremena in podobno.



Slika 2.12: Simbol predstavlja dvostopenjski 4/3 potni ventil v srednji poziciji v kateri je pretok skozi priključke blokiran. Prikazani ventil je elektro-hidravlično kontroliran.

Če podrobneje razdelimo sklope v tipičnem digitalnem proporcionalnem ventilu opazimo tri glavne enote vidne na sliki 2.13.



Slika 2.13: Sestav PVE hidravličnega ventila z vsemi podrobnostmi [1].

2.5.1. PVB modul

Je sestavljen iz glavnega bata in kompenzacijskega bata. Funkcija glavnega bata je, da usmeri pravo količino toka za določeno funkcijo, ki jo definira položaj bata. To glavni bat zagotovi tako, da spreminja pretočno površino dveh izhodov s svojim premikanjem. V primeru ko je hidravlični tok turbulenten velja za količino pretoka enačba (2.1).

$$Q = Cd \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta P} \quad (2.1)$$

Naloga kompenzacijskega bata pa je, da vzdržuje konstanten tlak in da je pretok toka odvisen samo od položaja bata.

2.5.2. PVP modul

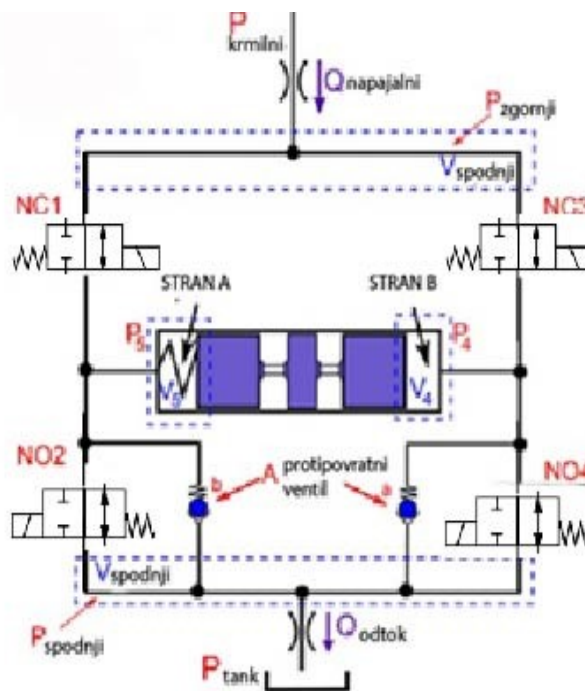
PVP modul ima tri prikllope. Prvi je prikllopljen na črpalko, drugi na rezervoar, zadnji pa vodi tok skozi PVB modul. Glavna naloga PVP modula je prilagoditev tlaka na približno 15 bar nad največjim porabnikom. Če bi ta tok samo spustili v tok, bi bile izgube zelo visoke.

2.5.3. PVE modul

Glavna funkcija PVE modula je premikanje glavnega bata in s tem spreminjanje smeri in pretoka. Premikanje omogoča sistem, ki pretvori vhodni signal v določen položaj bata preko sekundarnega hidravličnega sistema. Za zagotavljanje položaja bata PVE modul neprestano nadzira položaj preko LVDT-ja. Če je potrebno PVE modul napako kompenzira preko notranjega nadzornega sistema in ta značilnost izhaja iz zaprte povratne zanke. Izhodni signal je ves čas primerjan z željenim vhodnim signalom.

2.6. PVE modul podrobneje

PVE modul vsebuje elektronsko nadzirano enoto in hidravlični sistem (slika 2.14). Obe enoti sta namenjeni za premikanje glavnega bata.



Slika 2.14: Hidravlična shema PVE modula [1].

Dva protipovratna ventila imata enake preseke in zato vedno, ko bo delni podtlak nastal na mestu A ali B bo tok tekel skozi krogelni ventil z nižjim tlakom v mesto A ali B iz spodnjega.

Simboli na sliki so:

- praznilna dušilka (Qizpraznilni) je dušilka med spodnjo votlino in rezervoarjem.
- Dovodna dušilka (Qnapajalni) vodi kapljevino v zgornjo votlino in je večja od spraznilne dušilke.
- Prostori in napeljave med sestavnimi deli.
- Pozitivna dislokacija, ki pomeni da se bo volumen v delu A povečal, v delu B pa zmanjšal. Tako velikost glavnega bata določa spremembo volumna.
- Tlak v PVE modulu (P.,). V PVE modulu opazujemo štiri območja, ki vsebujejo volumne in posledično tudi tlake; to so P_{spodnji}, P_{zgornji}, P₄ in P₅.

