

Simulacija elektrohidrauličkih sustava

Mrvoš, Marina

Undergraduate thesis / Završni rad

2012

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:506052>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**

Repository / Repozitorij:

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



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Marina Mrvoš

Zagreb, 2012.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Šitum

Student:

Marina Mrvoš

Zagreb, 2012.

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

Zahvaljujem se svojem mentoru na strpljenju i razumijevanju iskazanom tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se svom suprugu na velikoj podršci i pomoći tijekom studija.

Marina Mrvoš

SADRŽAJ

| | |
|---|----|
| Sadržaj..... | I |
| Popis slika..... | II |
| 1. Uvod..... | 1 |
| 2. Programski paket Matlab/SimHydraulics..... | 2 |
| 2.1. Simulacijski program Simulink..... | 2 |
| 2.1.1. Osnovni elementi Simscape biblioteke..... | 3 |
| 2.1.2. Mehanički elementi..... | 4 |
| 2.1.3. Hidraulički elementi..... | 8 |
| 2.1.4. Elementi Simulink biblioteke..... | 11 |
| 2.2. Primjer simulacije sustava koristeći Simulink SimScape..... | 12 |
| 2.3. Ograničenja simulacijskog programa Simulink i biblioteke SimScape..... | 14 |
| 3. Simulacija elektrohidrauličkih servosustava..... | 15 |
| 3.1. Regulacija rotacijskog gibanja..... | 15 |
| 3.1.1. Eksperimentalni rezultati..... | 16 |
| 3.1.2. Simulink model..... | 17 |
| 3.1.3. Rezultati dobiveni simulacijom..... | 18 |
| 3.2. Regulacija translacijskog gibanja..... | 20 |
| 3.2.1. Eksperimentalni rezultati..... | 21 |
| 3.2.2. Simulink model..... | 21 |
| 3.2.3. Rezultati dobiveni simulacijom..... | 24 |
| 3.3. Regulacija sile..... | 25 |
| 3.3.1. Eksperimentalni rezultati..... | 26 |
| 3.3.2. Simulink model..... | 27 |
| 3.3.3. Rezultati dobiveni simulacijom..... | 28 |
| 4. Usporedba SimHydraulics paketa sa sličnim paketima..... | 29 |
| 4.1. Programski paket FESTO FluidSIM..... | 29 |
| 4.2. Programski paket DSH Plus..... | 31 |
| 5. Zaključak..... | 34 |
| 6. Literatura..... | 35 |

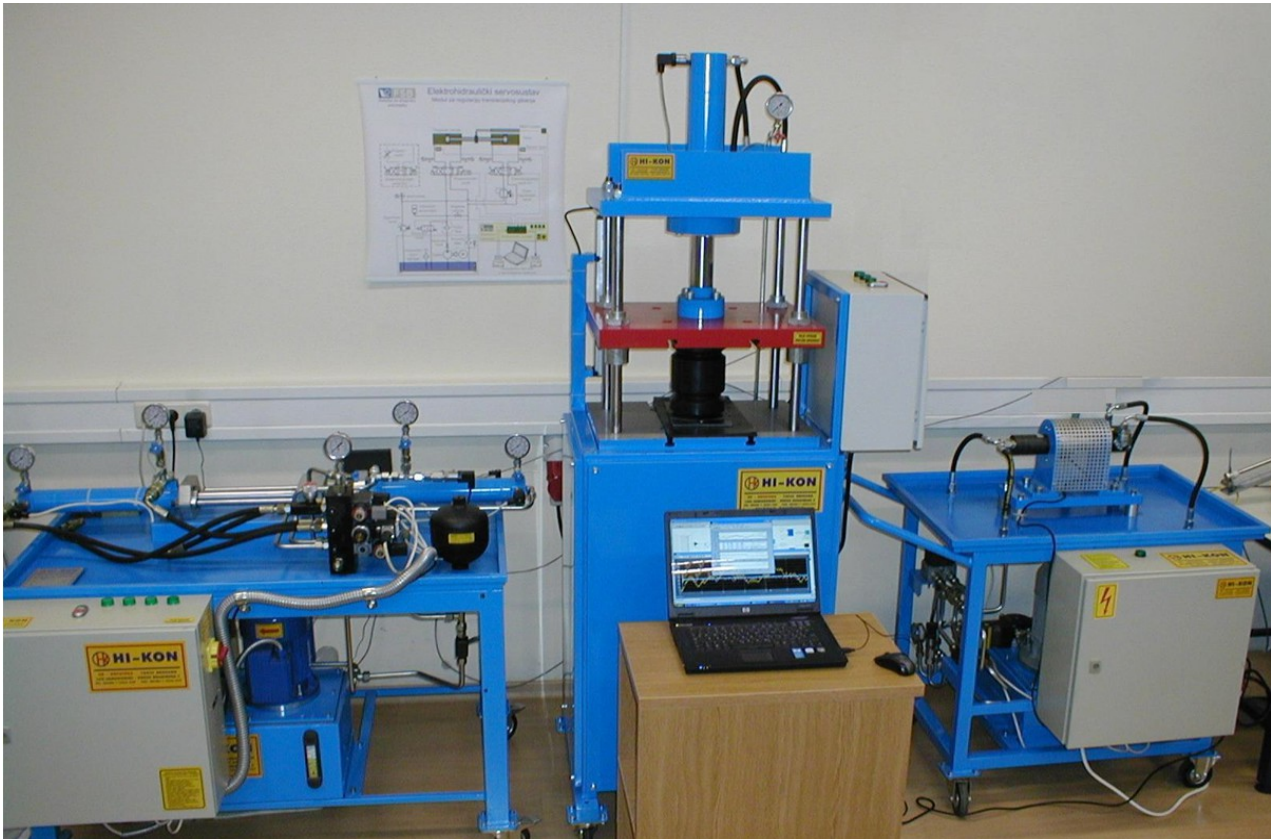
POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1: Eksperimentalni postav servohidrauličkih sustava..... | 1 |
| Slika 2: Simulacijski program Simulink sa otvorenom SimHydraulics bibliotekom..... | 2 |
| Slika 3: Simulink-PS converter..... | 3 |
| Slika 4: PS-Simulink Converter..... | 4 |
| Slika 5: Solver configuration..... | 4 |
| Slika 6: Referentna točka rotacijskog gibanja..... | 4 |
| Slika 7: Inercijski blok..... | 5 |
| Slika 8: Referentna točka translacijskog gibanja..... | 5 |
| Slika 9: Masa..... | 6 |
| Slika 10: Translacijska opruga..... | 6 |
| Slika 11: Translacijska prigušnica..... | 6 |
| Slika 12: Idealni izvor kutne brzine..... | 7 |
| Slika 13: Idealni senzor rotacijskog gibanja..... | 7 |
| Slika 14: Idealni senzor translacijskog gibanja..... | 7 |
| Slika 15: Fluid u sustavu..... | 8 |
| Slika 16: Referentna točka tlaka..... | 8 |
| Slika 17: Linearni hidraulički otpor..... | 8 |
| Slika 18: Nepovratni ventil..... | 9 |
| Slika 19: Ventil za ograničenje tlaka..... | 9 |
| Slika 20: Idealni hidraulički senzor tlaka..... | 9 |
| Slika 21: Dvoradni cilindar..... | 10 |
| Slika 22: Pumpa sa konstantnim protokom..... | 10 |
| Slika 23: Hidraulički motor..... | 11 |
| Slika 24: 4/3 Razvodnik..... | 11 |
| Slika 25: PID regulator..... | 12 |
| Slika 26: PID regulator – podsustav..... | 12 |
| Slika 27: Primjer Simulink-SimHydraulics modela..... | 13 |
| Slika 28: Rezultati simulacije primjera Simulink-SimHydraulics modela..... | 14 |
| Slika 29: Regulacija rotacijskog gibanja..... | 15 |
| Slika 30: Eksperimentalni rezultati modela za regulaciju brzine vrtnje..... | 16 |
| Slika 31: Regulacija brzine vrtnje – Simulink model..... | 17 |
| Slika 32: Parametri glavne pumpe..... | 18 |
| Slika 33: Rezultati dobiveni simulacijom sustava..... | 19 |
| Slika 34: Regulacija translacijskog gibanja..... | 20 |
| Slika 35: Eksperimentalni rezultati modela za regulaciju translacijskog gibanja..... | 21 |
| Slika 36: Parametri glavnog cilindra..... | 22 |
| Slika 37: Simulink model regulacije translacijskog gibanja..... | 23 |
| Slika 38: Rezultati dobiveni simulacijom sustava..... | 24 |
| Slika 39: Regulacija sile..... | 25 |
| Slika 40: Eksperimentalni rezultati modela za regulaciju sile..... | 26 |
| Slika 41: Regulacija sile..... | 27 |
| Slika 42: Element linearnog hidrauličkog otpora..... | 27 |
| Slika 43: Simulink model – rezultati simulacije..... | 28 |
| Slika 44: FluidSIM sučelje..... | 29 |
| Slika 45: Detaljan opis odabrane pumpe..... | 30 |
| Slika 46: Interaktivna simulacija..... | 30 |
| Slika 47: Prilagodba razvodnika..... | 31 |

| | |
|--|----|
| Slika 48: DSH Plus – model regulacije brzine vrtnje..... | 32 |
| Slika 49: Odziv sustava na referencu brzine vrtnje..... | 33 |

1. Uvod

Laboratorij za automatiku i robotiku na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, između ostalog, sadrži i 3 eksperimentalna servohidraulička sustava. Ti su sustavi namijenjeni za demonstraciju rada hidrauličkih sustava i njihovu primjenu.



Slika 1: Eksperimentalni postav servohidrauličkih sustava

U ovome radu će se prikazati mogućnosti simulacijskog programa *Simulink* (okolina unutar programskog paketa *Matlab*) i njegove biblioteke *SimHydraulics*. Za navedene servohidrauličke sustave postoje rezultati mjerenja dobiveni eksperimentalno, tako da će se ti isti sustavi pokušati modelirati unutar simulacijskog programa *Simulink*. Rezultati simulacije će se usporediti sa rezultatima dobivenim eksperimentalno, te će se pokušati dati uvid u prednosti i nedostatke simulacijskog programa *Simulink*. Uz to, dati će se detaljan pregled korištenih elemenata pojedinih biblioteka, te će se kroz primjer opisati princip rada u simulacijskom programu *Simulink*.

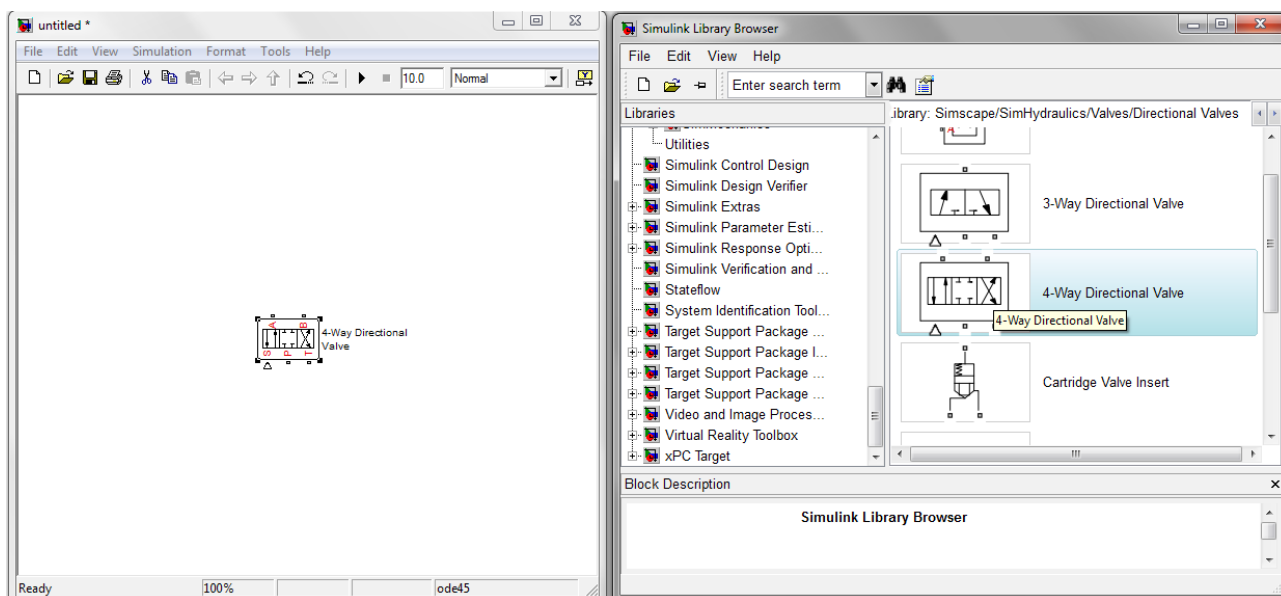
Kako bi se bolje mogli prikazati prednosti i nedostaci simulacijskog programa *Simulink*, ukratko će se opisati i rad u drugim programima za simulaciju hidrauličkih sustava te će se zatim usporediti sa simulacijskim programom *Simulink*. Na taj način će se dobiti realniji osjećaj (ne)jednostavnosti simulacijskog programa *Simulink*.

2. PROGRAMSKI PAKET *MATLAB/SIMHYDRAULICS*

Matlab je programsko okruženje za razvoj algoritama, analizu podataka, vizualizaciju i numeričke proračune. *Matlab* se koristi u mnogim primjenama kao što su obrada signala i slikovnih datoteka, komunikacija, sinteza i razvoj regulatora, ... U današnje vrijeme je postao najrašireniji alat za brojne inženjerske primjene

2.1. Simulacijski program *Simulink*

Simulacijski program *Simulink* je okruženje unutar *Matlab* paketa, a služi za simulaciju i konstruiranje na temelju modela (eng. *Model-Based Design*). *Simulink* pruža interaktivno grafičko okruženje i široku biblioteku blokova kojima se simulira, implementira i testira široki spektar sustava. U nastavi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje se koristi u brojnim predmetima u svrhu sinteze regulatora i simulacije jednostavnih sustava (npr. simulacija električnih, robotskih, hidrauličkih, pneumatskih, mehaničkih sustava). *Simscape* je jedna od *Simulink* biblioteka koja omogućuje okolinu za modeliranje i simuliranje fizikalnih sustava, bilo mehaničkih, električnih, hidrauličkih ili sustava iz drugih fizikalnih domena. Također, pruža osnovne gradivne elemente iz navedenih domena koji se mogu povezati u modele fizikalnih dijelova kao što su električni motori, hidraulički ventili i sl.



