



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Karolis Tumaitis

KOMPRESORIŲ BANDYMO STENDO ORO SLĖGIO
AUTOMATINIO REGULIAVIMO SISTEMOS DERINIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Vygandas Vaitkus

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

**KOMPRESORIŲ BANDYMO STENDO ORO SLĖGIO
AUTOMATINIO REGULIAVIMO SISTEMOS DERINIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Studijų programos pavadinimas (kodas 621H66001)

Vadovas

Doc. dr. Vygandas Vaitkus

Recenzentas

Lekt. Gytis Petrauskas

Projektą atliko

Karolis Tumaitis

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos

(Fakultetas)

Karolis Tumaitis

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos 621H66001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Kompresorių bandymo stendo oro slėgio automatinio reguliavimo sistemos derinimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 30 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Karolio Tumaičio** baigiamasis projektas tema „Kompresorių bandymo stendo oro slėgio automatinio reguliavimo sistemos derinimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Tumaitis, Karolis. Kompresorių bandymo stendo oro slėgio automatinio reguliavimo sistemos derinimas. *Valdymo sistemų magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Vygandas Vaitkus; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Automatikos katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *Kompresoriai, bandymu stendas, PID, Fuzzy, oro srautas, slėgis*

Kaunas, 2017. 63 psl.

SANTRAUKA

Projekte pateikiama literatūros analizė valdymo reguliatorių temomis. Aprašomas tiriamasis objektas, pateikiamos proceso schemos bei lygtys. Sukurtas matematinis modelis imituoti objektui su PID bei *Fuzzy* reguliatoriais. Pateikiamas modelio tyrimas, gautų rezultatų tyrimas. Realus kompresorių bandymo stendo problemos analizė. Pateikiama atliktų eksperimentu analizė siekiant patikrinti modelio tinkamumą.

Tumaitis, Karolis. TUNING OF AIR PRESSURE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR COMPRESSOR TEST STAND. Master's thesis in Control system qualification degree / supervisor assoc. doc. dr. Vygandas Vaitkus; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of automation

Keywords: compressors, test stand, PID, Fuzzy, air flow, pressure.

Kaunas, 2017. 63 p.

SUMMARY

The project provides literature management controller topics. Describe the research object contains process diagrams and equations. Created a mathematical model to simulate the object with PID and *fuzzy* controllers. Model shown in the test results obtained by examination. Real-compressor test bench analysis of the problem. It contains an analysis carried out an experiment to verify the suitability of the model.

Turinys

<i>Ivadas</i>	7
1. <i>Procesų valdymo metodų apžvalga</i>	8
1.1 <i>Regulatoriai</i>	8
1.2 <i>PID regulatoriai</i>	8
1.1.1 <i>PID regulatorių derinimas</i>	9
1.2 <i>Fuzzy (neraiškios logikos) regulatorius</i>	10
1.3 <i>Srauto matavimo metodai</i>	12
2. <i>Tiriamųjų kompresorių kontrolinių matavimų bandymo stendas</i>	13
2.1 <i>Stendo struktūra</i>	14
3. <i>Problemos analizavimas</i>	18
4. <i>Matematinio, tiriamos sistemos modelio sudarymas</i>	20
4.1 <i>Proceso lygtys</i>	20
4.2 <i>Testuojamo kompresoriaus parametrai</i>	21
5. <i>Modelio sudarymas naudojant Simulink, regulatorių derinimas, bei jo testavimas</i>	24
6. <i>Bandymai su realiu objektu</i>	60
<i>Išvados</i>	61
<i>Literatūra</i>	62

Įvadas

Kompresoriai sutinkami pramonėje, automobiliuose, autoservisuose ir pan. Suspaustas oras patogus ir ekonomišką energijos perdavimo būdas. Kompresoriuje sukaupia energija įvairiomis vamzdžių sistemomis perduodama pneumatiniams įrenginiams, robotams, naudojama sunkiojoje technikoje. Kompresoriai turi būti pagaminti kokybiškai, nes tai labai įtakoja jų darbo charakteristikas. Kokybei užtikrinti kompanijos gaminančios kompresorius, naudoja tam tikrus standus jiems pilnai išbandyti, patikrinti darbo charakteristikas keičiantis įvairioms sąlygoms. Vienas iš tokių būtų: Tiriamųjų kompresorių kontrolinių matavimų bandymo stendas. Jo paskirtis:

1. Kompresoriaus tiekiamo suspausto oro našumo matavimas visame sūkių ir priešslėgių diapazone;
2. Kompresoriaus cilindų galvučių aušinimo efektyvumo tyrimai;
3. Aušinimo intarpų įtakos tiekiamo oro temperatūrai tyrimai;
4. Skirtingų modifikacijų vožtuvų įtakos kompresoriaus našumui tyrimai;
5. Kompresoriaus energijos taupymo sistemos tyrimai;
6. Kompresoriaus suvartojamos galios matavimas;
7. Kompresoriaus vožtuvų hermetiškumo matavimas.

Šiame darbe bus tiriami oro kompresorių bandymo stenduose naudojamų matavimų metodikų ir reguliatorių parinkimas bei optimizavimas. Pagrindiniai projekte spręstini uždaviniai:

- 1) Srauto matavimo metodo analizė (momentinis ar integralinis);
- 2) Variklio greičio paklaidos įtaka slėgio reguliatoriui;
- 3) Slėgio reguliatorių (PID, *Fuzzy*) analizė, parametrų derinimas, slėgiui ir apsisukimams kintant plačiame diapazone.

1. Procesų valdymo metodų apžvalga

Šio tyrimo objektas, tiriamųjų kompresorių kontrolinių matavimų bandymo stendas, turi tris vienas nuo kito, valdymo atžvilgiu, nepriklausomus kontūrus. Tai yra sistemos aušinimo skysčio valdymo, tepimo sistemos valdymo, ir suslėgto oro sistemos valdymo kontūrai. Visi šie kontūrai valdomi nepriklausomais PID reguliatoriais. Kadangi suspausto oro sistemoje, kuri yra pagrindinė šio stendo dalis, yra problema susijusi su PID reguliatoriaus parametrų derinimu, tyrimas pradedamas nuo reguliatorių apžvalgos.

1.1 Regulatoriai

Vienas iš uždavinių yra tinkamo slėgio reguliatoriaus parinkimas, bei jo parametrų nustatymas. Vieni iš pagrindinių reguliatorių gali būti naudojami PID arba neraiškios logikos (*Fuzzy*) reguliatoriai. Toliau pateikiama abiejų reguliatorių apžvalga.

1.2 PID regulatoriai

Šie regulatoriai kone plačiausiai naudojami tiek pramoniniuose įrengimuose, tiek buitiniuose. Jo valdymo principas toks, kaip ir dauguma reguliatorių turi du įėjimus, tai yra užduoties, bei valdomo proceso išėjimo reikšmę, tarp kurių bando palaikyti kuo mažesnę paklaidą, taip artinant proceso išėjimą norimos, užduotosios vertės. PID regulatoriai turi tris dedamąsias, kurios yra P – proporcinė, I – integralinė, D – diferencialinė dedamoji.

Sistema su tolydiniu PID reguliatoriumi gali būti išreikšta lygtimi (1)

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]. \quad (1)$$

Čia:

$u(t)$ - valdymo signalas;

$r(t)$ – užduotis;

$y(t)$ - išėjimas;

$e(t) = r(t) - y(t)$ - paklaida;

$K = P$ - proporcinės dedamosios koeficientas;

T_I – integruojančios dedamosios laiko pastovioji;

T_D – diferencijuojančios dedamosios laiko pastovioji;

T_o - diskretizavimo žingsnis,

1.1.1 PID reguliatorių derinimas

Siekiant jog sistema veiktų stabiliai, būtina nustatyti tinkamus reguliatorių parametrus. Kad tai padaryti naudojami keli reguliatorių reguliavimo metodai.

Pirmas metodas, kuris tikriausiai užima daugiausiai laiko, tai rankinis parametų derinimo metodas. Jis dažnai taikomas praktikoje kai nepavyksta suderinti kitais metodais. Parametrai pradedami reguliuoti nuo P dedamosios, tuo tarpu kitas dedamąsias prilyginus nuliui. Tuomet P dalis didinama tol kol gaunamas laikui bėgant nusistovėjęs proceso išėjimas, kuris dažniausiai turi nemažą paklaidą. Toliau jei reikia keičiama diferencijuojanti dedamoji. Ji didinama tol, kol objekto išėjimo signalo nuokrypis sumažėja iki leidžiamo. Tuomet jei reikia pakoreguojama integruojanti dalis. Ji keliamą tol kol sistema suvaldoma per norimą laiko tarpą.

Sekantis reguliatorių reguliavimo metodas būtų *Ziegler'io-Nichols'o*. Pradžia šio metodo tokia pati kaip ir rankinio reguliavimo, keičiama P dalis kol nusistovi išėjimas. Tuomet naudojantis 1.1 lentele paskaičiuojami ir kiti reguliatoriaus parametrai.

1.1 lentelė. *Ziegler'io-Nichols'o* PID reguliatoriaus reguliavimo lentelė

Regulatorius	K_p	K_I	K_D
P	$0.5 \cdot K_c$	-	-
PI	$0.45 \cdot K_c$	$1.2 \cdot K_p / P_c$	-
PID	$0.6 \cdot K_c$	$2 \cdot K_p / P_c$	$K_p \cdot P_c / 8$

Sekantis metodas būtų Takahaši metodas. Jo metu sudaromas pereinamojo proceso grafikas ir iš jo nustatomos T_U ir T_G parametų reikšmės. Turint jas reguliatoriaus parametrai paskaičiuojami pagal tokias formules:

$$K_p = \frac{1.2T_G}{(T_u + T_o)} - \frac{0.3T_G T_o}{(T_u + T_o / 2)^2}, \quad (1)$$

$$K_I = \frac{0.6T_G T_o}{K(T_u + T_o / 2)^2}, \quad (2)$$

$$K_D = \frac{0.5T_G}{KT_o} \quad (3)$$

1.2 Fuzzy (neraiškios logikos) reguliatorius

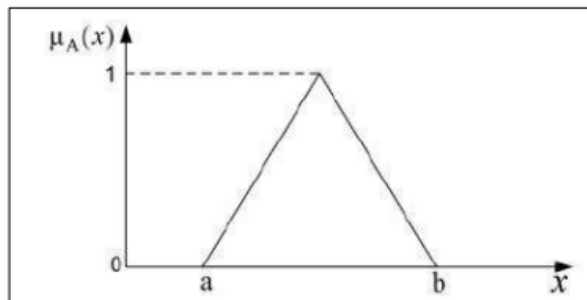
Šie reguliatoriai gali būti pritaikyti beveik visose sistemose kur reikalingas automatinis valdymas. Jie ypatingai pasižymi tokiuose procesuose kur nėra aiškumo, sudėtinguose, greituose procesuose. Toks reguliatorius aprašomas paprastomis taisyklėmis, pavyzdžiui „Jei x yra y tai, z yra n “ ir panašiai. Nustatant šias taisykles dažniausiai reikalaujama ne teorinių žinių, bet žinių apie procesą, nes šios taisyklės nors ir nėra tikslios, tačiau labai išsamios ir aiškios.

Siekiant aprašyti reguliatorių sudaromi lingvistiniai kintamieji, kuriais aprašomos sąlygos kaip turi veikti reguliatorius, pavyzdžiui „Jei paklaida didelė, tai išėjimas mažas“. Dažniausia turint procesą kur reguliuojamas vienas parametras, t.y. yra tik viena užduotis ir vienas išėjimas, užtenka trijų reguliavimo taisyklių.

Fuzzy reguliatoriaus veikimą dar būtų galima aprašyti kaip aibes ir joms priklausančius dydžius. Regulatorius stengiasi aibėje X išlaikyti dydį x nustatant jai ribas ir panašiai.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}. \quad (4)$$

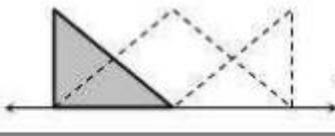
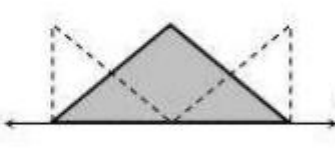
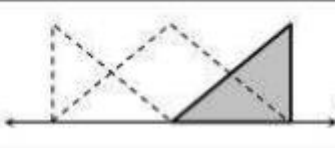
Čia x priklauso aibei X , o funkcija $\mu_A()$ parodo kaip x priklauso aibei X . Žemiau pateiktas grafinis vaizdas 1.1pav.



1.1 pav. Priklausomybės aibei A funkcija [20]

Dažniausiai Fuzzy reguliatorių tiek įėjimas tiek išėjimas sudaryti iš mažiausiai trijų tokių aibių. Jos apibrėžia kaip turi priklausyti išėjimas nuo paklaidos, apibrėžiant ribomis. Tokios funkcijos kurios nurodo priklausomybes gali būti apskaičiuotos pagal žemiau, 1.2.1 lentelėje pateiktas formules.

1.2.1 lentelė. Priklausomybių apskaičiavimo formulės [20]

Kairys kraštas		$\mu(u) = \begin{cases} 1 & \text{jeigu } u \leq c \\ \max\left\{0, 1 + \frac{c-u}{0.5w}\right\} & \text{kitu atveju} \end{cases}$
Centrinė dalis		$\mu(u) = \begin{cases} \max\left\{0, 1 + \frac{u-c}{0.5w}\right\} & \text{jeigu } u \leq c \\ \max\left\{0, 1 + \frac{c-u}{0.5w}\right\} & \text{kitu atveju} \end{cases}$
Dešinys kraštas		$\mu(u) = \begin{cases} \max\left\{0, 1 + \frac{u-c}{0.5w}\right\} & \text{jeigu } u \leq c \\ 1 & \text{kitu atveju} \end{cases}$

Įvedus daugiau narystės funkcijų tiek įėjimui tiek išėjimui, padidinamas jo tikslumas, sušvelninamas reguliavimas. Taip pat tam pačiam papildyti dar galima iterpti įėjimo (paklaidos) integralą, kaip įėjimą. Juo apibrėžiama kaip greitai kinta paklaida ir į tegiamą ar neigiamą pusę. Tuomet atsirada tokie įėjimo ar išėjimo apibrėžimai kaip „*Didinti nedaug*“, „*Mažinti vidutiniškai*“. Kuo daugiau tokių apibrėžimų tuo tikslesnis reguliavimas.

Turint sprendimą, atprašyta lingvistiniais kintamaisiais, sistemos išėjimo signalą apskaičiuoti galima svorio centro metodu [20]. Svorio centro metodu apskaičiuojama pagal formulę (5).

$$y = \frac{\sum_{i=1}^R b_i \cdot \int_y \mu(y) dy}{\sum_{i=1}^R \int_y \mu(y) dy}. \quad (5)$$

Čia b_i – i -tosios aibės centras, R -taisyklių kiekis, y – atsakymas, $\mu(y)$ – narystės funkcija.

Kai narystės funkcijų paviršiai aprašyti simetriškais trikampiais, tuomet integralą galima apskaičiuoti pagal (6) formulę:

$$w \cdot \left(h - \frac{h^2}{2}\right). \quad (6)$$

Fuzzy (neraiškia) logika paremtas valdymas susideda iš tokių dalių:

1. Regulatoriaus taisyklių bazė, aprašanti kaip valdyti sistemą;
2. Ryšys tarp įėjimo ir išėjimo, kuris vertina kuomet ir kuri taisyklė turi būti įtraukta į išėjimo skaičiavimą;
3. Lingvistinio kitamojo narystės funkcijų nustatymas (fuzifikavimas);
4. Rezultato ar kitaip valdančio poveikio apskaičiavimas;

1.3 Srauto matavimo metodai

Srautas tai skysčio ar dujų tūris, pratekantis per laiko vienetą skersiniu pjūviu. Srautas šiame kompresorių bandymo stende yra vienas pagrindinių reguliuotinų parametrų, kurio reguliavimas yra pakankamai sudėtingas dėl nepastovių, bei dideliame diapazone kintančių variklio apsisukimų, slėgio kitimo, bei dėl greit kintančių oro savybių, kurios kinta nuo jo slėgio (pvz. temperatūra). Stende oro srautą galima sureguliuoti keičiant priešslėgį, kuris keičiasi valdant oro sklendę. Sklendės pozicija gali būti tarp pilnai uždaros arba atviros (0-100%).

