

# Modeliranje i simulacija elektrohidrauličkih servosustava

---

**Oković, Petra**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:044196>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-15**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Petra Oković**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum, dipl. ing.

Student:

Petra Oković

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Željku Šitumu što mi je omogućio izradu završnog rada, te odvojio svoje vrijeme kako bi korisnim savjetima i stručnom pomoći olakšao njegovu izradu.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji što mi je omogućila studiranje i pružala podršku i razumijevanje tijekom studija.

Petra Oković



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **PETRA OKOVIĆ** Mat. br.: 0035198765

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MODELIRANJE I SIMULACIJA ELEKTROHIDRAULIČKIH SERVOSUSTAVA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **MODELING AND SIMULATION OF ELECTRO-HYDRAULIC SERVO SYSTEMS**

Opis zadatka:

Modeliranje i simulacija tehničkih procesa predstavljaju važan alat za smanjenje troškova i ubrzanje postupka projektiranja i izrade cjelokupnog sustava u različitim inženjerskim područjima. Stalni zahtjevi za ostvarenje što boljih radnih značajki suvremenih tehničkih sustava rezultiraju njihovom većom kompleksnošću. Takvi sustavi vrlo često kombiniraju podsustave iz nekoliko specijaliziranih područja, pa ovakvi složeni sustavi mogu sadržavati različite mehaničke, električne, hidrauličke, pneumatske, elektroničke i druge komponente. Zbog toga je razvoj učinkovitih simulacijskih modela preduvjet za daljnji napredak ovog inovativnog procesa. U okviru široko korištenog programskog paketa Matlab/Simulink razvijena je knjižnica alata SimHydraulics koja služi kao potpora projektnim inženjerima u području analize hidrauličkih sustava. Spada u skupinu grafički orijentiranih programa prilagođenih korisniku koji omogućuje otvorenu i intuitivnu platformu za analizu i simulaciju elektrohidrauličkih sustava.

U zadatku je potrebno:

- opisati način rada i programiranja u programskom paketu SimHydraulics,
- izraditi simulacijske programe za regulaciju položaja hidrauličkog cilindra, brzine vrtnje hidromotora i sile hidrauličke preše prema hidrauličkim shemama na temelju kojih su izrađeni laboratorijski eksperimentalni sustavi,
- dati usporednu analizu simulacijskih i eksperimentalnih rezultata,
- usporediti način rada u programskom paketu SimHydraulics s drugim programskim alatima namijenjenim za simulaciju sustava fluidne tehnike (npr. DSHplus, Automation Studio, FluidSIM, AMESim i sl.).

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.

Rok predaje rada:

**1. rok:** 24. veljače 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.  
**3. rok:** 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.  
**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

v.d. predsjednika Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

**SADRŽAJ:**

SADRŽAJ: .....	I
POPIS SLIKA: .....	III
POPIS OZNAKA: .....	IV
SAŽETAK: .....	V
SUMMARY: .....	VI
1. UVOD .....	1
2. PROGRAMSKI PAKET SimHydraulics .....	3
2.1. Način rada u programskom paketu SimHydraulics.....	3
2.2. Modeli hidrauličkih komponenti .....	6
2.2.1. Energetski dio hidrauličkog sustava.....	6
2.2.2. Upravljački dio hidrauličkog sustava .....	7
2.2.2. Izvršni dio hidrauličkog sustava.....	9
2.3. Modeli osnovnih komponenti.....	10
2.3.1. Senzori.....	10
2.3.2. Idealni izvor brzine vrtnje .....	11
2.3.3. Ostale osnovne komponente.....	11
3. SIMULACIJSKI PROGRAMI LABORATORIJSKIH EKSPERIMENTALNIH SUSTAVA .....	12
3.1. Modul za regulaciju translacijskog gibanja.....	12
3.1.1. Opis rada sustava.....	12
3.1.2. Komponente i parametri.....	14
3.1.3. Simulacijski model.....	18
3.2. Modul za regulaciju rotacijskog gibanja .....	19
3.2.1. Opis rada sustava.....	19
3.2.2. Komponente i parametri.....	21
3.2.3. Simulacijski model.....	24
3.3. Modul za regulaciju sile .....	25
3.3.1. Opis rada sustava.....	25
3.3.2. Komponente i parametri.....	27
3.3.3. Simulacijski model.....	30
4. USPOREDNA ANALIZA SIMULACIJSKIH I EKSPERIMENTALNIH REZULTATA 31	
4.1. Rezultati modula za regulaciju translacijskog gibanja .....	31
4.2. Rezultati modula za regulaciju rotacijskog gibanja .....	33
4.3. Rezultati modula za regulaciju sile .....	35

5. USPOREDBA RADA U PROGRAMSKOM PAKETU SimHydraulics S RADOM U PROGRAMSKOM PAKETU FluidSIM .....	37
5.1    Usporedba načina rada .....	37
5.2    Usporedba hidrauličkih komponenti .....	39
6. ZAKLJUČAK .....	40
LITERATURA:.....	41

**POPIS SLIKA:**

Slika 1 Eksperimentalni postavi elektrohidrauličkih servosustava .....	1
Slika 2 Primjer jednostavnog simulacijskog modela .....	4
Slika 3 Pretvarački blokovi .....	5
Slika 4 Blok <i>Solver</i> .....	5
Slika 5 Primjer unošenja parametara u komponentu.....	5
Slika 6 Simbol pumpe .....	6
Slika 7 Simbol 4/3 razvodnika .....	7
Slika 8 Simboli aktuatora ventila - proporcionalni/servo (lijevo) i elektromagnetski “ <i>on-off</i> ” (desno).....	8
Slika 9 Tlačni ventili - ventil za ograničavanje tlaka (lijevo) i ventil za regulaciju tlaka (desno) .....	8
Slika 10 Simbol dvoradnog hidrauličkog cilindra.....	9
Slika 11 Simbol hidrauličkog motora.....	9
Slika 12 Simbol senzora tlaka .....	10
Slika 13 Simbol senzora translacijskog gibanja (lijevo) i rotacijskog gibanja (desno).....	10
Slika 14 Simbol idealnog izvora brzine vrtnje .....	11
Slika 15 Simboli referentnih točaka – hidraulička (lijevo), rotacijska (sredina), translacijska (desno).....	11
Slika 16 Simbol hidrauličkog fluida.....	11
Slika 17 Eksperimentalni postav za regulaciju translacijskog gibanja.....	12
Slika 18 Shema eksperimentalnog postava za regulaciju translacijskog gibanja.....	13
Slika 19 Karakteristike proporcionalnog razvodnika .....	15
Slika 20 Prijelazne karakteristike proporcionalnog razvodnika.....	16
Slika 21 Karakteristika 4/3 razvodnika, krivulja A .....	16
Slika 22 Plivajući centar.....	17
Slika 23 Simulacijski model postava za regulaciju translacijskog gibanja .....	18
Slika 24 Eksperimentalni postav za regulaciju rotacijskog gibanja .....	19
Slika 25 Shema eksperimentalnog postava za regulaciju rotacijskog gibanja .....	20
Slika 26 Karakteristika servoventila - rotacija .....	22
Slika 27 Simulacijski model postava za regulaciju brzine vrtnje.....	24
Slika 28 Eksperimentalni postav za regulaciju sile .....	25
Slika 29 Shema eksperimentalnog postava za regulaciju sile .....	26
Slika 30 Simbol 2/2 razvodnik .....	27
Slika 31 Karakteristika servoventila - sila.....	28
Slika 32 Simboli opruge i prigušivača .....	29
Slika 33 Simulacijski model postava za regulaciju sile .....	30
Slika 34 Eksperimentalni rezultati – translacija .....	31
Slika 35 Simulacijski rezultati - translacija.....	31
Slika 36 Eksperimentalni rezultati - rotacija .....	33
Slika 37 Simulacijski rezultati - rotacija .....	33
Slika 38 Eksperimentalni rezultati - sila .....	35
Slika 39 Simulacijski rezultati - sila.....	35
Slika 40 Jednostavni hidraulički krug u FluidSIM.....	37
Slika 41 Isječak simulacije u FluidSIM programskom alatu .....	38



**POPIS OZNAKA:**

$V$	[m <sup>3</sup> /rad]	- jednični volumen
$\eta_V$	[-]	- volumenski stupanj korisnog djelovanja
$\eta_t$	[-]	- ukupni stupanj korisnog djelovanja
$p_{nom}$	[Pa]	- nominalni tlak
$\omega_{nom}$	[rad/s]	- nominalna brzina vrtnje
$\nu_{nom}$	[cSt]	- nominalna kinematička viskoznost fluida
$\rho_{nom}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- nominalna gustoća fluida
$Q$	[m <sup>3</sup> /s]	- izlazni protok
$\omega$	[rad/s]	- brzina vrtnje
$\Delta p$	[Pa]	- pad tlaka
$T$	[Nm]	- moment vratila
$\nu$	[cSt]	- kinematička viskoznost fluida
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- gustoća fluida
$k_L$	[-]	- koeficijent volumenskih gubitaka uslijed curenja

## SAŽETAK:

Tema ovog završnog rada je modeliranje i simulacija elektrohidrauličkih servosustava. MATLAB/Simulink je programski paket koji inženjeri koriste za simuliranje tehničkih sustava. Kao potpora projektnim inženjerima u području analize hidrauličkih sustava, u okviru Simulinka razvijena je knjižnica alata SimHydraulics koja je korištena u ovom radu. U okviru rada su izrađeni simulacijski programi tri elektrohidraulička sustava, a to su sustav za regulaciju translacijskog gibanja tj. za regulaciju položaja hidrauličkog cilindra, sustav za regulaciju rotacijskog gibanja tj. za regulaciju brzine vrtnje hidromotora i sustav za regulaciju tlaka tj. sile hidrauličke preše. Simulacijski programi su izrađeni prema hidrauličkim shemama na temelju kojih su izrađeni laboratorijski eksperimentalni postavi navedena tri elektrohidraulička sustava. U radu je prvo dan kratki opis načina rada u programskom paketu SimHydraulics te su prikazani i ukratko opisani modeli korištenih hidrauličkih komponenti. Zatim je dan opis rada eksperimentalnih postava, te je prikazan detaljan postupak parametriziranja simulacijskih modela eksperimentalnih postava u programskom paketu SimHydraulics. Kako bi se dobio uvid u točnost simulacije, rezultati dobiveni simulacijom su uspoređeni s eksperimentalnim rezultatima. Na kraju rada je dana usporedba programskog paketa SimHydraulics, koji je dio programa za simulaciju raznih tehničkih sustava Simulink, i programskog paketa FluidSIM koji je namijenjen prvenstveno za simulaciju sustava fluidne tehnike.

Ključne riječi: hidraulika, elektrohidraulički servosustav, simulacija, modeliranje, MATLAB, Simulink, SimHydraulics, automatska regulacija

**SUMMARY:**

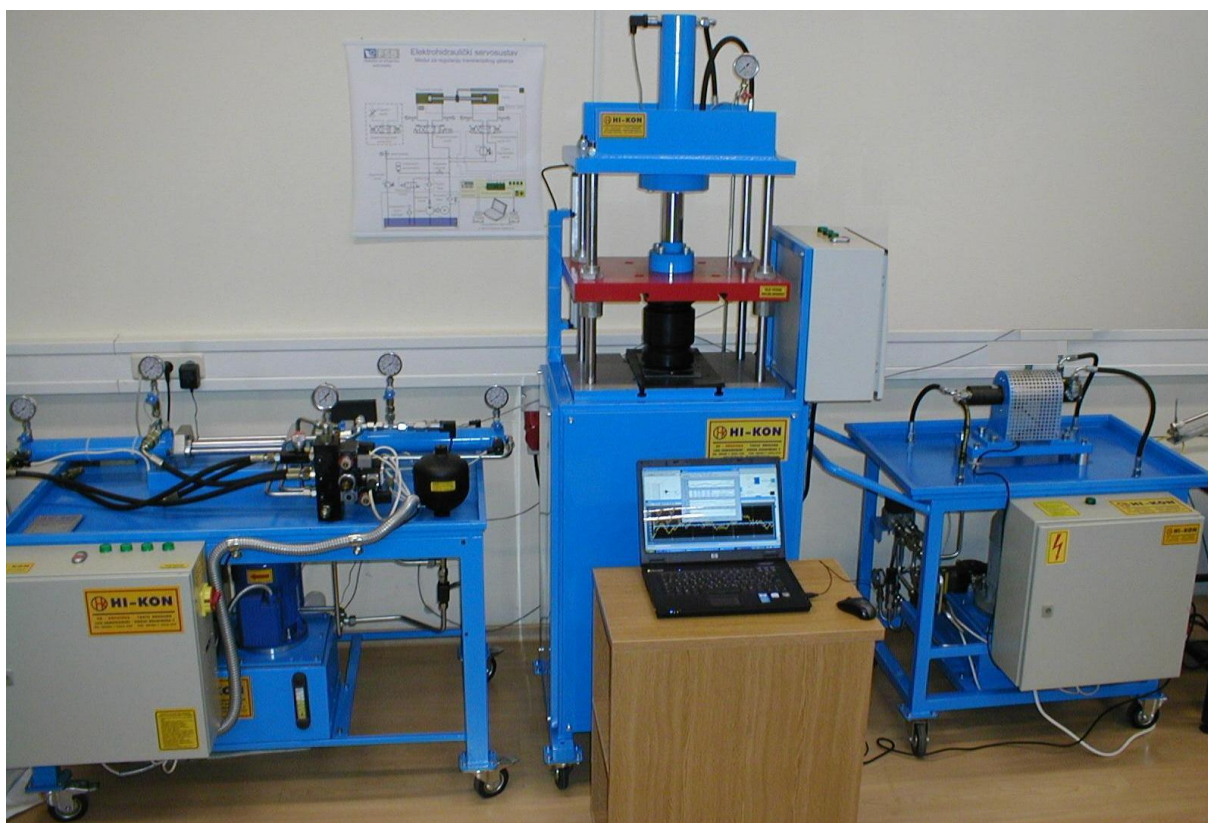
In this thesis, modeling and simulation of electro-hydraulic servo systems is done within MATLAB/Simulink environment by using SimHydraulics. SimHydraulics provides component libraries for modeling and simulating fluid systems, and serves as a tool for engineers dealing with hydraulic power systems. Simulation models of three electro-hydraulic servo systems were created in accordance with hydraulic schematic diagrams of the following experimental setups. First system is a module for linear motion control, in which a position of hydraulic cylinder rod is controlled. Second system is a module for rotational motion control, in which the speed of hydraulic motor is controlled. Third system is a module for pressure control, in which the force of compressing of a hydraulic press is controlled. In the first part of the thesis, a brief description of a way of working in SimHydraulics is given, followed by explanation of SimHydraulic components used in simulation models. Afterwards, a brief explanation of working principle of experimental setups is given. Next, the procedure of simulation models parameterization is presented. In order to gain insights in simulation model accuracy, simulation results are compared with experimental results. Finally, a short comparison between SimHydraulics, which is a part of a general purpose simulation software, and FluidSIM, which is a more specialized fluid power simulation software, is given.

Keywords: hydraulics, electro-hydraulic servo systems, simulation, modeling, MATLAB, Simulink, SimHydraulics, control systems

## 1. UVOD

Hidraulički sustavi često se koriste u industriji, a razvojem moderne hidraulike sve više se koriste elektrohidraulički servosustavi kako bi se postigle što bolje radne značajke sustava. Elektrohidraulički servosustavi omogućuju da se velikim inercijskim opterećenjima upravlja uz visoku točnost upravljanja, veliku brzinu odziva i velika pojačanja snage. Takvi sustavi vrlo često kombiniraju podsustave iz nekoliko područja, pa ovakvi složeni sustavi mogu sadržavati različite mehaničke, električne, hidrauličke, pneumatske, elektroničke i druge komponente. Elektrohidraulički servosustavi također podrazumijevaju upotrebu regulacije, te je danas sve češća primjena naprednih regulacijskih algoritama, poput adaptivnih regulacijskih algoritama i nelinearnih regulatora, te umjetne inteligencije.

Kako bi se postupak projektiranja i izrade cjelokupnog sustava, a i sustava upravljanja, ubrzao i olakšao, te kako bi se smanjili troškovi, koriste se računalne simulacije. Inženjeri tehničke procese modeliraju i simuliraju, te je razvoj učinkovitih simulacijskih modela preduvjet za daljnji napredak u izradi suvremenih tehničkih sustava. Za modeliranje i simulaciju tehničkih sustava široko se koristi program MATLAB/Simulink. Kao potpora inženjerima u području analize hidrauličkih sustava unutar programa Simulink je razvijena knjižnica alata SimHydraulics koja je korištena u ovom radu.