Slika 2: Simulacijski program *Simulink* sa otvorenom *SimHydraulics* bibliotekom

Elementi *Simscape* biblioteke se malo razlikuju od ostalih elemenata simulacijskog programa *Simulink* po tome što su svi signali koji ulaze ili izlaze iz elemenata – fizikalni signali kojima se

mora dodijeliti neka mjerna jedinica. Primjerice, pumpa kao ulazni signal ima brzinu vrtnje, a kao izlazni signal protok. Srećom, simulacijski program *Simulink* je dovoljno "pаметan" pa nije moguće spojiti elemente koji nisu predviđeni da se spajaju (primjerice osovina na senzor tlaka).

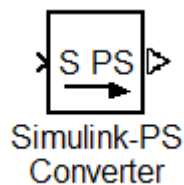
Simscape ima veliku vlastitu biblioteku dijelova koji su raspoređeni po domeni primjene. Neki od njih su: *SimMechanics* (elementi mehaničkih sustava), *SimHydraulics* (elementi za hidrauliku) i *Foundation Library* (osnovni elementi pojedinih okolina). Navedene biblioteke su korištene tijekom izrade završnog rada, imaju veliki broj različitih elemenata pa će dalje u radu biti opisane samo komponente korištene u radu.

2.1.1. Osnovni elementi Simscape biblioteke

Kao što je već napomenuto, u *SimScape* biblioteci svaki element zahtijeva određeni fizikalni ulazni signal (ili signale) i daje određeni izlazni signal. Najčešće kratice koje se koriste kod mehaničkih elemenata su:

- **C** (eng. *case* – kućište)
- **R** (eng. *rod* – štap)
- **S** (eng. *signal* - signal)
- **T** (eng. *tank* - spremnik)

Simulink-PS Converter (Simulink to Physical signal)

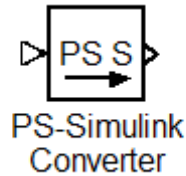


Slika 3: Simulink-PS converter

Obzirom da *Simscape* elementi daju fizikalne signale, oni nisu kompatibilni sa signalom koji daju osnovni *Simulink* elementi. Ovaj blok pretvara "običan" *Simulink* signal u fizikalni. U samome bloku je nužno odrediti mjernu jedinicu (npr. za brzinu vrtnje: rpm, rad/s, rad/min, ...). Ovi su blokovi nužni jer je to jedini način na koji se može znati koje mjerne jedinice korisnik koristi prilikom izrade modela.

Element se nalazi u biblioteci *Simscape* pod dijelom *Utilities*.

PS-Simulink Converter (Physical signal to Simulink)

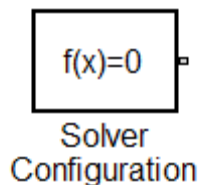


Slika 4: PS-Simulink Converter

Obrnuto prethodnom elementu, ovaj element pretvara fizikalni signal u *Simulink* signal. Također je u samome bloku nužno odrediti mjernu jedinicu.

Element se nalazi u biblioteci *Simscape* pod dijelom *Utilities*.

Solver configuration



Slika 5: Solver configuration

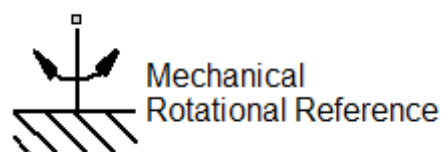
Ovaj element predstavlja konfiguraciju numeričke metode, odnosno toleranciju i tip. Element je potrebno spojiti bilo gdje na mjestu fizikalnog signala. Ukoliko su u jednom modelu, dva potpuno odvojena fizikalna modela, nužno je na oba postaviti ovaj element.

Kako bi simulacija radila bez poteškoća, preporučeno je u samom *Simulink* modelu (*Simulation – Configuration parameters*) podesiti *ode15s* kao solver konfiguraciju umjesto zadanog *ode45*.

Element se nalazi u biblioteci *Simscape* pod dijelom *Utilities*.

2.1.2. Mehanički elementi

Referentna točka rotacijskog gibanja

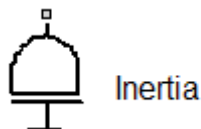


Slika 6: Referentna točka rotacijskog gibanja

Kao što mu naziv govori, ovaj element predstavlja referentnu točku rotacijskog gibanja. Primjerice, ukoliko se postavi senzor brzine vrtnje, on će vratiti relativnu brzinu između neke dvije točke. Ukoliko se želi dobiti apsolutna brzina, jednu točku senzora je potrebno postaviti na ovaj element.

Element se nalazi u biblioteci *Simscape/Foundation Library* pod dijelom *Mechanical/Rotational Elements*.

Inercijski blok

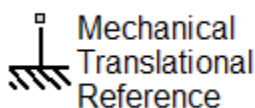


Slika 7: Inercijski blok

Elementi poput pumpe ili motora su idealni, što znači da se podrazumijeva da nema utjecaja ni trenja niti inercije. Ovo može biti problematično jer ukoliko se primjerice pumpi promijeni referentna ulazna veličina, protok će se promijeniti u nultoj jedinici vremena (broj okretaja može doslovce pasti sa 500 na -500 $^{\circ}/\text{min}$ u nultoj jedinici vremena). Ova pretpostavka je pogodna za pogonsku pumpu kojoj se broj okretaja zapravo ni ne mijenja, ali problem nastaje kada se primjerice motoru mijenja smjer vrtnje. Kako bi sustav bio realniji, na *R* dio se može staviti inercijski blok i u njemu definirati veličina inercije.

Ovaj element se nalazi u biblioteci *Simscape/Foundation Library* pod dijelom *Mechanical/Rotational Elements*.

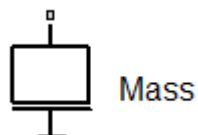
Referentna točka translacijskog gibanja



Slika 8: Referentna točka translacijskog gibanja

Ovaj blok predstavlja referentnu točku za translacijsko gibanje, odnosno nepomični oslonac. Ovaj element se nalazi u biblioteci *Simscape/Foundation Library* pod dijelom *Mechanical/Translational Elements*.

Masa



Slika 9: Masa

Ukoliko je na neki R dio potrebno staviti masu, koristi se ovaj blok. Masa se definira unutar bloka.

Element se nalazi u biblioteci *Simscape/Foundation Library* pod dijelom *Mechanical/Translational Elements*.

Translacijska opruga



Translational Spring

Slika 10: Translacijska opruga

Ovaj element predstavlja oprugu kojoj je moguće definirati krutost i početnu deformaciju. Element se nalazi u biblioteci *Simscape/Foundation Library* pod dijelom *Mechanical/Translational Elements*.

Translacijska prigušnica



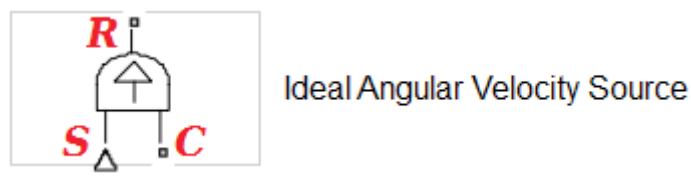
Translational Damper

Slika 11: Translacijska prigušnica

Ovaj element predstavlja prigušnicu kojoj je moguće definirati faktor prigušenja ($\frac{N}{(m/s)}$).

Element se nalazi u biblioteci *Simscape/Foundation Library* pod dijelom *Mechanical/Translational Elements*.

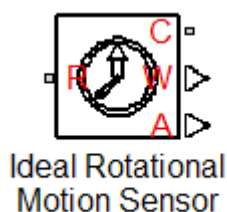
Idealni izvor kutne brzine



Slika 12: Idealni izvor kutne brzine

Putem ulaza S regulira se relativna brzina vrtnje između točaka R i C . Ukoliko se želi podešavati brzina osovine S , najbolje je postaviti točku C na referentnu točku rotacijskog gibanja. Na taj način će brzina vrtnje osovine odgovarati brzini ulaznog signala S . Element se nalazi u biblioteci *Simscape/Foundation Library* pod dijelom *Mechanical/Mechanical Sensors and Sources*.

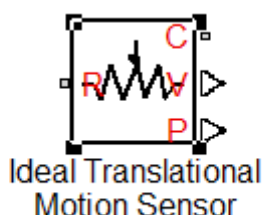
Idealni senzor rotacijskog gibanja



Slika 13: Idealni senzor rotacijskog gibanja

Senzor rotacijskog gibanja mjeri relativni pomak između točaka R i C . Na izlazu W se dobiva kutna brzina, a na izlazu A kutni zakret. Element se nalazi u biblioteci *Simscape/Foundation Library* pod dijelom *Mechanical/Mechanical Sensors and Sources*.

Idealni senzor translacijskog gibanja

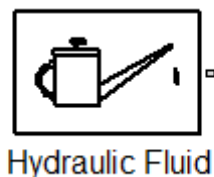


Slika 14: Idealni senzor translacijskog gibanja

Ovaj senzor mjeri relativni pomak između točaka R i C . Na izlazu V se dobiva brzina, a na izlazu P se dobiva pomak. Element se nalazi u biblioteci *Simscape/Foundation Library* pod dijelom *Mechanical/Mechanical Sensors and Sources*.

2.1.3. Hidraulički elementi

Fluid u sustavu

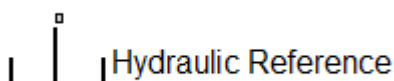


Slika 15: Fluid u sustavu

Ovim elementom se definira fluid u sustavu. Dovoljno ga je spojiti na bilo koju točku u sustavu kroz koju bi trebao prolaziti fluid. U samome bloku se može izabrati između pojedinih tipova mineralnih ulja, a moguće je i definirati vlastiti fluid po karakteristikama .

Element se nalazi u biblioteci *SimScape/SimHydraulics* pod dijelom *Hydraulic utilities*.

Referentna točka tlaka (Atmosfera)

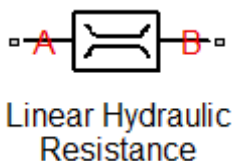


Slika 16: Referentna točka tlaka

Ovaj blok predstavlja točku u kojoj je tlak jednak atmosferskom. Kao i već spomenuti elementi koji služe kao referentne točke pomaka ili rotacije, tako i ovaj element služi kao referentna točka veličine tlaka. U sustavu je potrebno koristiti barem jedan ovakav element (primjerice u povratnom vodu). Postoji i alternativa ovome elementu (*Reservoir*) kojoj se još može definirati i referentni tlak.

Element se nalazi u biblioteci *SimScape/Foundation Library* pod dijelom *Hydraulic/Hydraulic Elements*.

Linearni hidraulički otpor

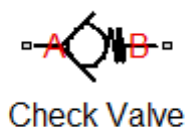


Slika 17: Linearni hidraulički otpor

Ovaj element predstavlja hidraulički otpor u cjevovodu koji je proporcionalan protoku fluida. Ovaj element je nužan kako bi se rast i pad tlaka u sustavu ponašao realnije.

Element se nalazi u biblioteci *SimScape/Foundation Library* pod dijelom *Hydraulic/Hydraulic Elements*.

Nepovratni ventil



Slika 18: Nepovratni ventil

Pozitivan smjer protoka je od točke A do točke B. Ventil je potrebno definirati veličinom presjeka, vrijednost tlaka nakon koje će se ventil otvoriti te maksimalnu vrijednost tlaka koju element može podnijeti.

Element se nalazi u biblioteci *SimScape/SimHydraulics* pod dijelom *Valves/Directional valves*.

Ventil za ograničenje tlaka

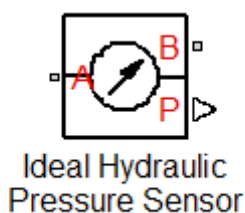


Slika 19: Ventil za ograničenje tlaka

Kao i klasični ventil za ograničenje tlaka, ograničava tlak između dvije točke (na slici točke A i B). Potrebno je definirati tlak do kojeg će ventil ostati zatvoren i presjek ventila.

Element se nalazi u biblioteci *SimScape/SimHydraulics* pod dijelom *Valves/Pressure control valves*.

Idealni hidraulički senzor tlaka

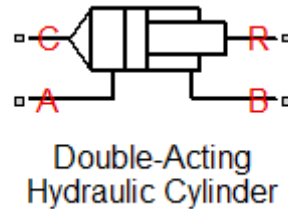


Slika 20: Idealni hidraulički senzor tlaka

Senzor tlaka na izlazu daje razliku tlakova između točaka *A* i *B*. Ukoliko je potrebno odrediti apsolutni tlak u nekoj točki, najbolje je spojiti točku *B* na referentnu točku tlaka.

Element se nalazi u biblioteci *Simscape/Foundation Library* pod dijelom *Hydraulic/Hydraulic Sensors and Sources*.

Dvoradni cilindar

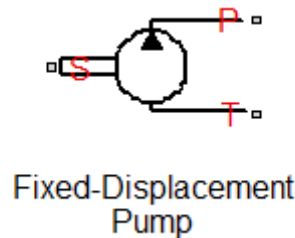


Slika 21: Dvoradni cilindar

Točke *A* i *B* predstavljaju tlačne vodove, *C* poziciju kućišta (najčešće se spaja na nepomični oslonac) i *R* predstavlja klip. U bloku se mogu podesiti površine klipa, duljina klipa, prigušenje i sl.

Element se nalazi u biblioteci *Simscape/SimHydraulics* pod dijelom *Hydraulic Cylinders*.

Pumpa sa konstantnim volumenom

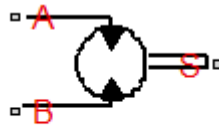


Slika 22: Pumpa sa konstantnim protokom

Element pumpe sa konstantnim protokom definiran je volumenom koji kroz nju prođe po okretaju [m^3/okr], iskoristivosti, nominalnim tlakom i nominalnom kutnom brzini. Na točku *S* se dovodi fizikalni signal kutne brzine, točka *T* (*tank*) predstavlja vezu sa spremnikom, a točka *P* izlaz iz pumpe (jedini mogući smjer fluida je iz *T* u *P*).

Element se nalazi u biblioteci *Simscape/SimHydraulics* pod dijelom *Pumps and Motors*.