Srauto matavimas gali būti momentinis (kai matuojama viename taške) arba integralinis (kai matavimai atliekami dviejuose taškuose ir matuojama iš skirtumo tarp jų). Momentinis matavimo būdas yra paprastesnis, užtenka vieno jutiklio, tačiau integraliniu galima pasiekti didesnę tikslumą. Tam kad įsitinkinti, kuris šiai sistemai tinkamesnis, bus atliekami eksperimentai ir jų metu nustatoma, kurį metodą parinkti oro kompresorių bandymo stendui.

2. Tiriamųjų kompresorių kontrolinių matavimų bandymo stendas

Tyrimui atlikti naudotas kompresorių tiriamųjų parametrų bandymo stendas, esantis įmonėje pavadinimu UAB „Panevėžio Aurida“, kuri gamina automobilinius oro kompresorius. Stendą įrengė ir paleido 2014 - 2015 metais UAB „Santaviltė“. Stendo vaizdas pateiktas paveiksle.



1 pav. Tiriamųjų kompresorių kontrolinių matavimų bandymo stendas

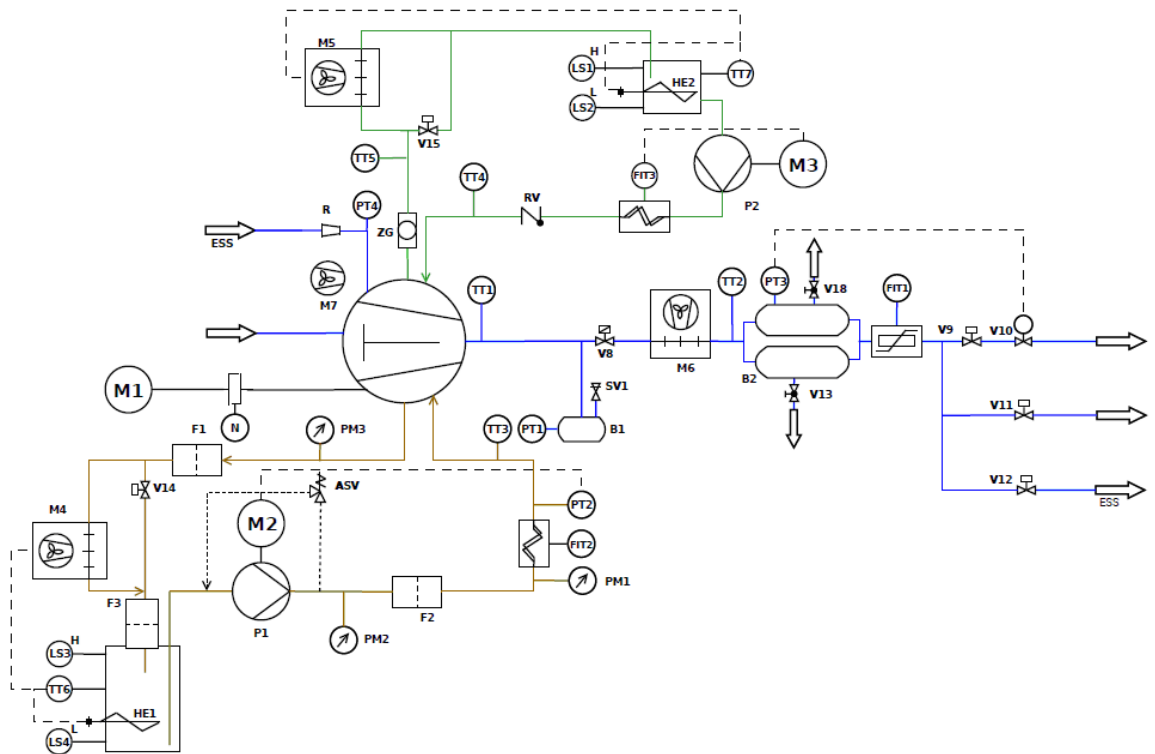
Šio stendo parametrų ribos kompresoriams testuoti:

1. Suspausto oro temperatūra slėgimo antgalyje (matavimo ribos ne mažesnės kaip $20 - 280 \pm 1^\circ\text{C}$);
2. Suspausto oro temperatūra už oro aušintuvo (matavimo ribos ne mažesnės kaip $20 - 150 \pm 1^\circ\text{C}$);
3. Suspausto oro slėgis slėgio lyginimo resiveriėje (matavimo ribos ne mažesnės kaip $0 - 2,5 \text{ MPa}$);
4. Tepimo sistemos paduodamo tepalo temperatūra (matavimo ribos ne mažesnės kaip $20 - 120 \pm 1^\circ\text{C}$);
5. Tepimo sistemos paduodamo tepalo slėgis (matavimo ribos ne mažesnės kaip $0,15 - 1,0 \pm 0,01 \text{ MPa}$);
6. Paduodamo į kompresorių aušinimo skysčio temperatūra (matavimo ribos ne mažesnės kaip $20 - 120 \pm 1^\circ\text{C}$);

7. Kompresoriaus sukuriamas suspausto oro našumas (matavimo ribos ne mažesnės kaip 50 - 1200 l/min $\pm 2,5\%$);
8. Kompresoriaus suvartojamas galingumas (matavimo ribos ne mažesnės kaip 0,5 – 15 $\pm 0,05$ kW);
9. Vožtuvų hermetiškumas (slėgio kritimas per minutę, kai pradinis slėgis 0,6 – 0,65 MPa iš vieno litro talpos resiverio).

2.1 Stendo struktūra

Tiriamųjų kompresorių stendas sudarytas iš trijų nepriklausomų kontūrų, tai yra oro sistemos, aušinimo ir tepimo kontūrai. Šiame darbe tiriamas tik oro sistemos darbas. Toliau pateikta detali visos sistemos P&I diagrama (*Piping and Instrumentation diagram*) 2.1 paveikslas. Ji parodo visus sistemos kontūrus, bei ryšius, srautų kryptis. Mėlyna spalva žymimas kontūras yra oro, žalia – aušinimo skysčio, ruda – tepalo.



2.1pav. Sistemos P&I diagrama

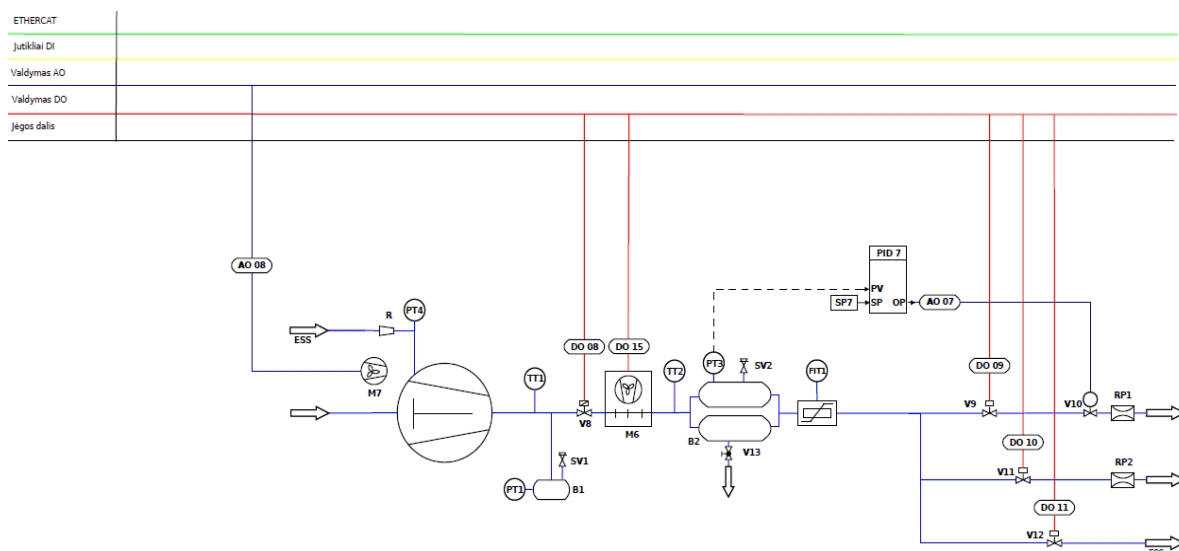
Diagramos žymėjimai:

- V1 Vertikalaus cilindro išstūmimas;
- V2 Vertikalaus cilindro sutraukimas;

V3 Horizontalaus cilindro išstūmimas;
V4 Horizontalaus cilindro sutraukimas;
V5 Vertikalaus cilindro fiksavimas;
V6 Horizontalaus cilindro fiksavimas;
V7 Kompresoriaus praputimo vožtuvas;
V8 Hermetiškumo tikrinimo vožtuvas;
V9 Atkirtos vožtuvas;
V10 Droseliavimo vožtuvas;
V11 Kalibravimo angos vožtuvas;
V12 Energijos taupymo sistemos vožtuvas;
V13 Kondensato nupylimo vožtuvas;
V14 Tepalo kontūro perjungimo vožtuvas;
V15 Auš. skys. kontūro perjungimo vožtuvas;
V18 Kondensato nupylimo vožtuvas;
LS1 Aušinimo skysčio lygio viršutinė riba;
LS2 Aušinimo skysčio lygio apatinė riba;
LS3 Tepalo lygio viršutinė riba;
LS4 Tepalo lygio apatinė riba;
TT1 SO temperatūra. Slėgimo antgalyje;
TT2 SO temperatūra. po oro aušintuvo;
TT3 Tepimo sis. paduodamo. tepalo temperatūra.;
TT4 Paduodamo į kompresoriaus auš. skysčio temperatūra.;
TT5 Grįžtančio iš kompresoriaus auš. skysčio temperatūra.;
TT6 Tepalo bako temperatūra;
TT7 Aušinimo skysčio temperatūra;
PT1 SO slėgis slėgio lyginimo resiveriye;
PT2 Tepimo sis. paduodamo tepalo slėgis;
PT3 SO slėgis slėgio resiveriye 40l;
PT4 Paduodamo į kompresorių aušinimo skysčio slėgis;
FIT1 Kompresoriaus sukuriamas SO našumas;
FIT2 Kompresoriaus Sukuriamas tepalo našumas;
FIT3 Kompresoriaus Sukuriamas aušinimo našumas;
N Variklio sukimo momentas.

Kadangi darbas apima tik suslėgto oro kontūro valdymą, toliau yra išskiriama ir tiriama tik jo dalis.

Suslėgto oro kontūro valdymo schemeje parodomi oro srautų valdymo ryšiai. Darbe nagrinėjamas PID7 darbas valdant V10 sklendę, pagal slėgį PT3, kai palaikoma užduotis SP7. RP1 matuojamas išėjimo srautas. V11 sklendė skirta kalibravimui, o V12 energijos taupymo sistemos vožtuvas.



2.2 pav. Suslėgto oro kontūro valdymo schema

Suspaustam orui valdyti sistemoje sumontuota ASCO Series290 slėgiu valdoma sklendė (2.3 pav.) su pozicijos jutikliu.



2.3 pav. Suslėgto oro valdymo sklendė ASCO Series290

2.1 lentelė. Sklendės parametrai

Sistemoje esančio oro temperatūra:	0...50°C
Darbinis slėgis:	0...1,6 Mpa
Pralaidumas:	600 (mm ² /s)
Reikalavimai sistemoje esančioms dujoms:	Oras arba inertinės dujos, išfiltruotos, sausos, be kondensato ar vandens

2.2 lentelė. Stendo reikalavimai oro srauto matavimo prietaisui

Temperatūra:	20...150°C
Slėgis:	0...2,5 Mpa
Srautas (FAD Free Air Delivery)	50...1200 l/min
Matavimo paklaida	Mažiau nei 2%

Srauto matavimui naudojama Fox FT2A srauto matuoklė.



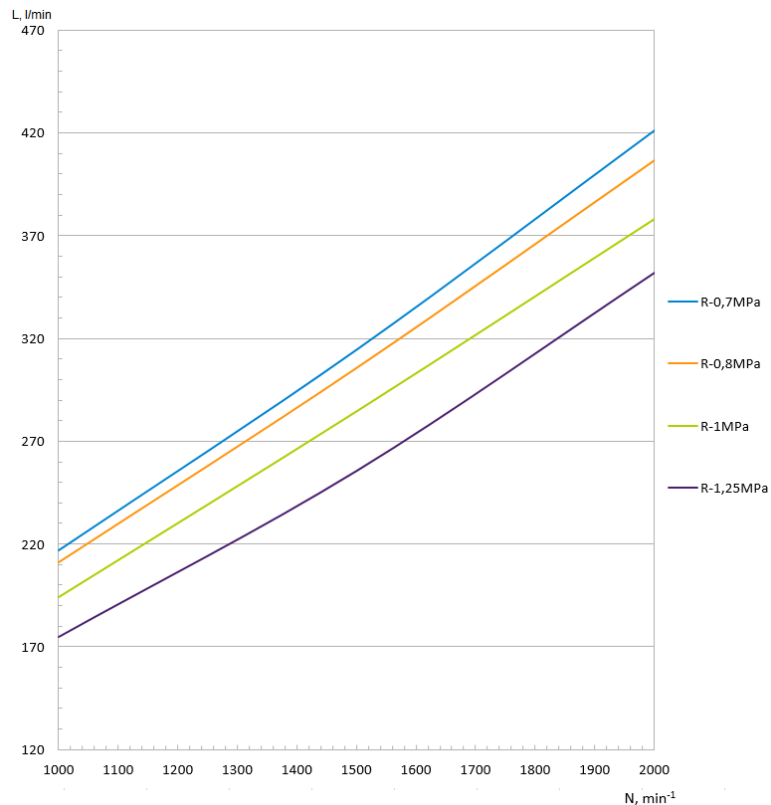
2.4 pav. Srauto jutiklis Fox FT2A

2.3 lentelė. Srauto matavimo prietaiso parametrai pateikti lentelėje

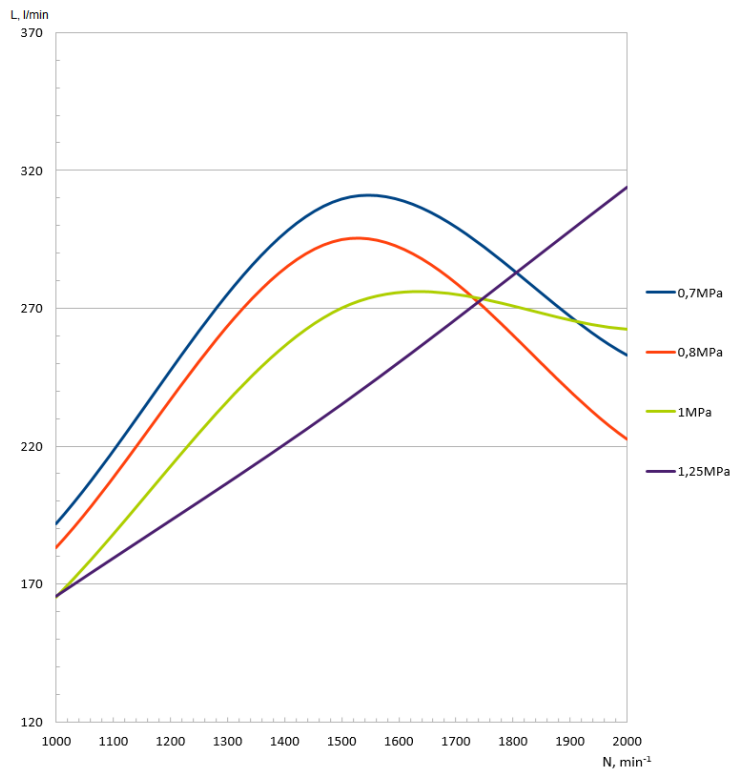
Temperatūra:	-40...121°C (± 1,0°C)
Slėgis:	0...2,5 Mpa
Srautas (FAD Free Air Delivery)	0...1320 l/min
Matavimo paklaida	±1 %
Išduodamas signalas:	4..20mA

3. Problemos analizavimas

Šio tyrimo eigoje siekiama ištirti kompresorių bandymo stendo charakteristikas. Stendas su esamu PID reguliatoriumi slėgį sureguliuoja gerai, tačiau dėl neaiškių priežasčių dirbant automatinio režimu krenta testuojamo kompresoriaus našumas, tai yra sumažėja pumpuojamo oro srautas. Tačiau valdant sklendę rankiniu režimu (mechaniškai reguliuojant žmogui), gaunamas testuojamo kompresoriaus našumas nekrenta ir atitinka kompresoriaus reikalavimus. Tai puikiai atsispindi grafikuose (3.1 pav. rankinio režimo metu, 3.2 pav. automatinio režimo metu).