Slika 1 Eksperimentalni postavi elektrohidrauličkih servosustava

U sklopu Laboratorija za automatiku i robotiku na Fakultetu strojarstva i brodogradnje izrađeni su eksperimentalni postavi elektrohidrauličkih servosustava prikazani na slici 1. Prvi eksperimentalni postav predstavlja tipični elektrohidraulički servosustav za regulaciju translacijskog gibanja (Slika 1 - lijevo), drugi eksperimentalni postav predstavlja tipični elektrohidraulički servosustav za regulaciju rotacijskog gibanja (Slika 1 - desno), a treći eksperimentalni postav predstavlja tipični elektrohidraulički servosustav za regulaciju sile (Slika 1 - sredina). Izrađeni elektrohidraulički servosustavi imaju sve karakteristike sustava koji se koriste u industriji, te se sastoje od standardnih hidrauličkih komponenti korištenih u industriji. Kako bi se provjerila točnost rezultata simulacijskih modela, izrađeni su simulacijski modeli ova tri laboratorijska eksperimentalna postava te su simulacijski rezultati uspoređeni s poznatim eksperimentalnim rezultatima.

## 2. PROGRAMSKI PAKET SimHydraulics

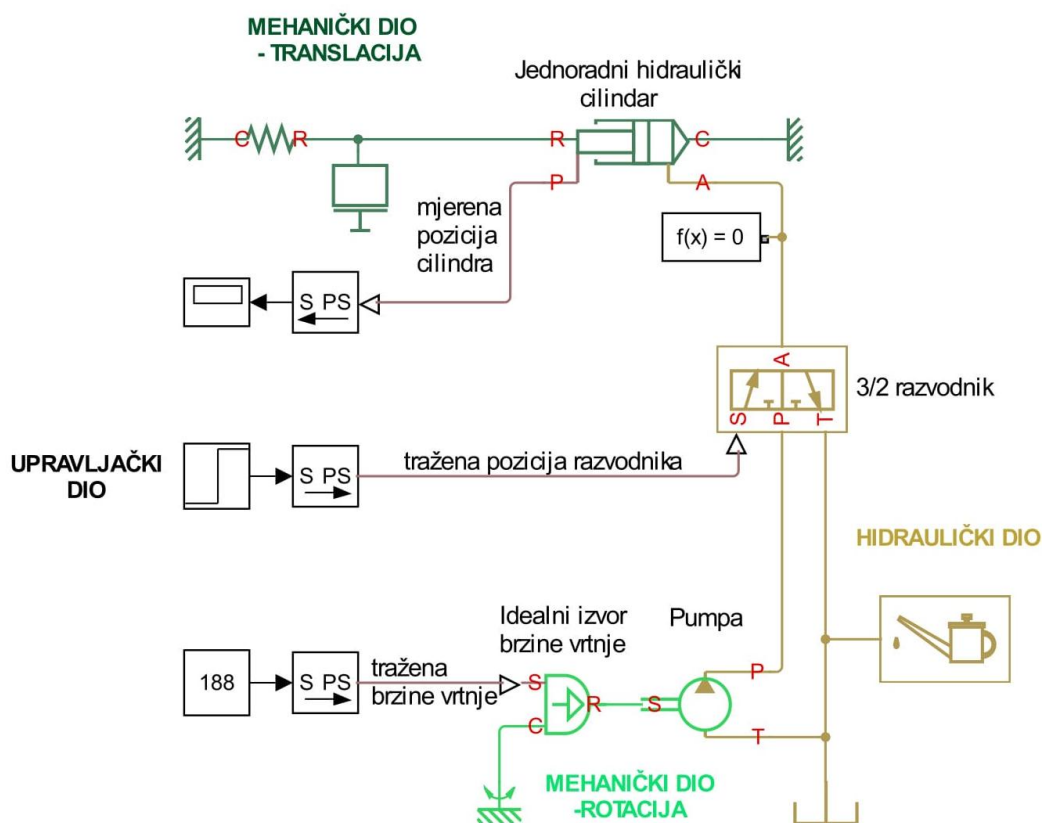
SimHydraulics je jedna od knjižnica alata Simscape-a, dodatka koji se koristi za modeliranje fizičkih sustava unutar programa Simulink. Simulink je grafički alat unutar MATLAB programskog sustava koji omogućuje modeliranje, simulaciju i analizu dinamičkih sustava. Bitna razlika između programskog dodatka Simscape i programa Simulink je u tome što modeli napravljeni u programskom dodatku Simscape predstavljaju stvarne fizičke strukture, za razliku od programa Simulink u kojem modeli predstavljaju jednadžbe. Simulacijski model izrađen u programskom dodatku Simscape se sastoji od komponenti koje predstavljaju neku stvarnu komponentu sustava, te je matematički model komponente sadržan u samoj komponenti. Simscape sadrži 6 glavnih knjižnica alata koje su međusobno kompatibilne. Prva, osnovna knjižnica alata, sadrži matematičke modele osnovnih komponenti iz područja strojarstva i elektrotehnike. SimDriveline sadrži modele raznih prijenosnika te komponente za modeliranje vozila. SimElectronics sadrži modele komponenti koje se koriste u elektronici i mehatronici. SimMechanics sadrži komponente za modeliranje 3D mehaničkih sustava od više tijela. SimPowerSystems sadrži modele komponenti korištenih u energetici i elektrostrojarstvu.

SimHydraulics sadrži matematičke modele komponenti koje su potrebne za modeliranje i simuliranje hidrauličkih sustava. Uključuje gotove modele hidrauličkih pumpi, raznih ventila, aktuatora, cijevi, te ostalih hidrauličkih komponenti. Korisnik može jednostavno izraditi i vlastite matematičke modele hidrauličkih komponenti koje nisu sadržane u knjižnici. Osim hidrauličkih sustava koristeći programski paket SimHydraulics moguće je modelirati i simulirati ostale vrste sustava koji koriste fluid kao radni medij, poput cjevovoda i sustava grijanja i hlađenja.

SimHydraulics omogućava jednostavnu izradu simulacijskih modela hidrauličkih sustava koji inženjerima služe kao temelj za dimenzioniranje i izbor komponenti sustava, ispitivanje i određivanje parametara regulatora servohidrauličkih sustava, modeliranje upravljačkog sustava, te analizu ponašanja cijelog sustava. Sve komponente su izrađene tako da korisnik u njih upisuje parametre koji su često dostupni u tehničkoj dokumentaciji.

### 2.1. Način rada u programskom paketu SimHydraulics

Spajanje komponenti simulacijskog modela u programskom dodatku Simscape jednako je spajanju istih komponenti u stvarnosti, zbog čega Simscape simulacijski modeli izgledaju isto kao shematski prikazi stvarnog sustava. Radi lakšeg razumjevanja načina rada u programskom paketu SimHydraulics, na slici 2 prikazan je jednostavan simulacijski model.

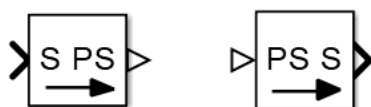


Slika 2 Primjer jednostavnog simulacijskog modela

Za bolju preglednost simulacijskih modela svaki dio sustava predstavljen je jedinstvenom bojom, pa je tako hidraulički dio sustava prikazan smeđom bojom, mehanički dio sustava zelenom bojom i upravljački dio sustava crnom bojom. Ljubičastom bojom prikazane su linije koje povezuju upravljački dio s ostalima. Komponente koje su poveznice između različitih dijelova sustava imaju priključke u bojama koje odgovaraju dijelovima sustava koje povezuju (npr. pumpa).

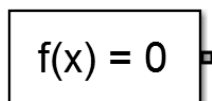
Komponente u programskom dodatku Simscape imaju dvije vrste priključaka, fizičke priključke (npr. priključci  $P$ ,  $T$  i  $A$  na razvodniku) i priključke signala (npr. priključak  $S$  na razvodniku). Broj i vrsta fizičkih priključaka simulacijske komponente odgovara broju i vrsti fizičkih priključaka stvarne komponente. Na primjer, jednoradni hidraulički cilindar ima jedan hidraulički priključak kao i u stvarnosti, te dva mehanička translacijska priključka od kojih jedan predstavlja klipnjaču, a drugi cijev cilindra s kojom se cilindar pričvršćuje za okolinu. Priključke za signale najčešće imaju komponente kojima korisnik u stvarnosti može upravljati (npr. ventil) i komponente koje korisniku daju informaciju o sustavu (npr. senzor na cilindru).

Za povezivanje programskog dodatka Simscape i programa Simulink koriste se dva pretvaračka bloka. S-PS blok, prikazan na slici 3 lijevo, koristi se za pretvaranje Simulink signala u Simscape signal, dok se PS-S blok, prikazan na slici 3 desno, koristi za pretvaranje Simscape signala u Simulink signal. Pomoću tih blokova se može definirati i mjerna jedinica Simscape signala.



Slika 3 Pretvarački blokovi

Osim pretvarača, svaki Simscape model mora sadržavati i blok koji definira parametre za rješavanje jednadžbi, tzv. *Solver*, prikazan na slici 4.



Slika 4 Blok *Solver*

Pošto Simscape sadrži samo matematičke modele komponenti fizičkih sustava, upravljački dio sustava koji predstavlja upravljački uređaj poput PLC-a modelira se pomoću standardnih Simulink blokova.

Simscape komponente zahtjevaju unos parametara od strane korisnika. Parametri se u komponentu mogu unijeti izravnim upisivanjem brojevnih vrijednosti parametra, kao što je prikazano na slici 5, ili korištenjem predefiniranih varijabli. Prilikom unošenja parametara bitno je i definirati mjernu jedinicu parametra unutar komponente. Svaka komponenta može imati parametre definirane s vlastitom mjernom jedinicom, na primjer tlak otvaranja tlačnog ventila može biti definiran u barima [bar], a nominalni tlak pumpe u paskalima [Pa].

Parameters		
Pump displacement:	<input type="text" value="5e-6"/>	<input type="text" value="m^3/rad"/>
Volumetric efficiency:	<input type="text" value="0.92"/>	
Total efficiency:	<input type="text" value="0.8"/>	
Nominal pressure:	<input type="text" value="100e5"/>	<input type="text" value="Pa"/>
Nominal angular velocity:	<input type="text" value="188"/>	<input type="text" value="rad/s"/>
Nominal kinematic viscosity:	<input type="text" value="18"/>	<input type="text" value="cSt"/>
Nominal fluid density:	<input type="text" value="900"/>	<input type="text" value="kg/m^3"/>

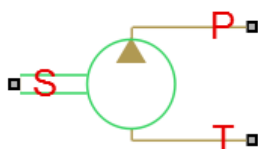
Slika 5 Primjer unošenja parametara u komponentu



## 2.2. Modeli hidrauličkih komponenti

### 2.2.1. Energetski dio hidrauličkog sustava

Jedna od osnovnih komponenti svakog hidrauličkog sustava je pumpa, koja predstavlja energetski dio sustava. U laboratorijskim sustavima korištene su pumpe fiksnog volumena. Na slici 6 prikazan je simbol pumpe fiksnog volumena u SimHydraulics-u.



Slika 6 Simbol pumpe

Hidraulički priključci  $P$  i  $T$  predstavljaju izlaz tj. ulaz u pumpu. Priključak  $S$  predstavlja pogonsko vratilo pumpe na koje se spaja motor. Glavne pretpostavke modela pumpe su da se stišljivost fluida ne uzima u obzir, te da u modelu nisu uključene mehaničke karakteristike vratila poput inercije, trenja, elastičnosti i sl.

Parametri modela koje korisnik može unijeti su jednični volumen pumpe  $V$ , volumenski stupanj korisnog djelovanja  $\eta_v$ , ukupni stupanj korisnog djelovanja  $\eta_t$ , nominalni tlak  $p_{nom}$ , nominalna brzina vrtnje  $\omega_{nom}$ , nominalna kinematička viskoznost fluida  $\nu_{nom}$  i nominalna gustoća fluida  $\rho_{nom}$ . Svi navedeni parametri su najčešće dostupni u tehničkoj dokumentaciji.

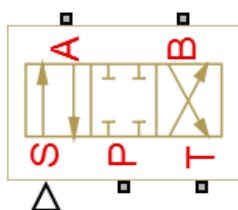
Model pumpe opisan je sljedećim jednadžbama:

$$\begin{aligned}
 Q &= V\omega - k_L\Delta p \\
 T &= V\Delta p \frac{\eta_v}{\eta_t} \\
 k_L &= \frac{V\omega_{nom}(1-\eta_v)\nu_{nom}\rho_{nom}}{\nu\rho p_{nom}}
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

gdje je  $Q$  izlazni protok pumpe,  $\omega$  brzina vrtnje pumpe,  $\Delta p$  pad tlaka na pumpi,  $T$  moment vratila pumpe,  $\nu$  kinematička viskoznost fluida,  $\rho$  gustoća fluida, a  $k_L$  je koeficijent volumenskih gubitaka uslijed curenja, za koje je pretpostavka da su linearno proporcionalni s padom tlaka na pumpi.

### 2.2.2. Upravljački dio hidrauličkog sustava

Razvodnici su vrsta ventila koji otvaraju ili zatvaraju prolaz fluidu te ga tako usmjeravaju, dakle razvodnici predstavljaju upravljački dio hidrauličkog kruga. U laboratorijskim sustavima se najčešće koristi razvodnik s 4 priključka i 3 razvodna položaja. Na slici 7 prikazan je simbol takvog razvodnika u SimHydraulics-u.



Slika 7 Simbol 4/3 razvodnika

Hidraulički priključci na simbolu su u skladu sa standardnim oznakama na hidrauličkim shemama te predstavljaju priključke tlaka ( $P$ ), povrata ( $T$ ) i radne priključke ( $A, B$ ). Priključak  $S$  na simbolu predstavlja upravljački signal koji određuje položaj razvodnika. Pozitivan upravljački signal spaja priključke  $P-A$  i  $B-T$  što odgovara lijevom položaju na slici 7, a negativni upravljački signal odgovara desnom položaju. Središnji položaj razvodnika je određen parametrima *Initial Opening*, te je istim modelom moguće dobiti 11 različitih središnjih položaja. Osim prikazanog 4/3 razvodnika, unutar programskog paketa SimHydraulics postoji još 9 različitih izvedbi razvodnika s različitim lijevim i desnim krajnjim položajima.

SimHydraulics omogućuje 3 načina parametriziranja modela razvodnika: prvi je pomoću maksimalnog pomaka razvodnog mehanizma i maksimalne površine prolaza za ulje, drugi je pomoću karakteristike površine prolaza za ulje u ovisnosti o pomaku razvodnog mehanizma i treći način je pomoću karakteristika protoka u ovisnosti o padu tlaka i pomaku razvodnog mehanizma.

Pošto su u tehničkoj dokumentaciji razvodnika najčešće dane karakteristike protoka u ovisnosti o padu tlaka, u svim modelima je korišten treći način parametriziranja modela.

Potrebni parametri modela u tom slučaju su:

- vektor pomaka razvodnog mehanizma u kojem vrijednosti moraju biti raspoređene od najmanje, obično 0%, do najveće, obično 100% pomaka.
- vektor padova tlaka na ventilu u kojem vrijednosti moraju biti raspoređene od najmanje, obično negativna vrijednost najvećeg pozitivnog pada tlaka, do najveće, obično najveći pozitivni pad tlaka.
- matrica protoka dimenzija  $m \times n$ , gdje je  $m$  dimenzija vektora pomaka razvodnog mehanizma, a  $n$  dimenzija vektora padova tlaka na ventilu. Svaka vrijednost u matrici odgovara protoku za kombinaciju pomaka i pada tlaka.

Opisani model razvodnika opisuje samo hidraulički dio razvodnika. Upravljanje razvodnikom i tip razvodnika (servo, proporcionalni i elektromagnetski "on-off") definira se zasebnim blokom, tzv. aktuatorom ventila koji povezuje hidraulički dio razvodnika s upravljačkim dijelom. Slika 8 prikazuje simbole aktuatora ventila u programskom paketu SimHydraulics.



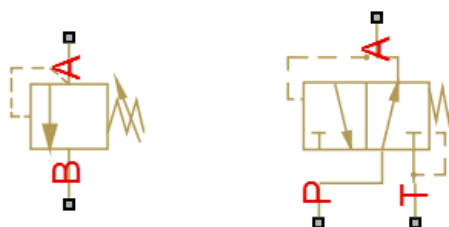
Slika 8 Simboli aktuatora ventila - proporcionalni/servo (lijevo) i elektromagnetski "on-off" (desno)

Priključak s desne strane aktuatora u pravilu se spaja sa priključkom *S* razvodnika. Priključak s lijeve strane proporcionalnog/servo aktuatora predstavlja ulaz i prima vrijednost upravljačkog signala. Priključci *A* i *B* na elektromagnetskom "on-off" aktuatoru predstavljaju traženi položaj razvodnika. Pozitivan signal na priključku *A* odgovara lijevom položaju razvodnika, a pozitivan signal na priključku *B* odgovara desnom položaju razvodnika.