Hidraulički motor



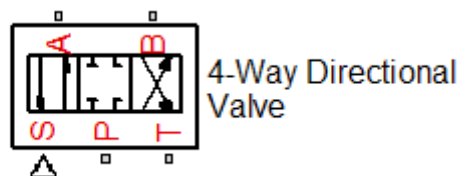
Hydraulic Motor

Slika 23: Hidraulički motor

Motor radi po obrnutom principu od pumpe: protokom između točaka *A* i *B* dolazi do rotacije osovine u pozitivnom smjeru, a pozitivna razlika tlaka između te dvije točke stvara pozitivni moment osovine. Kao i pumpa, motor je definiran njegovim volumenom, iskoristivosti te nominalnim tlakom i kutnom brzinom.

Element se nalazi u biblioteci *Simscape/SimHydraulics* pod dijelom *Pumps and Motors*.

4/3 razvodnik



Slika 24: 4/3 Razvodnik

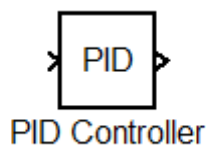
Broj elemenata razvodnika je vrlo ograničen (2/1, 3/2 i 4/3) i nije ih moguće u potpunosti prilagoditi vlastitim potrebama. Kao i kod stvarnih razvodnika, *P* predstavlja tlačni vod, *T* povratni vod, točke *A* i *B* se povezuju sa izvršnim elementom.

Umjesto različitih načina aktivacije položaja razvodnika, u *Simulink* elementu postoji samo ulaz *S* kojem se šalje neki signal. Pozitivan signal postavlja lijevu poziciju razvodnika, negativan desnu a nul signal neutralnu poziciju.

Element se nalazi u biblioteci *Simscape/SimHydraulics* pod dijelom *Valves/Directional valves*.

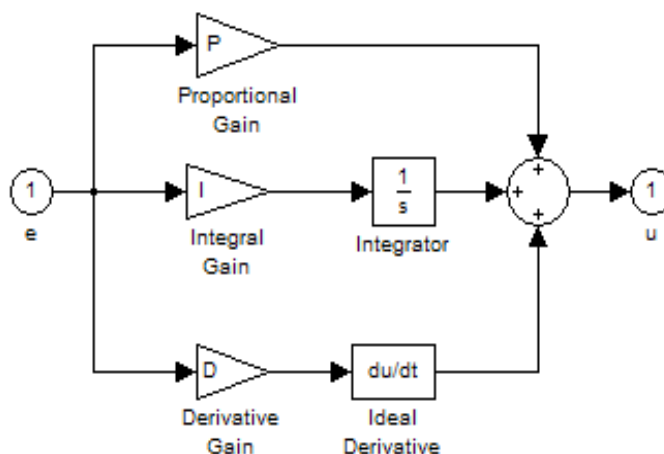
2.1.4. Elementi Simulink biblioteke

Korišteni su standardni *simulink* blokovi: pojačanje (*gain*), *scope* (prikaz mjernih veličina), različiti izvori signala (*sources*).



Slika 25: PID regulator

Uz navedene, korišten je i gotovi blok za PID regulator u kojem je potrebno definirati pojačanja. Blok PID regulatora je zapravo podsustav koji izgleda na sljedeći način:



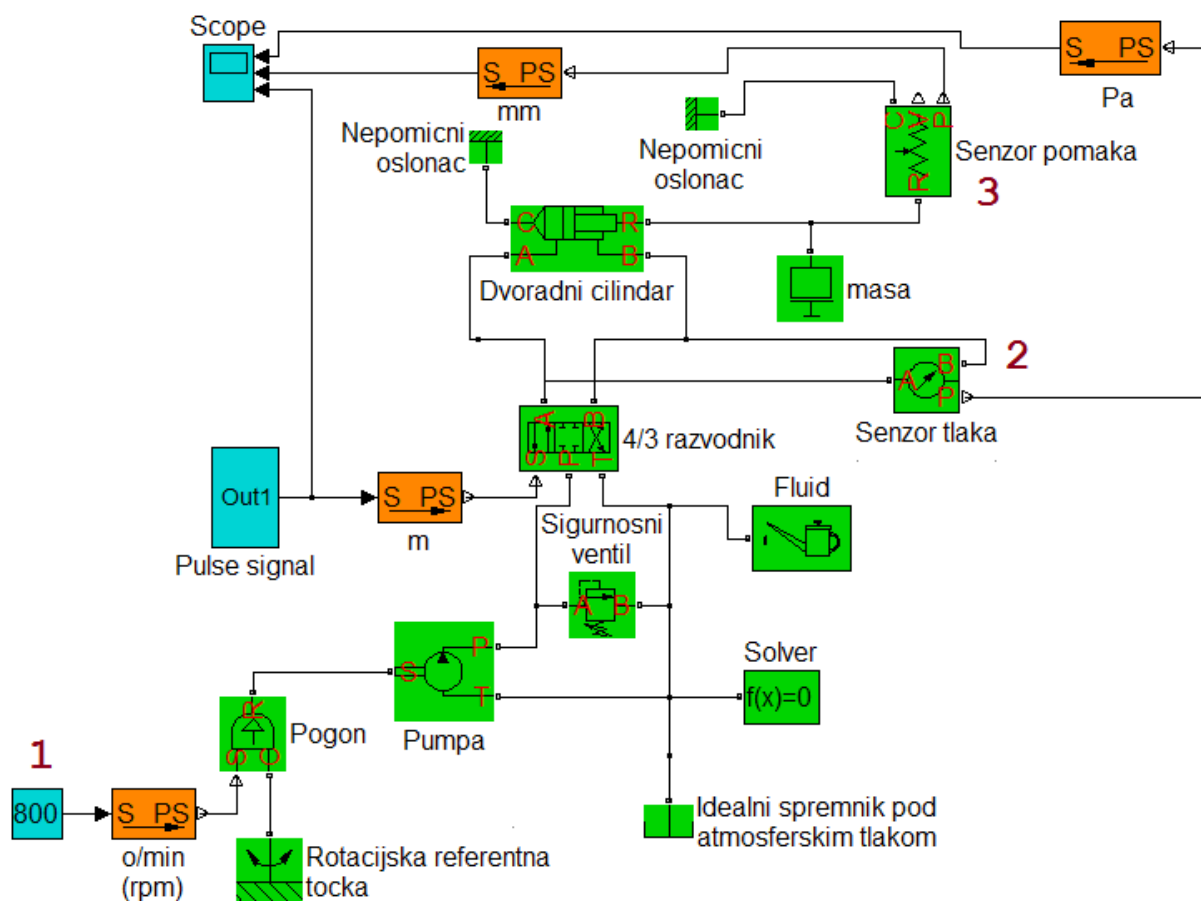
Slika 26: PID regulator – podsustav

Unutar samog bloka je moguće podesiti P, I i D pojačanje.

2.2. Primjer simulacije sustava koristeći Simulink SimScape

Kako bi se lakše razumjeli kasniji modeli i kako bi se prikazale mogućnosti ovog paketa, u narednih nekoliko redova će se opisati i prikazati sustav koji će kao zadaću imati jednostavno izvlačenje i uvlačenje klipa cilindra. Ovdje će biti prikazani i neki problemi sa kojima se može susresti prilikom korištenja ovog paketa.

Naredna slika prikazuje gotov model hidrauličkog sustava, zelenom bojom su označeni svi "fizički" elementi, plavom "obični" Simulink element, a narančastom elementi pretvorbe jednog tipa signala u drugi. Elementi se slažu potpuno jednako kao i u običnom Simulink okruženju, razlika je jedino u tome što se mora pripaziti na željene mjerne jedinice.



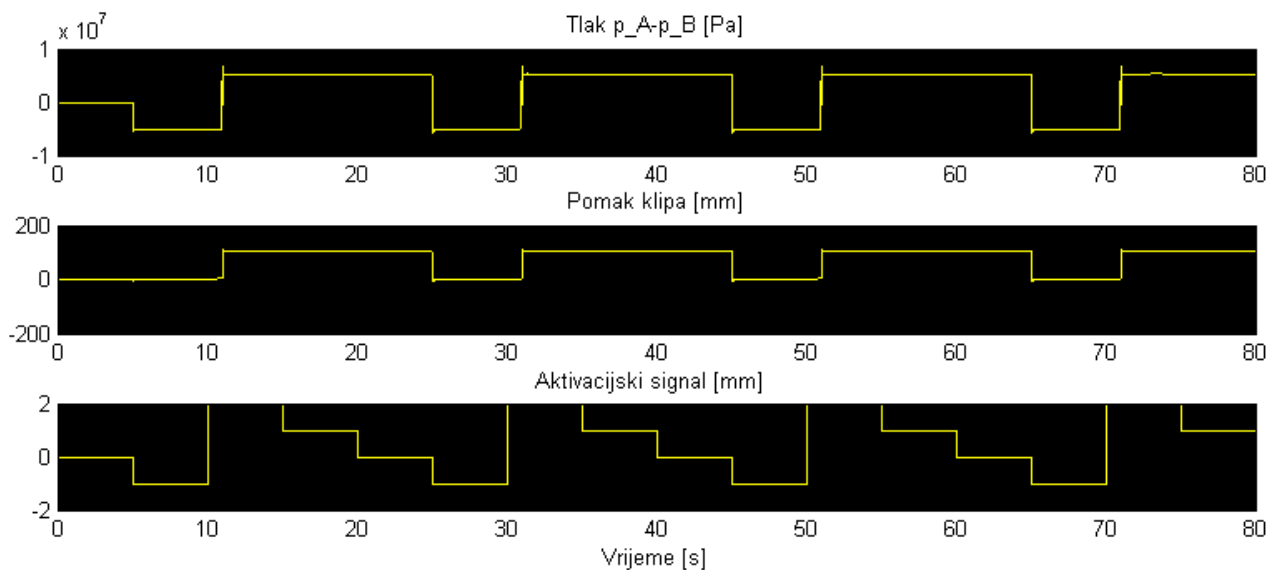
Slika 27: Primjer Simulink-SimHydraulics modela

Osnovni element sustava je pogonska pumpa. Kako bi se pumpa simulirala, potrebno je iskoristiti više elemenata od same pumpe: U točki jedan je izvor koji za izlaznu vrijednost daje konstantnu vrijednost (800). Ta izlazna vrijednost se u S-PS elementu predstavlja kao fizikalni signal kutne brzine, jedinice *okretaji po minuti*. Nakon nje slijedi idealni izvor kutne brzine (pogon) koji kao izlaznu kutnu brzinu daje razliku brzina prethodnog S-PS bloka i rotacijske referentne točke. Obzirom da je u rotacijskoj referentnoj točki brzina vrtnje jednaka nuli, broj okretaja pogona je jednak ulaznom signalu u točki 1.

Pogon pokreće pumpu koja se spaja na 4/3 razvodnik koji upravlja dvoradnim cilindrom. Senzor tlaka (2) mjeri razliku tlaka između točaka A i B razvodnika, a senzor pomaka (3) mjeri pomak klipa cilindra.

4/3 razvodnik na ulazu S dobiva signal kojime se određuje koji će položaj razvodnik zauzeti. U dokumentaciji je navedeno da pozitivan signal otvara prolaz između točaka A-P i B-T, te da zatvara prolaz između točaka A-T i P-B. Prethodna tvrdnja je samo djelomično točna. Naime, pozitivan signal doista postavlja lijevu poziciju, ali tek negativan signal postavlja desnu poziciju. Neutralna pozicija se ostvaruje slanjem 0 signala. Ovo se može najbolje vidjeti na rezultatu simulacije gornjeg

modela:



Slika 28: Rezultati simulacije primjera Simulink-SimHydraulics modela

Prvi graf prikazuje razliku tlaka između točaka A i B razvodnika, drugi prikazuje pomak klipa, a treći prikazuje aktivacijski signal razvodnika. U 30. sekundi dolazi do pozitivnog signala na razvodniku, tlak se povećava te se klip izvlači. Ali, u 40. sekundi aktivacijski signal pada na vrijednost 0, a klip i dalje stoji u krajnjem položaju. Tek slanjem negativnog signala se klip uvukao.

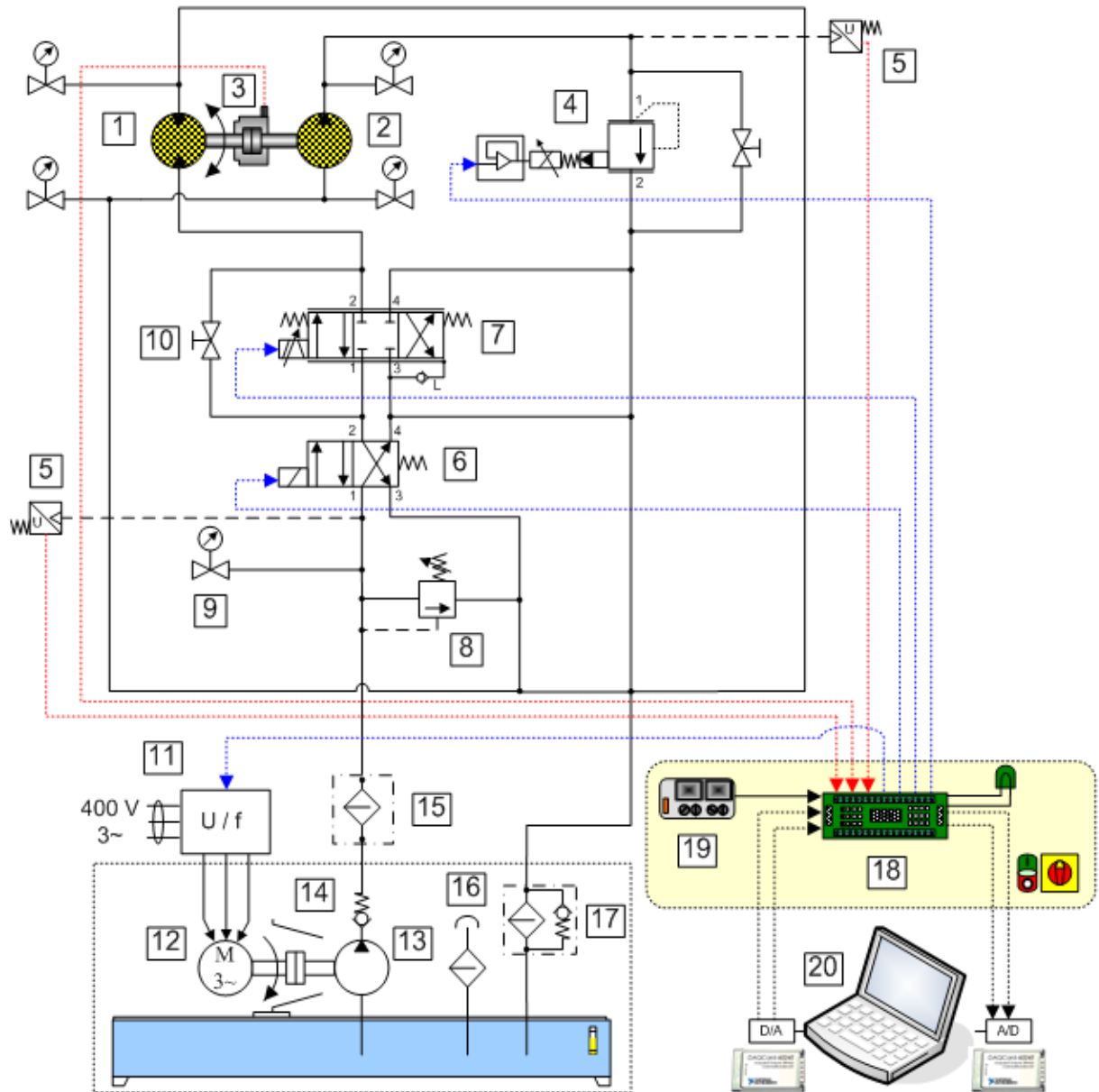
2.3. Ograničenja simulacijskog programa Simulink i biblioteke SimScape

Najveći problem biblioteke *SimScape/SimHydraulics* je nedostatak elemenata. Primjerice, 4/2 razvodnik ne postoji u biblioteci nego je nužno koristiti 4/3 razvodnik. No, obzirom na veliki broj elemenata, i ovome je moguće doskočiti stavljanjem releja kojemu je aktivacijska vrijednost postavljena na 0. Na taj način do razvodnika nikada neće doći nul signal.