3.1 pav. Gautas kompresoriaus našumas jį testuojant rankiniu stendo valdymo būdu



3.2 pav. Gautas kompresoriaus našumas jį testuojant automatinio stendo valdymo būdu

Tokiai problemai analizuoti pasitelktas matematinis modeliavimas, kuomet tirama sistema kai oro sklendė valdoma PID arba *Fuzzy* reguliatoriais, stebimos reakcijos į įvairius trikdžius, variklio apsisukimų greičio paklaidą, valdymo vėlinimą. Kadangi sistemoje naudojamas momentinis srauto matavimas, tirama kaip keičiasi srauto matavimo rezultatai naudojant integralinį matavimo būdą.

4. Matematinio, tiriamos sistemos modelio sudarymas

Matematinius modelius patogiu sudaryti naudojantis *MATLAB Simulink* modeliavimo įrankiu. Jis turi visas tam atlikti reikalingas funkcijas. Taip pat yra elementų skirtų modeliuoti kompresoriams, tačiau norint tikslesnio tiriamos sistemos modelio, patartina naudotis būtent jos proceso lygtimis.

4.1 Proceso lygtys

Modeliui sudaryti reikalingos trys lygtys, tai yra srauto (našumo) lygtis, slėgio sistemoje charakteristika, bei kompresoriaus sunaudojamos galios lygtis. Visos pateiktos lygtys yra sudarytos būtent šiam objektui. Koefficientai paimti iš stendo gamintojo dokumentacijos.

Kompresoriaus našumo skaičiavimas aprašomas taip:

$$L = V_{st.} \cdot n_{st.} \cdot N_m \cdot \lambda_{už.n.} \quad m^3/s \quad (6)$$

L – našumas;

$V_{st.}$ – darbinis tūris paskaičiuojamas pagal (7);

$n_{st.}$ – stūmoklių kiekis;

N_m – kompresoriaus apsisukimų skaičius;

$\lambda_{už.n.}$ – Cilindro užpildymo nuostoliai paskaičiuojami pagal (8);

$n_{st.} = 1$;

$N_m = 500..3500$ apsk./min.

Darbinis tūris skaičiuojamas pagal formulę:

$$V_{st.} = \left(\frac{D}{2 \cdot 1000}\right)^2 \cdot \pi \cdot \frac{h}{1000} = \left(\frac{60}{2 \cdot 1000}\right)^2 \cdot 3,14 \cdot \frac{38}{1000} = 0,000107388 \quad m^3; \quad (7)$$

Cilindro užpildymo nuostolių skaičiavimas:

$\lambda_{už.n.} = \lambda_{0n} \cdot 0,83 \cdot 0,92$; čia koefficientai 0,83 ir 0,92, paimti kaip pavyzdys, kompresoriaus modelio 1111-102; (8)

$$\text{kur, } \lambda_{0n} = 1 - \left(\left(\frac{1}{\varepsilon_p^{1,1225}} - 1 \right) \cdot 0,05 \right) \quad (\text{kai mirtinas tūris } 10\%); \quad (9)$$

$$\text{bei } \varepsilon_p = \frac{p}{p_{atm.}} \quad (\text{santykinis slėgio padidėjimas}); \quad (10)$$

Slėgio skaičiavimas:

$$p = \left(1 - \left(0,3 \cdot \frac{A}{\sqrt{p_n}} \right) \right) \cdot p_n \quad (11)$$

A – slėgio nuostolių koeficientas kompresoriuje;

p – vidutinis slėgis sistemoje;

p_n – nominalus užduotas slėgis.

Galios skaičiavimo formulė:

$$P_n = \frac{L_n}{60} \div n_{st.} \div \lambda_{už.n.} \div 1000 \cdot p_{atm.} \cdot Q_n \cdot \frac{1,4}{0,4} \cdot \left(\varepsilon_{cil.}^{\frac{0,4}{1,4}} - 1 \right) \cdot \frac{n_{st.}}{0,56} \quad (12)$$

P_n – reikalinga galia;

L_n – našumas;

$n_{st.}$ – stūmoklių kiekis;

$\lambda_{už.n.}$ – cilindro užpildymo nuostoliai;

$p_{atm.}$ – atmosferos slėgis;

Q_n – energijos sugrįžimo koeficientas;

$\varepsilon_{cil.}$ – patikslintas nominalus santykinis slėgio padidėjimas.

4.2 Testuojamo kompresoriaus parametrai

Modelio tyrimui bandymai atlikti su dviem kompresoriais. Jų parametrai pateikti žemiau iš „Auridos“ kompresorių katalogo. Jie reikalingi, norint sudaryti universalų modelį, kad neperrašant lygčių, o tik pakeitus koeficientus, būtų imituojamas testuojamo kompresoriaus pakeitimas.

Pirmo kompresoriaus parametrai:

Stūmoklio matmenys:

Skersmuo: $D = 60\text{mm}$;

Eiga: $h = 38\text{mm}$;

Stūmoklių skaičius: $n_{st.} = 1$;

Droseliavimo koeficientas: $\lambda_{dr} = 0,77990303$ (slėgio kritimo koeficientas kompresoriuje);

Pašildymo koeficientas: $\lambda_{pš} = 0,96$;

Tankumo koeficientas: $\lambda_{tk} = 0,96$;

Tūrinis koeficientas: $\lambda_t = 0,93$;

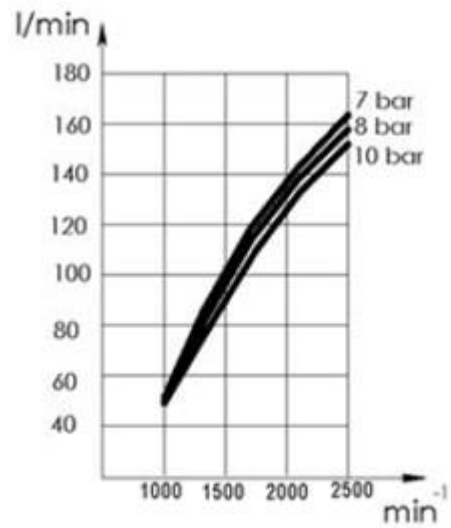
$$\text{Padavimo koeficientas: } \lambda = \lambda_{dr} \cdot \lambda_{pš} \cdot \lambda_{tk} \cdot \lambda_t = 0,669197 \quad (13)$$

$$\text{Cilindro užpildymo nuostoliai: } \lambda_{už.n.} = \lambda_0 \cdot 0,83 \cdot 0,92 \quad (14)$$

Slėgio nuostolių koeficientas: $A = 2,66$;

$$\text{Turinis koeficientas: } \lambda_T = 1 - 0,01 \cdot \left(\frac{p_n}{p_{atm.}} - 1 \right). \quad (15)$$

Pateiktos teorinės kompresoriaus charakteristikos:



4.1 pav. Teoriniai kompresoriaus parametrai (srauto matavimas)



4.2 pav. Teoriniai kompresoriaus parametrai (reikalingos galios matavimas)

Antrojo kompresoriaus parametrai:

Stūmoklio matmenys:

Skersmuo: $D = 92mm$;

Eiga: $h = 46mm$;

Kiti parametrai:

Stūmoklių skaičius: $n_{st.} = 1$;

Slėgio nuostolių koeficientas: $A=2,5$;

Droseliavimo koeficientas: $\lambda_{dr} = 0,753644$;

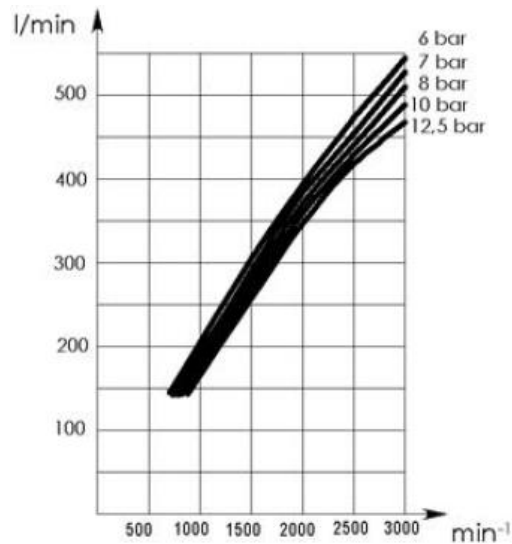
Pašildymo koeficientas: $\lambda_{dr} = 0,93$;

Tankumo koeficientas: $\lambda_{dr} = 0,93$;

Tūrinis koeficientas: $\lambda_{dr} = 0,90$;

Padavimo koeficientas: $\lambda = \lambda_{dr} \cdot \lambda_{pš} \cdot \lambda_{tk} \cdot \lambda_t = 0,0586644$ (16)

Cilindro užpildymo nuostoliai: $\lambda_{už.n.} = \lambda_0 \cdot 0,83 \cdot 0,92$ (17)



4.3 pav. Teoriniai kompresoriaus parametrai (srauto matavimas)

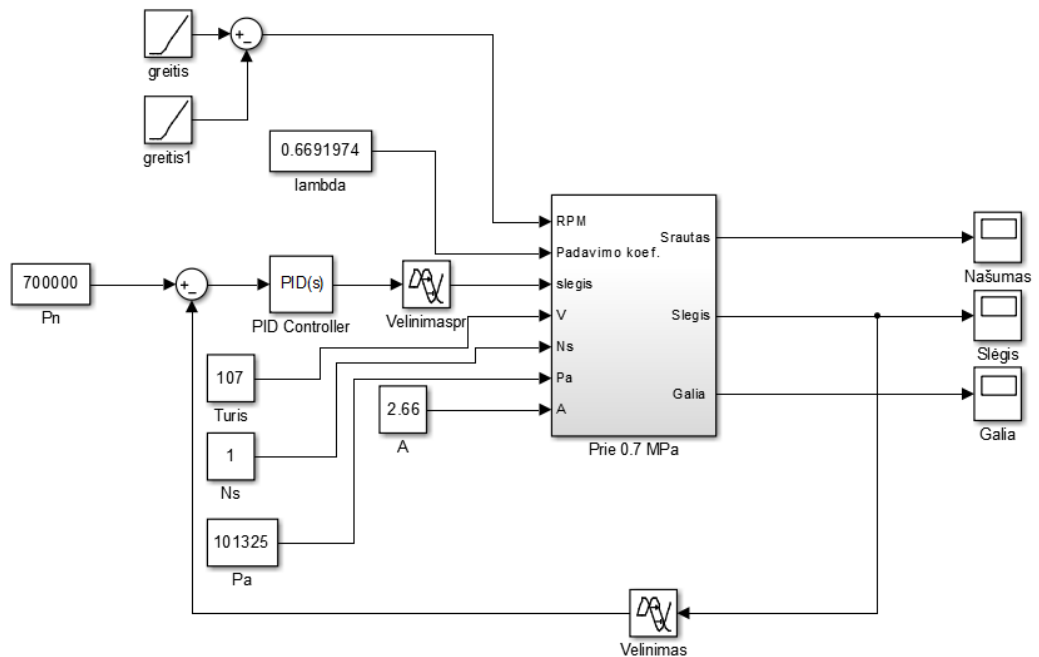


4.4 pav. Teoriniai kompresoriaus parametrai (reikalingos galios matavimas)

5. Modelio sudarymas naudojant *Simulink*, reguliatorių derinimas, bei jo testavimas

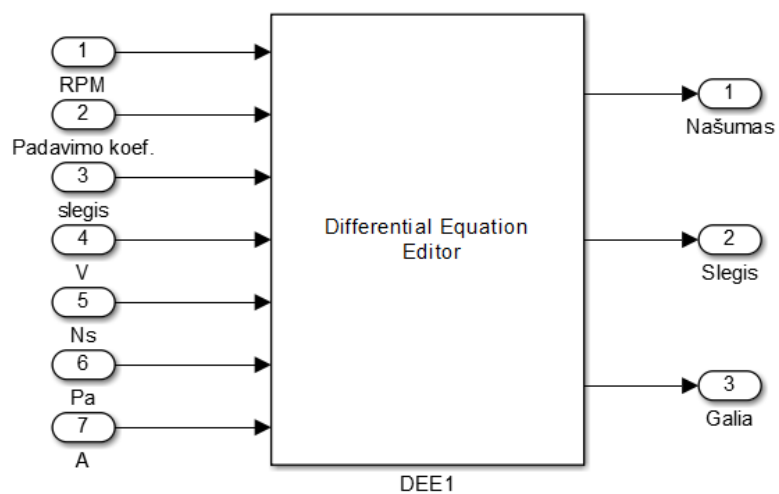
Pagal turimus stendo parametrus sudaryti atskiri modeliai, teoriniams skaičiavimams atvaizduoti, bei realiam procesui imituoti.

Pirmiausia sudarytas teorinių skaičiavimų modelis. Jo fragmentas pavaizduotas žemiau pateiktame paveiksle.



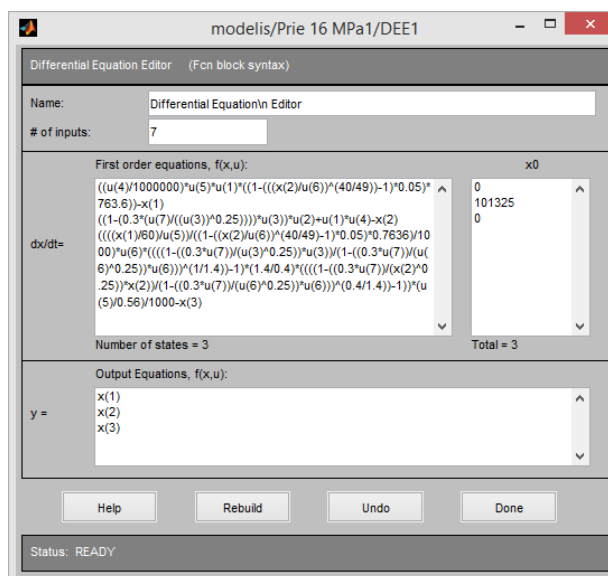
5.1 pav. Suslėgto oro kontūro matematinis modelis su PID reguliatoriumi

Proceso bloko viduje įterptas DEE blokas.



5.2 pav. Modelio proceso blokas su įėjimais bei išėjimais

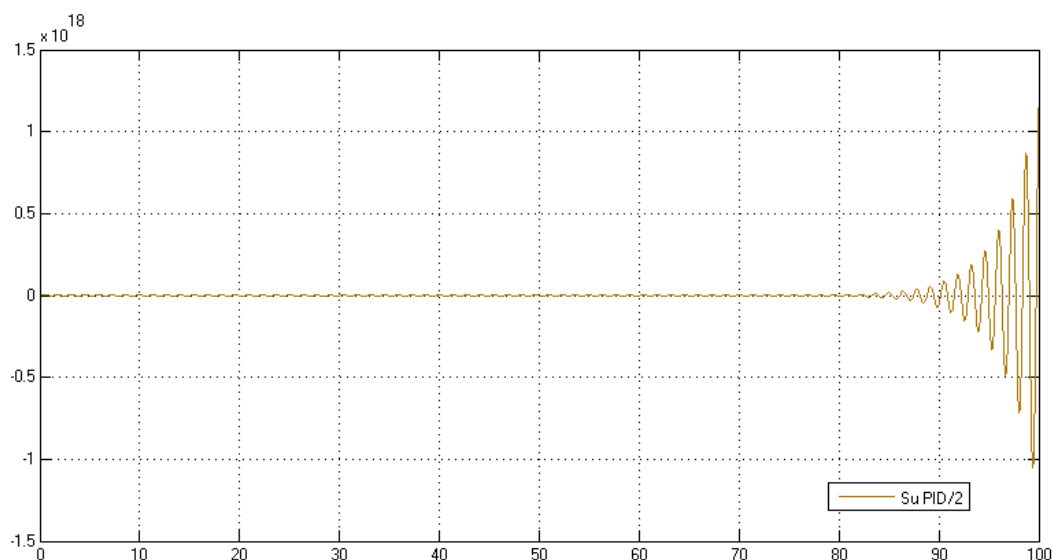
Šiame bloke aprašytos srtauto, slėgio bei galios proceso lygtys.