Parametri modela proporcionalnog/servo aktuatora ventila su pojačanje, vremenska konstanta i zasićenje kojima se oblikuje ponašanje razvodnog mehanizma. Parametri modela elektromagnetskog "on-off" aktuatora su hod razvodnog mehanizma, vrijeme uključivanja i isključivanja te nazivna vrijednost signala. Navedeni parametri se mogu dobiti iz tehničke dokumentacije.

Simboli tlačnih ventila u programskom paketu SimHydraulics prikazani su na slici 9. Ventil za ograničavanje tlaka, prikazan na slici 9 lijevo, koristi se kao sigurnosni ventil. Priključak *A* se u tom slučaju obično spaja na tlak, a priključak *B* se spaja na povrat. Ventil za regulaciju tlaka prikazan je na slici 9 desno. Priključak *A* se spaja na hidraulički dio kruga u kojem se želi održavati stalni sniženi tlak, a priključci *P* i *T* odgovaraju priključcima tlaka i povrata.

Parametri modela tlačnih ventila koje korisnik može unijeti su u skladu s parametrima koji se mogu pronaći u tehničkoj dokumentaciji.

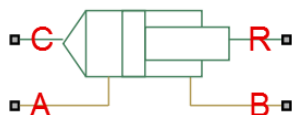


Slika 9 Tlačni ventili - ventil za ograničavanje tlaka (lijevo) i ventil za regulaciju tlaka (desno)

### 2.2.2. Izvršni dio hidrauličkog sustava

Izvršni dio hidrauličkog sustava čine hidraulički cilindri i motori.

Simbol dvoradnog hidrauličkog cilindra u programskom paketu SimHydraulics prikazan je na slici 10.

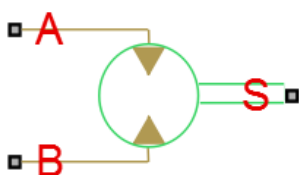


Slika 10 Simbol dvoradnog hidrauličkog cilindra

Priključci  $C$  i  $R$  predstavljaju mehaničke priključke cilindra. Priključak  $R$  odgovara klipnjači cilindra, a priključak  $C$  odgovara cijevi cilindra. Priključci  $A$  i  $B$  odgovaraju hidrauličkim priključcima. Glavne pretpostavke modela cilindra su da nema curenja, te da u modelu nisu uključene mehaničke karakteristike klipnjače poput mase, krutosti, trenja i sl.

Parametri modela koje korisnik može unijeti su površine klipova sa strane hidrauličkih priključaka, hod cilindra, mrtvi volumen cilindra, te krutost i prigušenje krajnjih položaja.

Simbol hidrauličkog motora stalnog volumena u programskom paketu SimHydraulics prikazan je na slici 11.



Slika 11 Simbol hidrauličkog motora

Priključci  $A$  i  $B$  predstavljaju hidrauličke priključke, a priključak  $S$  predstavlja vratilo motora. Glavne pretpostavke modela motora su da se stišljivost fluida ne uzima u obzir, te da u modelu nisu uključene mehaničke karakteristike vratila poput inercije, trenja, elastičnosti i sl.

Parametri modela koje korisnik može unijeti su jednični volumen motora  $V$ , volumenski stupanj korisnog djelovanja  $\eta_v$ , ukupni stupanj korisnog djelovanja  $\eta_t$ , nominalni tlak  $p_{nom}$ , nominalna brzina vrtnje  $\omega_{nom}$ , nominalna kinematička viskoznost  $\nu_{nom}$  i nominalna gustoća fluida  $\rho_{nom}$ . Svi navedeni parametri su najčešće dostupni u tehničkoj dokumentaciji.

Model motora opisan je sljedećim jednadžbama:

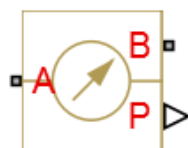
$$\begin{aligned}
 Q &= V\omega + k_L\Delta p \\
 T &= V\Delta p \frac{\eta_t}{\eta_v} \\
 k_L &= \frac{V\omega_{nom}(1-\eta_v)\nu_{nom}\rho_{nom}}{\nu\rho p_{nom}}
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

gdje je  $Q$  protok kroz motor,  $\omega$  brzina vrtnje vratila motora,  $\Delta p$  pad tlaka na motoru,  $T$  moment na vratilu motora,  $\nu$  kinematička viskoznost fluida,  $\rho$  gustoća fluida, a  $k_L$  je koeficijent volumenskih gubitaka uslijed curenja, za koje je pretpostavka da su linearno proporcionalni s padom tlaka na motoru.

## 2.3. Modeli osnovnih komponenti

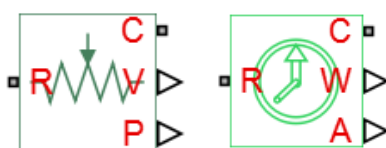
### 2.3.1. Senzori

Na slici 12 prikazan je simbol senzora tlaka u programskom paketu SimHydraulics. On pretvara mjerenu razliku tlakova između dvije točke sustava, na koje su spojeni priključci A i B, u fizički signal proporcionalan razlici tlakova. Priključak A se obično spaja na točku koju želimo mjeriti, a priključak B se spaja na referentnu točku. Priključak P predstavlja dobiveni fizički signal. Senzor je idealan jer ne uzima u obzir inerciju, trenje, kašnjenja signala i sl.



Slika 12 Simbol senzora tlaka

Senzor translacijskog gibanja, prikazan na slici 13 (lijevo), mjeri razliku pozicije/brzine između priključaka R i C, gdje se priključak R spaja na točku čiju poziciju/brzinu želimo mjeriti, a priključak C na referentnu točku. Priključak P predstavlja fizički signal pozicije, a priključak V predstavlja fizički signal brzine. Senzor je idealan jer ne uzima u obzir inerciju, trenje, kašnjenja signala i sl.

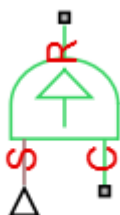


Slika 13 Simbol senzora translacijskog gibanja (lijevo) i rotacijskog gibanja (desno)

Senzor rotacijskog gibanja prikazan je na slici 13 (desno). On mjeri razliku brzine vrtnje/zakreta između priključaka R i C, gdje se priključak R spaja na točku čiju brzinu vrtnje/zakret želimo mjeriti, a priključak C na referentnu točku. Priključak W predstavlja fizički signal brzine vrtnje, a priključak A predstavlja fizički signal zakreta. Senzor je idealan jer ne uzima u obzir inerciju, trenje, kašnjenja signala i sl.

### 2.3.2. Idealni izvor brzine vrtnje

Pošto u simulacijskim modelima nisu korišteni modeli elektromotora za pogon pumpe, umjesto njih stavljen je idealni izvor brzine vrtnje, čiji simbol je prikazan na slici 14. Ovaj izvor je idealan jer se podrazumjeva da je dovoljno snažan da održi zadanu brzinu vrtnje neovisno o momentu kojim je opterećen. Priključak *R* predstavlja izlaz brzine i spaja se na vratilo koje želimo pogoniti. Priključak *C* predstavlja referentnu točku. Na upravljački priključak *S* zadaje se profil željene brzine vrtnje.



Slika 14 Simbol idealnog izvora brzine vrtnje

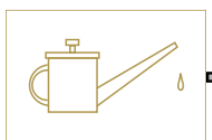
### 2.3.3. Ostale osnovne komponente

Pošto u simulacijskim modelima nije korišten model hidrauličkog spremnika, koristi se model hidrauličke reference, prikazan na slici 15 lijevo, koja predstavlja otvor komponente prema atmosferskom tlaku. Rotacijska referenca, prikazana na slici 15 u sredini, te translacijska referenca, prikazana na slici 15 desno, predstavljaju nepomične dijelove elemenata sustava, poput statora motora, kućišta i sl.



Slika 15 Simboli referentnih točaka – hidraulička (lijevo), rotacijska (sredina), translacijska (desno)

Za provedbu simulacije hidrauličkog kruga potrebno je definirati svojstva fluida. Blok koji predstavlja skup parametara fluida prikazan je na slici 16. Korisnik može sam unijeti parametre fluida ili izabrati jedan od 24 preddefinirana fluida.



Slika 16 Simbol hidrauličkog fluida

### 3. SIMULACIJSKI PROGRAMI LABORATORIJSKIH EKSPERIMENTALNIH SUSTAVA

Eksperimentalni postavi elektrohidrauličkih servosustava izrađeni su za potrebe istraživanja u području proporcionalne i servohidraulike, ali i za edukaciju studenata. Na eksperimentalnim sustavima moguće je provjeriti ponašanje stvarnog sustava koji se simulira, te dobiti uvid u razlike između ponašanja stvarnog sustava i simulacijskog modela. Eksperimentalni postavi su korisni i za provjeru razvijenih sustava upravljanja i regulacije koji se prvo provjeravaju na simulacijskim modelima. Kako bi se sustav upravljanja što kvalitetnije izradio potrebno je imati što detaljnije simulacijske modele. U nastavku su opisani eksperimentalni postavi te su prikazani njihovi simulacijski modeli izrađeni u SimHydraulics programskom paketu.

#### 3.1. Modul za regulaciju translacijskog gibanja

##### 3.1.1. Opis rada sustava



Slika 17 Eksperimentalni postav za regulaciju translacijskog gibanja

Konstruktivna izvedba eksperimentalnog postava elektrohidrauličkog servosustava za regulaciju translacijskog gibanja prikazana je na slici 17, a njena shema na slici 18.

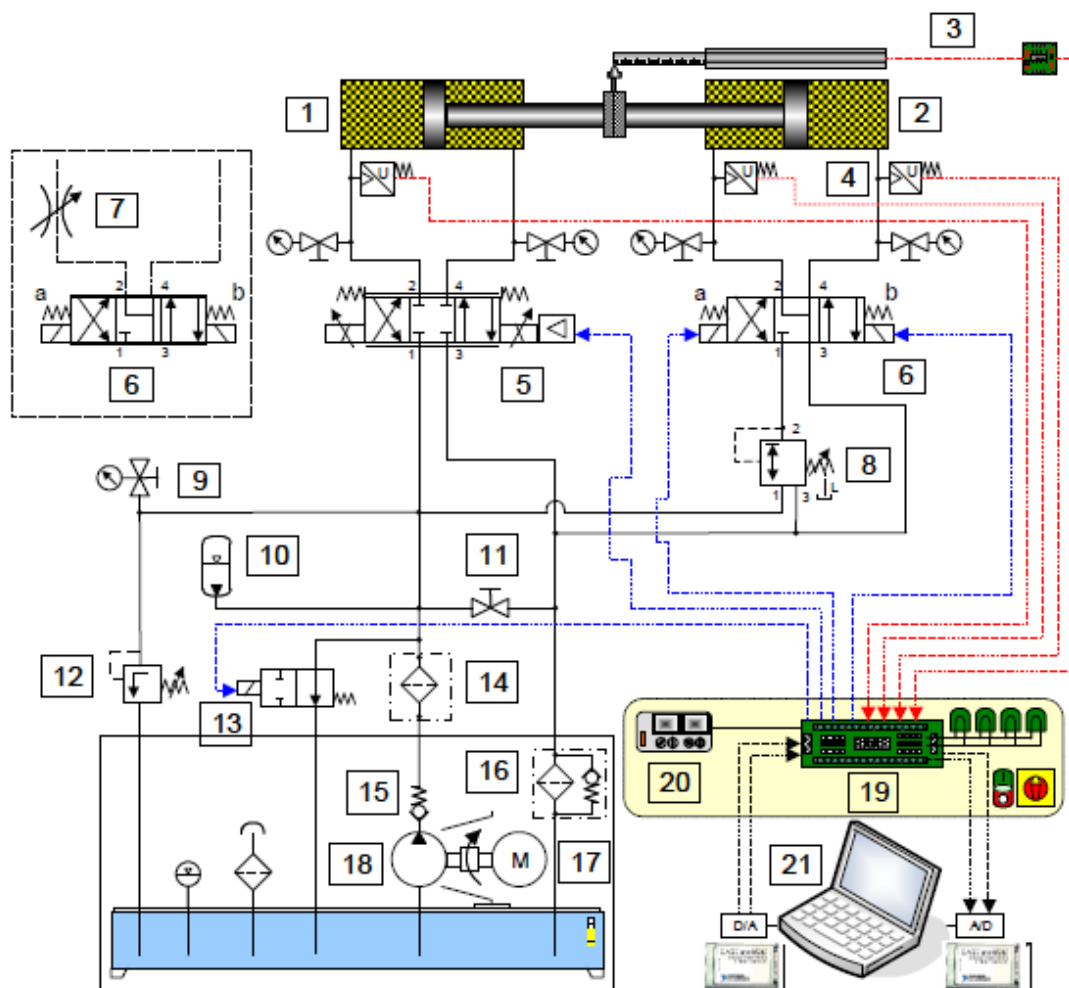
Postav se sastoji od dva, kruto vezana, hidraulička cilindra. Glavni cilindar (1) predstavlja servosustav kojim se upravlja, a cilindar za terećenje (2) predstavlja opterećenje glavnom cilindru. Upravljanje pozicijom glavnog cilindra vrši se proporcionalnim razvodnikom (5), koji propušta više ili manje ulja prema cilindru i na taj način regulira poziciju glavnog cilindra.

Upravljanje pozicijom glavnog cilindra moguće je i pomoću elektromagnetskog 4/3 razvodnika (6) i prigušnice (7). Položaj glavnog cilindra mjeri se linearnim enkoderom (3).

Upravljanje cilindra za terećenje izvršava elektromagnetski 4/3 razvodnik (6). Ako je razvodnik u središnjem položaju nema opterećenja glavnog cilindra. Kako bi glavni cilindar mogao savladati poremećaj koji uzrokuje cilindar za terećenje u sustav je ugrađen tlačni regulacijski ventil (8), koji održava stalni sniženi tlak u vodovima cilindra za terećenje. Maksimalni tlak u sustavu ograničava sigurnosni ventil (12). Za kontrolu tlaka u komorama cilindra ugrađeni su senzori tlaka (4). Rasteretni ventil (13) služi za aktivaciju sustava. Kako bi sustav mogao raditi, on mora biti zatvoren.

Dobavu ulja osigurava agregat koji čine zupčasta pumpa (18), fiksno volumena s vanjskim ozubljenjem, pogonjena elektromotorom (17), nepovratni ventil (15) i povratni filter za pročišćavanje ulja (16). Kako bi se osigurao potreban protok pri pomicanju cilindara, u sustav je ugrađen akumulator (10). Ostale komponente u sustavu su tlačni filter ulja (14), manometri za nadzor tlaka (9) i slavina (11).

Upravljački dio sustava čine komponente (19, 20 i 21) koje mogu biti u raznim izvedbama, npr. razni PLC uređaji, prijenosna računala i sl.



Slika 18 Shema eksperimentalnog postava za regulaciju translacijskog gibanja



### 3.1.2. Komponente i parametri

Glavni cilindar (1) i cilindar za terećenje (2) istih su dimenzija, te su jedini poznati podaci o cilindrima dimenzije klipa i klipnjače koje su redom: promjer klipa 50 mm, promjer klipnjače 36 mm i hod cilindra 300 mm.

Poznati parametri hidrauličkog cilindra u simulacijskom modelu su prema tome:

- površina klipa na strani hidrauličkog priključka A: 1963,5 mm<sup>2</sup>
- površina klipa na strani hidrauličkog priključka B: 945,62 mm<sup>2</sup>
- hod klipnjače cilindra: 300 mm

Pretpostavljeni parametri su:

- mrtvi volumen na strani hidrauličkog priključka A i B: 10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>

Ostali parametri nisu poznati stoga su ostavljene preddefinirane vrijednosti.

Osim parametara komponente, potrebno je zadati i početne uvjete u kojima se cilindar nalazi na početku simulacije. Početni uvjeti hidrauličkih cilindara su:

- položaj klipa u odnosu na hidraulički priključak A: 0.15m
- početni tlak u komori hidrauličkog priključka A: 0 Pa
- početni tlak u komori hidrauličkog priključka B: 0 Pa

Eksperimentalni postav je opremljen zupčastom pumpom (18), fiksnog volumena, s vanjskim ozubljenjem proizvođača Vivoil. Korištena je pumpa Vivoil XV-1P/2.6 za koju su podaci preuzeti iz [5], a to su specifični volumen pumpe koji iznosi 2.6 cm<sup>3</sup>/okr, volumenski stupanj korisnog djelovanja koji je u rasponu od 0.91 – 0.96, te mehanički stupanj korisnog djelovanja koji je u rasponu od 0.85 – 0.9.