Pretok iz enega v drugo območje popisujejo enačbe od (2.2) do (2.9).

$$Q_{napajalni} - Q_{NC1} - Q_{NC3} = \frac{V_{zgornji}}{\beta} \cdot \frac{dP_{zgornji}}{dt} \quad (2.2)$$

$$Q_{NC1} + Q_{pp-B} - Q_{NO2} = -A_m \cdot \dot{\chi}_m + \frac{V_5 - \chi_m \cdot A_m}{\beta} \cdot \frac{dP_5}{dt} \quad (2.3)$$

$$Q_{NC2} - Q_{pp-A} - Q_{NO4} = -A_m \cdot \dot{\chi}_m + \frac{V_4 - \chi_m \cdot A_m}{\beta} \cdot \frac{dP_4}{dt} \quad (2.4)$$

$$Q_{NO2} + Q_{NO4} - Q_{pp-A} - Q_{pp-B} - Q_{izpraznilni} = \frac{V_{spodnji}}{\beta} \cdot \frac{dP_{spodnji}}{dt} \quad (2.5)$$

$$P_{zgornji} = \int dt \frac{V_{zgornji}}{\beta} \cdot (Q_{napajalni} - Q_{NC1} - Q_{NC3}) \quad (2.6)$$

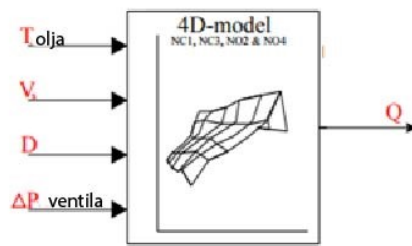
$$P_5 = \int dt \frac{\beta}{V_5 - \chi_m \cdot A_m} \cdot (Q_{NC1} + Q_{pp-A} - Q_{NO2} + A_m \cdot \dot{\chi}_m) \quad (2.7)$$

$$P_4 = \int dt \frac{\beta}{V_4 + \chi_m \cdot A_m} \cdot (Q_{NC3} + Q_{pp-B} - Q_{NO4} - A_m \cdot \dot{\chi}_m) \quad (2.8)$$

$$P_{spodnji} = \int dt \frac{\beta}{V_{spodnji}} \cdot (Q_{NO2} + Q_{NO4} - Q_{pp-A} - Q_{pp-B} - Q_{izpraznilni}) \quad (2.9)$$

2.7. Pretok skozi 2/2 potni ventil

2/2 potni ventili se uporabljajo zato, da ustvarimo različen tlak na mestih A in B. Spremembo tlakov dosežemo z normalno odprtimi in zaprtimi ventili. Normalno odprta ventila sta povezana z rezervoarjem, medtem ko sta normalno zaprta povezana s krmilnim tlakom. Pretok skozi dotične ventile je odvisen od cikla delovanja, ki je določen preko 4D enačb, ki so prikazane na sliki 2.15.



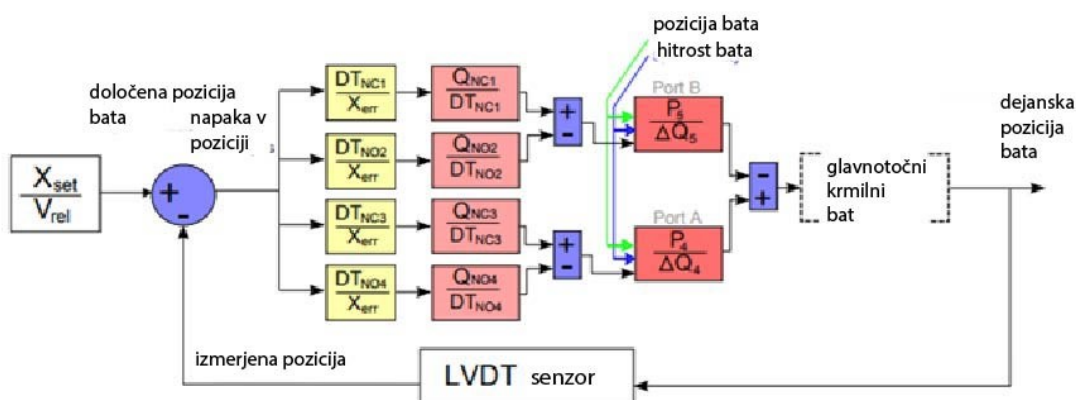
Slika 2.15: 4d model "on/off" ventilov, eni so za normalno odprte in eni za normalno zaprte [1].

Te 4D enačbe določajo štirje parametri:

- T_{olja} je temperatura, ki ima vpliv na viskoznost olja.
- V_s je krmilna napetost, ki ima vpliv na dinamiko on/off ventila, saj večja napetost poveča magnetno moč kot tudi naredi ventile hitrejše.
- D določa koliko časa mora biti ventil v določenem položaju.
- ΔP predstavlja padec tlaka skozi ventil in ima direkten vpliv na količino kapljevine, ki bo v trenutku odprtja pretekla.

2.8. Električni Aktuator

Glavna naloga aktuatorja je, da premika glavni bat na željeno pozicijo in s tem zagotovi, da to premikanje uporablja povratni sistem. Nato se napaka pozicije spremeni v delovni cikel, ki definira različne pretoke skozi 2/2 potne ventile. Shematsko povezavo električnega krmiljenja pve modula ponazarja shema na sliki 2.16.