5.3 pav. Modelio proceso DEE blokas

Regulatoriaus derinimas naudojant antrąjį *Ziegler'io-Nichols'o*, arba kitaip vadinamą jautrumo metodą.

Pirmiausia pagal šio metodo taisykles nustatoma P dedamoji rankiniu būdu, kitas dedamąsias I ir D nustatant nuliams. Rasta P dedamosios vertė kuomet procesas pradeda švytuoti harmoningais negęstančiais svyravimais yra $K_c=8$, švytavimo periodas $P_c=1s$ ir slėgis prie užduoto 0,7MPa nusistovi tik prie 0,6MPa, taip gaunama 0,1MPa paklaida.



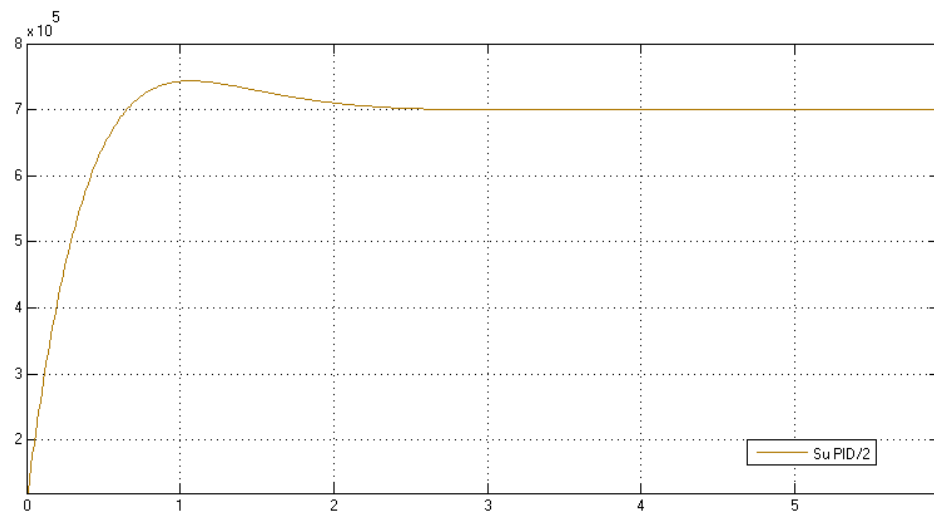
5.4 pav. PID regulatoriaus slėgio palaikymas prie 0,7MPa (kai P lygus 8 ir gauti negęstantys svyravimai)

Toliau pagal metodo derinimo lentelę 1.1 apskaičiuoti PID reguliatoriaus parametrai.

5.1 lentelė.

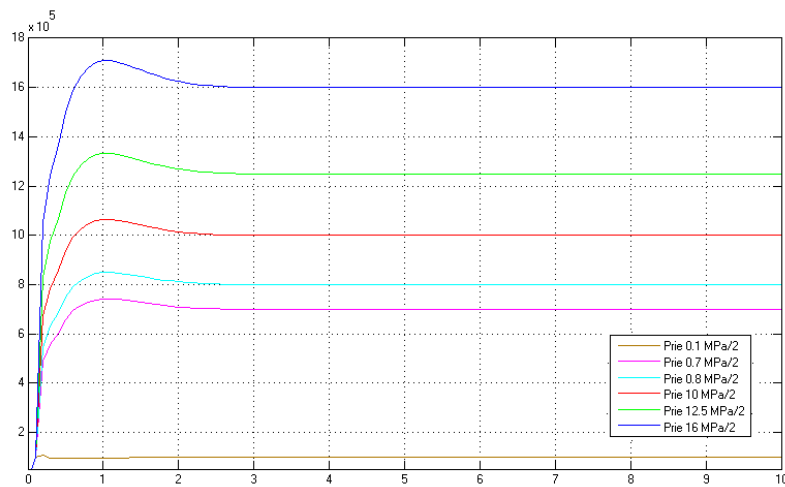
P dedamoji K_P	I dedamoji K_I	D dedamoji K_D
$K_P = 0,6 * K_c$	$K_I = 2 * K_P / P_c$	$K_D = K_P * P_c / 8$
$K_P = 4,8$	$K_I = 9,6$	$K_D = 0,6$

Sustačius paskaičiuotus PID reguliatoriaus parametrus gauta slėgio palaikymo charakteristika pateikta grafike:



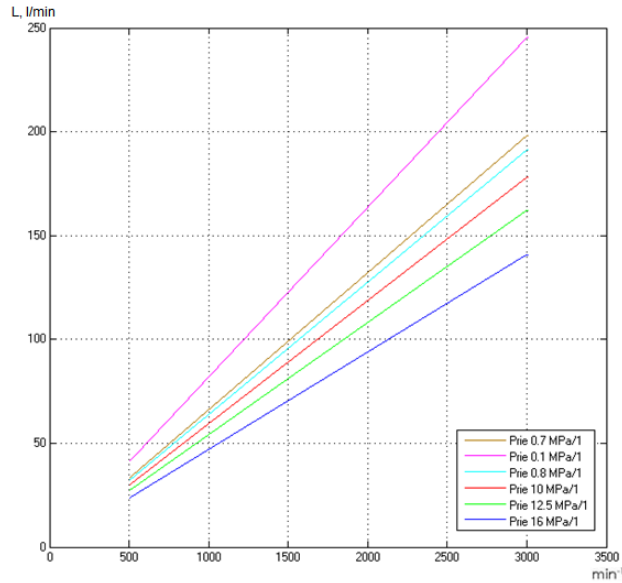
5.5 pav. Gauta slėgio kreivė prie 0,7MPa, su paskaičiuotais PID reguliatoriaus parametrais

Toliau išbandoma kaip palaikomi visi užduodami standartiniai, testavimo metu naudojami, slėgiai, tai yra prie: 0,7MPa, 0,8MPa, 1,0MPa, 1,25MPa ir 1,6MPa. Taip pat pasižiūrėjimui pridėtas prie atmosferos slėgio ~0,1MPa.



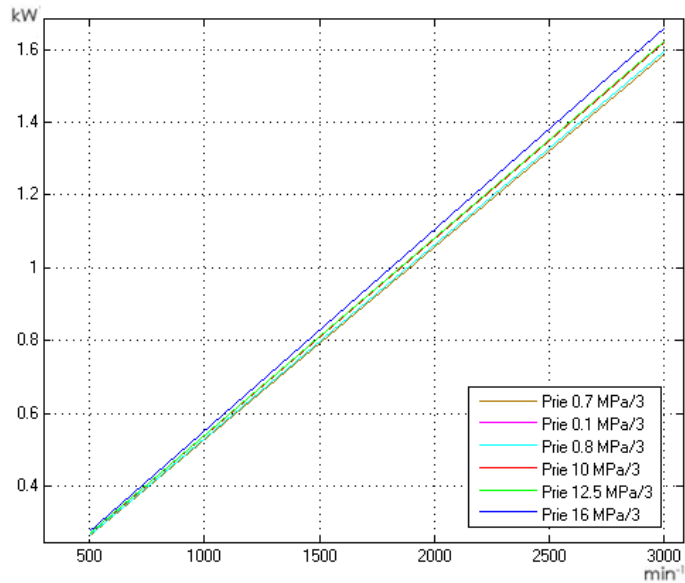
5.6 pav. Gautos slėgio kreivės su paskaičiuotais PID reguliatoriaus parametrais

Toliau testuojami kokie bus gauti kompresorių našumai bei galios poreikiai.



5.7 pav. Gautas teorinis našumas su modeliu

Gauta teorinė galios poreikio charakteristika:



5.8 pav. Teorinis galios poreikis su modeliu

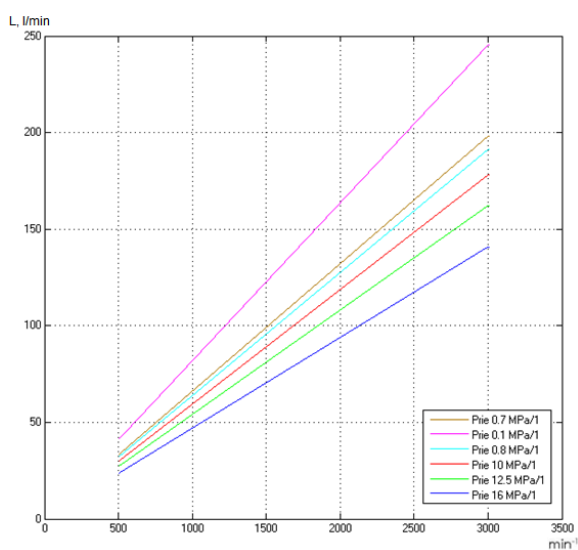
Iš gautų grafikų galima teigti jog regulatoriaus parametrai paskaičiuoti tinkamai, nes prie bet kokio iš reikalaujamų slėgių gaunami gana tikslūs rezultatai, (pvz. esant slėgiui 1,6MPa, pagal teorines kreives prie 2000 apsisukimų per minutę turi būti 94 l/min, sumodeliavus gautas rezultatas yra 93 l/min, visuose diapazonuose vyrauja panaši paklaida, tai yra ± 3 l/min. Tuo tarpu galios parodymai prie 2000 apsisukimų per minutę, skiriasi vos $\pm 0,02$ kW.

Toliau išbandomas slėgio reguliatorius suderintas naudojantis *Auto Tune* funkcija, tam, kad palyginti rezultatus su anksčiau paskaičiuotais parametrais, kuomet gauti tokie reguliatoriaus parametrai:

Proportional (P):	2.05587994615895
Integral (I):	3.47802266912622
Derivative (D):	-0.426507818002763
Filter coefficient (N):	4.82026321530555

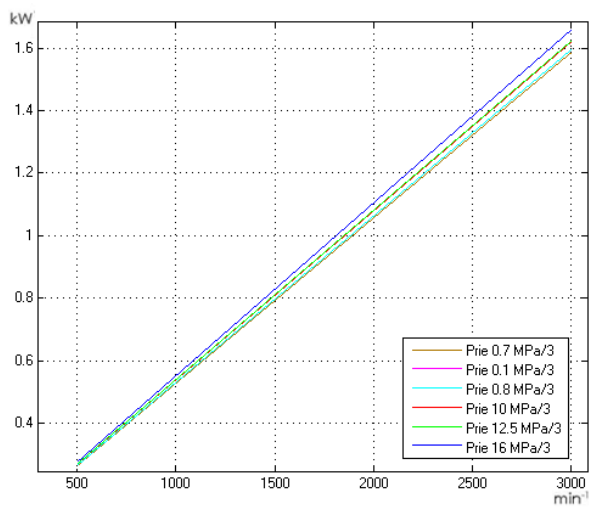
5.9 pav. Modelio PID reguliatoriaus gauti parametrai

Gautas teorinis našumas:



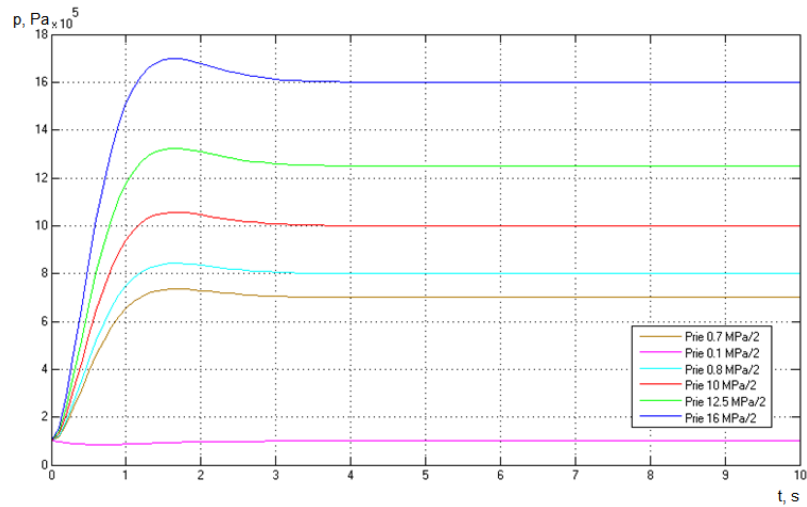
5.10 pav. Gautas teorinis našumas su modeliu

Gauta teorinė galios poreikio charakteristika:



5.11 pav. Teorinis galios poreikis su modeliu

Idealios (be trikdžių) sistemos slėgio palaikymas:

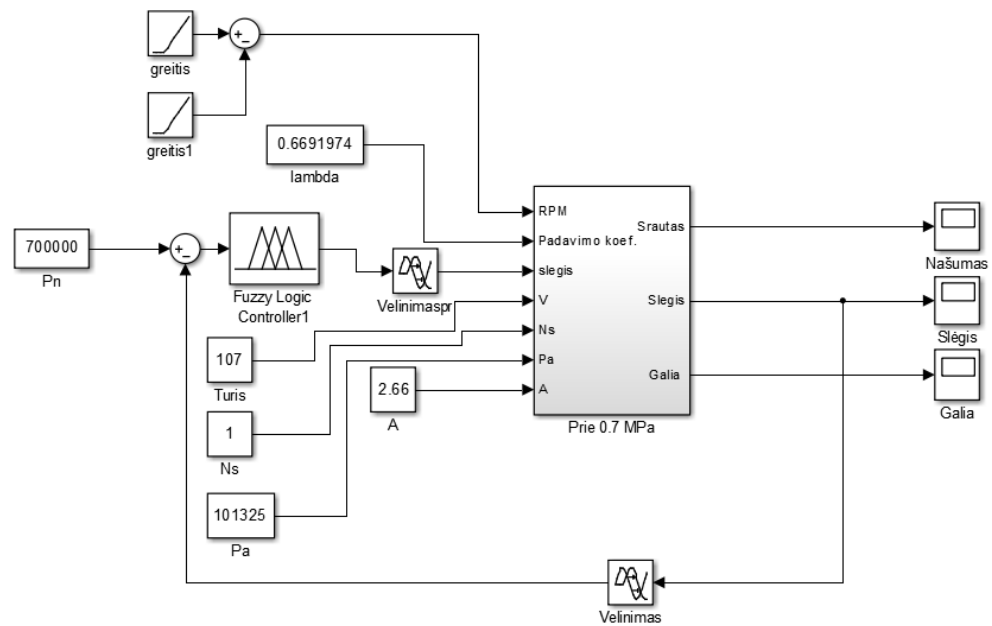


5.12 pav. Slėgio palaikymas idealioje sistemoje

Iš gautų grafikų galima pastebėti jog visus reikalaujamus slėgius reguliatorius palaiko tinkamai, bei našumai ir galios poreikiai atitinka teorinius skaičiavimus šiam stendui su tokiu kompresoriumi. Lyginant su paskaičiuotais parametrais pagal *Ziegler'io-Nichols'o* metodą, su automatinu derinimu slėgis nusistovi šiek tiek vėliau, tai yra *Autotune* suderina per 3,2s, o paskaičiavus parametrus pagal metodą gaunama 2,5s, tai yra 0,7s skirtumas. Nors tai nėra didelis skirtumas galima priimti išvada jog *Ziegler'io-Nichols'o* metodu gauti rezultatai tenkina labiau, todėl tolesniems tyrimams jie ir bus naudojami.

Toliau seka to paties modelio tyrimas su *fuzzy* reguliatoriumi. Tam įgyvendinti tiesiog pakeičiamas reguliatorius, aprašomi lingvistiniai kintamieji, iš jų sudaromos valdymo taisyklės, bei aprašomos paklaidos bei išėjimo charakteristikos.

Analogiškai sudarytas modelis vietoj PID regulatoriaus įterpiant, neraiškių aibių (*Fuzzy*) reguliatorių (5.13 pav.).



5.13 pav. Suslėgto oro kontūro matematinis modelis su *Fuzzy* reguliatoriumi

Toliau seka neraiškių logikos regulatoriaus derinimas. Pirmiausia nusistatomos įėjimo ir išėjimo ribos. Įėjimo signalas bus paklaida, todėl ji pasirinkta ± 200 Pa, o išėjimas slėgis, kuris gali būti nuo atmosferos slėgio, tai yra 0,1 MPa iki 2 MPa.