Poznati parametri pumpe fiksnog volumena u simulacijskom modelu su prema tome:

- volumen pumpe: 2.6 cm<sup>3</sup>/okr
- volumenski stupanj korisnog djelovanja: 0.93
- ukupni stupanj korisnog djelovanja: 0.8091

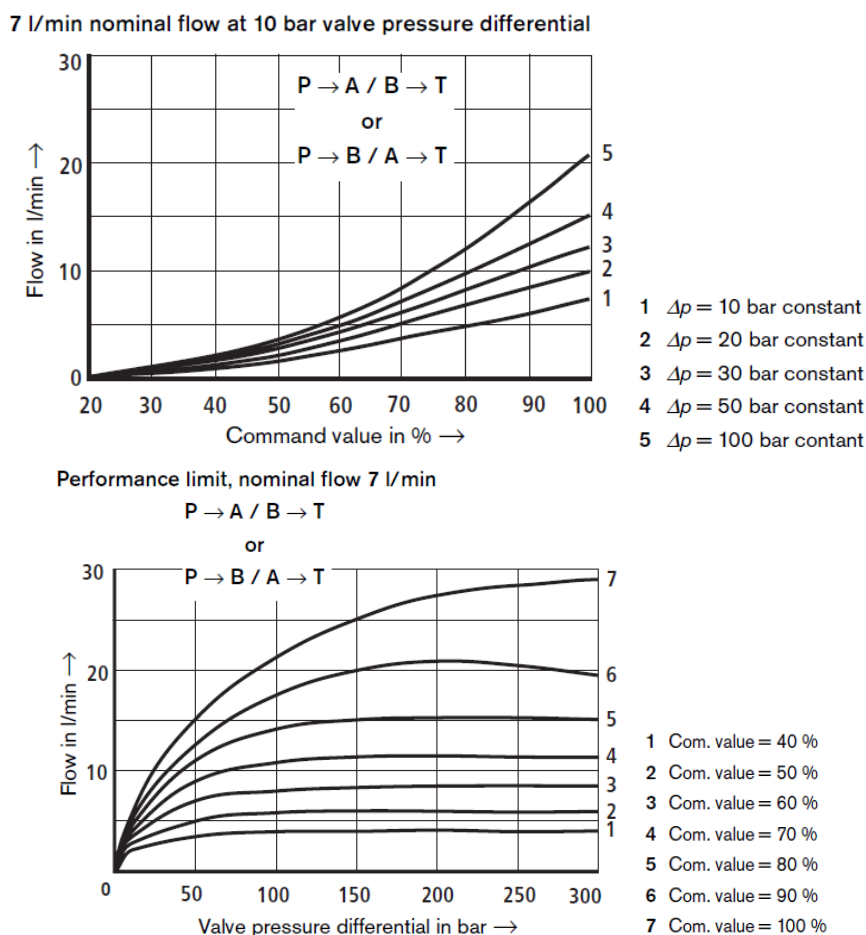
Pretpostavljeni parametri modela pumpe fiksnog volumena su:

- nominalni tlak: 200 bar
- nominalna brzina vrtnje: 3000 okr/min

Vrijednosti ostalih parametara nisu poznate te su ostavljene preddefinirane vrijednosti.

Hidroakumulator (10), koji je ugrađen u eksperimentalni postav, je membranski akumulator proizvođača HYDAC, oznake SBO140-1,4E1/112U-140AB. Poznati podaci akumulatora preuzeti su iz [6], a to su volumen akumulatora od 1,4 l i maksimalni tlak akumulatora 140 bar. Prema tome, poznati parametar simulacijskog modela akumulatora je ukupni volumen akumulatora 1,4 l. Pretpostavljeni parametar je početni tlak akumulatora 60 bar. Vrijednosti ostalih parametara nisu poznate te su ostavljene preddefinirane vrijednosti.

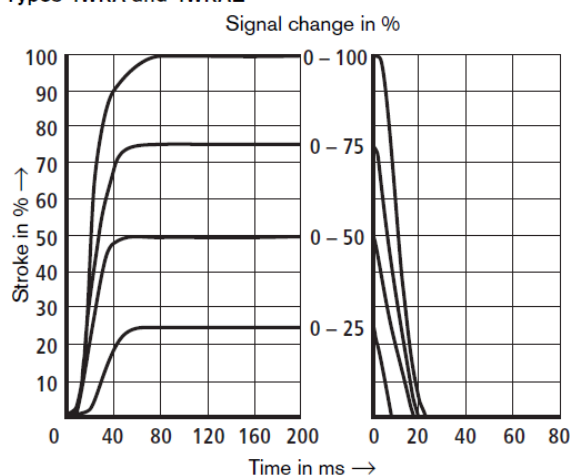
Proporcionalni razvodnik (5), koji upravlja glavnim cilindrom, je 4/3 proporcionalni razvodnik proizvođača Bosch-Rexroth, oznake 4WRAE607-2X/G24 K31/A1V. Podaci proporcionalnog razvodnika preuzeti su iz [7], a to su karakteristike zavisnosti protoka o upravljačkom signalu za konstantni pad tlaka i karakteristike zavisnosti protoka o padu tlaka na ventilu za konstantni upravljački signal, prikazane na slici 19. Osim hidrauličkih karakteristika poznata je i karakteristika elektromagneta, prikazana na slici 20.



Slika 19 Karakteristike proporcionalnog razvodnika

Transient functions with stepped form of electrical input signals

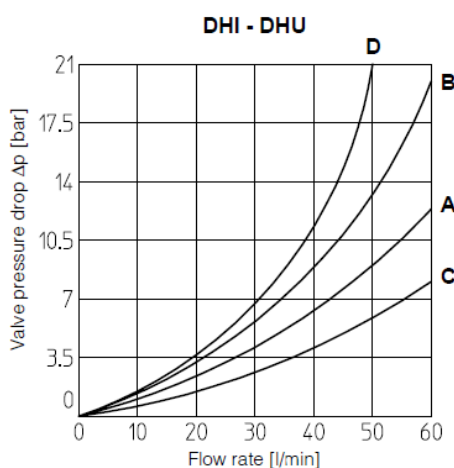
Types 4WRA and 4WRAE



Slika 20 Prijelazne karakteristike proporcionalnog razvodnika

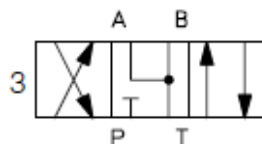
Prikazane karakteristike na slici 19 digitalizirane su pomoću besplatnog programskog paketa *Engauge Digitizer*, te pohranjene u obliku radne knjige za MS Excel. Radna knjiga s podacima karakteristika je zatim učitana u MATLAB te spremljena u matricnom obliku kako je opisano u odjeljku 2.2.2. Dobivene matrice predstavljaju parametre simulacijskog modela proporcionalnog razvodnika. Karakteristika elektromagneta, prikazana na slici 20, približno je opisana parametrima proporcionalnog aktuatora.

Elektromagnetski 4/3 razvodnik (6) korišten u eksperimentalnom postavu je ATOS DHI-071323, proizvođača ATOS. Podaci elektromagnetskog 4/3 razvodnika preuzeti su iz [8], a to su karakteristika zavisnosti protoka o padu tlaka A, prikazana na slici 21, te vremena uključivanja i isključivanja elektromagneta koja iznose 45ms i 20ms.



Slika 21 Karakteristika 4/3 razvodnika, krivulja A

Karakteristika zavisnosti protoka o padu tlaka spremljena je u matricnom obliku na isti način kao i karakteristike proporcionalnog razvodnika, te predstavlja parametre simulacijskog modela elektromagnetskog 4/3 razvodnika. Vrsta središnjeg položaja prikazana na slici 22, tzv. plivajući centar, dobivena je namještanjem početnih otvora prolaza P-A i P-B na pretpostavljenju negativnu vrijednost, a početnih otvora A-T i B-T na pretpostavljenju pozitivnu vrijednost.



Slika 22 Plivajući centar

Vrijeme uključivanja i isključivanja su parametri elektromagnetskog "on-off" aktuatora, te su namještena prema navedenim vrijednostima.

Podaci o tlačnim ventilima nisu poznati te su u simulacijskim modelima sigurnosnog ventila (12) i tlačnog regulacijskog ventila (8) ostavljene preddefinirane vrijednosti parametara. Poznati su jedino tlak otvaranja sigurnosnog ventila koji iznosi 100 bar, te tlak zatvaranja tlačnog regulacijskog ventila koji iznosi 80 bar.

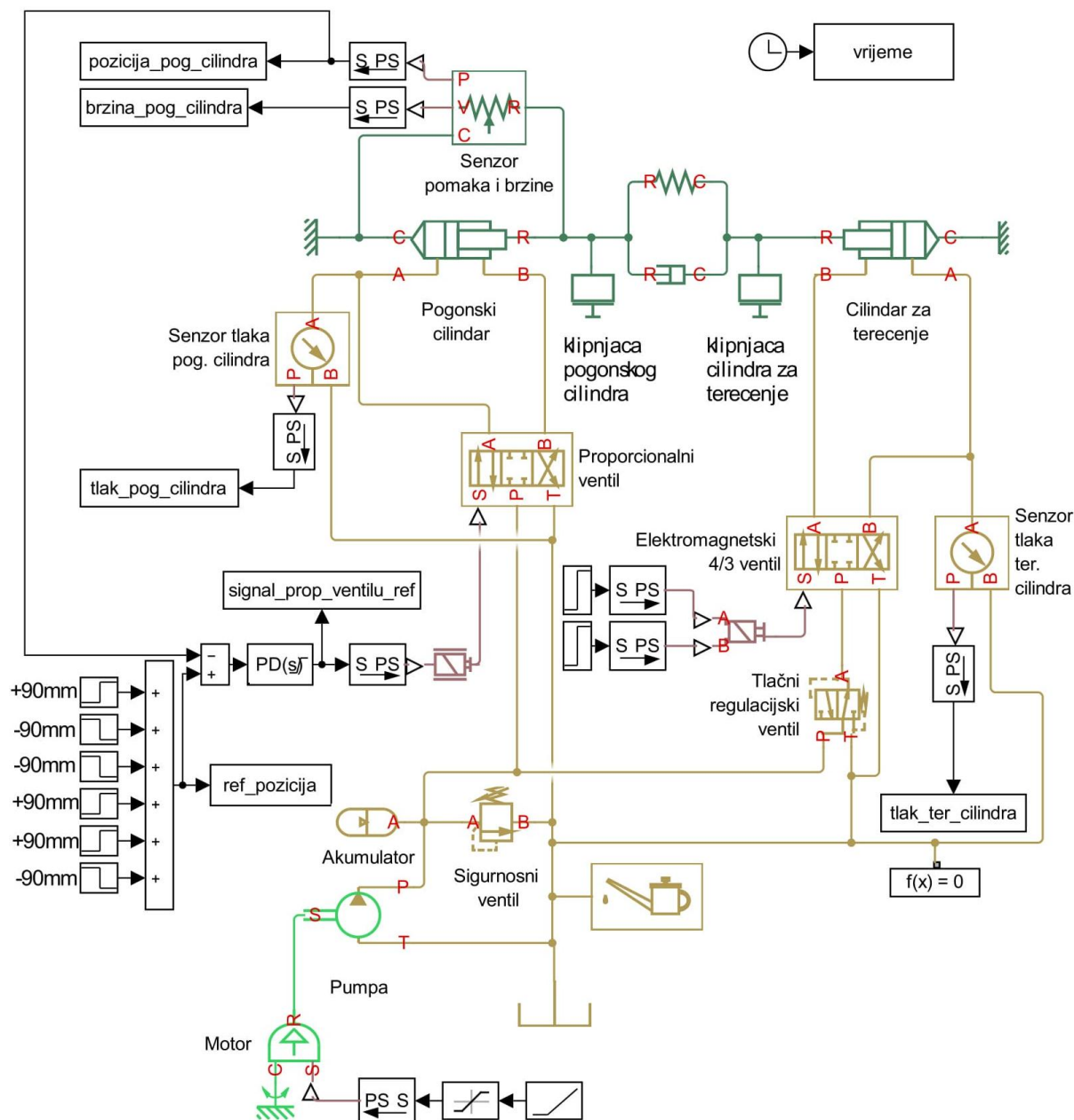
Elektromotor (17) nije modeliran, već je zamijenjen idealnim izvorom brzine. Brzina vrtnje koja je parametar idealnog izvora brzine namještena je tako da se u sustavu dobije protok od 3,7 l/min, te ona iznosi 1400 okr/min.

Tlačni filter (14), povratni filter ulja (16) i nepovratni ventil (15) su zanemareni i nisu postavljeni u simulacijski model.

Eksperimentalni rezultati dobiveni su korištenjem PD regulatora, stoga je u simulacijskom modelu postavljen isti regulator s pojačanjima  $K_p=40$  i  $K_d=0.2$ .

### 3.1.3. Simulacijski model

Slika 23 prikazuje gotovi simulacijski model eksperimentalnog postava elektrohidrauličkog servosustava za regulaciju translacijskog gibanja.



Slika 23 Simulacijski model postava za regulaciju translacijskog gibanja

## 3.2. Modul za regulaciju rotacijskog gibanja

### 3.2.1. Opis rada sustava



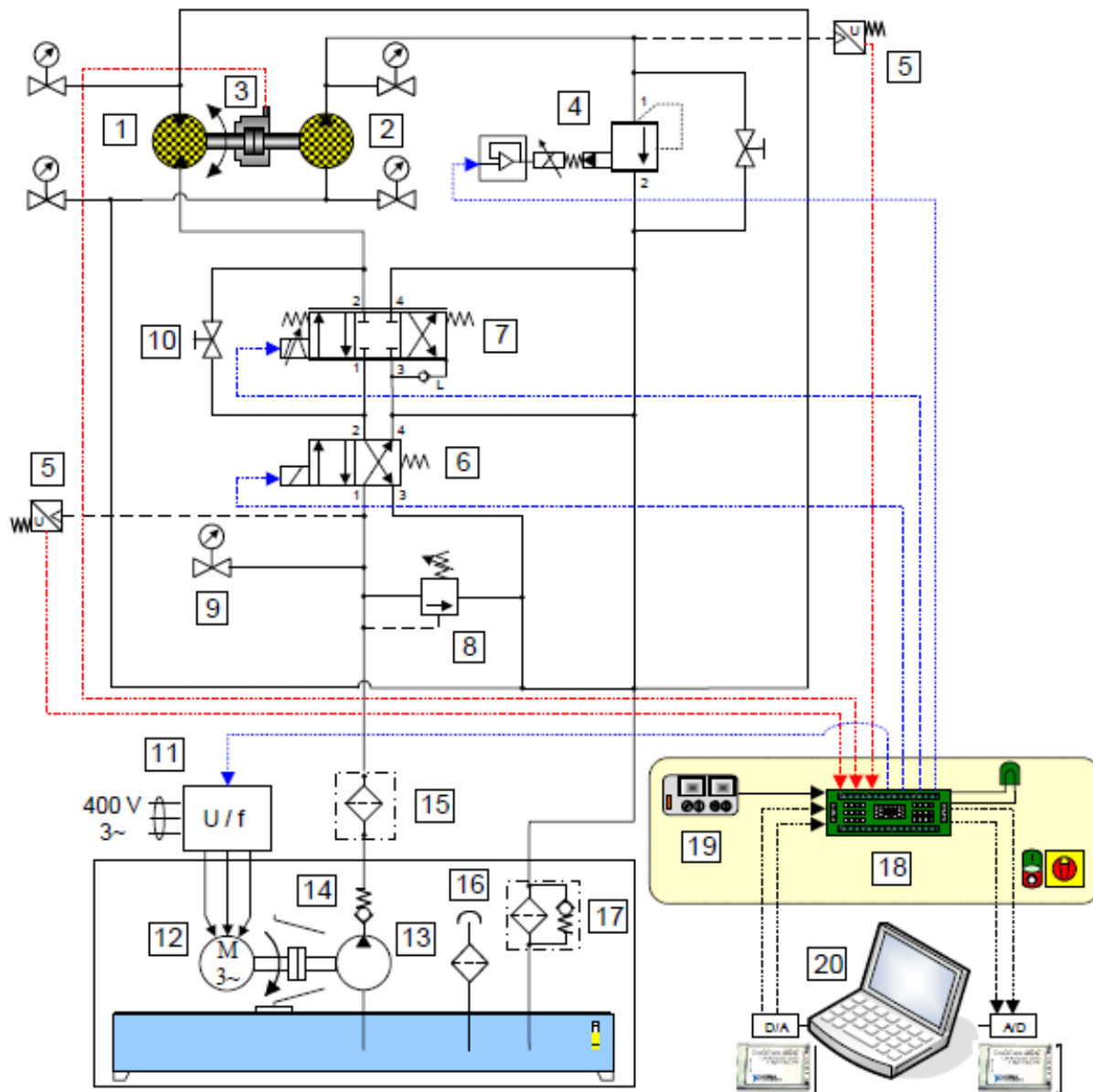
Slika 24 Eksperimentalni postav za regulaciju rotacijskog gibanja

Konstruktivna izvedba eksperimentalnog postava elektrohidrauličkog servosustava za regulaciju rotacijskog gibanja prikazana je na slici 24, a njena shema na slici 25.