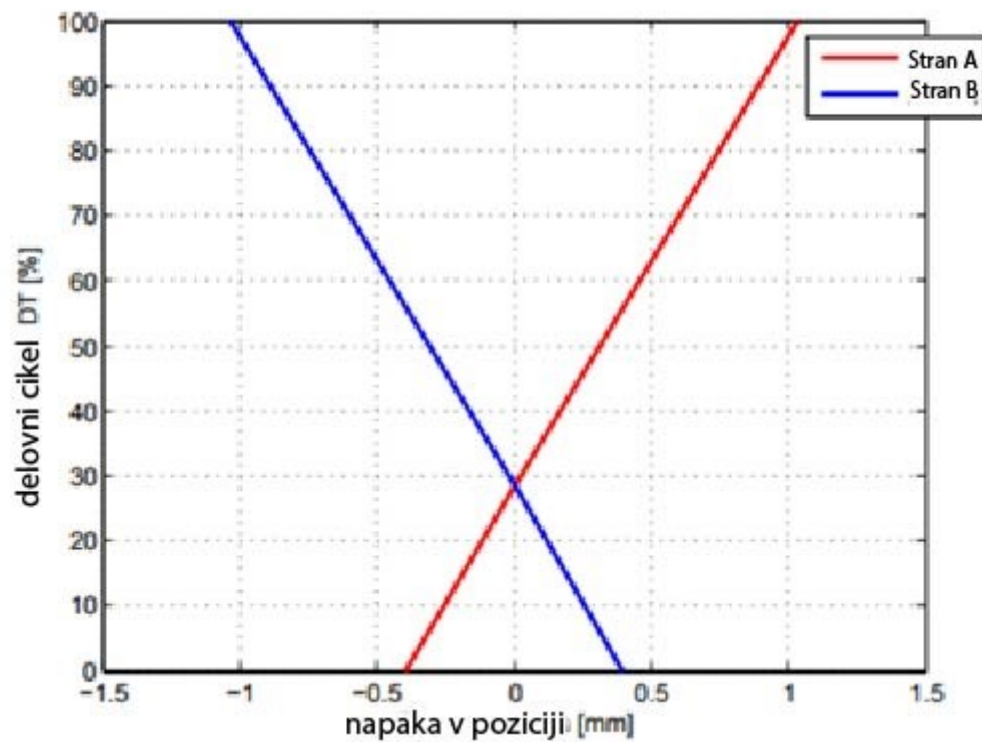


Slika 2.16 Shema, ki prikazuje povratni nadzor PVE modula z zaprto zanko [1].

Ključni elementi elektro sheme:

- Vhodni signal,
- vhodni signal, ki definira pozicijo glavnega bata,
- pozicijski senzor-
- Za določitev pozicije bata se uporablja LVDT, katerega prednost je zanesljivost in enostavnost.
- Delovni cikel za vsak del bata je odvisen od pozicijske napake. Napaka v poziciji definira delovni cikel vsakega pozicije, tako se določi kolikšen tok elektromagnetnega ventila pošljejo na vsak konec bata. Tako se ta napaka izraža kot razlika med željeno pozicijo bata in dejansko pozicijo.

Elektromagnetna ventila NC in NO sprejmeta enak delovni cikel. Glavna razlika določenega cikla teh ventilov je izvajanje ventila na krmilni strani NC1 in NC3. Oba imata časovni zamik 20 ms, ventila NO2 in NO4 pri rezervoarju pa imata zamik 3 ms, razlika med njimi je 17 ms. Razlog so tako imenovane bližnjice, kar pomeni, da ventila povezana na isti konec bata ne bosta istočasno odprta. Napaka v poziciji definira določen cikel, ki varira med 0% in 100% kar je prikazano na sliki 2.17.



Slika 2.17: Graf, ki prikazuje delovni cikel za komoro A in komoro B kot funkcija napake in pozicije [1].

Delovni cikli vsake strani bata se izločijo po enačbah 2.10 in 2.11 [1].

$$DT_A = -70 \cdot \chi_{napaka} + 28,4 \quad (2.10)$$

$$DT_B = 70 \cdot \chi_{napaka} + 28,4 \quad (2.11)$$

3. Metodologija raziskave

Razumevanje delovanja najboljše podpremo z vizualizacijo predmeta. Naš cilj je, da razstavimo elektro-hidravlični aktuator PVG ventila in s tem dobimo informacijo o zgradbi in fizični podobi. Ventil smo razstavljali tako, da smo zaporedno odstranjevali elemente, del aktuatorja se je razstavil z vijačenjem slednje pa z žaganjem in z deformacijo materialov. Na slikah 3.1 in 3.2 je prikazan še nerazstavljen aktuator.



Slika 3.1: Aktuator (priključna stran).



Slika 3.2: Aktuator (tloris).

Na sliki 3.3 je prikazano odstranjevanje in pozicija hidravlično povezovalnega segmenta aktuatorja. Hidravlično povezovalni segment se odstrani preprosto z odvijanjem dveh vijakov.



Slika 3.3: Prikaz prve faze demontaže.

Po odstranitvi prvega segmenta se na aktuatorju razvidno pokažejo štirje 2/2 potni ventili ter del LVDT-ja.



Slika 3.4: Aktuator po odstranitvi hidravlično povezovalnega segmenta.

Hidravlični aktuator z izvlečenimi elektromagnetnimi ventili kateri so bili pritrjeni s pomočjo vijачne zveze.