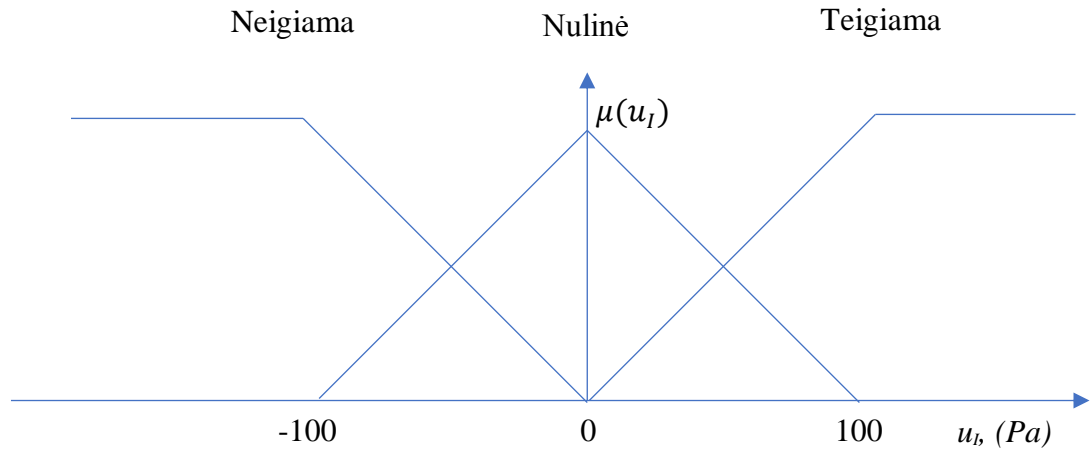
Toliau aprašomi lingvistiniai kintamieji *Mamdani* tipo reguliatoriui. Paklaida šiuo atveju gali būti neigiama, nulinė arba teigiama. Slėgis gali būti žemas (nuo 0,1 MPa iki užduotosios vertės), vidutinis – atitinka užduotąją vertę, bei aukštas, kai viršija nustatytąją iki 2 MPa. Kadangi sistemai slėgio palaikymo tikslumas nėra konkrečiai apibrėžtas pasirinktos paklaidos ribos reguliatoriui ± 100 Pa. Bandomi bus du *fuzzy* reguliatoriai, vienas su vienu įėjimu ir vienu išėjimu, ir antras su dviem įėjimais ir vienu išėjimu, kai pirmu atveju įėjimas tik paklaidos signalas ir išėjimas slėgis, tai antruoju atveju prie paklaidos kintamojo, antruoju bus paklaidos kitimo greitis.

Sudaryta lingvistinių kintamųjų lentelė kai reguliatorius turi vieną įėjimą.

5.2 lentelė.

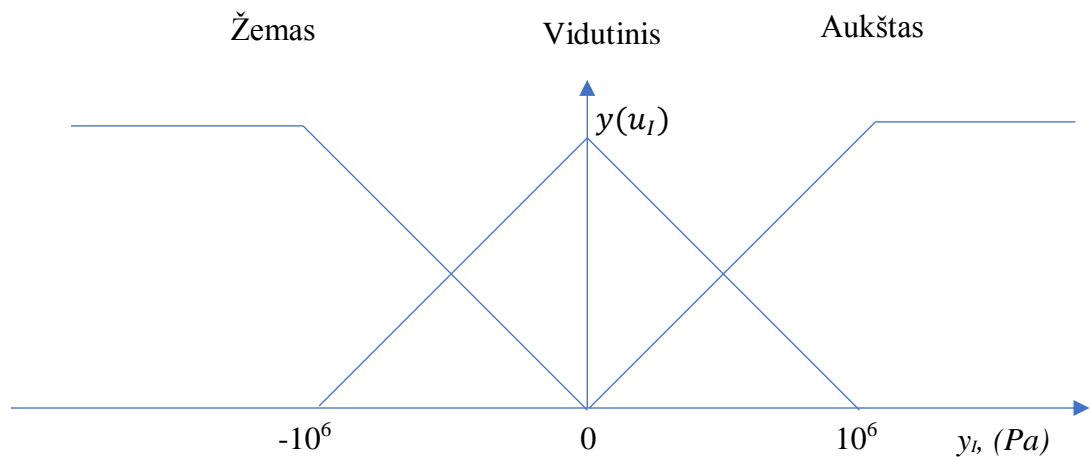
Išėjimas	Įėjimas (paklaida)		
	Neigiama	Nulinė	Teigiama
Slėgis	Mažinti	Nekeisti	Didinti

Sudarytos narystės funkcijos lingvistiniams kintamiesiems. Pasirinkta trikampė funkcijos forma.



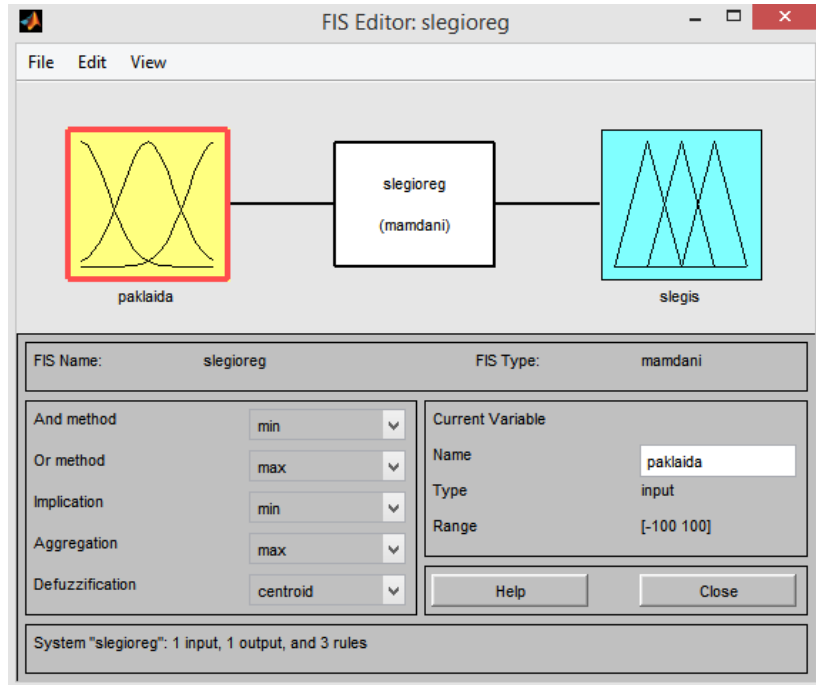
5.14 pav. Paklaidos lingvistinio kintamojo narystės funkcijos

Kadangi sistemoje leidžiamas slėgis nuo 0 MPa iki 2 MPa, tai ribos bus nuo -1 Mpa iki 1 MPa.

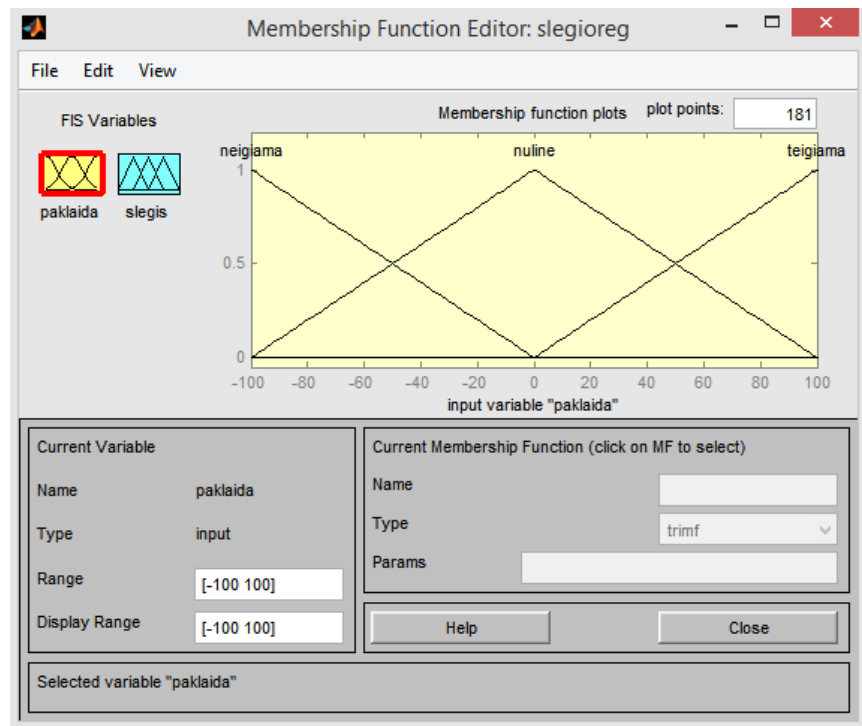


5.15 Išėjimo lingvistinio kintamojo narystės funkcijos

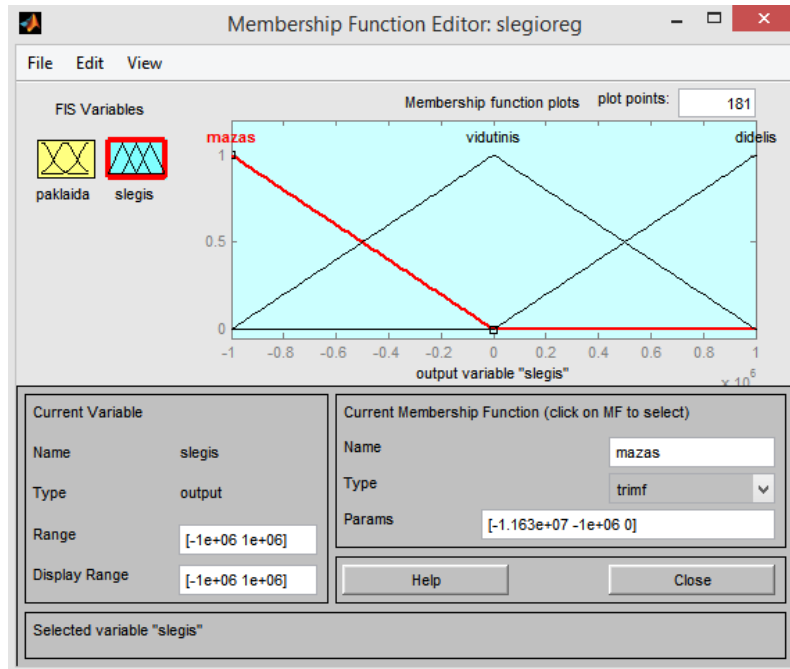
Toliau sudaryti kintamieji bei jų narystės funkcijos aprašomi *MATLAB/Simulink* modeliavimo aplinkoje.



5.16 pav. *Fuzzy* reguliatoriaus konfigūracija

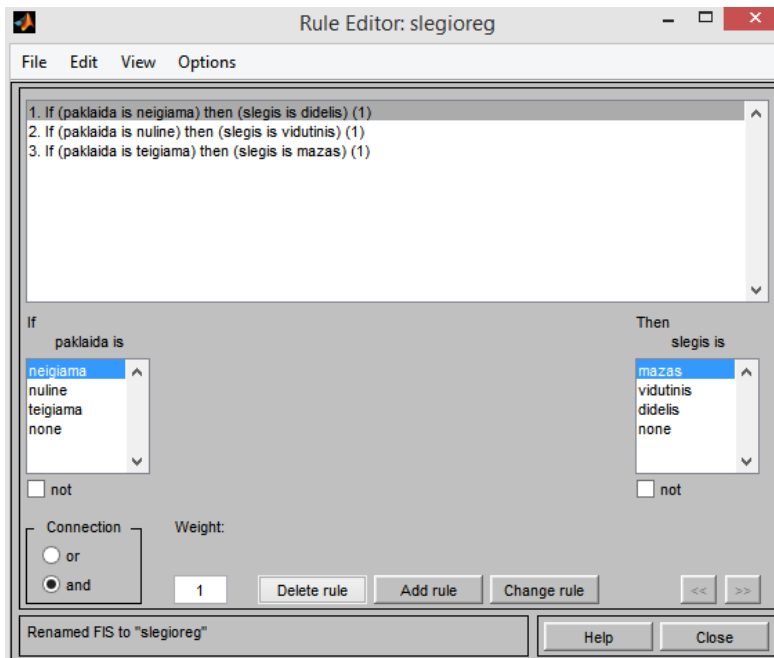


5.17 pav. *Fuzzy* reguliatoriaus įėjimo nustatymai



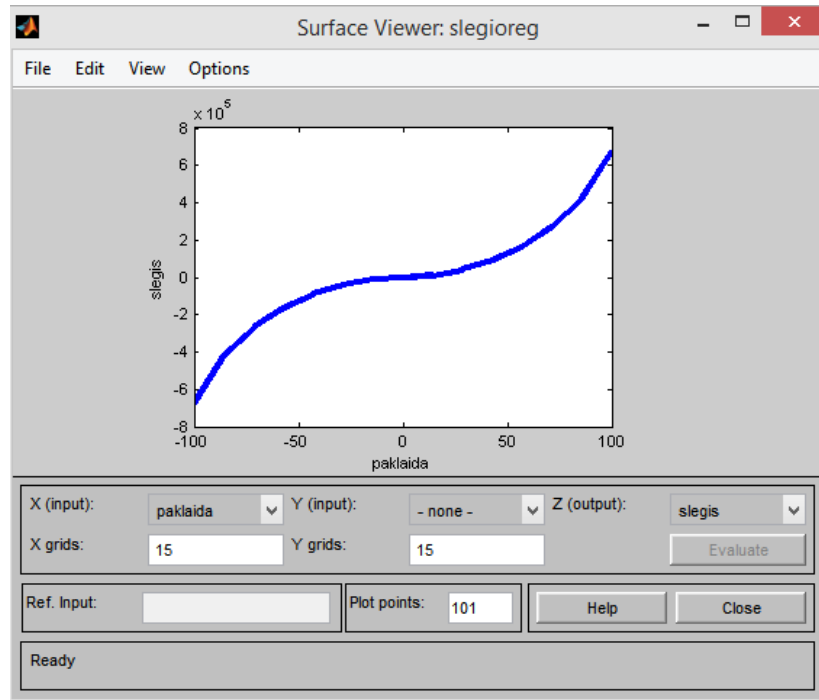
5.18 pav. *Fuzzy* reguliatoriaus išėjimo nustatymai

Taip pat žemiau pateiktos reguliavimo taisyklės. Jų yra trys, nes procesas turi tik vieną paklaidos jėgimą ir vieną išėjimą slėgio reguliavimui.



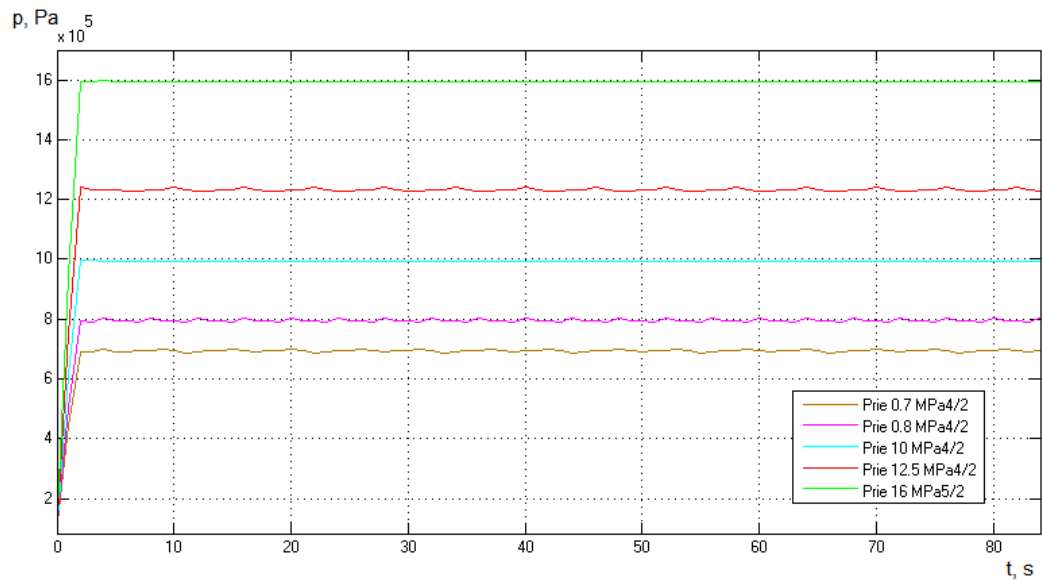
5.19 pav. *Fuzzy* reguliatoriaus taisyklių aprašymas

Gautas toks reguliavimo paviršius.