Postav se sastoji od hidrauličkog motora (1), fiksnog volumena, čija se brzina vrtnje regulira pomoću servoventila (7). Servoventil propušta više ili manje ulja prema hidromotoru, te tako prigušujući protok kroz hidromotor upravlja brzinom hidromotora. Brzinu hidromotora moguće je regulirati i mijenjanjem protoka u sustavu reguliranjem brzine elektromotora (12). Opterećenje hidromotoru predstavlja pumpa za terećenje (2) s kojom je hidromotor čvrsto vezan. Kako bi se opterećenje moglo kontrolirati i mijenjati ugrađen je proporcionalni tlačni ventil (4), koji svojim tlakom otvaranja predstavlja otpor pumpi za terećenje, a samim time i tereti hidromotor. Brzina vrtnje hidromotora mjeri se inkrementalnim enkoderom (3), dok se tlak u sustavu nadzire sensorima tlaka (5). Maksimalni tlak u sustavu ograničava sigurnosni ventil (8). Za aktivaciju sustava koristi se elektromagnetski 4/2 ventil (6). Kako bi sustav mogao raditi on mora biti u lijevom krajnjem položaju.

Dobavu ulja osigurava agregat koji čine zupčasta pumpa (13), fiksnog volumena s vanjskim ozubljenjem, pogonjena elektromotorom (12) koji je upravljan frekvencijskim pretvaračem (11), nepovratni ventil (14) i povratni filter za pročišćavanje ulja (17). Ostale komponente u sustavu su tlačni filter ulja (15), manometri za nadzor tlaka (9) i slavina (10).

Upravljački dio sustava čine komponente (18, 19 i 20) koje mogu biti u raznim izvedbama, npr. razni PLC uređaji, prijenosna računala i sl.



Slika 25 Shema eksperimentalnog postava za regulaciju rotacijskog gibanja

### 3.2.2. Komponente i parametri

Hidraulički motor (1) kojem se regulira brzina vrtnje je prstenasti (gerotor) motor fiksnog volumena, proizvođača Lösi Hydraulik GmbH, oznake HK EPMM 008 C. Podaci o hidromotoru preuzeti su iz [9], a to su specifični volumen motora  $8,2 \text{ cm}^3/\text{okr}$  i ukupni stupanj korisnog djelovanja 73%.

Poznati parametri hidrauličkog motora u simulacijskom modelu su prema tome:

- volumen motora:  $8.2 \text{ cm}^3/\text{okr}$
- ukupni stupanj korisnog djelovanja: 0.73

Pretpostavljeni parametri modela pumpe fiksnog volumena su:

- nominalni tlak: 100 bar
- nominalna brzina vrtnje: 1800 okr/min

Vrijednosti ostalih parametara nisu poznate te su ostavljene preddefinirane vrijednosti.

Pumpa za terećenje (2) je ista pumpa koja se koristi u eksperimentalnom postavu za regulaciju translacijskog gibanja, pa su parametri simulacijskog modela pumpe fiksnog volumena za terećenje prepisani iz odjeljka 3.1.2.

Pumpa (13) je zupčasta pumpa, fiksnog volumena, s vanjskim ozubljenjem, proizvođača Vivoil, tip XV-1P/4.9. Podaci o pumpi preuzeti su iz [5], a to su specifični volumen pumpe koji iznosi  $4.94 \text{ cm}^3/\text{okr}$ , volumenski stupanj korisnog djelovanja koji je u rasponu od 0.91 – 0.96, te mehanički stupanj korisnog djelovanja koji je u rasponu od 0.85 – 0.9.

Poznati parametri pumpe fiksnog volumena u simulacijskom modelu su prema tome:

- volumen pumpe:  $4.94 \text{ cm}^3/\text{okr}$
- volumenski stupanj korisnog djelovanja: 0.93
- ukupni stupanj korisnog djelovanja: 0.8091

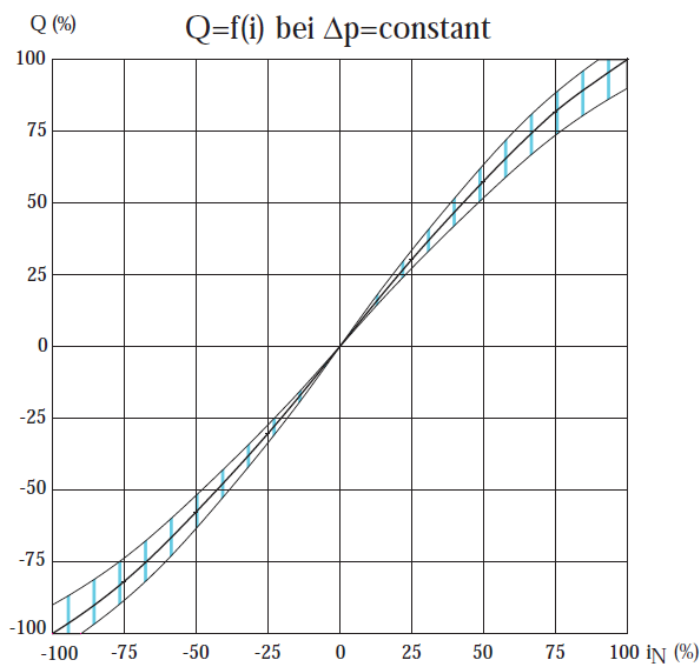
Pretpostavljeni parametri modela pumpe fiksnog volumena su:

- nominalni tlak: 250 bar
- nominalna brzina vrtnje: 3000 okr/min

Vrijednosti ostalih parametara nisu poznate te su ostavljene preddefinirane vrijednosti.



Za upravljanje brzinom vrtnje hidromotora korišten je servoventil (7) proizvođača Schneider Kreuznach, oznake HVM 061-005-1200-0C-E1. Podaci o servoventilu su preuzeti iz [10] a to su karakteristika zavisnosti protoka o upravljačkom signalu pri konstantnom tlaku, prikazana na slici 26, i nazivni protok od 5 l/min pri padu tlaka 70 bar. Karakteristika zavisnosti protoka o padu tlaka pohranjena je u matričnom obliku na isti način kao u odjeljku 3.1.2, te predstavlja parametre simulacijskog modela servoventila.



Slika 26 Karakteristika servoventila - rotacija

Parametri modela aktuatora servoventila nisu poznati te su ostavljene predefinirane vrijednosti.

Elektromagnetski 4/2 razvodnik (6) je ATOS DHI-0631/2/A 23, proizvođača ATOS. Podaci o razvodniku preuzeti su iz [8], a to su karakteristika zavisnosti protoka o padu tlaka koja je ista kao i za elektromagnetski 4/3 razvodnik prikazana u odjeljku 3.1.2, te vrijeme uključivanja i isključivanja elektromagneta koje je također isto. Karakteristika zavisnosti protoka o padu tlaka spremljena je u matričnom obliku na isti način kao u odjeljku 3.1.2, te predstavlja parametre simulacijskog modela elektromagnetskog 4/2 razvodnika.

U programskom paketu SimHydraulics ne postoji model 4/2 razvodnika, ali se može namjestiti srednji položaj tako da odgovara desnom položaju na način da se početni otvor prolaza P-A i B-T postave kao negativne vrijednosti, a početni otvor prolaza P-B i A-T kao pozitivne vrijednosti.

Vremena uključivanja i isključivanja elektromagneta su parametri simulacijskog modela elektromagnetskog "on-off" aktuatora.

Podaci o sigurnosnom ventilu (8) nisu poznati pa su u simulacijskom modelu ostavljene sve preddefinirane vrijednosti parametara, osim tlaka otvaranja sigurnosnog ventila koji je postavljen na 200 bar.

U programskom paketu SimHydraulics ne postoji komponenta za proporcionalni tlačni ventil (4), pa je korištena ista komponenta kao i za sigurnosni ventil, s time da je tlak otvaranja postavljen na 100 bar. Ostali podaci nisu poznati pa su ostavljene preddefinirane vrijednosti parametara.

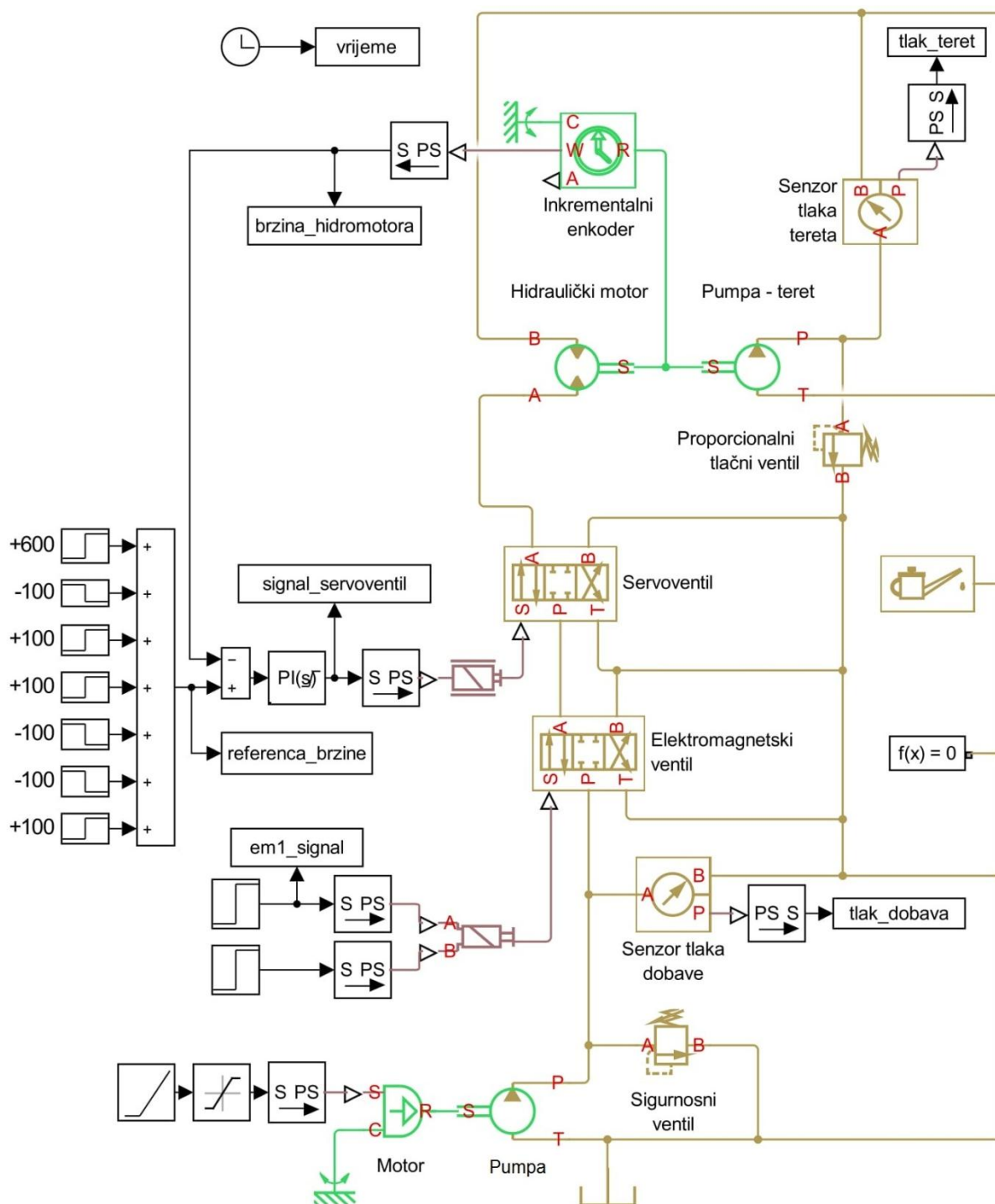
Elektromotor (12) je zamijenjen idealnim izvorom brzine vrtnje kojemu je brzina namještena tako da se u sustavu dobije protok od 7 l/min, te iznosi 1410 okr/min.

Tlačni filter (15), povratni filter ulja (17) i nepovratni ventil (14) su zanemareni i nisu postavljeni u simulacijski model sustava.

Upravljački dio sustava (18, 19, 20) predstavljen je PI regulatorom koji je korišten pri dobivanju eksperimentalnih rezultata. Pojačanja regulatora iznose  $K_p=0.05$  i  $K_i=0.05$ .

### 3.2.3. Simulacijski model

Slika 27 prikazuje gotovi simulacijski model eksperimentalnog postava elektrohidrauličkog servosustava za regulaciju rotacijskog gibanja.



Slika 27 Simulacijski model postava za regulaciju brzine vrtnje

### 3.3. Modul za regulaciju sile

#### 3.3.1. Opis rada sustava



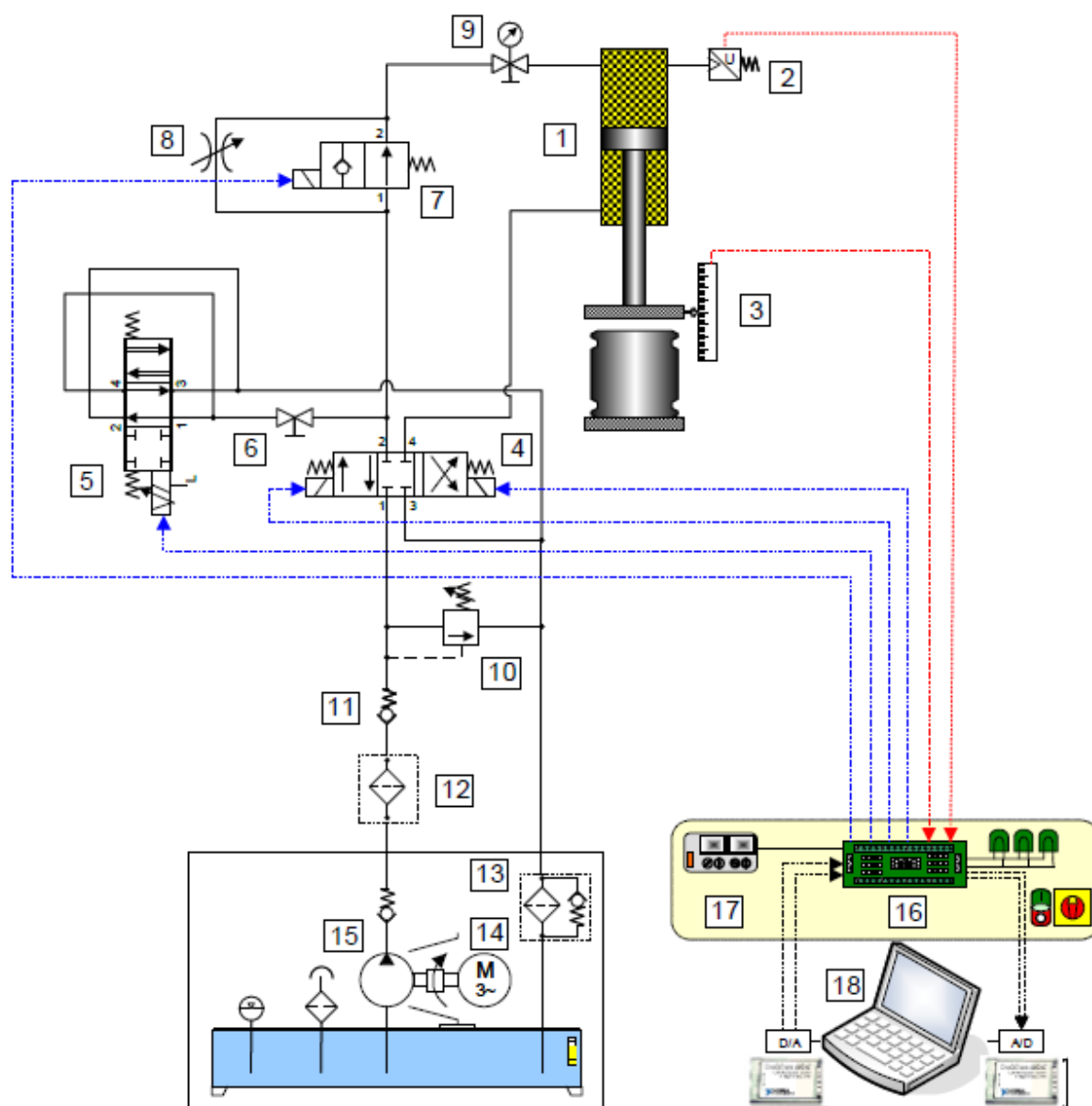
Slika 28 Eksperimentalni postav za regulaciju sile

Konstruktivna izvedba eksperimentalnog postava elektrohidrauličkog servosustava za regulaciju sile prikazana je na slici 28, a njena shema prikazana je na slici 29.