Slika 3.5: Odstranjeni 2/2 potni ventili.

Nadaljna demontaža ni bila mogoča brez poškodovanja vzorca, saj je preostali del aktuatorja zalit z gumo in plastiko. Na sliki je razvidno navitje enega od ventilov. S pomočjo žage in uporabo sile smo odstranili del plastike ter tako dobili pogled na tuljavo kateri smo ocenili karakteristiko in sicer ima dotična tuljava približno 2000 ovojev z 0,2 mm debelo žico.



Slika 3.6: Tuljava v prerezu.

Na sliki 3.7 so prikazani navoji tuljav ter del LVDT-ja. Ventil smo zažagali po sredini ter s silo razprli kovinsko ohišje, da smo s tem pridobili pogled na LVDT.



Slika 3.7: Deformirano ohišje.

Z deformacijo ohišja se je je faza razstavljanja praktično zaključila. Na naslednjih slikah so prikazani še posamezni elementi aktuatorja. Hidravlično povezovalni segment z jedrom LVDT-ja je prikazan na sliki 3.8.



Slika 3.8: Hidravlično povezovalni ventil z jedrom LVDT-ja.

Krmilni del elektro-hidravličnega akuatorja, kjer je na sliki 3.9 razvidno električno vezje z odstranjenim zaščitnim gelom. Krmilno vezje je bilo s PVE modulom spojeno s kovicami katere smo odbrusili ter vezje previdno odstranili, vezje je bilo v celoti zalito z gelom kateri služi k boljšemu odvajanju toplote.



Slika 3.9: Elektronika ventilskega modula PVE

Na slikah 3.10 in 3.11 je prikazan normalno zaprti ventil pred in po rezanju.



Slika 3.10: NC pred rezajem.



Slika 3.11: NC po rezanju.

Na slikah 3.12 in 3.13 je prikazan normalno odprti ventil pred in po rezanju.



Slika 3.12: NO pred rezanjem.



Slika 3.13: NO po rezanju.

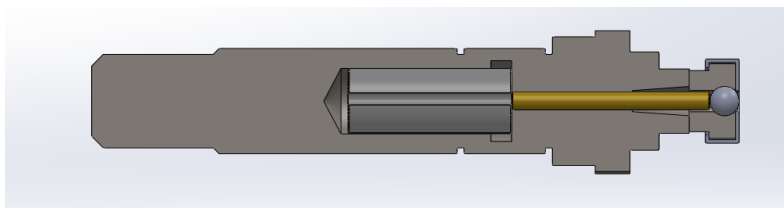
4. Rezultati

4.1. Koncept 2/2 potnega ventila

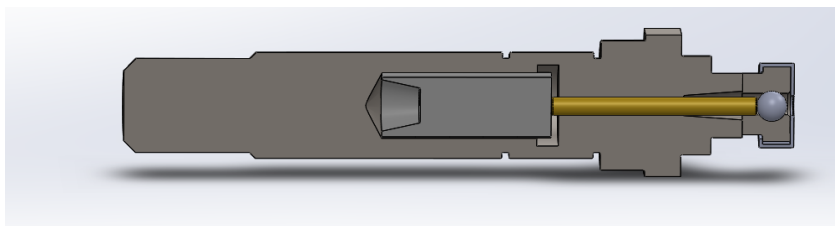
Kot del naloge smo raziskali konstrukcijo 2/2 potnih ventilov, zato smo ventile razžagili kot je vidno na slikah 3.11 in 3.13. Nato smo s pomočjo 3D modelirnika rekonstruirali normalno odprt ventil viden na sliki 4.1, 4.2 in 4.3 ter normalno zaprt ventil na sliki 4.4, 4.5 in 4.6. Za boljše razumevanje raziskave je potrebno omeniti, da je dolžina ventila brez tuljave 55 mm. Delovanje ventila je v obeh primerih odvisno od kroglice, katera tesni s pomočjo konusa. Izračunali smo silo s katero mora elektromagnet zagotoviti da lahko dislocira kroglico, glede na delovni tlak v PVE modulu 14 bar in presek največje kroglice 3 mm mora elektromagnet zagotoviti silo 9.89 N. Pomikajoči se bat, na katerega deluje magnetna sila, prenese silo preko igle na kroglico ter v tem primeru pri normalno odprtem ventilu na sliki 4.2 potisne kroglico v pozicijo kjer zapre pretok olja. V primeru normalno zaprtega ventila na sliki 4.4 pa kroglico izmakne iz pozicije tesnenja ter tako omogoči pretok olja. Sistem bata igle in kroglice ima delovni hod 0.6 mm. Zaradi boljše preglednosti vgrajene pozicije smo dodali še sliki 4.7 in 4.8 na katerih je prikazan prerez sestava ventilov in hidravlično povezovalnega segmenta.