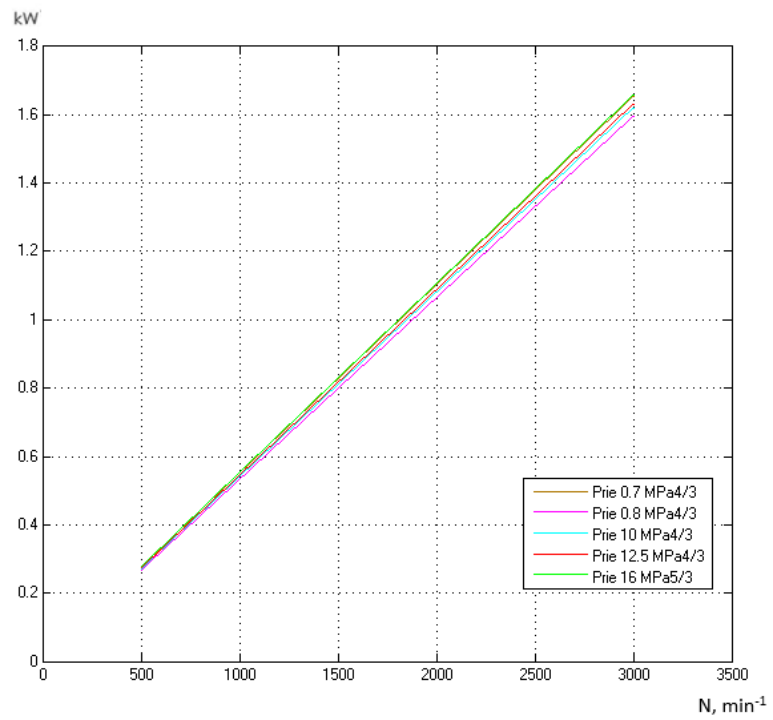


5.20 pav. Slégio regulatoriaus sudarytas paviršius

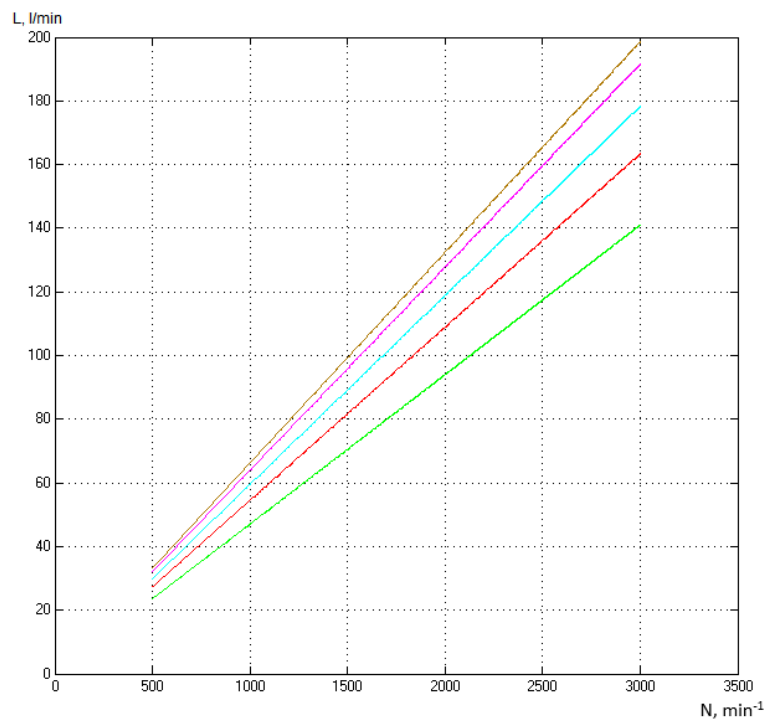
Toliau pateikti gauti rezultatai, atlikus bandymus su modeliu kai valdymui naudojamas neraiškių aibių regulatorius, bei nėra trikdžių (ideali sistema). Visi modeliavimo bei modelio parametrai palikti tie patys kaip ir prieš tai aptartiems regulatoriams.



5.21 pav. Slégio palaikymas idealioje sistemoje

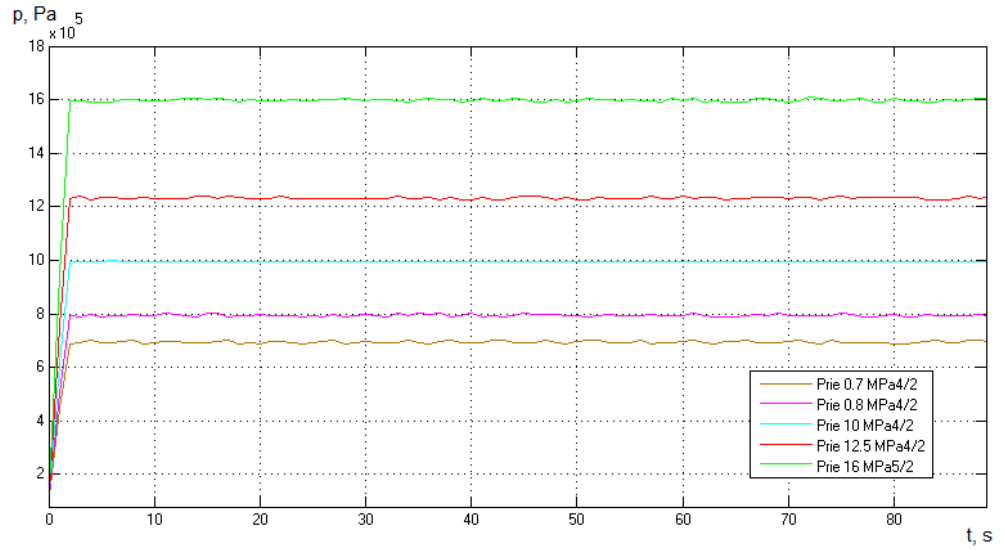


5.22 pav. Modelio galios poreikis idealioje sistemoje

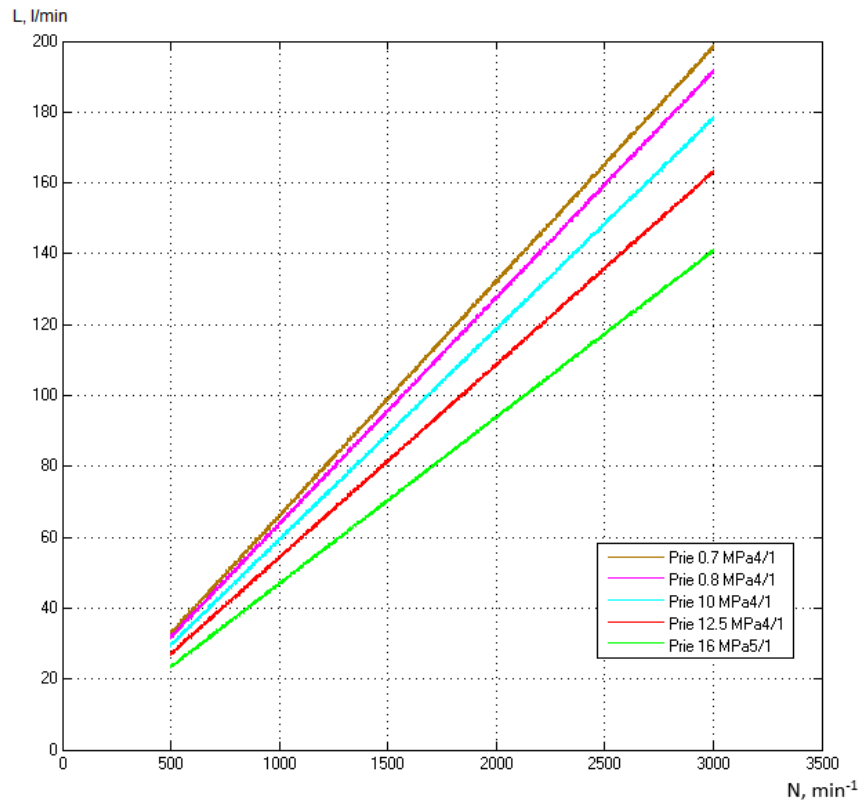


5.23 pav. Modelio našumas idealioje sistemoje

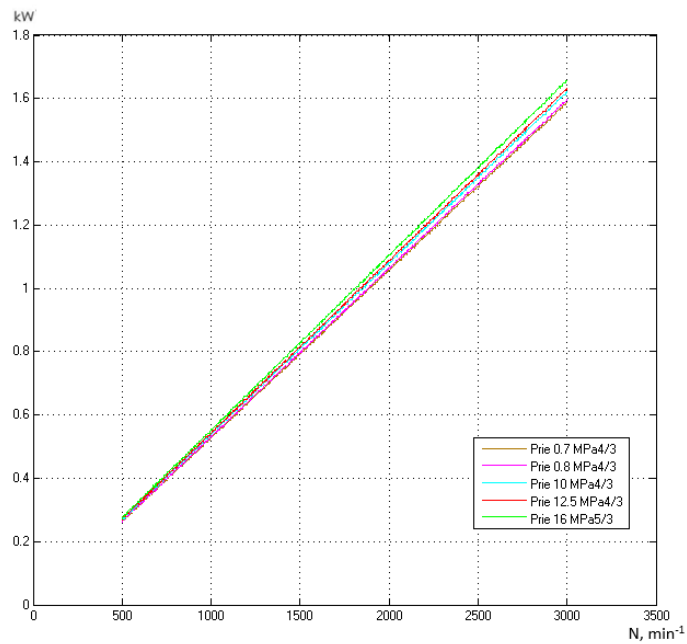
Toliau patikrinta kaip modelis reaguoja į greičio paklaidą ($\pm 100 \text{ min}^{-1}$).



5.24 pav. Slėgio palaikymas esant greičio paklaidai $\pm 100 \text{ min}^{-1}$

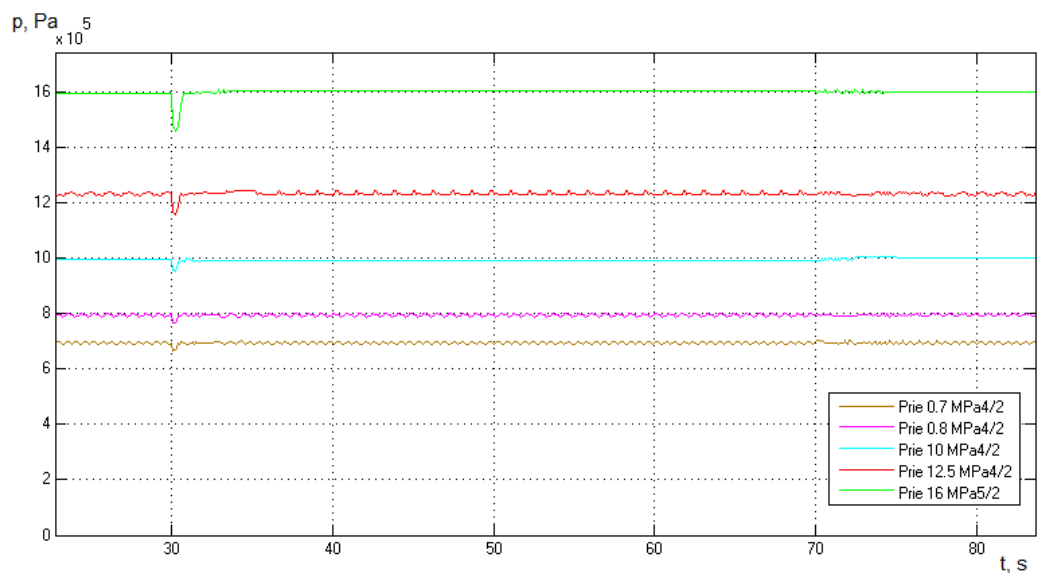


5.25 pav. Modelio našumas esant greičio paklaidai



5.26 pav. Modelio galios poreikis esant greičio paklaidai

Toliau patikrinta kaip sureaguoja į šuolinį impulsą, prieš tai užduodant pastovų 1500 min⁻¹ greitį ir duodant impulsą lygų 2000 min⁻¹, 30-uoju laiko momentu, bei 70-uoju.



5.27 pav. Modelio reakcija į šuolinį impulsą

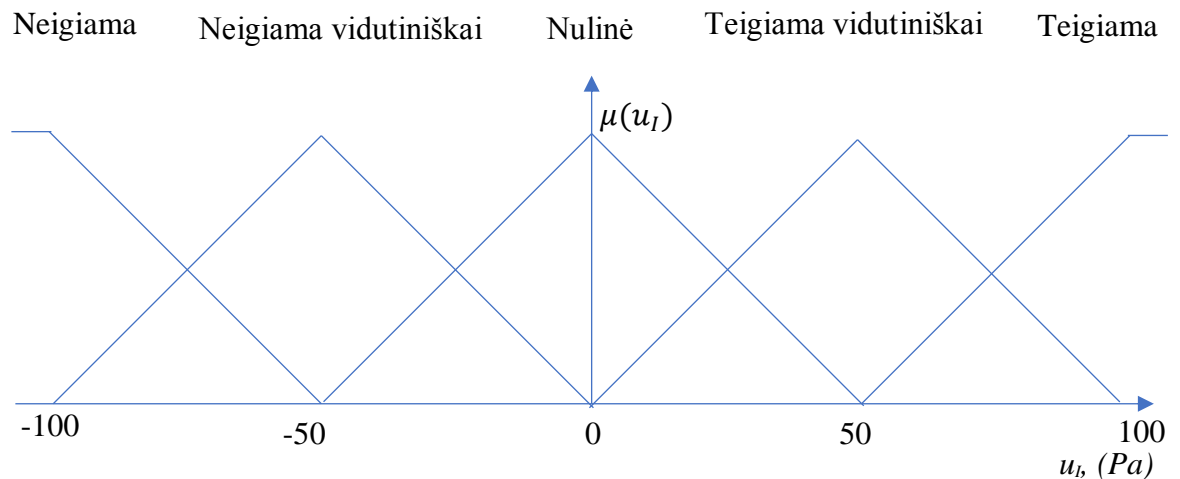
Iš gautų rezultatų galima teigti jog neraiškios logikos reguliatorius suderintas gana sėkmingai, gautas sureguliuavimo laikas panašus į PID reguliatoriaus.

Sekantis tyrimas su *fuzzy* reguliatoriumi skirtas tam, kad įsitikinti ar galima išvengti slėgio pastovių švytavimų, kurie lemia nedideles paklaidas tiek našumo tiek galios matavimuose, įtraukiant papildomą reguliatoriaus įėjimą, tai yra paklaidos kitimo greitį. Taip pat paklaida bus aprašoma penkiais terminais. Tam atlikti vėl sudaroma lingvistinių kintamųjų lentelė.

5.2 lentelė.

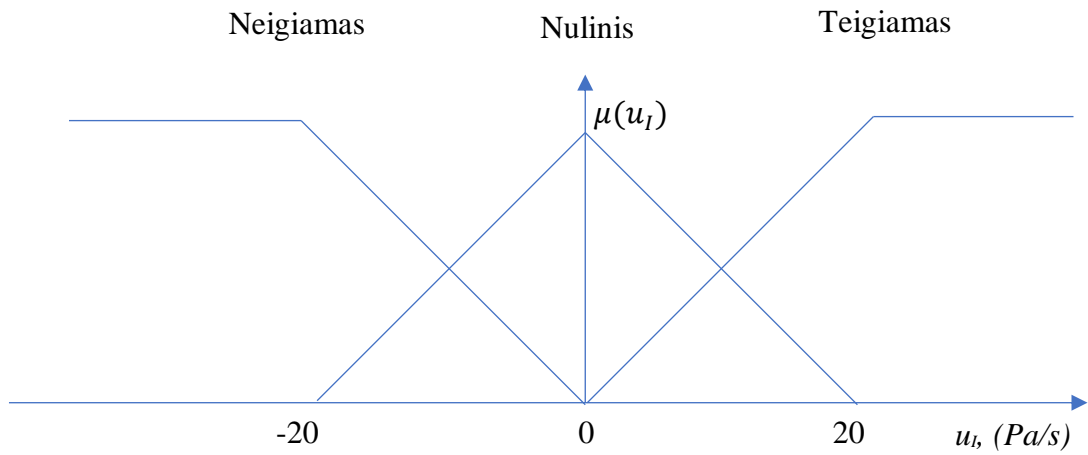
Išėjimas		Paklaida				
		Neigiama	Neigiama vidutiniškai	Nulinė	Teigiama vidutiniškai	Teigiama
Paklaidos kitimo greitis	Neigiamas	Mažinti stipriai	Mažinti nestipriai	Mažinti nestipriai	Nekeisti	Didinti nestipriai
	Nulinis	Mažinti nestipriai	Mažinti nestipriai	Nekeisti	Didinti nestipriai	Didinti nestipriai
	Teigiamas	Mažinti nestipriai	Nekeisti	Didinti nestipriai	Didinti nestipriai	Didinti stipriai

Sudarytos narystės funkcijos lingvistiniams kintamiesiems. Pasirinkta trikampė funkcijos forma.