Postav se sastoji od hidrauličkog cilindra (1) pomoću kojeg se preša gumeni blok. Za upravljanje cilindrom koristi se elektromagnetski 4/3 razvodnik (4) i servoventil (5). Elektromagnetski 4/3 razvodnik služi za uvlačenje i izvlačenje klipnjače cilindra, a servoventil služi za regulaciju tlaka u cilindru te tako regulira i silu prešanja gume. Servoventil je spojen na način da propušta ulje više ili manje prema spremniku te tako regulira tlak u radnoj komori cilindra koji se mjeri senzorom tlaka (2). Za mjerenje položaja klipnjače cilindra koristi se magnetski pretvornik pomaka (3). Brzina pomicanja klipnjače može se mijenjati pomoću elektromagnetskog 2/2 razvodnika (7) i prigušnice (8). Ako je elektromagnetski 2/2 razvodnik otvoren ulje prolazi kroz njega, a ako je zatvoren ulje prolazi kroz prigušnicu koja usporava pomicanje klipnjače. Maksimalni tlak u sustavu ograničava sigurnosni ventil (10).

Dobavu ulja osigurava agregat koji čine zupčasta pumpa (15), fiksno volumena s vanjskim ozubljenjem, pogonjena elektromotorom (14), povratni filter za pročišćavanje ulja (13). Ostale komponente u sustavu su tlačni filter ulja (12), manometri za nadzor tlaka (9), slavina (6) i nepovratni ventil (11).

Upravljački dio sustava čine komponente (16, 17 i 18) koje mogu biti u raznim izvedbama, npr. razni PLC uređaji, prijenosna računala i sl.



Slika 29 Shema eksperimentalnog postava za regulaciju sile

### 3.3.2. Komponente i parametri

Za hidraulički cilindar (1) jedini poznati podaci su dimenzije klipa i klipnjače. Promjer klipa je 80 mm, promjer klipnjače 60 mm, te hod cilindra 300 mm.

Poznati parametri hidrauličkog cilindra u simulacijskom modelu su prema tome:

- površina klipa na strani hidrauličkog priključka A: 5026,5 mm<sup>2</sup>
- površina klipa na strani hidrauličkog priključka B: 2199,1 mm<sup>2</sup>
- hod klipnjače cilindra: 300mm

Pretpostavljeni parametri su:

- mrtvi volumen na strani hidrauličkog priključka A i B: 10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>

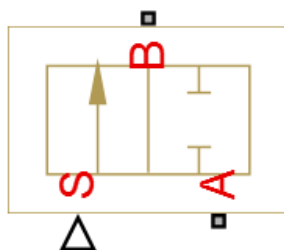
Ostali parametri nisu poznati stoga su ostavljene predefimirane vrijednosti. Osim parametara komponente, potrebno je zadati i početne uvjete u kojima se cilindar nalazi na početku simulacije. Početni uvjeti hidrauličkih cilindara su:

- položaj klipa u odnosu na hidraulički priključak A: 0.01 m
- početni tlak u komori hidrauličkog priključka A: 0 Pa
- početni tlak u komori hidrauličkog priključka B: 0 Pa

Pumpa (15) je ista pumpa koja se koristi u eksperimentalnom postavu za regulaciju translacijskog gibanja, pa su parametri simulacijskog modela pumpe fiksnog volumena prepisani iz odjeljka 3.1.2.

Korišteni servoventil (5) je servoventil proizvođača Schneider Kreuznach, oznake HVM 025-005-1260-4G BY. Podaci o servoventilu su preuzeti iz [11], a to su karakteristika zavisnosti protoka o upravljačkom signalu pri konstantnom tlaku, prikazana na slici 31 i nazivni protok od 5 l/min pri padu tlaka 15 bar.

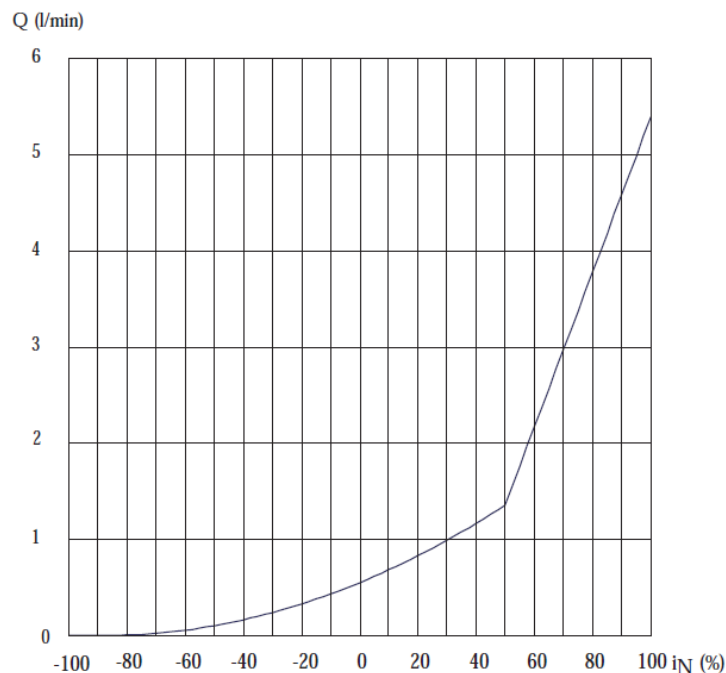
SimHydraulics ne sadrži u svojoj biblioteci vrstu 4/3 razvodnika sa položajima kakve ima ovaj servoventil. Međutim pošto su priključci servoventila spojeni tako da prosljeđuje više ili manje ulja u spremnik korištena je komponenta 2/2 razvodnika, prikazana na slici 30.



Slika 30 Simbol 2/2 razvodnik

Karakteristika zavisnosti protoka o padu tlaka pohranjena je u matričnom obliku na isti način kao u odjeljku 3.1.2, te predstavlja parametre simulacijskog modela servoventila.

Parametri modela aktuatora servoventila nisu poznati, te su ostavljene preddefinirane vrijednosti.



**Slika 31 Karakteristika servoventila - sila**

Elektromagnetski 4/3 razvodnik (4) je elektromagnetski razvodnik proizvođača ATOS. Podaci o razvodniku preuzeti su iz [8], a to su karakteristika zavisnosti protoka o padu tlaka koja je ista kao i za elektromagnetski 4/3 razvodnik prikazana u odjeljku 3.1.2, te vrijeme uključivanja i isključivanja elektromagneta koja su također ista. Karakteristika zavisnosti protoka o padu tlaka pohranjena je u matričnom obliku na isti način kao u odjeljku 3.1.2, te predstavlja parametre simulacijskog modela elektromagnetskog 4/3 razvodnika.

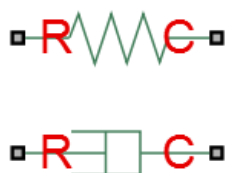
Podaci o sigurnosnom ventilu (8) nisu poznati, pa su u simulacijskom modelu ostavljene preddefinirane vrijednosti parametara, osim tlaka otvaranja sigurnosnog ventila koji je postavljen na 100 bar.

Elektromotor (14) je zamijenjen idealnim izvorom brzine vrtnje kojemu je brzina namještena tako da se u sustavu dobije protok od 3,7 l/min, te iznosi 1530 okr/min.

Tlačni filter (12), povratni filter ulja (13) i nepovratni ventil (11) su zanemareni i nisu postavljeni u simulacijski model sustava.

Upravljački dio sustava (16, 17, 18) predstavljen je PID regulatorom koji je korišten pri dobivanju eksperimentalnih rezultata. Pojačanja regulatora iznose  $K_p=20$ ,  $K_i=2$  i  $K_d=0.5$ .

Gumeni blok, kojeg cilindar preša, predstavljen je paralelnim spojem opruge i prigušivača, čiji su simboli prikazani na slici 32.



Slika 32 Simboli opruge i prigušivača

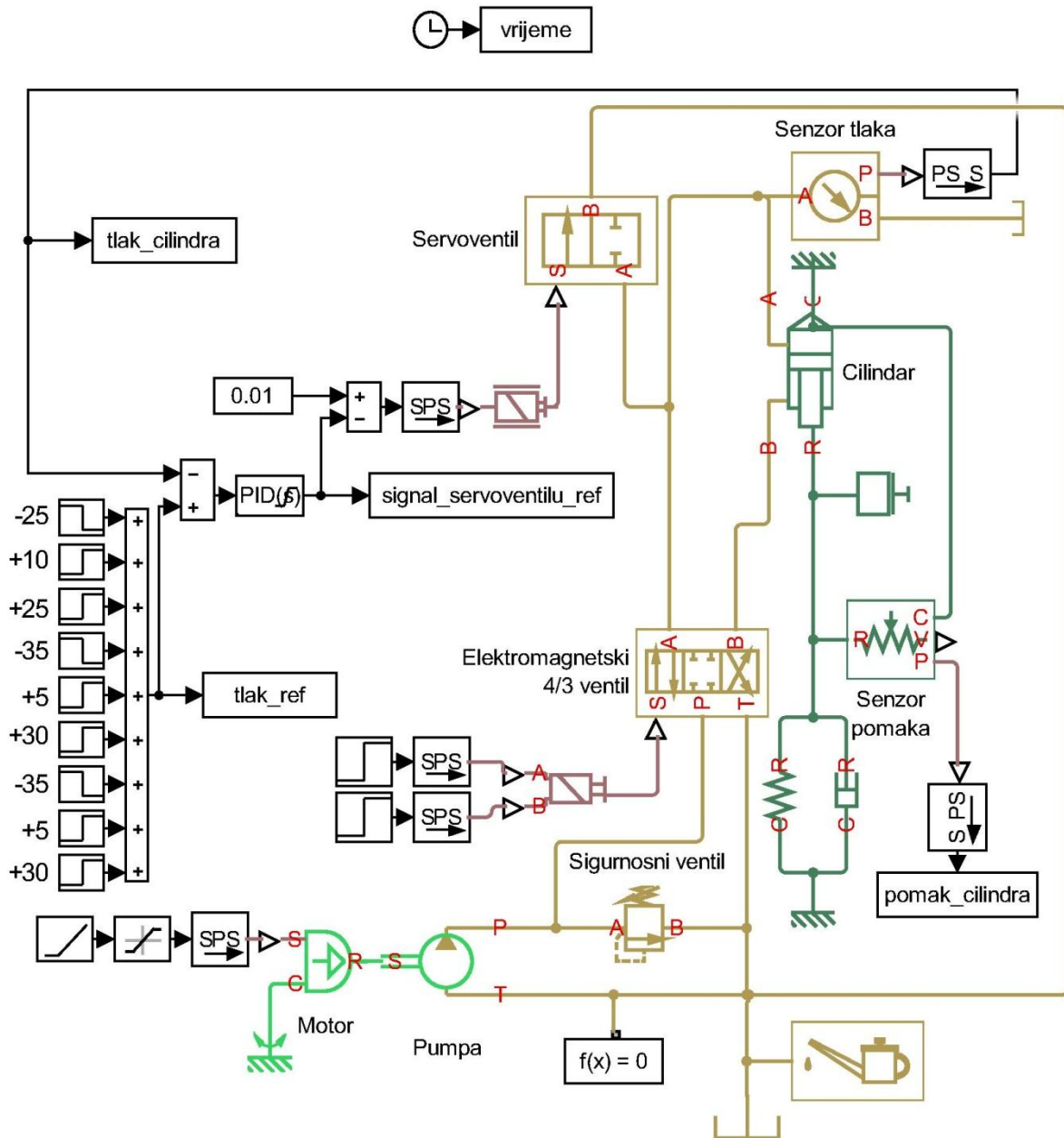
Vrijednosti parametara su pretpostavljene te iznose:

- krutost opruge:  $10^6$  N/m
- koeficijent prigušenja: 100 Ns/m



### 3.3.3. Simulacijski model

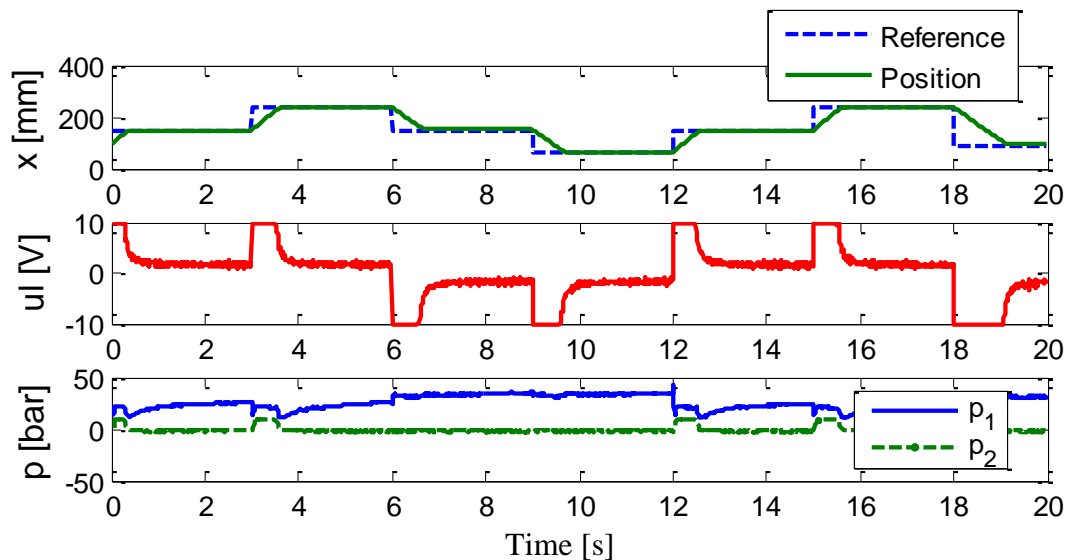
Slika 33 prikazuje gotovi simulacijski model eksperimentalnog postava elektrohidrauličkog servosustava za regulaciju sile.



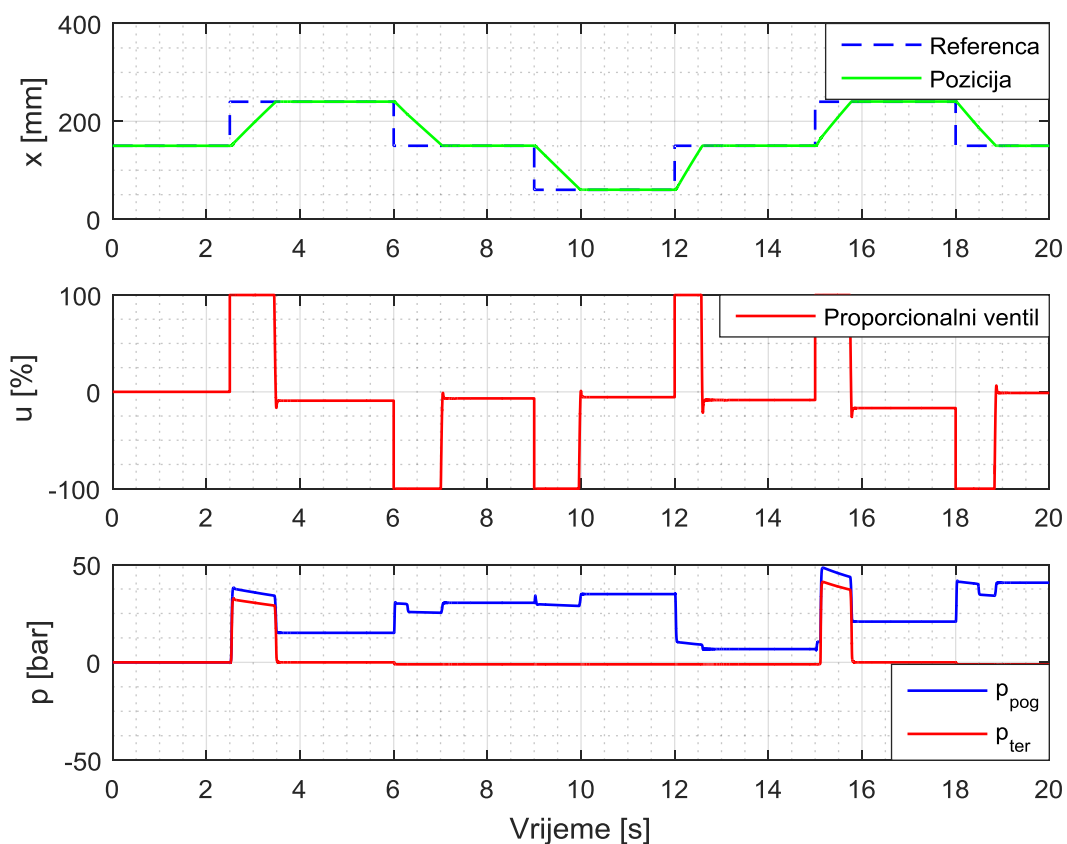
Slika 33 Simulacijski model postava za regulaciju sile