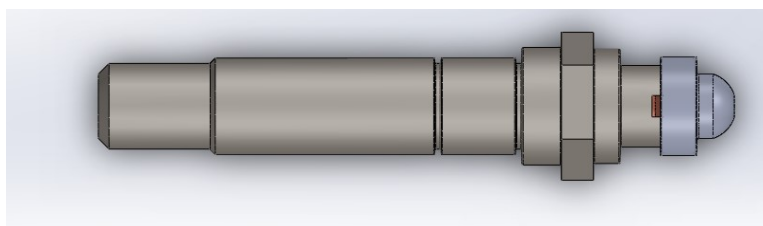
Slika 4.1: Normalno odprt ventil.



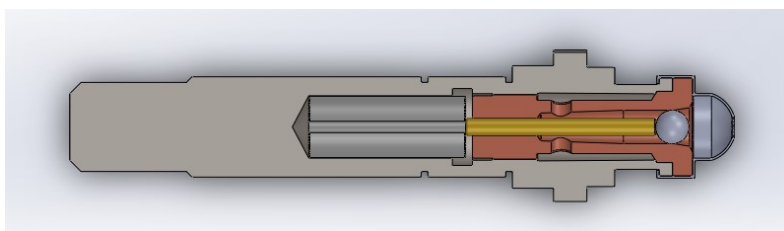
Slika 4.2: Normalno odprt ventil v prerezu (aktivno stanje).



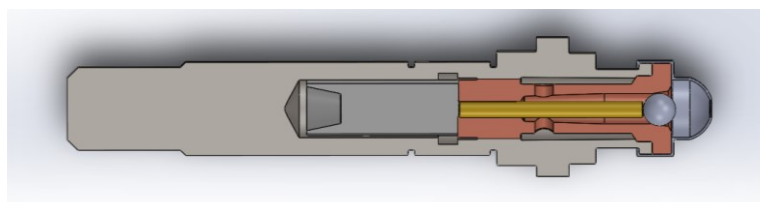
Slika 4.3: Normalno odprt ventil v prerezu (normalno stanje).



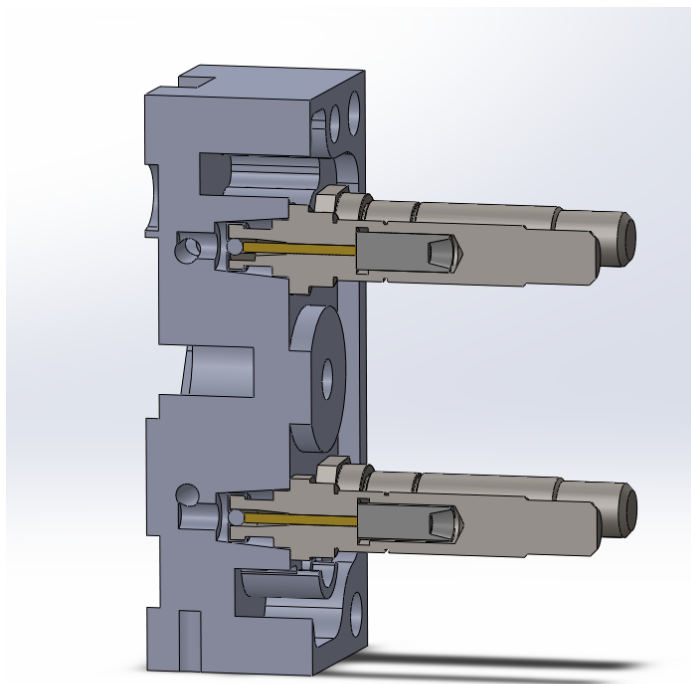
Slika 4.4: Normalno zaprt ventil.



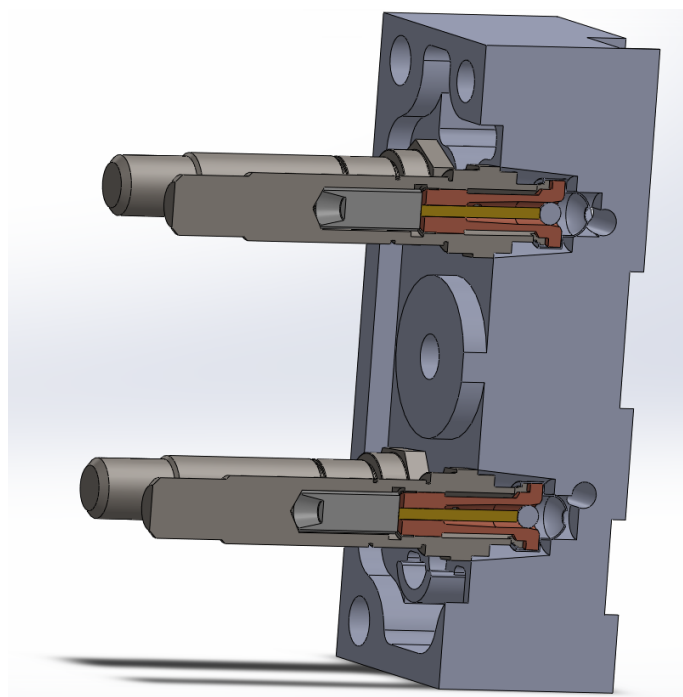
Slika 4.5: Normalno zaprt ventil v prerezu (normalno stanje).



Slika 4.6: Normalno zaprt ventil v prerezu (aktivno stanje).