Drugi problem je što su svi elementi idealni pa im je nužno staviti dodatne blokove kako bi se ponašali realnije (element inercije, mase, ...).

3. SIMULACIJA ELEKTROHIDRAULIČKIH SERVOSUSTAVA

3.1. Regulacija rotacijskog gibanja



Slika 29: Regulacija rotacijskog gibanja

Princip rada sustava je sljedeći: Crpka (13) dovodi fluid u sustav. Maksimalni tlak u sustavu je osiguran sigurnosnim ventilom (8). Servoventilom (7) se mijenja smjer fluida prema hidromotoru čime se mijenja i njegov smjer vrtnje. Crpka (2) pored hidromotora (1) služi kao opterećenje hidromotoru. Filterima se osigurava čistoća fluida, a sensorima se dobivaju povratne informacije iz sustava. Upravljačkim računalom se preko senzora dobivaju informacije o sustavu i na temelju tih

informacija se mijenja položaj servoventila.

Parametri elemenata sustava, koji su nužni za izradu simulacije su sljedeći:

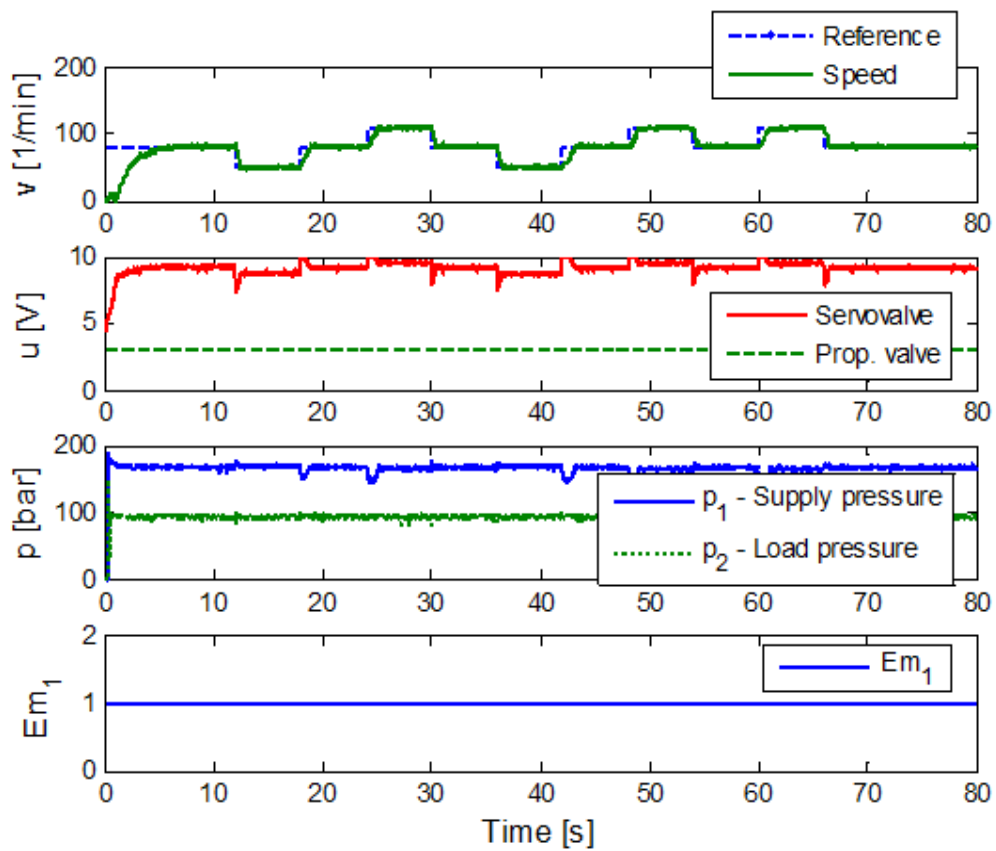
Pumpa (1) : specifični protok – $4.9 \text{ cm}^3/\text{o}$

 nominalni tlak – 25 MPa

Pumpa (4): specifični protok – $2.6 \text{ cm}^3/\text{o}$

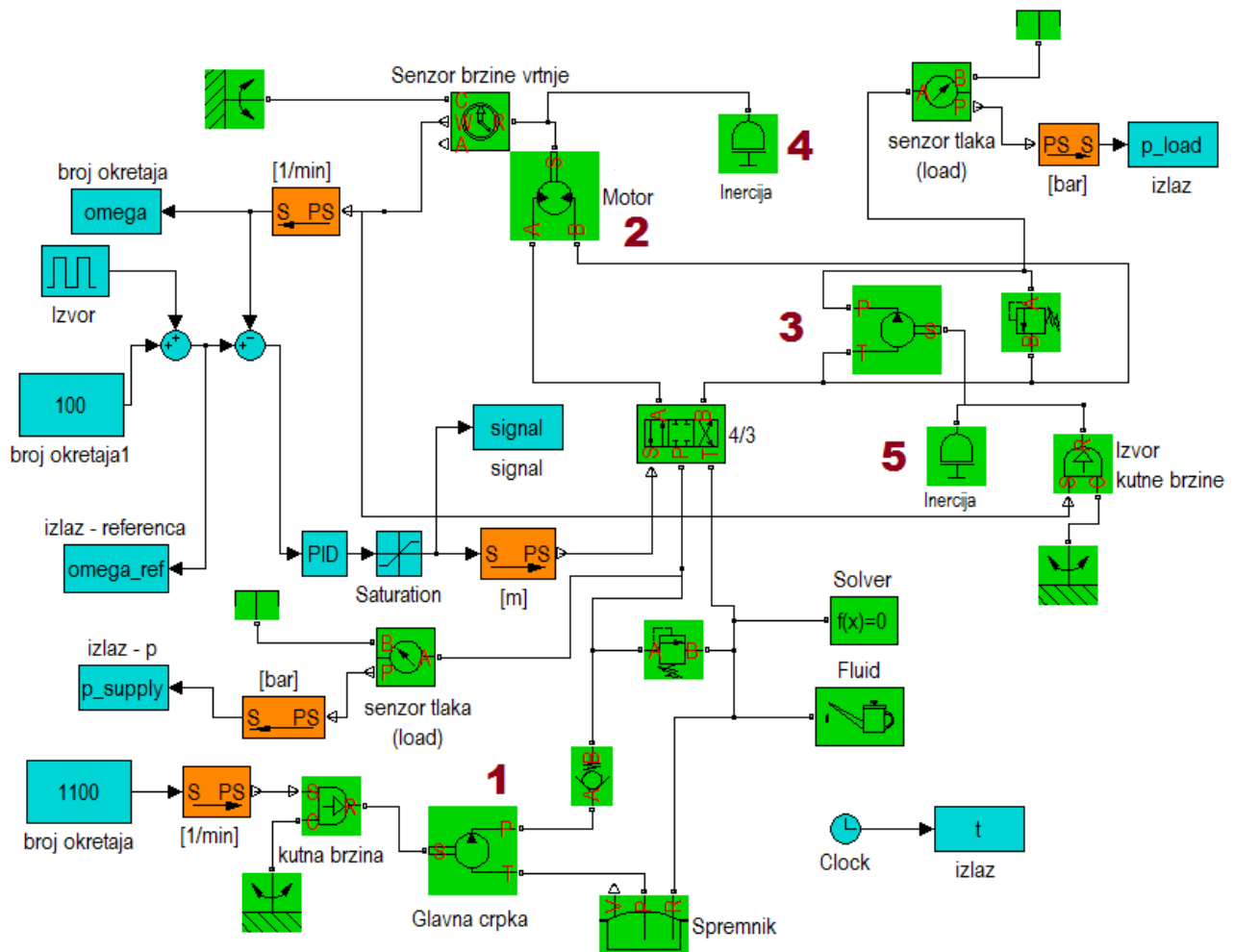
Hidromotor (5): specifični protok – $8.2 \text{ cm}^3/\text{o}$

3.1.1. Eksperimentalni rezultati



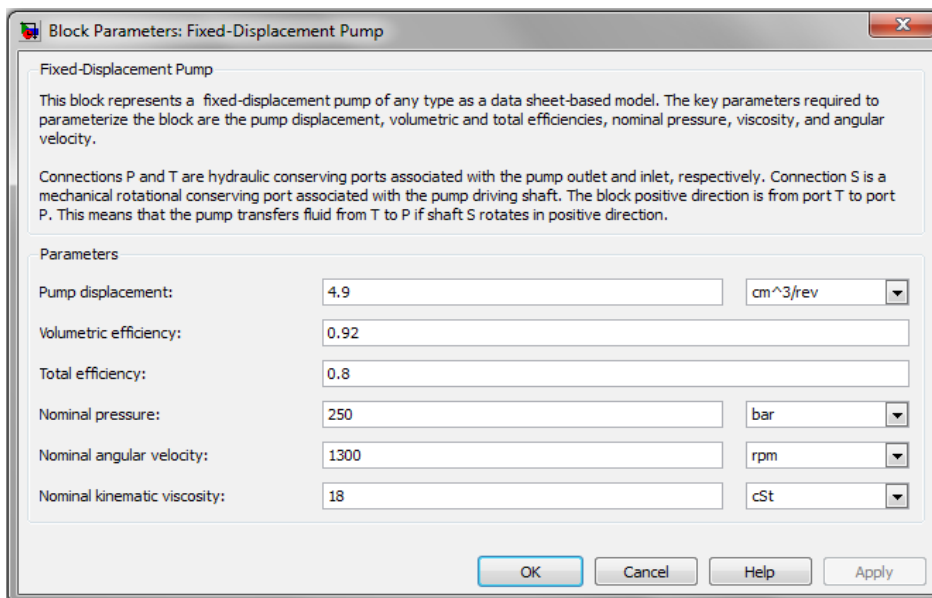
Slika 30: Eksperimentalni rezultati modela za regulaciju brzine vrtnje

3.1.2. Simulink model



Slika 31: Regulacija brzine vrtnje – Simulink model

Na gornjoj slici je prikazan *Simulink* model za regulaciju brzine vrtnje. Princip rada je gotovo identičan stvarnome modelu. Parametri elementa PID regulatora su $P = 5$, $I = 0.2$ i $D=0$ (jer se radi o PI regulatoru). Pogonskoj pumpi (1) nije dodan inercijski blok jer se očekuje da će pumpa nakon zaleta raditi konstantom kutnom brzinom. Motoru (2) i pumpi koja tereti motor (3) su dodani inercijski elementi (motor 0.3 (4), pumpa 0.2 kg m^2 (5)). Da tih elemenata nema, karakteristika bi bila praktički linearna i referenca bi se pratila bez kašnjenja ili nadvišenja. Razlika u odnosu na stvarni sustav je što je izbačen elektromagnetski 4/2 ventil kojeg nema u *Simulink* biblioteci. Iz tog razloga bi se morao koristiti još jedan 4/3 ventil koji bi neprekidno bio u otvorenom položaju. U *Simulinku* postoji element hidrauličkog spremnika ali je za dane primjere dovoljno staviti blok hidrauličke reference. Naime, ako se koristi blok za spremnik, može se podesiti tlak spremnika. Ako se stavi samo hidraulička referenca, podrazumijeva se da je fluid u spremniku pod atmosferskim tlakom.