## 4. USPOREDNA ANALIZA SIMULACIJSKIH I EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

### 4.1. Rezultati modula za regulaciju translacijskog gibanja



Slika 34 Eksperimentalni rezultati – translacija



Slika 35 Simulacijski rezultati - translacija

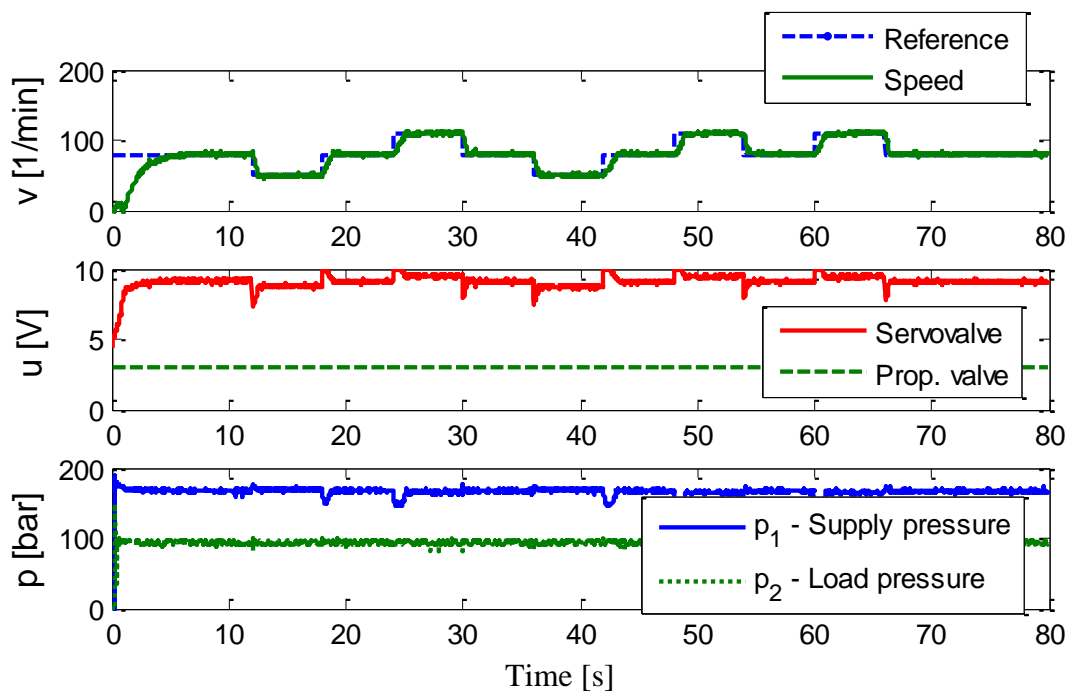
Slika 34 prikazuje eksperimentalne rezultate dobivene na postavu elektrohidrauličkog servosustava za regulaciju translacijskog gibanja. Prvi dijagram prikazuje referentnu i mjerenu poziciju klipnjače glavnog cilindra u ovisnosti o vremenu, drugi dijagram prikazuje upravljački signal na proporcionalnom razvodniku u ovisnosti o vremenu, a treći dijagram prikazuje tlak unutar glavnog cilindra ( $p_1$ ) i tlak unutar cilindra za terećenje ( $p_2$ ) također u ovisnosti o vremenu. Rezultati su dobiveni za slučaj kada terećenje glavnog cilindra nije uključeno (elektromagnetski ventil (6) nalazi se u srednjem položaju).

Na slici 35 prikazani su rezultati dobiveni simulacijskim modelom sustava za regulaciju translacijskog gibanja. Dijagrami prikazuju iste veličine kao i oni sa slike 34. Iz prvog dijagrama vidimo da pozicija cilindra u simulacijskom modelu odgovara stvarnoj poziciji cilindra u eksperimentalnom sustavu. Kako u simulacijskom modelu zadajemo postotak upravljačkog signala umjesto napona na proporcionalnom ventilu, tako i dobivene vrijednosti u drugom dijagramu dobivamo u rasponu od  $\pm 100\%$  umjesto u rasponu od  $\pm 10V$ . Ako u obzir uzmemo da je vrijednost od  $-100\%$  upravljačkog signala ekvivalentna vrijednosti napona od  $-10V$  na proporcionalnom ventilu, a vrijednost  $+100\%$  upravljačkog signala ekvivalentna vrijednosti napona od  $+10V$  na proporcionalnom ventilu tada možemo zaključiti da simulacijski rezultati odgovaraju rezultatima dobivenim u eksperimentalnom sustavu, uz manja odstupanja. U trećem dijagramu dobivamo jednaku najveću vrijednost tlaka unutar pogonskog cilindra, u iznosu od 50 bara, u eksperimentalnim i simulacijskim rezultatima. Međutim, raspodjela tlakova unutar oba cilindra u ovisnosti o vremenu se razlikuje.

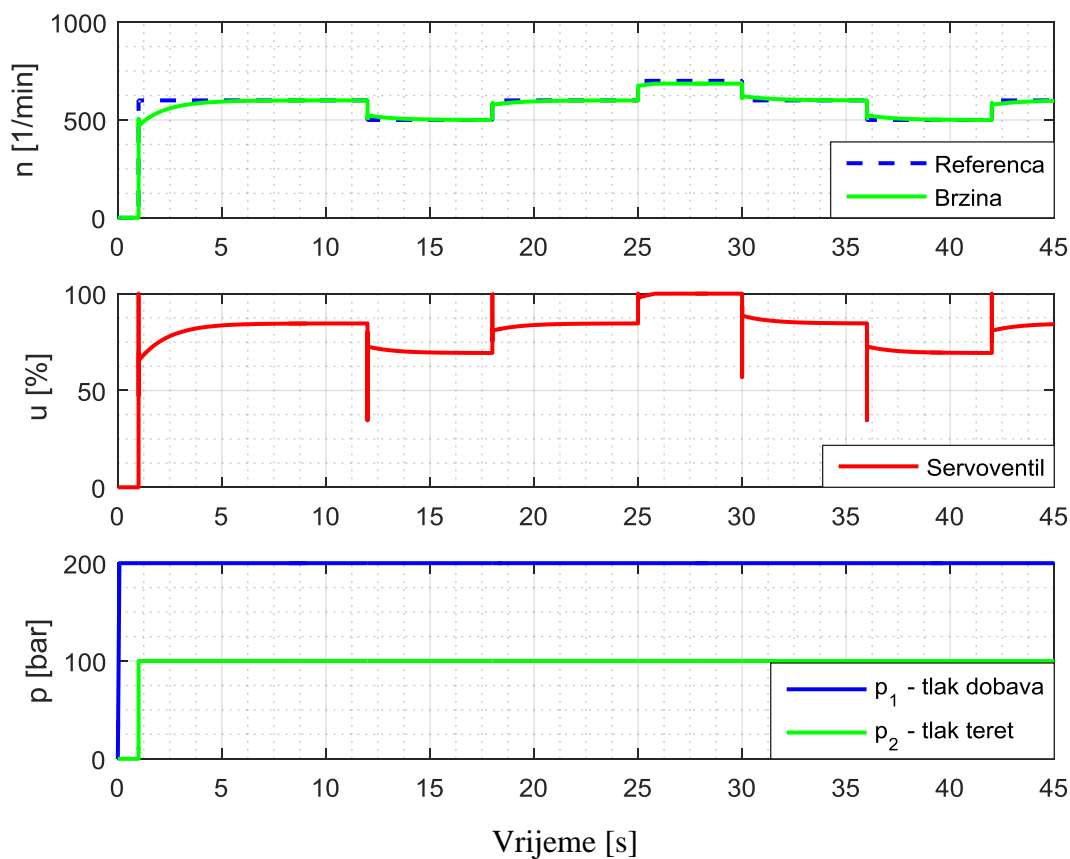
Do razlika između eksperimentalnih i simulacijskih rezultata prvenstveno dolazi zbog toga što u simulacijskom modelu nisu uključene sve komponente sustava. Također, kako je navedeno u poglavlju 2.2., matematički modeli komponenti ne uzimaju u obzir neke stvarne fizičke pojave poput trenja, elastičnosti, kompresibilnosti fluida i sl. Nadalje, svi traženi parametri unutar komponenti nisu bili poznati, pa su tako neke tražene vrijednosti pretpostavljene, što je uvelike moglo utjecati na konačne simulacijske rezultate.

Ako zanemarimo manja odstupanja među rezultatima, nastala zbog neizbježnih razlika između eksperimentalnog i simulacijskog modela, možemo zaključiti da simulacijski rezultati dovoljno vjerno odgovaraju eksperimentalnim rezultatima. Kako je glavni zadatak eksperimentalnog sustava regulacija pozicije klipnjače cilindra, najvažnije je da pozicija klipnjače dobivena simulacijskim modelom što vjernije odgovara stvarnoj poziciji klipnjače u eksperimentalnom sustavu. Jednako važno je i da je upravljački signal dobiven simulacijskim modelom što sličniji stvarnom upravljačkom signalu. Kako su razlike u oba dijagrama minimalne možemo zaključiti da je simulacijski model dovoljno precizan.

### 4.2. Rezultati modula za regulaciju rotacijskog gibanja



Slika 36 Eksperimentalni rezultati - rotacija



Slika 37 Simulacijski rezultati - rotacija

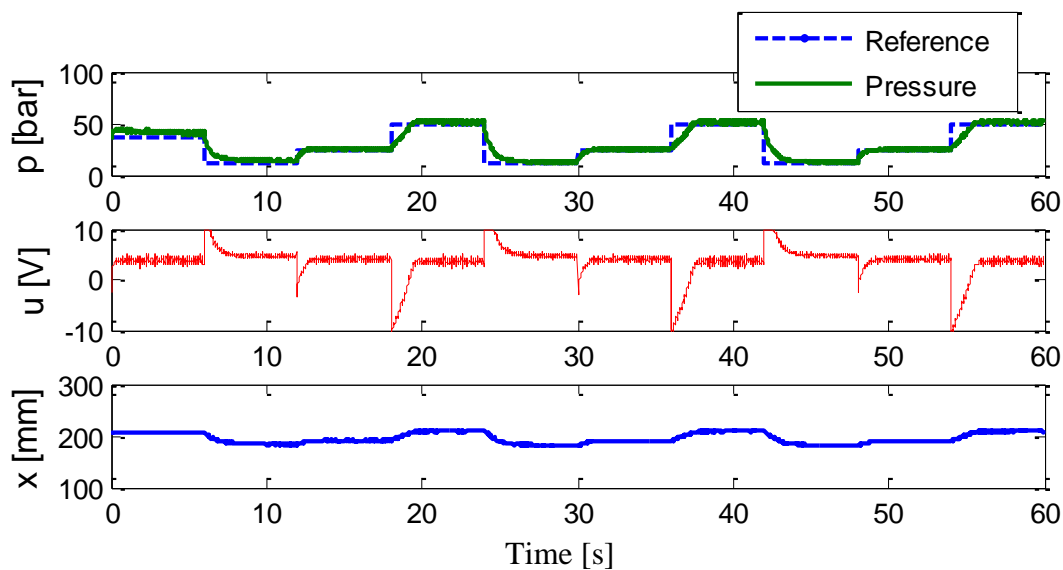
Slika 36 prikazuje eksperimentalne rezultate dobivene na postavu elektrohidrauličkog servosustava za regulaciju rotacijskog gibanja. Prvi dijagram prikazuje referentnu i mjerenu brzinu vrtnje hidromotora u ovisnosti o vremenu, drugi dijagram prikazuje upravljački signal na servoventilu u ovisnosti o vremenu, a treći dijagram prikazuje tlak unutar voda dobave ( $p_1$ ) i tlak na pumpi za terećenje ( $p_2$ ) također u ovisnosti o vremenu. Rezultati su dobiveni za slučaj konstantnog tlaka na pumpi za terećenje.

Na slici 37 prikazani su rezultati dobiveni simulacijskim modelom sustava za regulaciju rotacijskog gibanja. Dijagrami prikazuju iste veličine kao i oni sa slike 36., ali je vrijeme simulacije smanjeno na 45 sekundi pošto se u eksperimentalnim rezultatima zadana referenca nakon 42 sekunde ponavlja. Po obliku dobivenih rezultata, iz prvog dijagrama, vidimo da brzina hidromotora u simulacijskom modelu odgovara stvarnoj brzini hidromotora u eksperimentalnom sustavu. Isto kao i kod postava za regulaciju translacijskog gibanja u simulacijskom modelu zadajemo postotak upravljačkog signala umjesto napona na servoventilu. Zbog toga dobivene vrijednosti u drugom dijagramu dobivamo u rasponu od  $\pm 100\%$  umjesto u rasponu od  $\pm 10V$ . Pošto se hidromotor na postavu vrti uvijek u istom smjeru upravljački signal je uvijek pozitivan, 0-100% u simulacijskom modelu odnosno 0-10V u eksperimentalnom modelu. Usporedbom rezultata vidimo da oblik upravljačkog signala u simulacijskom modelu, odgovara obliku upravljačkog signala u eksperimentalnom modelu, uz manja odstupanja. U trećem dijagramu vidimo da tlak na pumpi za terećenje u simulacijskom modelu u potpunosti odgovara istom tlaku u eksperimentalnom sustavu. Međutim, tlak dobave, u eksperimentalnom sustavu, pada pri povećavanju brzine vrtnje, što se u simulacijskim rezultatima ne može vidjeti.

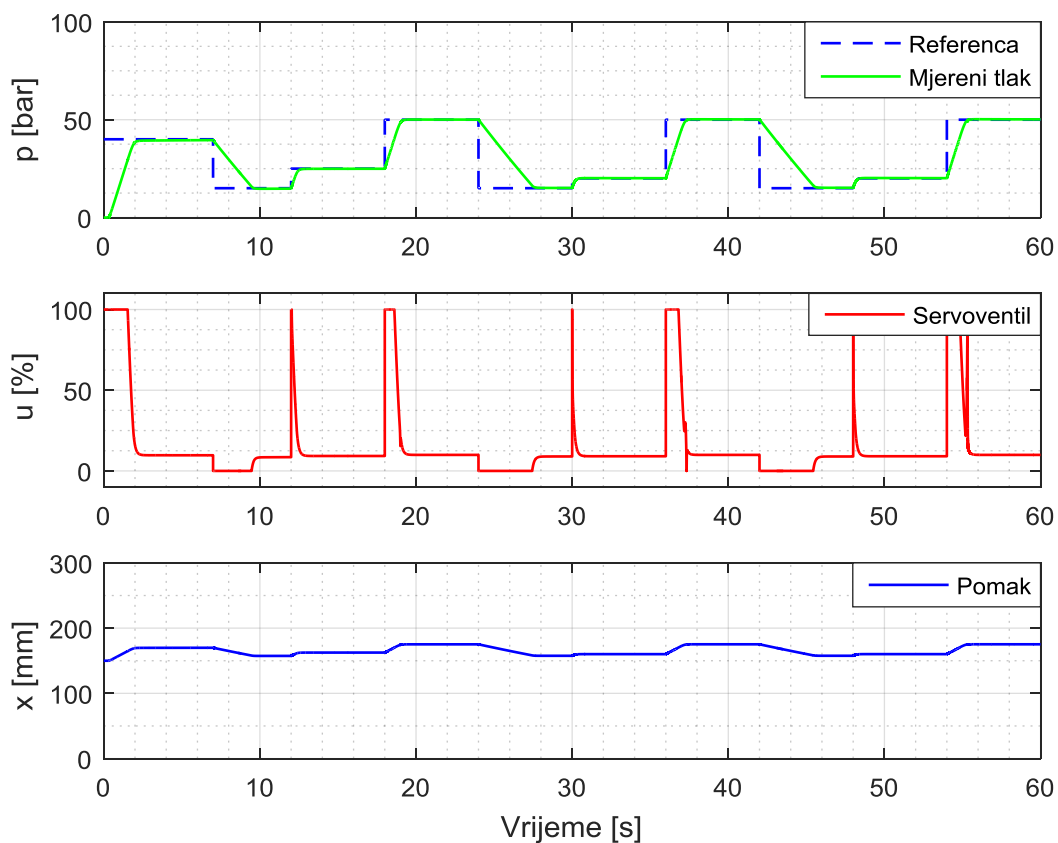
Do razlika između eksperimentalnih i simulacijskih rezultata prvenstveno dolazi zbog toga što su u simulacijskom modelu, zbog nepostojanja modela nekih stvarnih komponenti, korišteni zamjenski modeli traženih komponenti. Također, kao i u prethodnom sustavu, matematički modeli komponenti ne uzimaju u obzir neke stvarne fizičke pojave poput inercije, elastičnosti, kompresibilnosti fluida i sl. Nadalje, ni u ovom simulacijskom modelu, svi traženi parametri unutar komponenti nisu bili poznati, pa su tako neke tražene vrijednosti pretpostavljene, što je uvelike moglo utjecati na konačne simulacijske rezultate.