Slika 4.7: Normalno odprta ventila vstavljena v hidravlično povezovalni segment.



Slika 4.8: Normalno zaprta ventila vstavljena v hidravlično povezovalni segment.

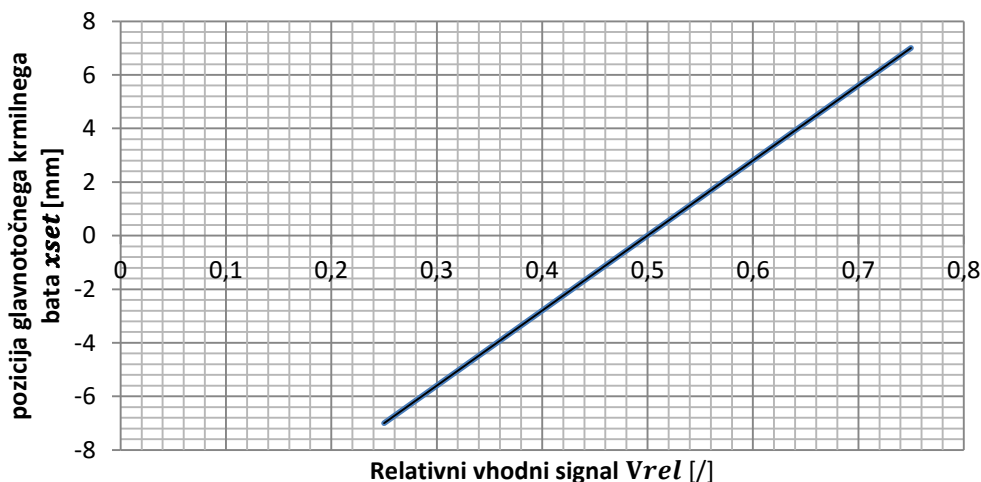
4.2. Zasnova preizkuševališča

Ideja preizkuševališča je, da prvo raziščemo ali vprašljivi digitalni aktuator deluje ali ne. Uspešno delovanje aktuatorja je pogojeno s pravilno dislokacijo glavnega bata pretočnega ventila na pozicijo, ki jo želimo. Vhodni signal, ki definira pozicijo je v obliki napetosti. PVE modul, ki uporablja vir napetosti kot celotno skalo vhoda, signalno napetost pa kot variabilni parameter, ki ga primerja z napajalno napetostjo. Za vrednost, ki ponazarja dislokacijo bata tako uporabimo relativni signal V_{rel} . Zaradi premikanja glavnega bata mobilno hidravličnega ventila za ± 7 milimetrov je vrednost V_{rel} enaka 0,5 in določena kot srednja pozicija. Največja dislokacija bo v eno ali drugo stran, saj je tako V_{rel} enak 0,25 oziroma V_{rel} enak 0,75, kar predstavlja linearnost vidno na sliki 4.9, to pa je idealna karakteristika za zasnovo preprostega preizkuševališča.

Relacija med vhodnim signalom in željenim mestom je izračunana po enačbi 4.1.

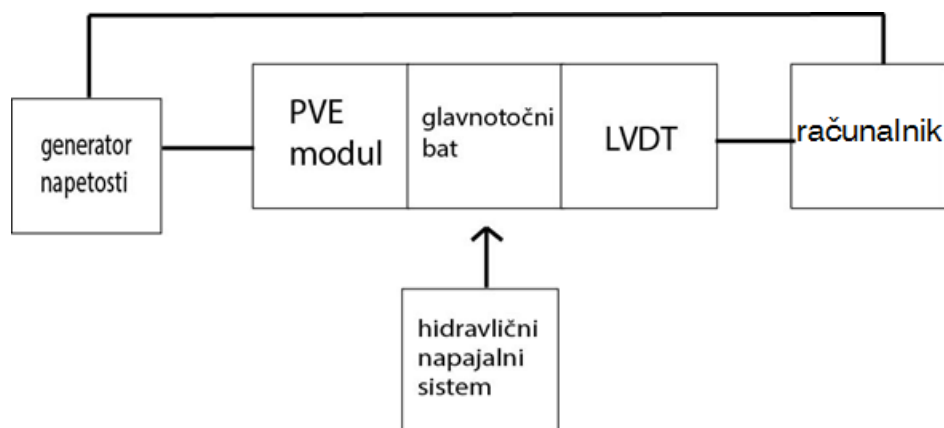
$$x_{set} = 0,028 \cdot V_{rel} - 0,014 \quad (4.1)$$

V tem primeru ga lahko primerjamo z izmerjeno pozicijo.