Slika 32: Parametri glavne pumpe

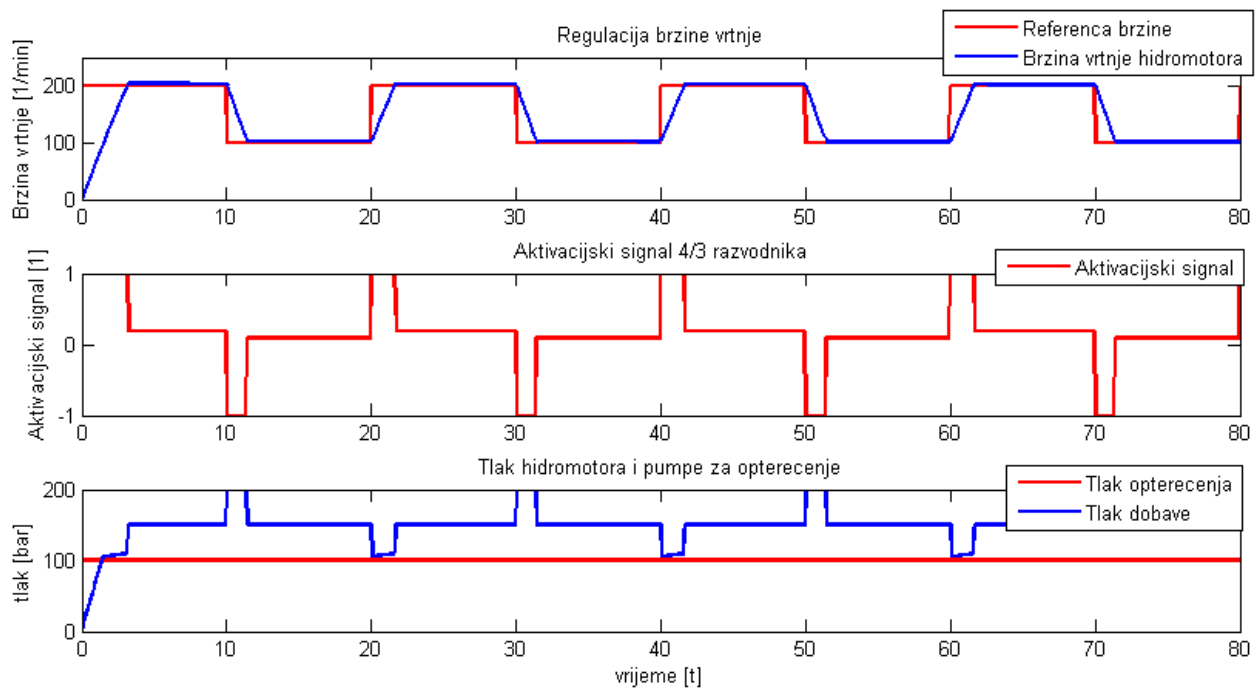
Kako bi sustav bio što bliži stvarnome, parametri hidrauličkih elemenata su podešeni na način na što bliže odgovaraju stvarnim elementima.

3.1.3. Rezultati dobiveni simulacijom

Rezultati dobiveni simulacijom sustava se ponešto razlikuju od onih dobivenih ekperimentalno ali se mogu objasniti. Ako se za početak usporede odzivi dobiveni za brzinu vrtnje, vidjeti će se da su donekle slični. Obzirom da u simulaciji nema šuma izlaznih veličina, tako dobiven odziv ne oscilira.

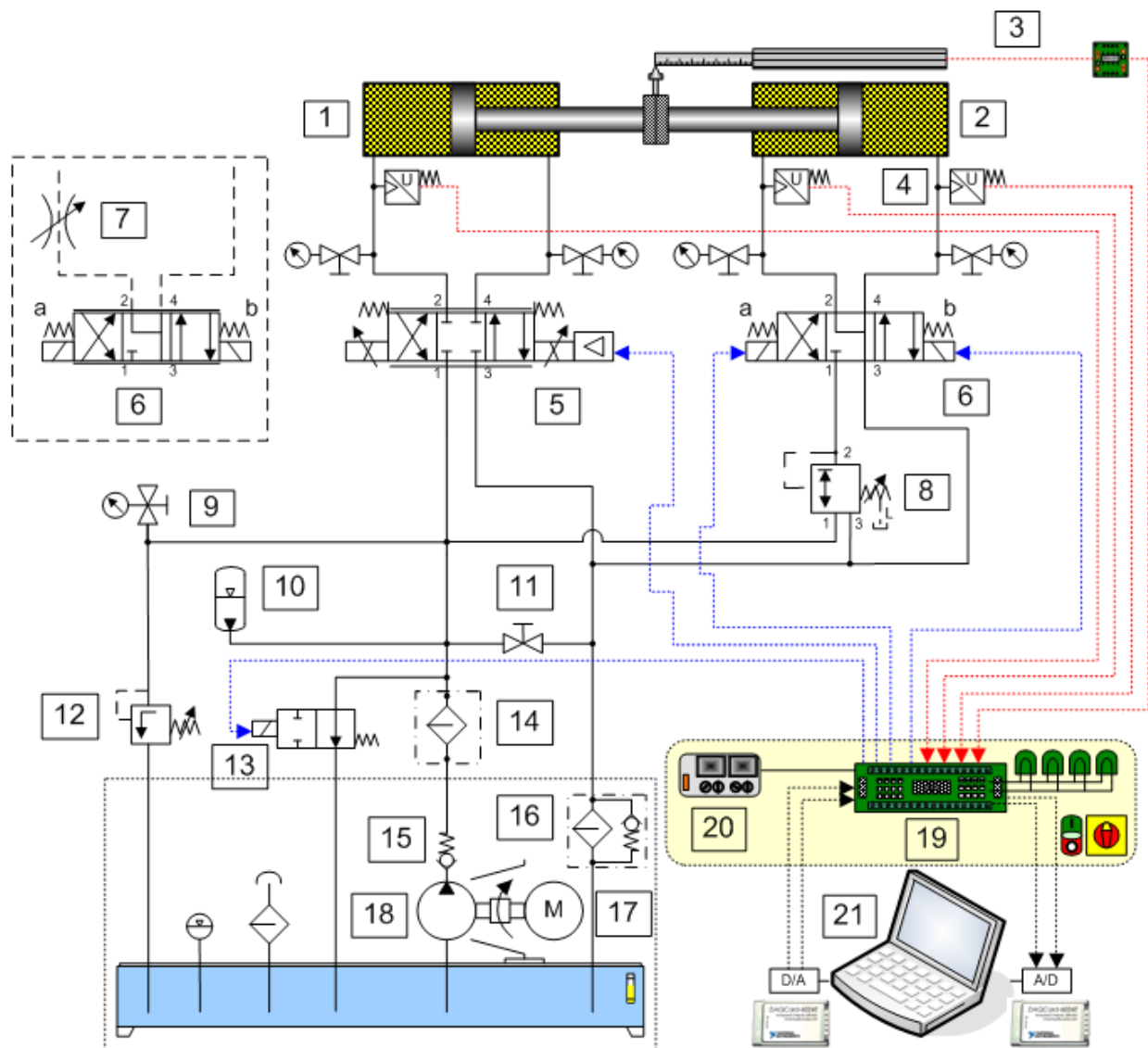
Ako se usporede aktivacijski signali, na prvi pogled će se primijetiti veća razlika ali je to također uzrokovano simulacijskim paketom. Ako se malo bolje promotri aktivacijski signal stvarnog modela, vidjeti će se da on pri naponu od 10V aktivira promjenu položaja razvodnika. U tim trenucima tlak padne. Tako se može zamisliti i signal dobiven simulacijom: kada aktivacijski signal dosegne vrijednost 1 - tlak pada. Ako bi cijelom aktivacijskom signalu dobivenom simulacijom dodali konstantu 9 (da bude sličan onome realnog modela) i visokofrekventni šum – dobili bi signal sličan onom od eksperimentalnog.

Praćeni tlakovi se također ponešto razlikuju i glavna je razlika veći propad tlaka u rezultatu dobivenom simulacijom nego u stvarnom modelu.



Slika 33: Rezultati dobiveni simulacijom sustava

3.2. Regulacija translacijskog gibanja



Slika 34: Regulacija translacijskog gibanja

Pogonski cilindar (1) i cilindar za terećenje (2) kruto su povezani. Teret je potrebno pomaknuti glavnim cilindrom (1), no cilindar koji služi kao teret (1) mu u tome pruža otpor. Cilindrima se upravlja putem proporcionalnog razvodnika (5) i elektromagnetskim direktno upravljanim razvodnikom (6). Sustav se napaja fluidom pomoću crpke (18). U slučaju pada tlaka u sustavu može reagirati hidraulički akumulator (10). Senzorom pomaka (3) se određuje koliko se teret pomaknuo. Kao i u prethodnom modelu, upravljačko računalo prima signale iz sustava putem senzora, obrađuje ih i na temelju toga mijenja položaj razvodnika.

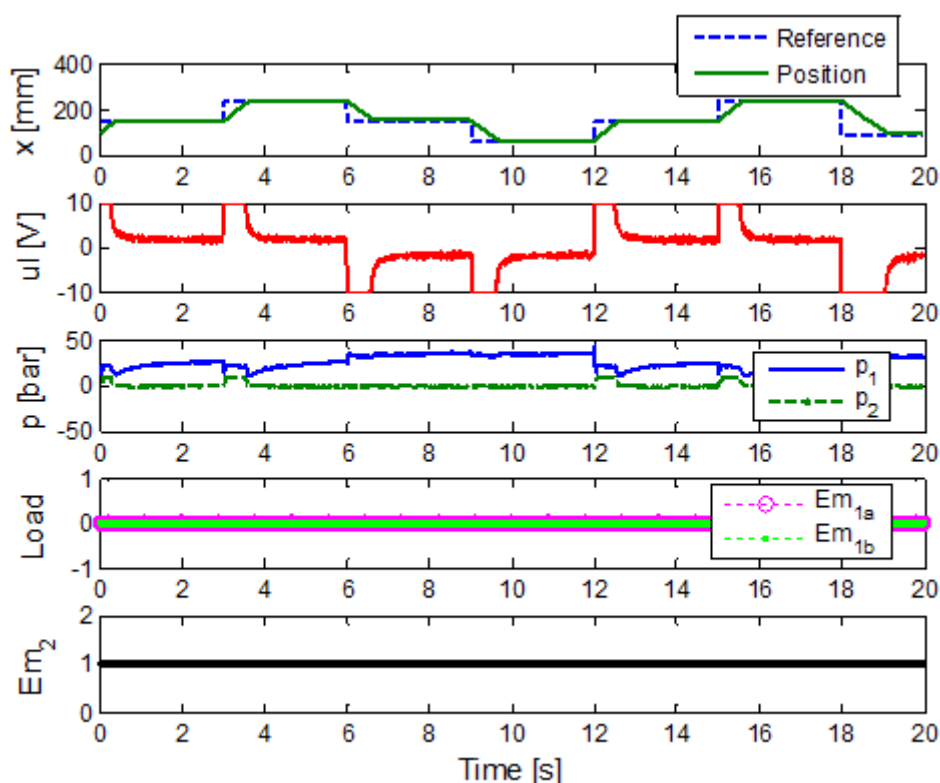
Parametri elemenata sustava, koji su nužni za izradu simulacije su sljedeći:

- Crpka (4): specifični protok – $3.7 \text{ cm}^3/\text{s}$

nominalni tlak – 25 MPa

- Cilindar (1) i (2): hod klipnjače – 300 mm
promjer klipa – 50 mm
promjer klipnjače – 36 mm