Manja odstupanja među rezultatima, nastala zbog neizbježnih razlika između eksperimentalnog i simulacijskog modela, možemo zanemariti i zaključiti da simulacijski rezultati dovoljno vjerno odgovaraju eksperimentalnim rezultatima. Kako je glavni zadatak eksperimentalnog sustava regulacija brzine hidromotora, najvažnije je da je brzina vrtnje hidromotora, dobivena simulacijskim modelom, što sličnija stvarnoj brzini vrtnje u eksperimentalnom sustavu. Jednako važno je i da je upravljački signal dobiven simulacijskim modelom što sličniji stvarnom upravljačkom signalu. Kako su razlike u obliku rezultata na oba dijagrama minimalne možemo zaključiti da je simulacijski model dovoljno precizan.

### 4.3. Rezultati modula za regulaciju sile



Slika 38 Eksperimentalni rezultati - sila



Slika 39 Simulacijski rezultati - sila

Slika 38 prikazuje eksperimentalne rezultate dobivene na postavu elektrohidrauličkog servosustava za regulaciju sile. Prvi dijagram prikazuje referentni i mjereni tlak na cilindru u ovisnosti o vremenu, drugi dijagram prikazuje upravljački signal na servoventilu u ovisnosti o vremenu, a treći dijagram prikazuje položaj klipnjače cilindra u ovisnosti o vremenu.

Na slici 39 prikazani su rezultati dobiveni simulacijskim modelom sustava za regulaciju sile. Dijagrami prikazuju iste veličine kao i oni sa slike 38. U sva tri dijagrama vidljiva je razlika u rezultatima do druge sekunde. Razlika je nastala zbog toga što eksperimentalni rezultati prikazuju stanje sustava u kojem je tlak već povišen tj. na gumeni blok već djeluje neka sila. U simulacijskim rezultatima prve dvije sekunde prikazano je izlaženje klipnjače iz početnog položaja, koji označava tek početak kontakta s gumenim blokom, do pritiskanja gumenog bloka kada tlak počinje rasti. Iz prvog dijagrama vidljivo je da su pri povećavanju tlaka simulacijski i eksperimentalni rezultati gotovo jednaki. Međutim, pri snižavanju tlaka dolazi do razlike u rezultatima. U drugom dijagramu dolazi do najveće razlike između rezultata zbog toga što je stvarni servoventil kojemu se zadaje upravljački signal u rasponu od  $\pm 10V$  zamijenjen modelom servoventila kojemu se upravljački signal zadaje u rasponu od 0% do 100%. Zamjena je napravljena zbog nepostojanja odgovarajuće komponente u programskom paketu. Ako u obzir uzmemo da se u eksperimentalnom sustavu povećava vrijednost upravljačkog signala kako bi se smanjio tlak, a u simulacijskom sustavu se isti učinak postiže smanjenjem vrijednosti upravljačkog signala, i obrnuto, možemo vidjeti poveznicu između rezultata. U trećem dijagramu također dolazi do odstupanja rezultata što je direktno posljedica nepoznavanja svojstva gumenog bloka.

Osim već navedenih razlika između eksperimentalnog i simulacijskog sustava, do razlika između eksperimentalnih i simulacijskih rezultata dolazi i zbog istih razloga kao i u prethodna dva simulirana sustava.

Iako je glavni zadatak eksperimentalnog sustava regulacija tlaka, te je tlak u simulacijskom modelu sličan tlaku u eksperimentalnom sustavu, ovaj simulacijski model nije toliko precizan kao prethodna dva zbog većeg broja odstupanja u njegovoj izradi koja su bila neizbježna.

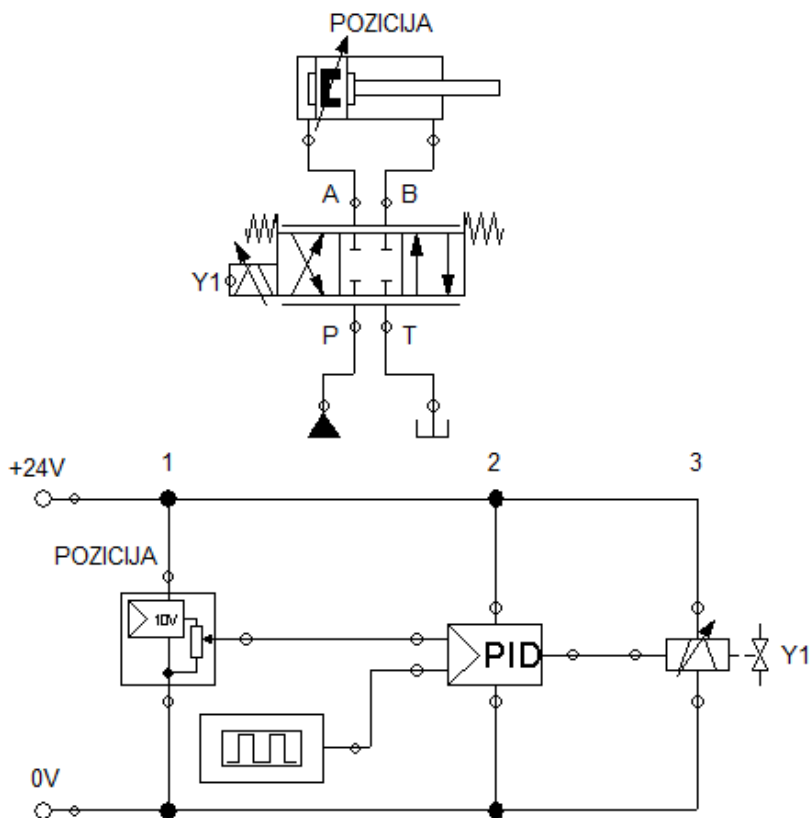
## 5. USPOREDBA RADA U PROGRAMSKOM PAKETU SimHydraulics S RADOM U PROGRAMSKOM PAKETU FluidSIM

Osim programskog paketa SimHydraulics, za simulaciju tehničkih sustava postoji još mnoštvo programskih paketa. Među njima postoje programski alati namijenjeni za simulaciju sustava fluidne tehnike poput DSHplus, Automation Studio, FluidSIM i sl. Za usporedbu sa SimHydraulics izabran je programski alat FluidSIM.

FluidSIM je programski alat namijenjen za modeliranje, simuliranje i analizu elektropneumatskih i elektrohidrauličkih sustava. Osim toga, FluidSIM se često koristi u edukaciji tehničara i inženjera koji rade s pneumatskim i hidrauličkim sustavima.

### 5.1 Usporedba načina rada

Način rada u FluidSIM programskom alatu je sličan načinu rada u SimHydraulics. Modeli se sastavljaju od komponenti koje predstavljaju hidrauličke komponente, te se komponente spajaju na isti način kao u stvarnosti. Stoga i ovdje simulacijski modeli izgledaju kao shematski prikazi stvarnog sustava, kao što je prikazano na slici 40.



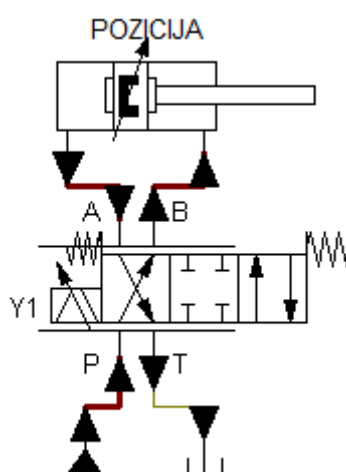
Slika 40 Jednostavni hidraulički krug u FluidSIM programskom alatu



Iako je rad u programskom alatu FluidSIM naizgled sličan radu u SimHydraulics programskom paketu postoje neke bitne razlike. Prva bitna razlika je što FluidSIM ne sadrži modele mehaničkih komponenti (npr. opruge, prigušivač, mase i sl.) pa nije moguće povezati hidrauličke komponente s mehaničkim dijelom sustava, tj. nije uopće moguće modelirati mehanički dio sustava. Zbog toga za izradu simulacijskih modela spomenuta tri elektrohidraulička servosustava, njihove sheme bi se trebale u potpunosti promijeniti i prilagoditi (npr. spojene klipnjače se ne mogu modelirati kao čvrsti spoj).

Druga razlika je u modeliranju upravljačkog sustava. Upravljački sustav u FluidSIM programskom alatu se može modelirati na dva načina. Prvi način je izrada upravljačke logike u sklopu modela PLC uređaja, a drugi način je izrada upravljačke logike i regulatora izradom električnih shema.

Nadalje, treća razlika je u izvođenju simulacije i analiziranju rezultata. Kako bi se u SimHydraulics programskom paketu dobili rezultati, potrebno je prvo izvršiti cijelu simulaciju, čiji je tijek unaprijed definiran, dok u FluidSIM programskom alatu korisnik može tijekom izvođenja simulacije utjecati na tijek simulacije (npr. može elektromagnetske "on-off" ventile aktivirati po želji u bilo kojem trenutku izvođenja simulacije), a rezultati se na dijagramu iscrtavaju za vrijeme izvođenja simulacije. Također vrijeme izvođenja simulacije nije predefinirano kao u SimHydraulics programskom paketu, već se simulacija može pauzirati ili zaustaviti u bilo kojem trenutku. Tijekom izvođenja simulacije na hidrauličkim shemama u FluidSIM simulacijskim modelima prikazan je smjer gibanja fluida u vodovima, te pomicanje komponenti hidrauličkog kruga (npr. trenutni položaj razvodnika, položaj klipnjače i sl.) kao što je prikazano na slici 41, što olakšava razumijevanje rada sustava.



Slika 41 Isječak simulacije u FluidSIM programskom alatu

## 5.2 Usporedba hidrauličkih komponenti

Najveća razlika u komponentama je u parametrima modela komponenti. Komponente u programskom alatu FluidSIM zahtijevaju podatke iz tehničke dokumentacije, ali u puno manjem broju.

Što se tiče energetskog dijela sustava, pumpa fiksnog volumena zahtjeva konstantnu brzinu vrtnje kao parametar i ne sadrži mogućnost modeliranja pogona pumpe, za razliku od SimHydraulics programskog paketa gdje je moguće modelirati i pogonski elektromotor i zadavati promjenjivu brzinu vrtnje.

Razlike postoje i u komponentama upravljačkog dijela hidrauličkog kruga. FluidSIM sadrži puno više modela razvodnika i ventila, uključujući proporcionalne tlačne ventile koje SimHydraulics ne sadrži. Moguće je izvesti bilo koju kombinaciju razvodnih položaja razvodnika i modelirati razvodnike s 2, 3 ili 4 razvodna položaja u kombinaciji s do 8 hidrauličkih priključaka. Za razliku od programskog paketa SimHydraulics, koji sadrži samo elektromagnetski aktuator, FluidSIM sadrži više različitih aktuatora razvodnika (npr. ručni, mehanički, hidraulički i elektromagnetski aktuator). Međutim, parametri razvodnika u FluidSIM programskom alatu su pojednostavljeni i nije moguće unijeti točne karakteristike iz tehničke dokumentacije.

Od komponenata izvršnog dijela hidrauličkog kruga FluidSIM programski alat također sadrži jednoradne i dvoradne cilindre i hidromotor. Parametri cilindra i motora su gotovo jednaki kao i u SimHydraulics programskom paketu. Glavna razlika je u tome što se izvršni dio ovdje ne može povezati s mehaničkim dijelom sustava pa se opterećenje mora unaprijed znati. Opterećenje cilindra se u FluidSIM zadaje kao jedan od parametara komponente te može biti masa koju cilindar pomiče, trenje, konstantna sila otpora ili sila koja opterećuje klipnjaču u ovisnosti o položaju klipnjače. Opterećenje hidromotora je također jedan od parametara komponente, te se može zadati jedino kao konstantni moment.

Prema prikazanome, možemo zaključiti da svaki programski paket ima svoje prednosti i nedostatke. FluidSIM je bolji za simuliranje jednostavnih hidrauličkih krugova kod kojih se koristi logičko upravljanje, dok je SimHydraulics bolji za modeliranje i simuliranje složenijih hidrauličkih krugova u koje spadaju elektrohidraulički servosustavi prikazani u poglavlju 3.

## 6. ZAKLJUČAK

Kroz rad je prikazan proces modeliranja i simulacije eksperimentalnih postava elektrohidrauličkih servosustava u SimHydraulics programskom paketu. Najveća prednost izrade simulacijskih modela u SimHydraulics programskom paketu je to što je on sastavni dio programa MATLAB/Simulink. Kako se unutar programa Simulink nalazi velik broj programskih paketa on omogućava jednostavnu izradu simulacijskih modela složenih sustava koje sadrže komponente iz različitih grana strojarstva. Samim time olakšava se analiza hidrauličkih sustava, te izrada upravljačkih sustava. Sljedeća prednost je ta što su matematički modeli svih komponenti već napravljeni, pa na korisniku ostaje samo izraditi model i upisati parametre modela, što olakšava dimenzioniranje hidrauličkog sustava i izbor komponenti.

Nedostatak programskog paketa SimHydraulics je taj što ne sadrži modele svih hidrauličkih komponenti što otežava izradu detaljnih modela, te dovodi do odstupanja u rezultatima.

Kvaliteta dobivenih rezultata uvelike ovisi o detaljnosti modela. Najveća odstupanja u dobivenim rezultatima pojavila su se upravo zbog idealiziranja sustava i nepoznavanja svih potrebnih parametara. Međutim, bez obzira na navedena odstupanja možemo zaključiti da simulacijski modeli dovoljno dobro opisuju ponašanje stvarnog sustava, te se mogu koristiti u svrhu projektiranja i izrade cjelokupnog sustava i sustava upravljanja.

Iako su simulacijski modeli dovoljno precizni moguće ih je unaprijediti dodavanjem modela hidrauličkih komponenti koje su zanemarene (npr. filteri), detaljnim modeliranjem elektromotora koji su u postojećim simulacijskim modelima idealizirani i modeliranjem senzora koji su također idealizirani. Osim toga, točnost modela se može unaprijediti zamjenom pretpostavljenih i nepoznatih parametara točnim parametrima. Krajnji korak u postizanju potpuno točnih simulacijskih sustava bila bi izrada modela komponenti koje SimHydraulics ne sadrži (npr. proporcionalni tlačni ventil u sustavu za regulaciju rotacijskog gibanja).

Na kraju možemo zaključiti da se simulacijama, koliko god one detaljne bile, može vjerovati do određene razine, no ipak zadnji korak u projektiranju hidrauličkih servosustava uvijek mora biti eksperimentalna provjera.

**LITERATURA:**

- [1] Šitum, Ž., Essert M., Žilić T., Milić V. - Design and Construction of Hydraulic Servomechanisms for Position, Velocity and Force Control, Proceedings of the 8<sup>th</sup> ASEE Global Colloquium on Engineering Education, Budapest, Hungary, 2009.
- [2] Šitum, Ž. - Predavanja iz kolegija "Pneumatika i hidraulika", FSB, Zagreb, 2015.
- [3] Petrić, J. - Predavanja iz kolegija "Pneumatika i hidraulika", FSB, Zagreb, 2015.
- [4] Petrić, J. - Hidraulika i pneumatika, 1.dio: Hidraulika, FSB, Zagreb, 2012.
- [5] Tehnička dokumentacija - hidraulička pumpa Vivoil
- [6] Tehnička dokumentacija - hidroakumulator HYDAC SBO140-1,4E1/112U-140AB
- [7] Tehnička dokumentacija - proporcionalni razvodnik Bosch-Rexroth 4WRAE607-2X/G24K31/A1V
- [8] Tehnička dokumentacija - elektromagnetski razvodnik ATOS DHI-071323/DHI-0631/2/A23
- [9] Tehnička dokumentacija - hidraulički motor Lösi Hydraulik GmbH HK EPMM 008 C
- [10] Tehnička dokumentacija - servoventil Schneider Kreuznach HVM 061-005-1200-0C-E1
- [11] Tehnička dokumentacija - servoventil Schneider Kreuznach HVM 025-005-1260-4G BY
- [12] MathWorks Support - <https://www.mathworks.com/help/simulink/>
- [13] FluidSIM Support - <https://www.art-systems.de/www/site/en/fluidsim/>