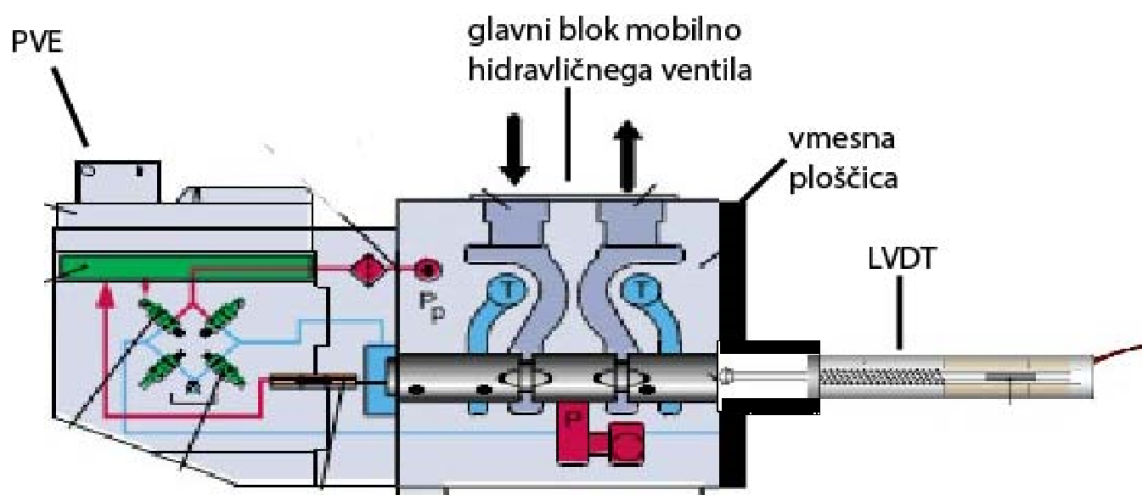


Slika 4.9: Graf pozicije in relativnega signala.

Preprosto preizkuševališče, ki je shematsko predstavljeno na sliki 4.10, bi tako sestavili iz glavnega ventilnega bloka z aktuatorjem, ki bi bil napajan preko preprostega hidravličnega vezja, vhodni signal bi simulirali z generatorjem napetosti v razponu od 6 do 18V. Spremembo položaja bata pa bi spremljali z LVDT-jem. Tako bi z eksperimentom in analizo rezultatov lahko ugotovili ali aktuator deluje pravilno ali ne. Skica montaže LVDTja na glavni glavni blok mobilno hidravličnega ventila je predstavljena na sliki 2.11



Slika 4.10: Primer preizkuševališča.



Slika 4.11: Skica sestave preizkuševališča [16].

4.2.1. Diagnostika napak na ventilu

1. Korak: pri nedelujočem ventilu bi najprej očistili vse kanale in preverili tesnost tesnil ter čistočo filtrov na hidravlično povezovalnem segmentu prikazanem na sliki 3.3.
2. Korak: v primeru nedelujočega ventila bi se lahko poslužili odkrivanju nadaljnjih napak s pomočjo eksperimentov v katerem bi namerno onemogočili posamičen ventil oziroma delujoči ventil zamenjali z nedelujočim ter tako naredili vrsto različnih testov katere rezultate bi lahko nato primerjali za odkrivanje težav pri diagnozi ventila.

3. Korak: delovanje tuljav bi bilo mogoče preveriti s pomočjo merilnika magnetnega polja prikazanega na sliki 4.9. V primeru delujoče tuljave in kljub temu nakazane napake na dotičnem ventilu je možno zamenjati samo notranji del ventila ter tako odpraviti napako. V primeru ko tuljava ne deluje pa rešitve ni, saj je tuljava in prav tako elektronika ter vezje zalito v gumo in temu tako nerazstavljivo [1].



Slika 4.12: Merilnik magnetnega polja [17].

5. Zaključki

Tekom raziskave elektro hidravličnega aktuatorja mobilno hidravličnega ventila smo najprej spoznali ozadje digitalne hidravlike ter različne metode katere so uporabljene za nadzor pretoka ventila. Dotični PVE modul bazira na PWM modulaciji katera deluje s spreminjanjem frekvenčnega delovnega cikla posameznega ventila. Frekvence ventilov se gibljejo od 100 pa do 1000 Hz pri delovnem tlaku okoli 14 bar.

Pri razstavljanju PVE modula smo ugotovili, da je popolna razčlenitev elementov nemogoča zato tudi popravilo ventila pri odkritju morebitnih napak v vsakem primeru ni izvedljivo. Odstranjevanje hidravlično povezovalnega segmenta in izvzem privijačenih jeder skočnih ventilov je mogoče samo z vijačenjem in se tako ventil lahko povrne v prvotno stanje. Nadaljna odstranitev tuljav in elektro krmilnega vezja nemogoča, brez da bi kakšen element trajno deformirali. Na začetku raziskave je bil cilj izdelati tudi elektro shemo vezja na sliki 3.9 vendar ga zaradi kompleksnosti nismo izpeljali.

Z rekonstrukcijo 2/ 2 potna ventila v 3d modele smo natančno spoznali koncept njihovega delovanja ter izračunali kolikšne sile mora zagotoviti elektromagnet, da lahko sistem pravilno deluje. V 3d modelih prikazanih na priloženih slikah lahko v prerezu natančno opazimo razliko v konstrukciji in delovanju normalno odprtega oziroma normalno zaprtega ventila. Za zagotovitev željene frekvence ventila je njegov princip delovanja osnovan na relativno majhnih pomikih bata elektromagnetnega ventila.