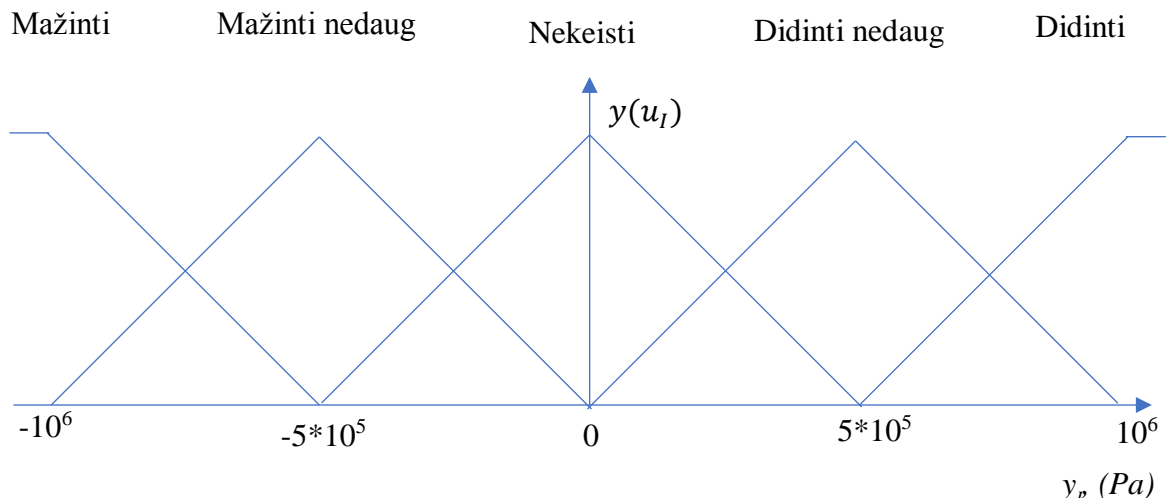
5.28 pav. Paklaidos lingvistinio kintamojo narystės funkcijos

Paklaidos kitimo greičiui taip pat surastos narystės funkcijos. Pasirinktos paklaidos kitimo greičio ribos nuo -20 Pa/s iki 20 Pa/s.



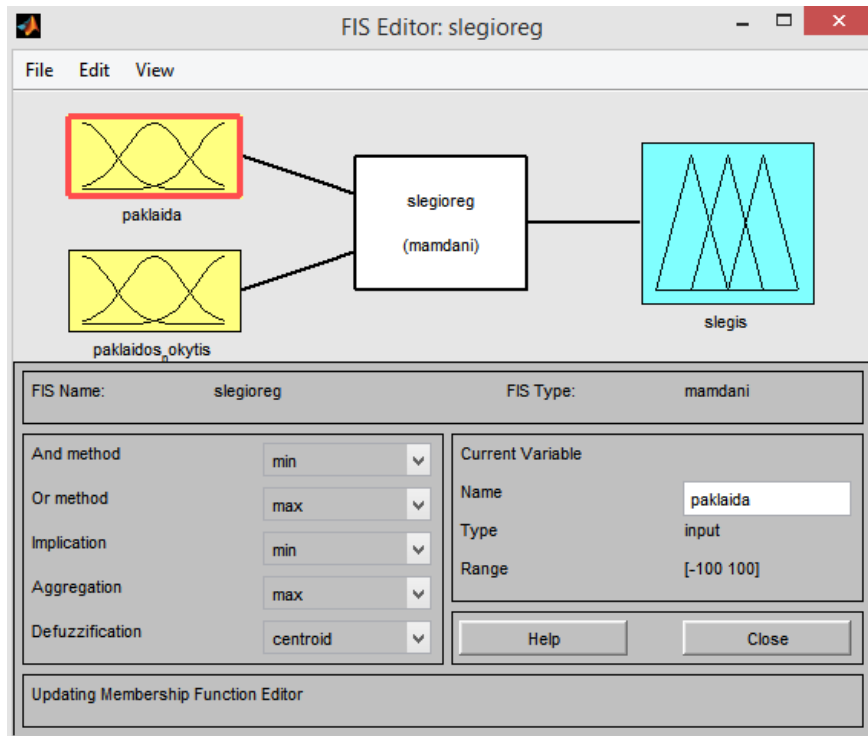
5.29 pav. Paklaidos kitimo greičio lingvistinio kintamojo narystės funkcijos

Kadangi sistemoje leidžiamas slėgis nuo 0 MPa iki 2 MPa, tai ribos bus nuo -1 Mpa iki 1MPa.

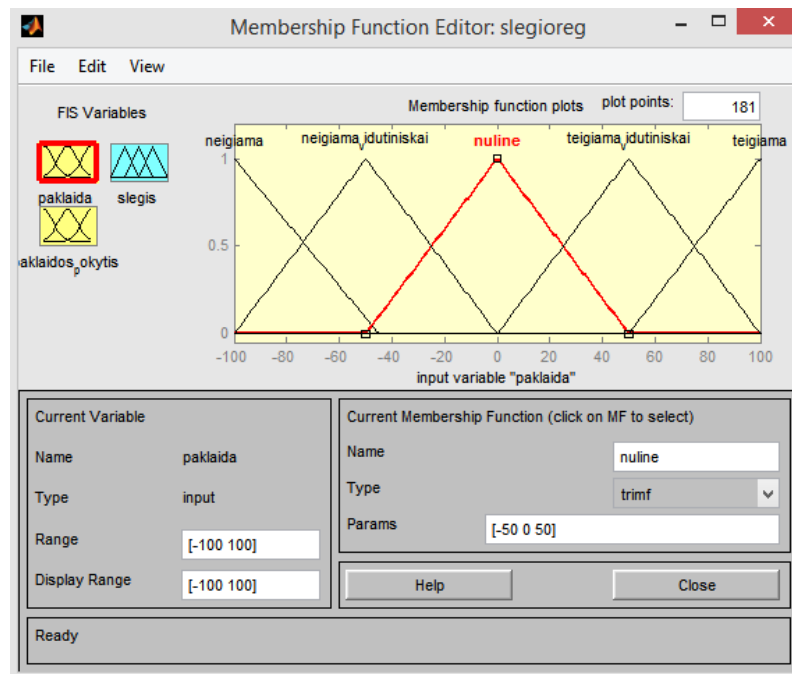


5.30 Išėjimo lingvistinio kintamojo narystės funkcijos

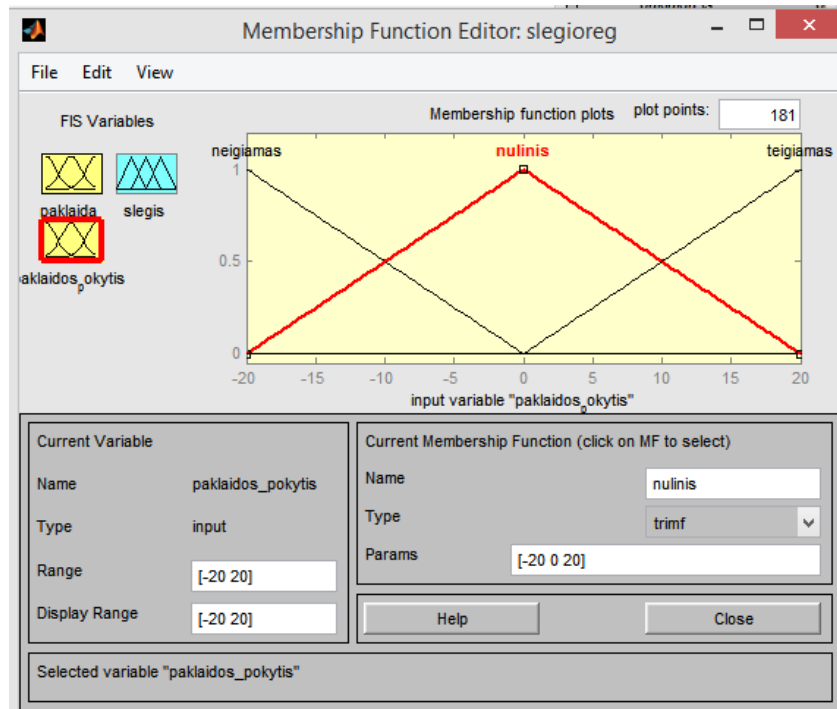
Toliau sudaryti kintamieji bei jų narystės funkcijos aprašomi *MATLAB/Simulink* modeliavimo aplinkoje.



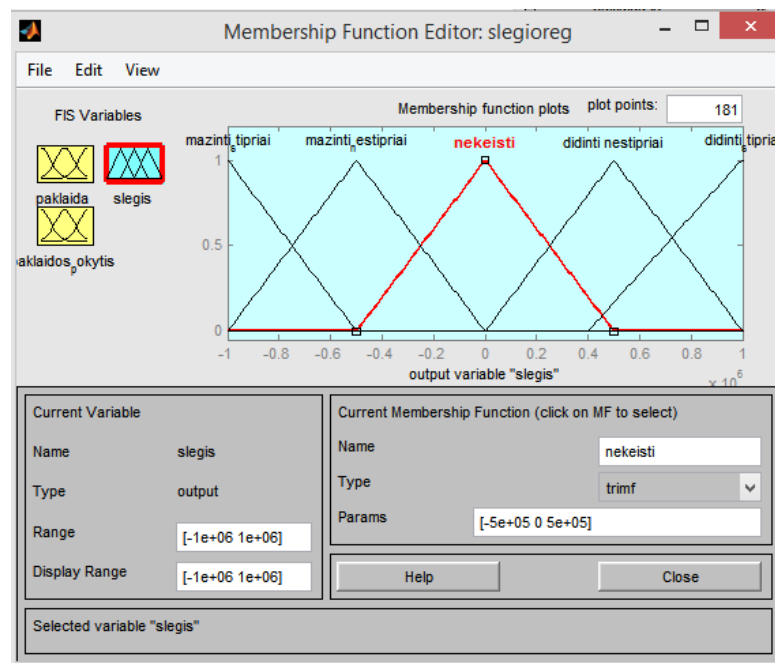
5.31 pav. Fuzzy reguliatoriaus konfigūracija



5.32 pav. Fuzzy reguliatoriaus paklaidos nustatymas

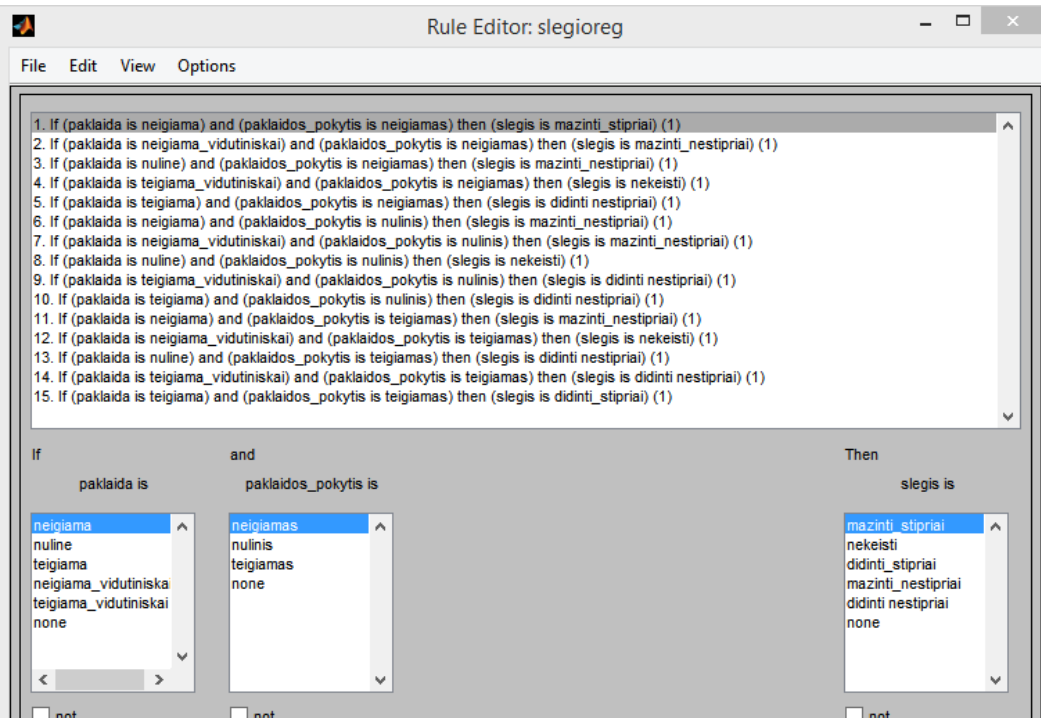


5.33 pav. *Fuzzy* regulatoriaus paklaidos nustatymas

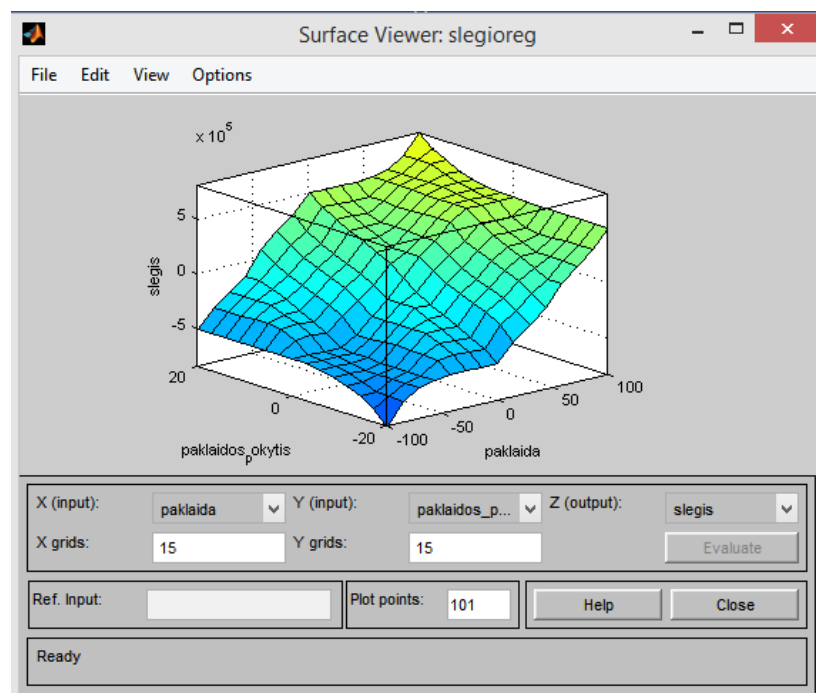


5.34 pav. *Fuzzy* regulatoriaus išėjimo nustatymas

Taip pat žemiau pateiktos reguliavimo taisyklės. Jų yra trys nes procesas turi tik viena paklaidos įėjimą ir vieną išėjimą slėgio reguliavimui.