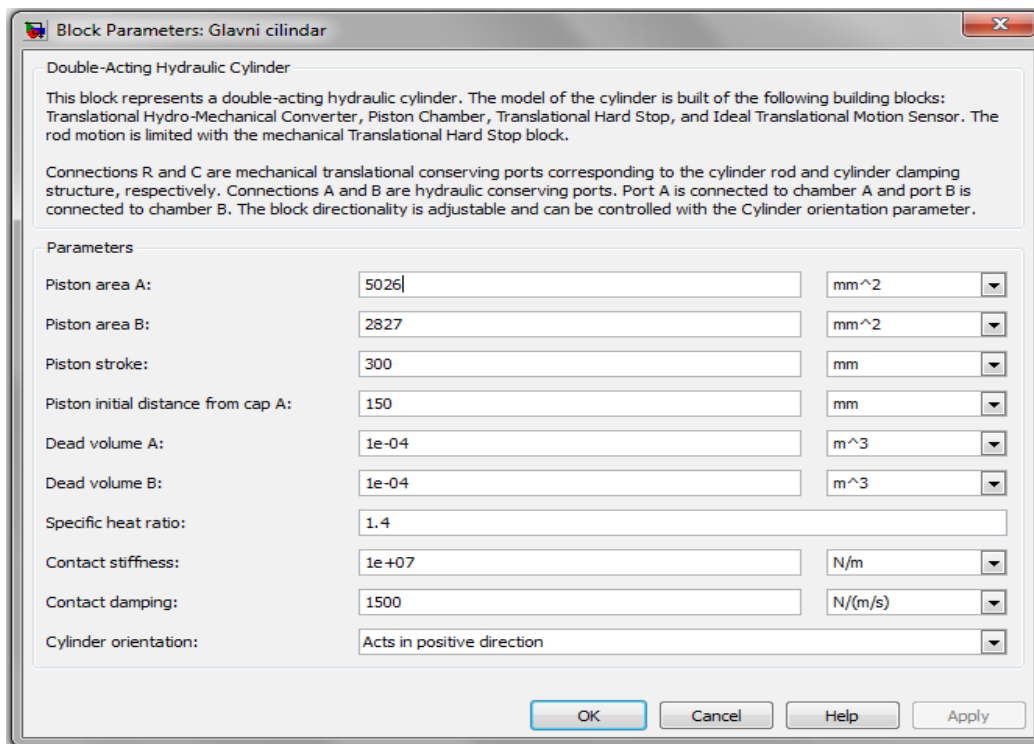
3.2.1. Eksperimentalni rezultati



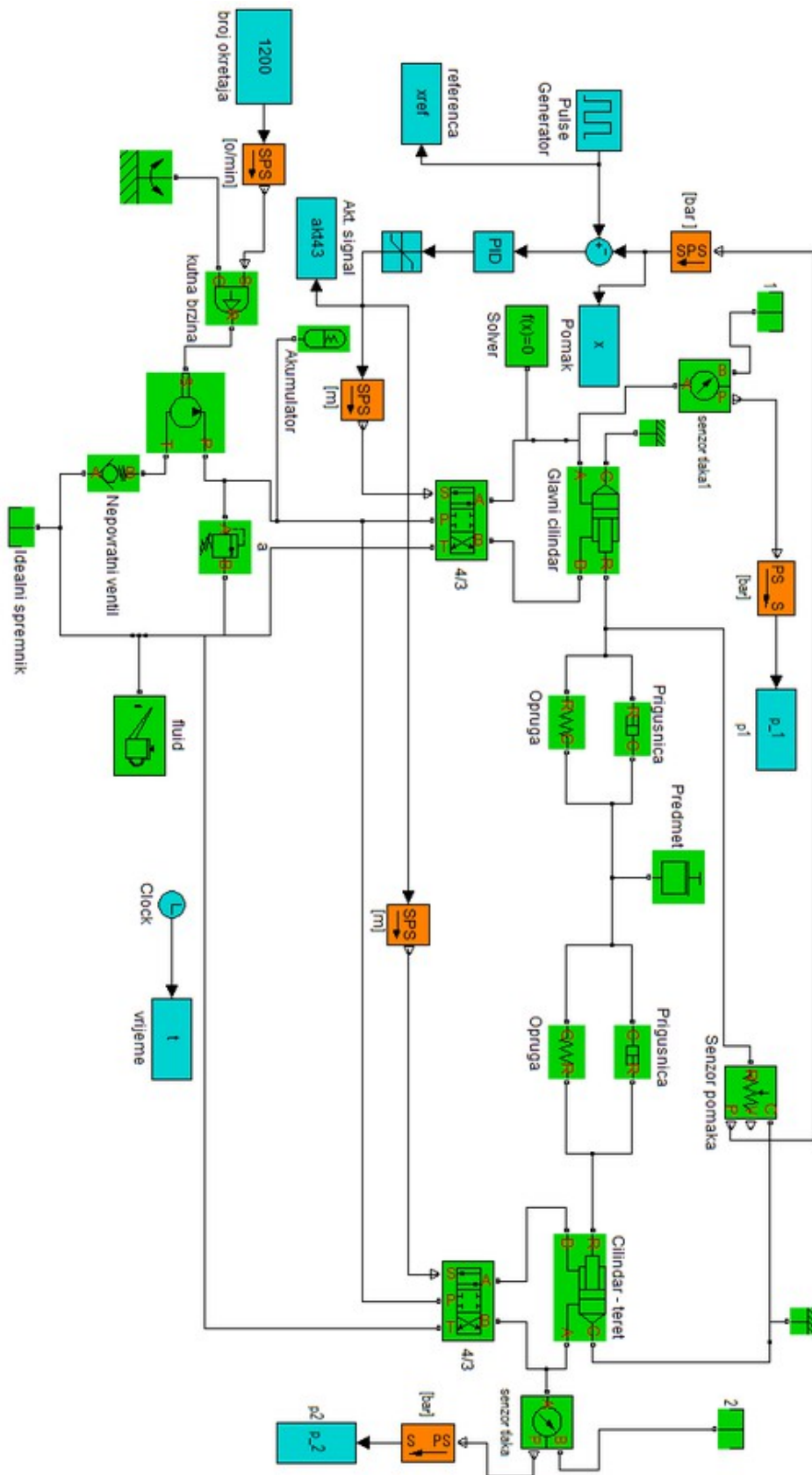
Slika 35: Eksperimentalni rezultati modela za regulaciju translacijskog gibanja

3.2.2. Simulink model

Simulink model se, zbog ograničenja samog paketa, ponešto razlikuje od stvarnog (npr. postavljen je akumulator s oprugom). U početnom položaju su klipovi ispruženi za polovicu hoda i u tom položaju opruge nisu deformirane. Slanjem reference se otvaraju/zatvaraju razvodnici i cilindri djeluju jedan na drugi (klipovi su međusobno povezani). Tijekom cijelog procesa se regulira položaj glavnog cilindra. Iz tog razloga je u sustavu PID regulator sa parametrima $P=25$, $I=0.9$ i $D=0.2$. Vrijeme uzorkovanja je 10 ms.



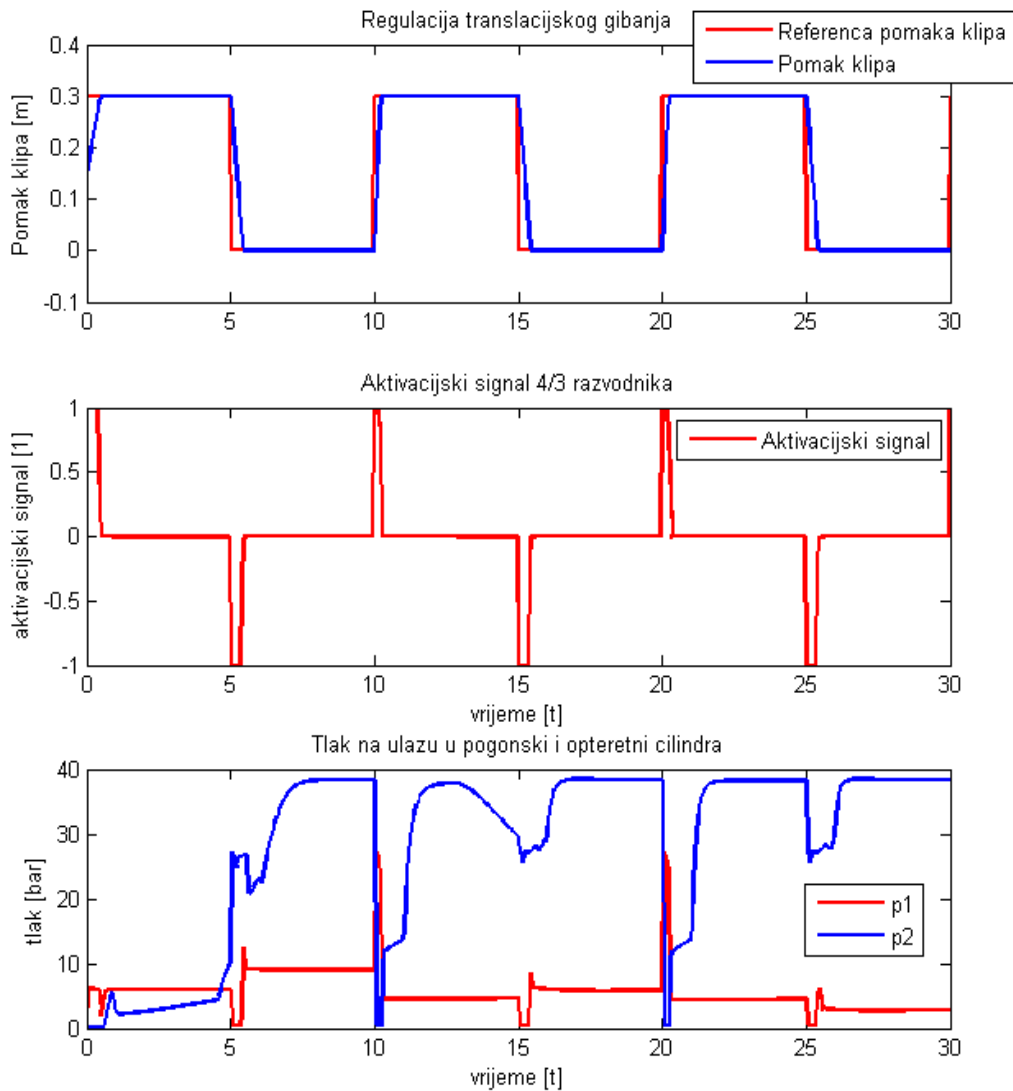
Slika 36: Parametri glavnog cilindra



Slika 37: Simulink model regulacije translacijskog gibanja

3.2.3. Rezultati dobiveni simulacijom

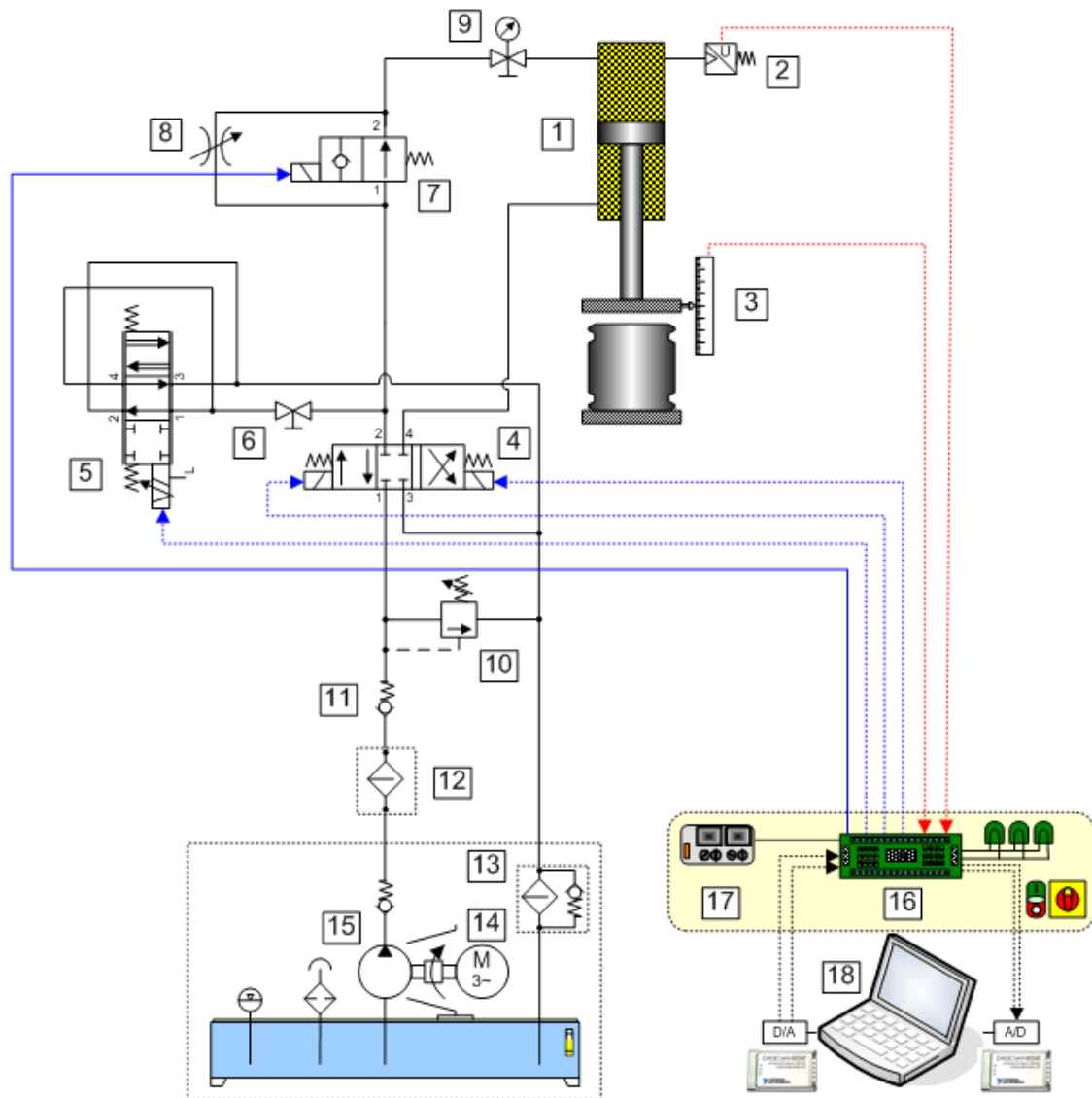
Kao što se vidi sa gornjih slika, odziv sustava je brz sa gotovo zanemarivim nadvišenjem. Promjenom parametara modela: prigušenjem cilindra, mase predmeta, prigušnica i opruga, dobivao bi se drugačiji odziv.



Slika 38: Rezultati dobiveni simulacijom sustava

Kao što se sa gornje slike može vidjeti, praćenje reference je vrlo slično realnom modelu. Aktivacijski signal koji se slao razvodnicima je također sličan (ako se zanemari šum). Problem nastaje kada se usporede rezultati tlaka na ulazu u glavni i opteretni cilindar. Razlika tog mjerenja dobivenog simulacijom je izrazito velika kada se uspoređi sa onom dobivenom eksperimentalno.