Ko smo natančno razumeli delovanje ventila, smo ga razstavili. Nato smo zasnovali preizkuševališče na katerem bi lahko preprosto določili ali ventil deluje ali ne ter tudi da smo na tem istem preiskuševališču naredili diagnostiko napak ventila. Pri popravilih strojev kateri uporabljajo mobilne hidravlične ventile je pogosta potreba informacije o delovanju posameznega elementa in tako bi na preprostem preiskuševališču že podali prvo informacijo o delovanju ventila, ki bi v praksi pomenila prihranek v času in tudi denarja saj je v primeru, ko zavržemo še popolnoma delujoč aktuator cena novega od 700 do 1000 evrov. Za primer nedelujočega ventila smo na podlagi pridobljenega znanja tekom raziskave navedli korake s katerimi bi lahko v nekaterih primerih ventil uspešno popravili. Menimo, da bi bila lahko v veliko primerih možna napaka ventila že zaradi same čistoče in bi tako že s čiščenjem filtrov in povezovalnih kanalov na hidravlično povezovalnem elementu hitro odpravili napake. Z ugotovitvijo o nedelovanju posameznega ventila zadeva ni več enostavna, saj je tuljava nezamenljiva o pasamičnih jedrih, ki bi bili na voljo za zamenjavo pa nismo dobili informacij.

Doprinos naše raziskave je strnjena informacija o delovanju digitalnega hidravličnega aktuatorja katerega uporaba se bo s časom zagotovo povečala. Ključni rezultat je zasnova preiskuševališča za preprosto ocenitev delovanja katere bi prav gotovo delovalo. Z raziskavo smo tudi predstavili koncept delovanja 2/2 potnih ventilov kateri se uporabljajo največ ravno v digitalno vodeni hidravliki.

5.1. Predlog za nadaljno delo

Prvi cilj nadaljnega dela v sklopu raziskave bi bila realizacija preiskuševališča ter izvedba simulacij glede okvar posameznih ventilov. Priporočljivo bi se bilo pozanimati direktno z proizvajalcem o dobavljivosti posamičnih jeder skočnih ventilov. Kot korak v boljše razumevanje delovanja ventila pa bi bila izdelava sheme električnega vezja katerega smo izvzeli iz ventila.

6. Literatura

- [1] M. Højen, M. H. Sørensen, T. Smhmidt, C. Yigen: *Modelling and control of a Sauer-Danfoss PVG 32 Valve*. Department of Energy and Technology, Aalborg university, 2009.
- [2] *Strojna sečnja*. SLONEP. Dostopno na: <http://www.slonep.net/gozd/delo-v-gozdu/strojna-secnja>, ogled 30.6.2017.
- [3] *Oprema za izdelavo transportnih trakov*. Sitor. Dostopno na: <http://sitor.si/stiskalnice/hidravlicna-stiskalnica-linija-za-izdelavo-transportnih-trakov/>, ogled 29. 6. 2017.
- [4] J. Pezdirnik, F. Majdič: *Pogonsko-krmilna hidravlika*. Zapiski za predavanja, RRP del Hidravlika. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Katedra za tribologijo in sisteme vzdrževanja, 2012.
- [5] N. Herakovič: *Digitalni ventili*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, laboratorij za strego montažo in pnevmatiko.
- [6] N. Herakovič: *Zvezno delujoči ventili*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, laboratorij za strego montažo in pnevmatiko.
- [7] M. Linjama, M. Vilenius: *Digital Hydraulics –Towards Perfect Valve Technology*. Revija ventil 14 (2008).
- [8] *Pulse-frequency modulation*. V Wikipedia, the free encyclopedia. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-frequency_modulation, ogled 10. 7. 2017.
- [9] *Pulse-amplitude modulation*. V Wikipedia, the free encyclopedia. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-amplitude_modulation, ogled 12. 7. 2017
- [10] *Pulse-position modulation*. V Wikipedia, the free encyclopedia. Dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-position_modulation, ogled 15. 7. 2017.

- [11] RF Cafe Website. Dostopno na: <http://www.rfcafe.com/references/popular-electronics/images3/pulse-modulation-oct-1960-popular-electronics-3.jpg>, ogled 17. 7. 2017.
- [12] K. Huhtala, M. Linjama, M. Paloniitty, L. Tiainen,: *Mechatronic design of digital hydraulic micro valve package*. Procedia Engineering (2015).
- [13] H. Murrenhoff, M. Vukovic: *The next generation of fluid power systems*. Procedia Engineering (2015).
- [14] A. Alexander, D. Cristofori, A. Vacca: *Active vibration damping in hydraulic construction machinery*. Procedia Engineering (2017).
- [15] G. Lutzemberger, A. Nocentini, M. Pagliai, A. Pretto, L. Pugi: *Design of a hydraulic servo-actuation fed by a regenerative braking system*. Applied Energy (2017).
- [16] *Electrohydraulic Actuators: PVE, Series 4 and PVHC*. Danfoss. Dostopno na: <http://files.danfoss.com/documents/52010553.pdf>, ogled 1.8.2017.
- [17] Extech SDL 900. MEPRO. Dostopno na: <http://www.mepro.si/extech-sdl-900>, ogled 29. 7. 2017