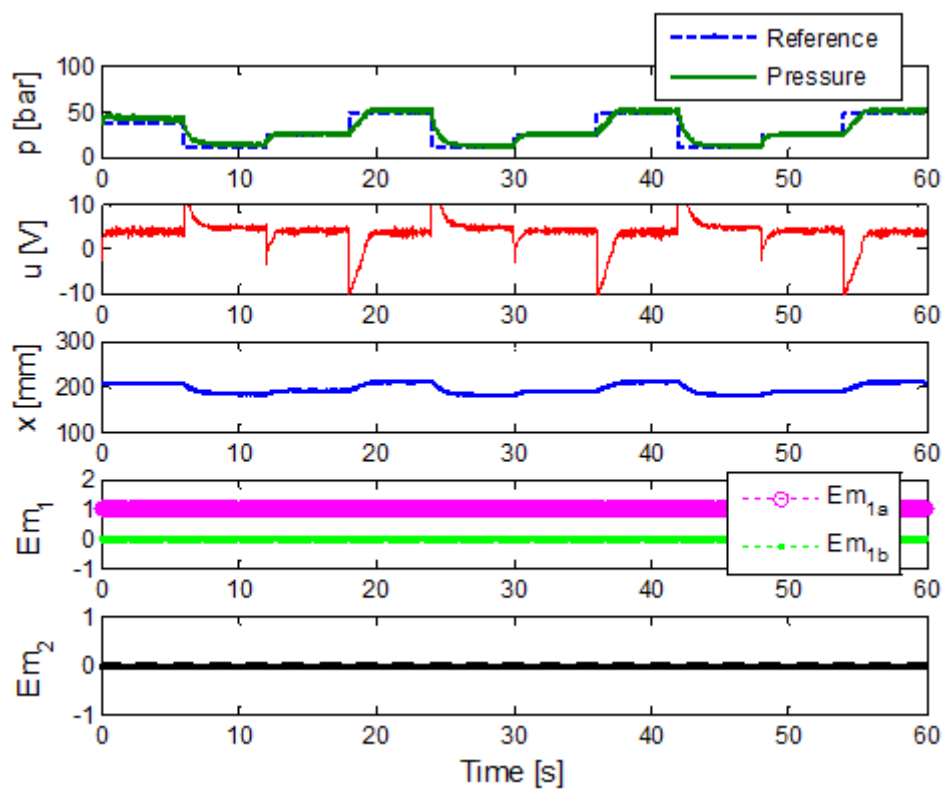
3.3. Regulacija sile



Slika 39: Regulacija sile

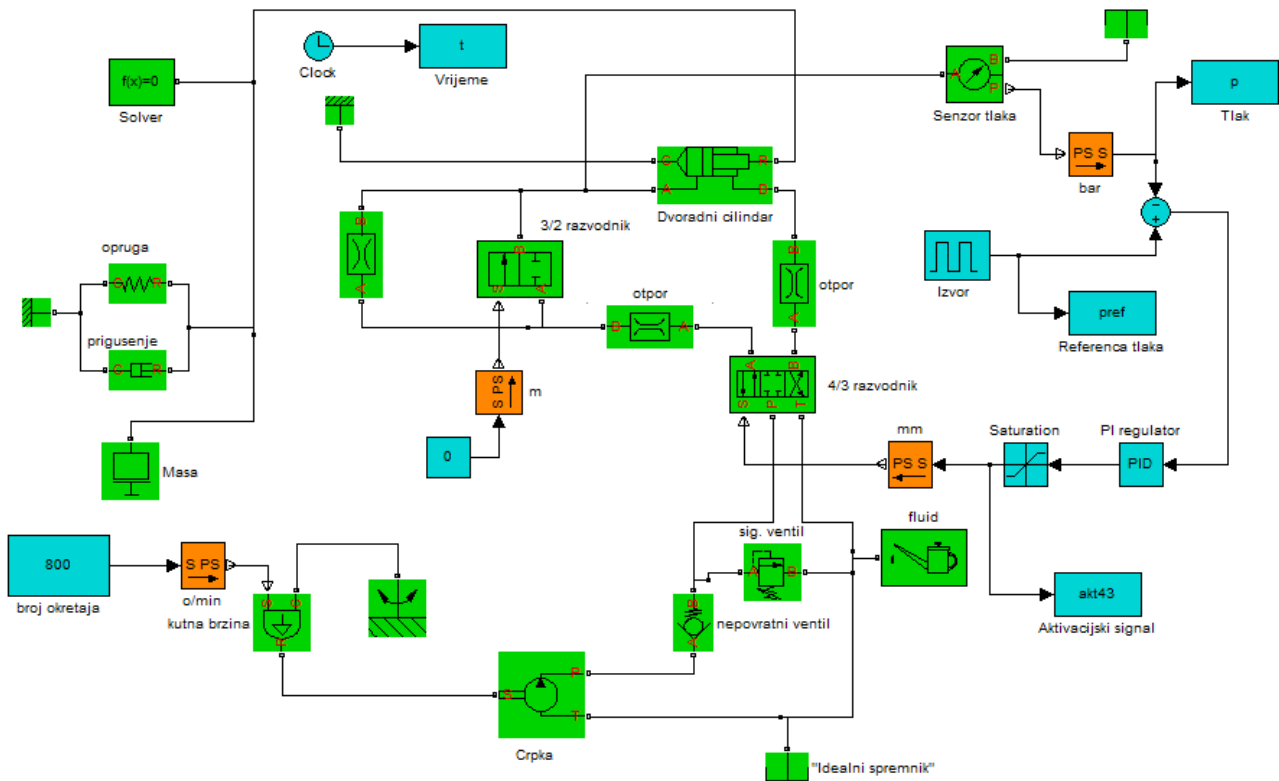
Iako se prilikom prešanja vodi računa o iznosu sile koja se primjenjuje, zapravo se regulira tlak cilindra. Naime, ukoliko je poznata površina presjeka klipa i iznos potrebne sile, dobiva se tlak ($p=F/A$) koji je potrebno održavati u sustavu. Nakon što se primjeni tlak i cilindar se izvuče do određene udaljenosti, prešanje je gotovo.

3.3.1. Eksperimentalni rezultati



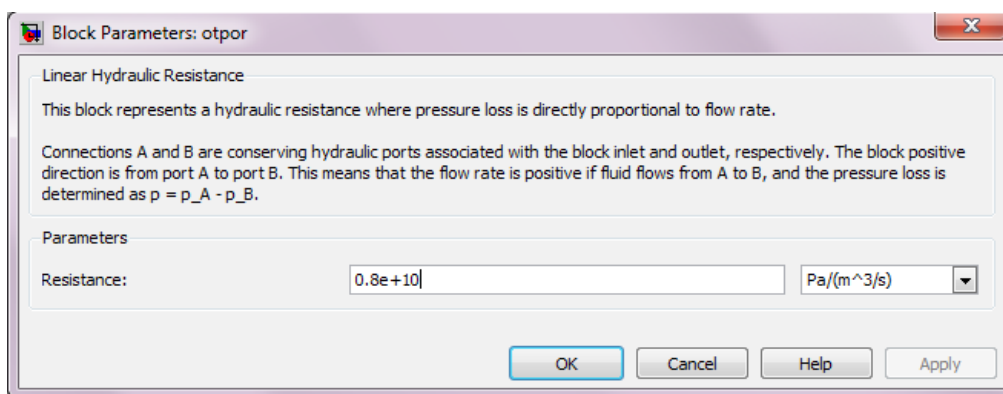
Slika 40: Eksperimentalni rezultati modela za regulaciju sile

3.3.2. Simulink model



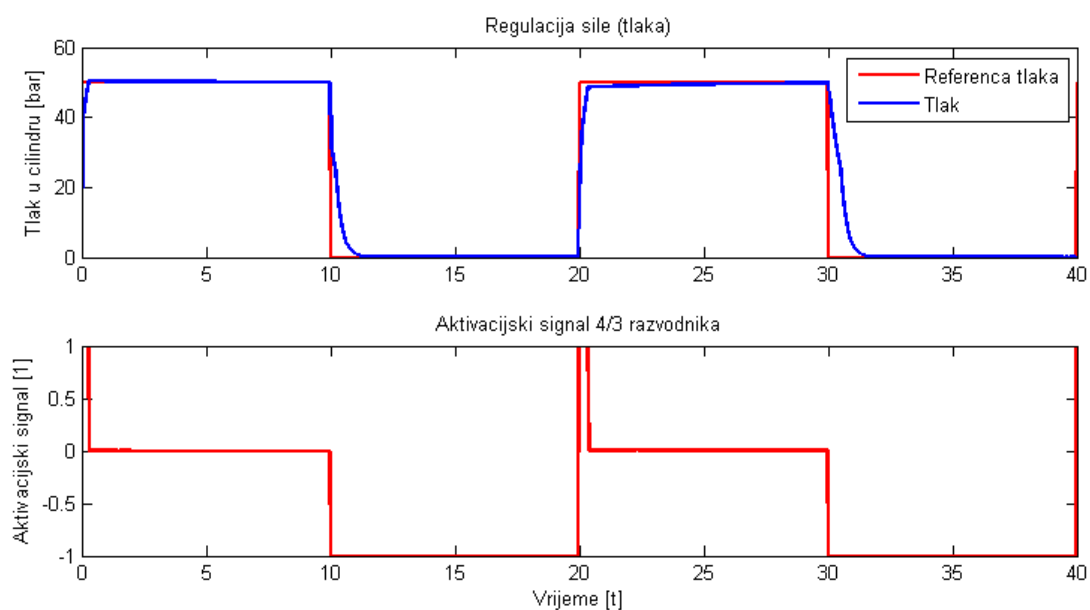
Slika 41: Regulacija sile

Kao što je već spomenuto u prethodnim primjerima, modeliranje u programskom paketu *Simulink* može biti komplicirano jer tlak može u nultoj jedinici vremena naglo promijeniti vrijednost. To i nije bilo toliko problematično u prethodnim primjerima, ali bi u sustavu koji regulira veličinu tlaka bilo nepoželjno. Iz tog razloga su nakon 4/3 razvodnika postavljena 2 elementa (na shemi označeni sa "otpor") koji predstavljaju linijski gubitak, odnosno pad tlaka koji ovisi o trenutnom protoku. Na taj način se postiglo da se promjena veličine tlaka ponaša bliže stvarnoj promjeni.



Slika 42: Element linearnog hidrauličkog otpora

3.3.3. Rezultati dobiveni simulacijom



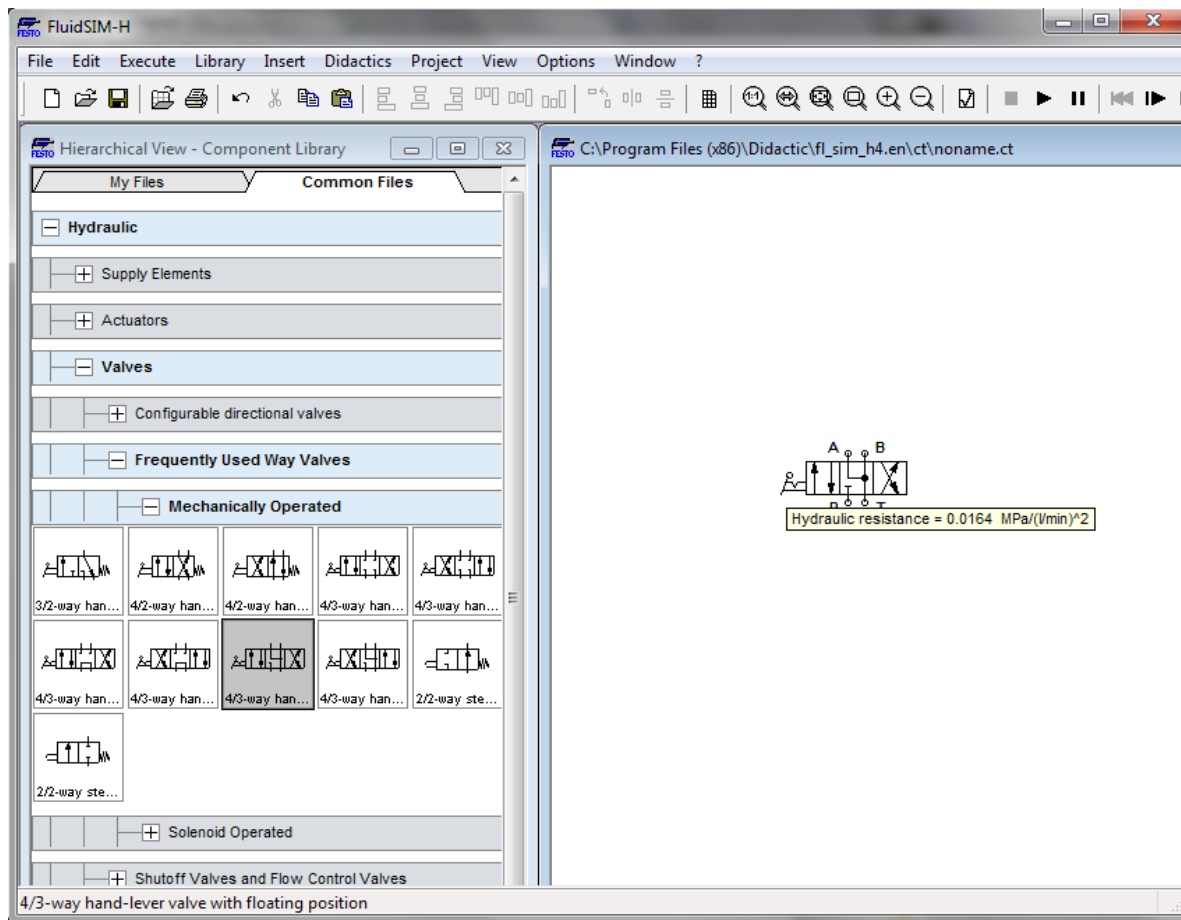
Slika 43: Simulink model – rezultati simulacije

Kao što se može vidjeti sa gornje slike, *Simulink* model se po pitanju praćenja reference tlaka ponaša gotovo jednako kao i eksperimentalni postav. Parametri regulatora su $P=10$ i $I=2$.

4. USPOREDBA *SIMHYDRAULICS* PAKETA SA SLIČNIM PAKETIMA

4.1. Programski paket *FESTO FluidSIM*

Za razliku od *SimHydraulics* biblioteke unutar *Matlab*-a, u *FluidSIM*-u je odmah vidljivo da je program specifične namjene. *FluidSIM* sadržava ogromnu biblioteku dijelova, detaljan opis svakog dijela i veliki dio sa pomoći (*Help*) korisniku (uputstva za korištenje programa, video zapisi stvarnih hidrauličkih sustava, ...).




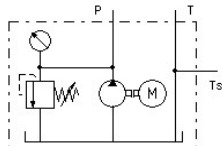
Slika 44: *FluidSIM* sučelje

Ako se na bilo koju komponentu klikne dva-puta dobit će se njen detaljan (ako postoji, onda i stvaran) opis:

Component library

Component library < Hydraulic Components < Service Components < Pump unit

Pump unit

The pump unit supplies a constant volumetric flow. The operating pressure is limited by the internal pressure relief valve. The pump unit has two tank connections.

Adjustable parameters

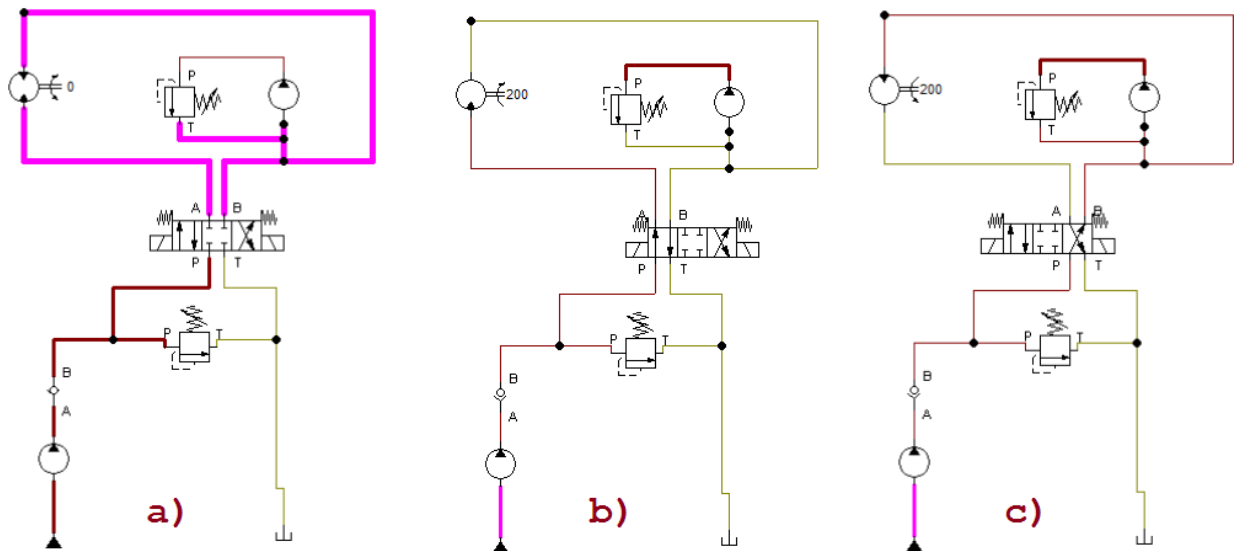
| | | |
|-------------------|-----------------------|--------|
| Max. pressure: | 0.01 ... 40 MPa | (6) |
| Flow: | 0 ... 500 l/min | (2.4) |
| Internal leakage: | 0 ... 100 l/(min*MPa) | (0.04) |

Related Topics

- [Pump unit \(simplified\)](#)
- [\[38\] Hydraulic power unit](#)
- [\[40\] Externally toothed gear pump](#)
- [\[41\] Internally toothed gear pump](#)

Slika 45: Detaljan opis odabrane pumpe

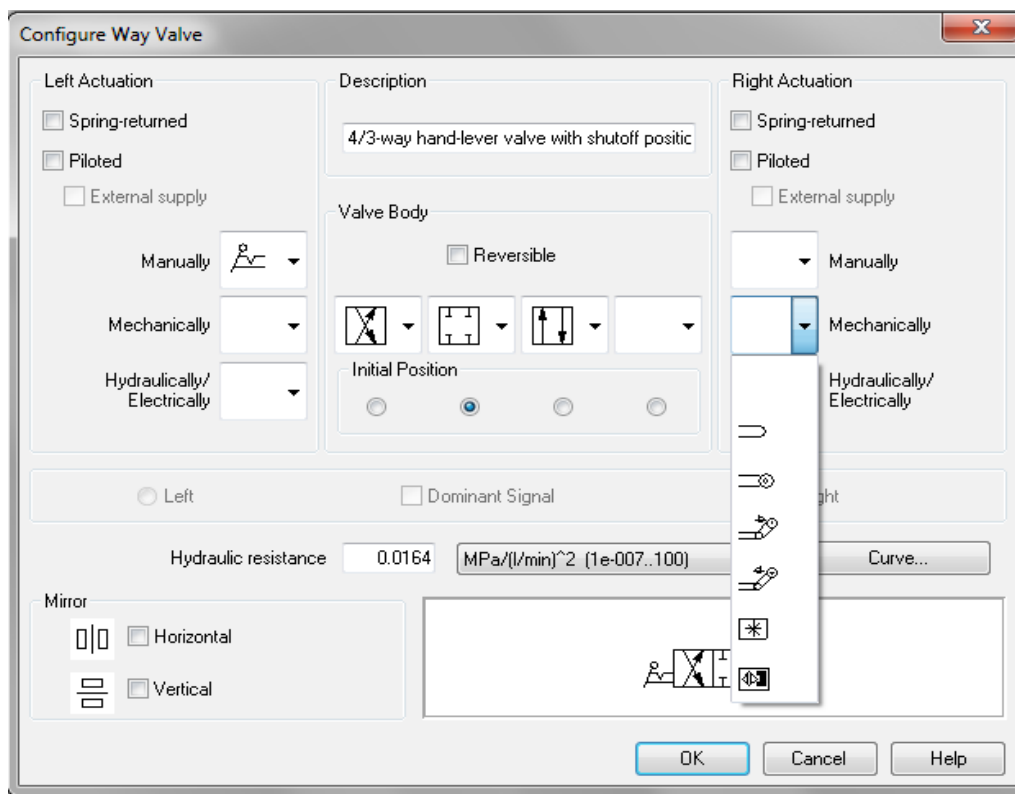
Simulacija unutar *FluidSIM*-a je interaktivna, odnosno parametre dijelova sustava je moguće mijenjati tijekom izvedbe simulacije. Vrlo korisna stvar je što se u svakom trenutku vidi kroz koje dijelove cjevovoda fluid struji. Na slici ispod je 4/3 razvodnik u sve tri pozicije: a) – neutralna, b) – lijeva i c) – desna:



Slika 46: Interaktivna simulacija

Kao što se vidi sa gornje slike, promjenom položaja razvodnika se mijenja smjer okretanja hidromotora. Kako bi se razvodnik aktivirao, dovoljno je samo kliknuti na stranu koju se želi aktivirati.

Još jedna vrlo bitna razlika u odnosu na *Matlab* je mogućnost prilagodbe dijelova. Svaki razvodnik, pumpa, motor ili koji god drugi dio se mogu prilagoditi vlastitim potrebama do sitnih detalja. Na slici ispod su prikazane mogućnosti prilagodbe razvodnika:



Slika 47: Prilagodba razvodnika

Kao što se može vidjeti sa slike, moguće je podesiti tip aktivacije, elemente razvodnika, početni položaj, otpor, ...

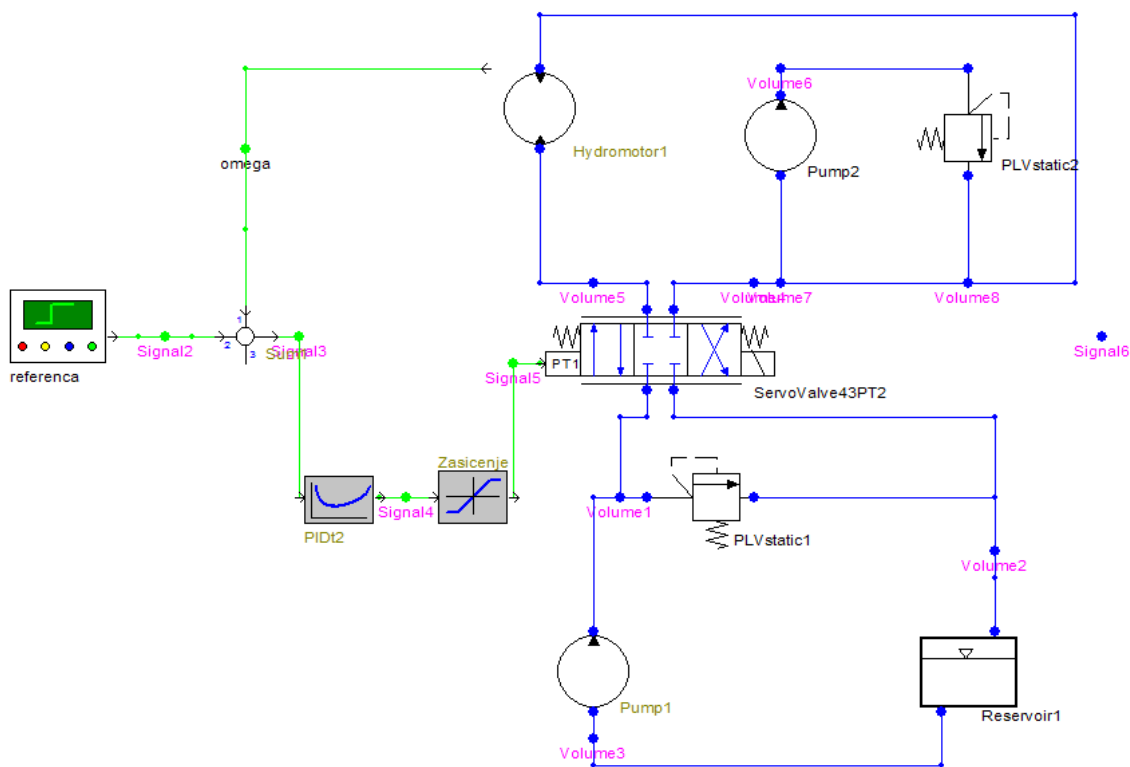
Problem sa *FluidSIM*-om je sličan kao i sa *Matlab*-om – neke komponente se ponašaju idealno. Primjerice, broj okretaja hidromotora se promijeni sa +200 na -200 u nultoj jedinici vremena. Za razliku od *Matlab*-a, ne postoje elementi koji bi druge elemente učinili manje idealnim.

4.2. Programski paket *DSH Plus*

DSH Plus ima malo drugačiji pristup modeliranju sustava nego prethodna dva programska paketa. U ovome programu je razdvojeno povezivanje elemenata od parametriziranja. To znači da se u prvom koraku korisnik orijentira isključivo na odabir elemenata i način njihovog povezivanja. Jednom kada je gotov sa time, prebacuje se u dio za parametrizaciju gdje odabire parametre elemenata i pokreće simulaciju. Moguće je u bilo kojem trenutku prebaciti se iz jedne u drugu okolinu.

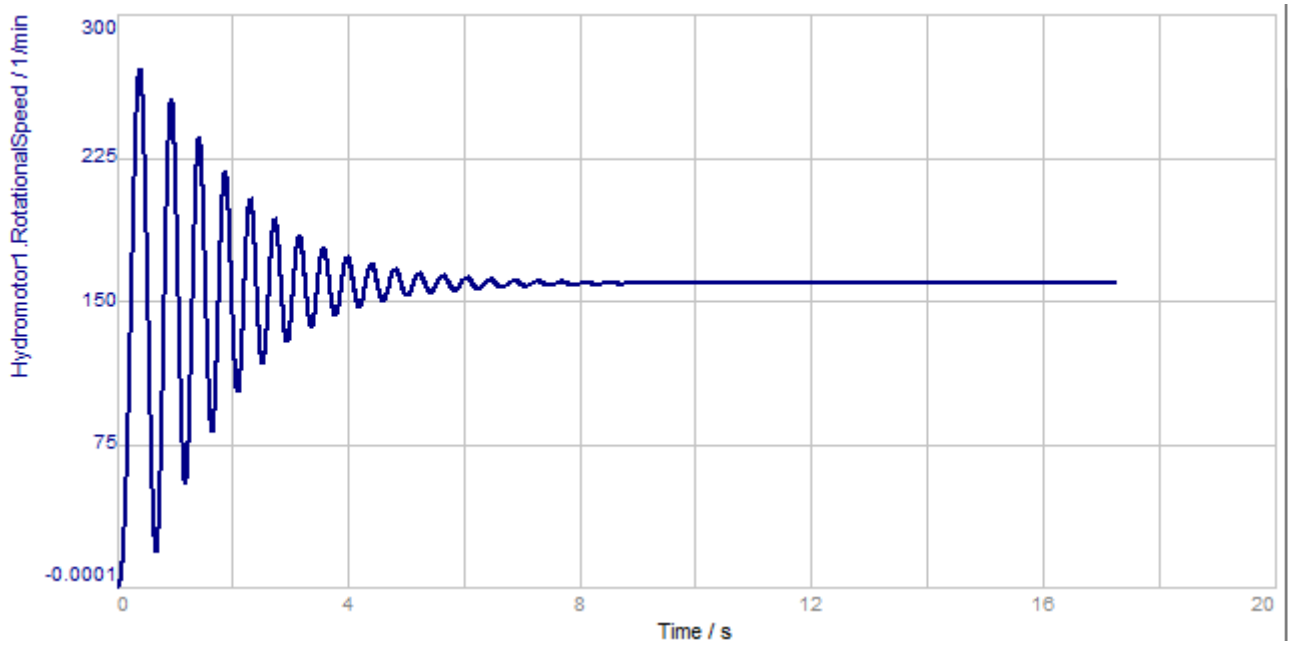
Hidrauličkih elemenata u biblioteci je mnogo i njihov sami opis je vrlo dobro napisan. Osim samih elemenata, moguće je bilo gdje na cjevovodu staviti izlazni signal koji pokazuje primjerice tlak ili protok. Isto je moguće napraviti i sa vodovima signala. Samo povezivanje elemenata zna biti pomalo nezgrapno.

Kao i u prethodnom primjeru za *FluidSIM*, napravljen je model za regulaciju brzine vrtnje hidromotora ali nije uključena PID regulacija (dakle samo P=1):



Slika 48: DSH Plus – model regulacije brzine vrtnje

Grafovi se crtaju u realnom vremenu i moguće ih je spremiti unutar samoga projekta ili ih spremiti u vanjsku datoteku. Prilikom crtanja se mogu birati svi signali ili mjerne veličine koje su postavljene u modelu. Na idućoj slici je prikazan odziv sustava na zadanu referencu, bez PID regulatora:



Slika 49: Odziv sustava na referencu brzine vrtnje

5. ZAKLJUČAK

Kao što se može zaključiti iz usporedbe modeliranih sustava sa eksperimentalnom postavom - modeliranje hidrauličkih sustava nije trivijalno. U većini paketa su hidraulički elementi idealni ali se promjenom njihovih parametara i dodavanjem ostalih elemenata mogu učiniti takvima da su slični stvarnim. Naravno, na inženjeru je da znanjem (a i metodom pokušaja i pogreške) i iskustvom to i ostvari.

Simulink okruženje se na prvi pogled čini nepodobnim za izradu modela zbog manjeg broja elemenata, ali kao što se kroz rad pokazalo – svi se hidraulički elementi mogu dobiti kombiniranjem više različitih elemenata *Simulink* biblioteke. Pokazalo se da su elementi često idealni, ali se također pokazao i način na koji se i to može riješiti. Sve ovo čini *Simulink* dobrim alatom za modeliranje. Naravno, prije nego se pristupi modeliranju potrebno je proučiti dosta materijala koji su dostupni i u samom *Matlab* paketu (*help* datoteke), ali i na službenim web stranicama. No, mora se uzeti u obzir da simulacija nije dovoljna da se zaključi da je neki sustav dobar/loš ili ostvariv/neostvariv – eksperimentalni postav ipak tu ima zadnju riječ.

Pitanje koje se prirodno postavlja jest zašto, pored drugih alata, koristiti baš programski paket *Simulink*? Iako nema veliku bazu i nije interaktivan kao *FluidSim*, te iako nema bazu i mogućnosti *DSHPlus* paketa, *Simulink* ima jednu veliku prednost – on je samo dio *Matlab* numeričkog paketa, tako da se sve mogućnosti *Matlab* paketa mogu iskoristiti i u *Simulink* modelima. Na taj način se inženjeru otvaraju brojne mogućnosti, a u krajnjoj liniji – elemente koje nema može načiniti sam.

6. 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 8th ASEE Global Colloquium on Engineering Education, Budapest, Hungary October 2009.*
- [2] *Mathworks – SimHydraulics:*
<http://www.mathworks.com/help/phymod/hydro/index.html>
- [3] *Mathworks – Primjeri hidrauličkih sustava izrađenih u Simulink okruženju:*
<http://www.mathworks.com/help/phymod/hydro/examples/>
- [4] *FluidSIM User Guide:*
http://www.fluidsim.de/fluidsim/indexhb4_e.htm