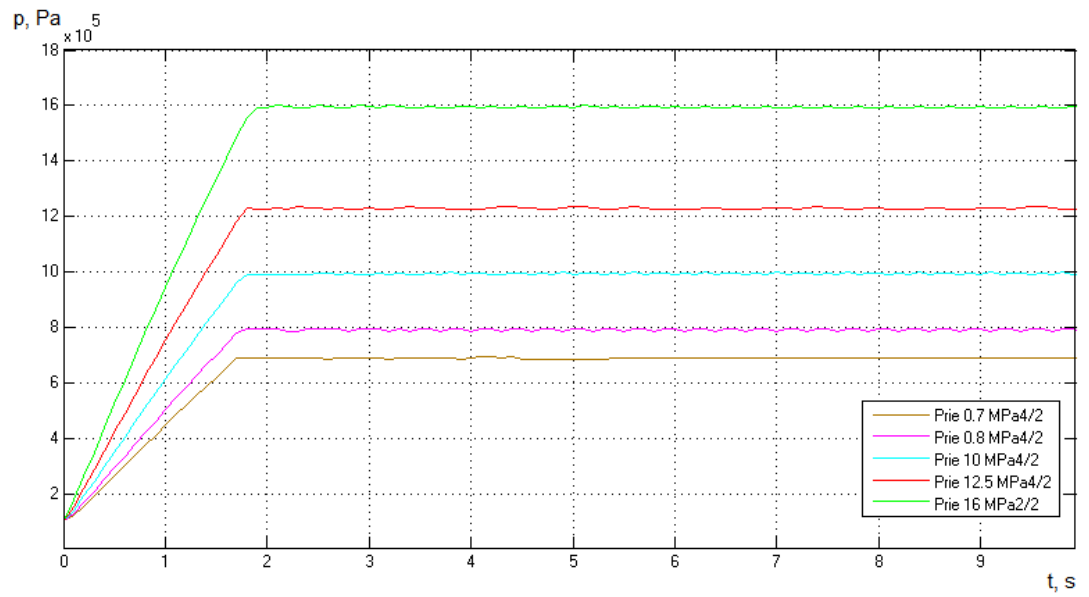


5.35 pav. Fuzzy regulatoriaus taisyklių aprašymas

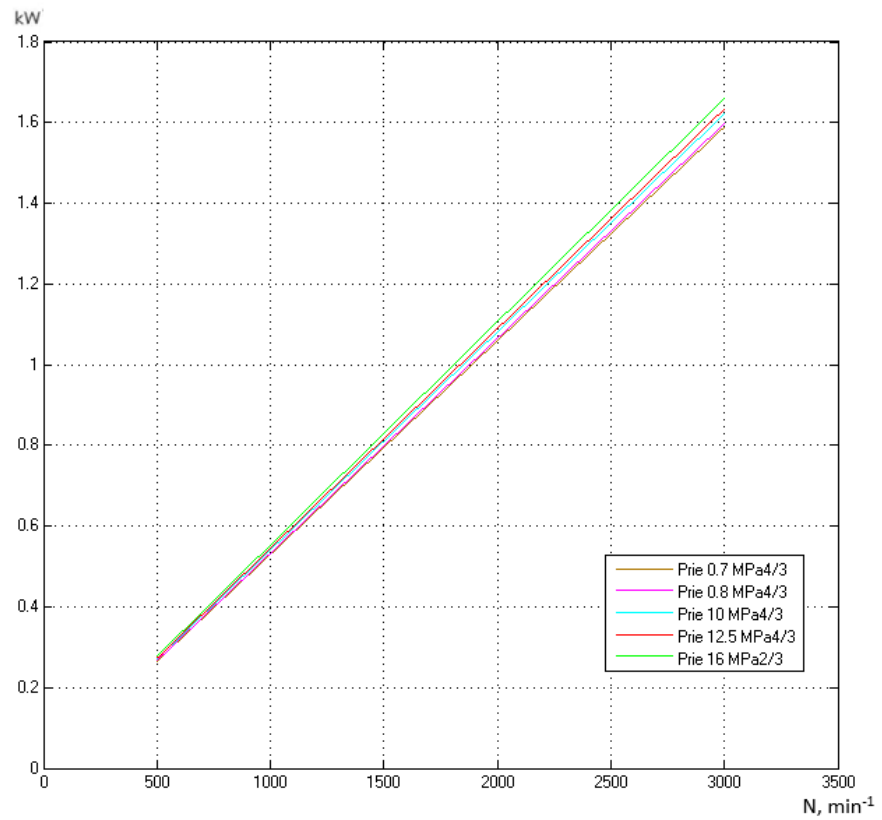


5.36 pav. Slėgio regulatoriaus sudarytas paviršius

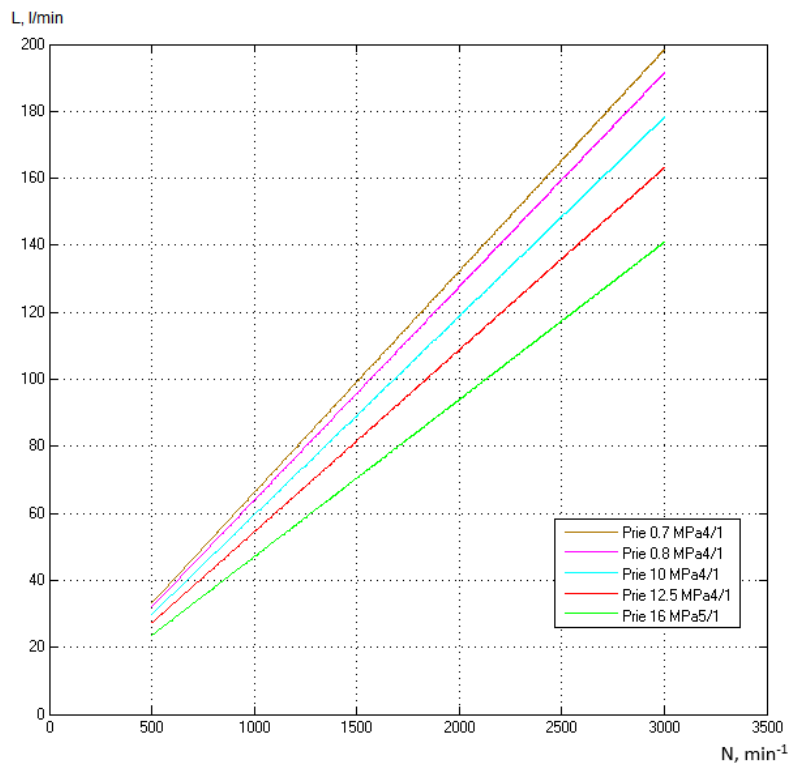
Toliau pateikti gauti rezultatai, atlikus bandymus su modeliu kai valdymui naudojamas neraiškių aibių reguliatorius, bei nėra trikdžių (ideali sistema). Visi modeliavimo bei modelio parametrai palikti tie patys kaip ir modelyje su PID reguliatoriumi.



5.37 pav. Slėgio palaikymas idealioje sistemoje

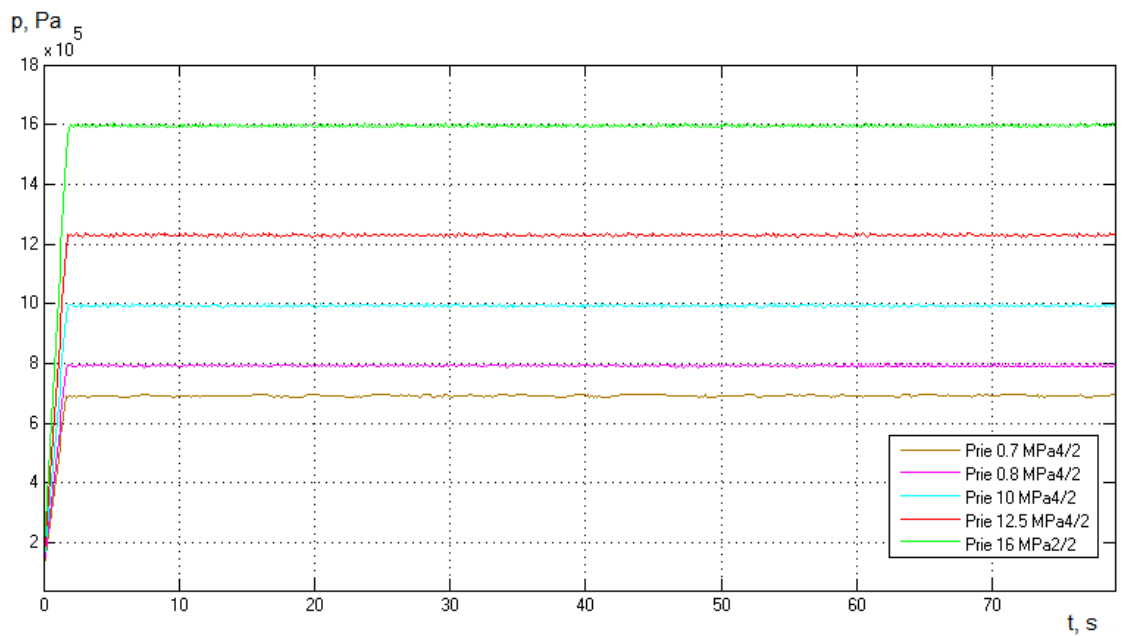


5.38 pav. Teorinis modelio galios poreikis

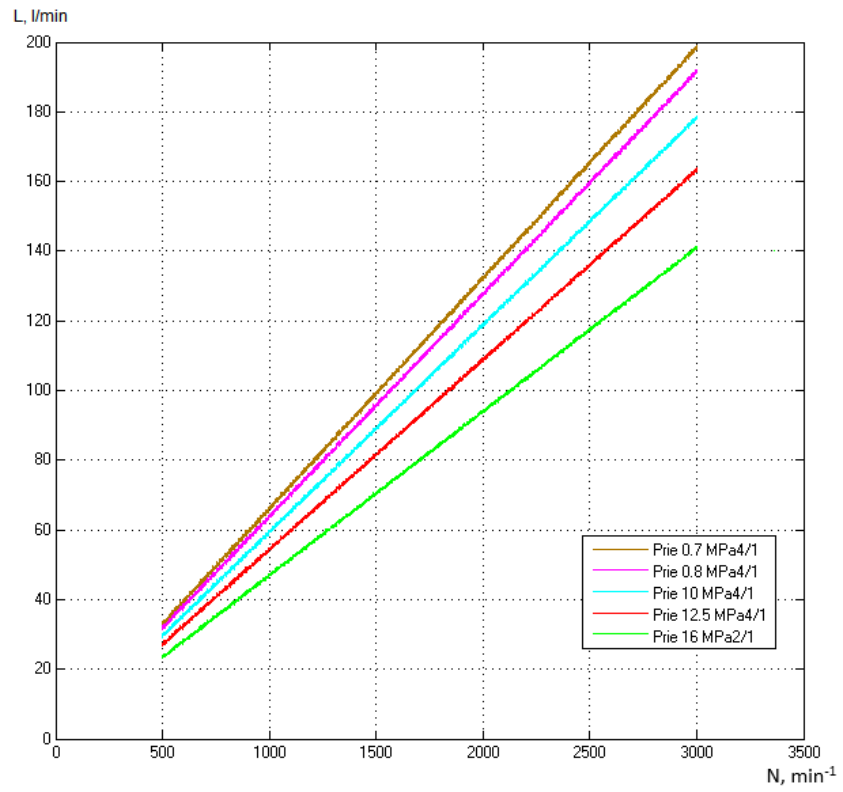


5.39 pav. Teorinis modelio našumas

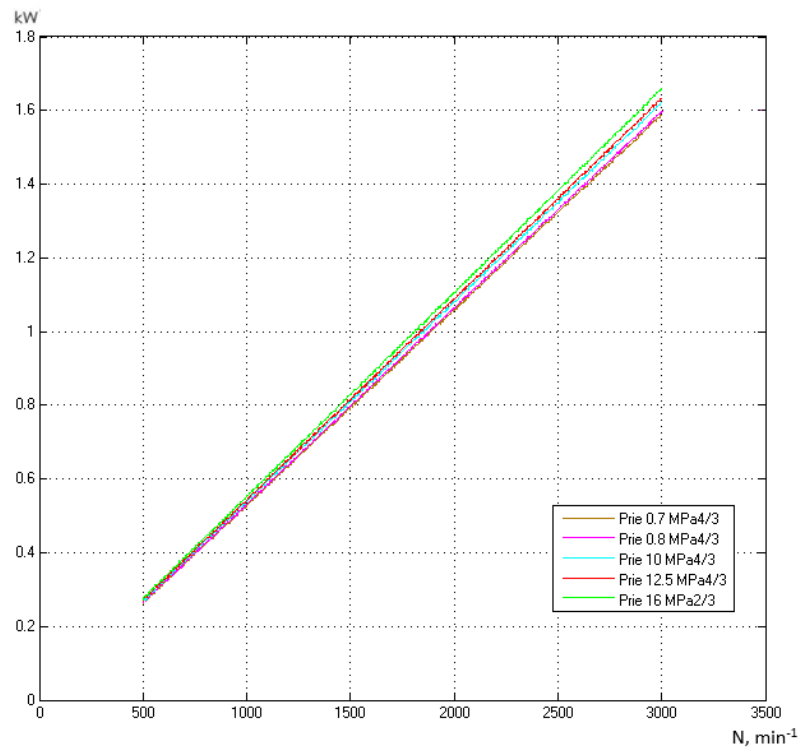
Toliau patikrinta kaip modelis reaguoja į greičio paklaidą ($\pm 100 min^{-1}$).



5.40 pav. Slėgio palaikymas esant greičio paklaidai $\pm 100 min^{-1}$



5.41 pav. Modelio našumas esant greičio paklaidai

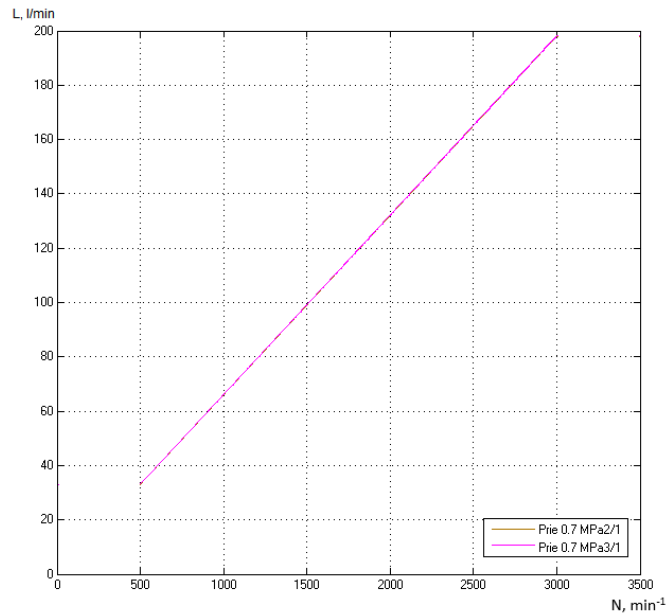


5.42 pav. Modelio galios poreikis esant greičio paklaidai

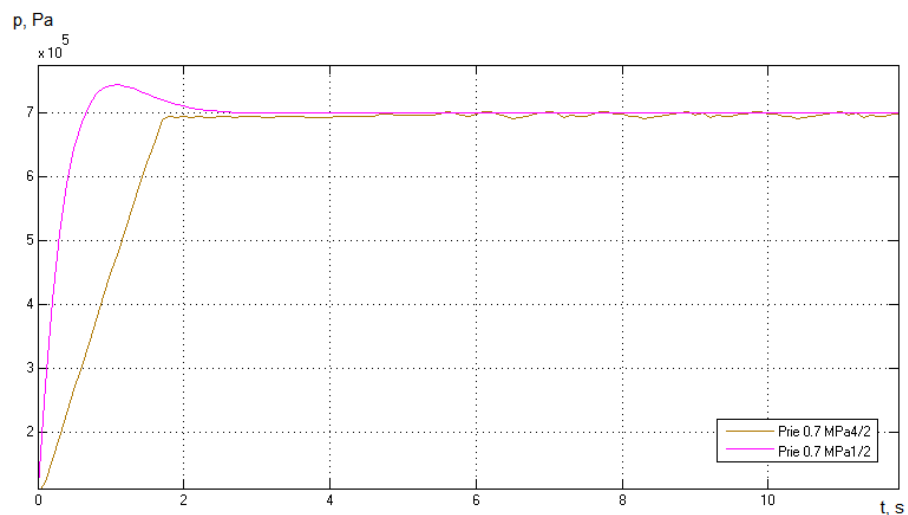
Iš gautų grafikų matosi jog esant vietoje PID reguliatoriaus *Fuzzy* reguliatoriui, sistemos modelis reaguoja taip pat gerai. Slėgiai sureguliuojami per labai panašų laiką, o našumas bei galios poreikis gaunami praktiškai identiški.

Toliau jog įsitikinti jog visos charakteristikos atitinka, lyginami kiekvienu iš atvejų, t.y. prie 0,7MPa, 0,8MPa ir 1,0Mpa slėgių gauti bandymų su modeliu rezultatai.

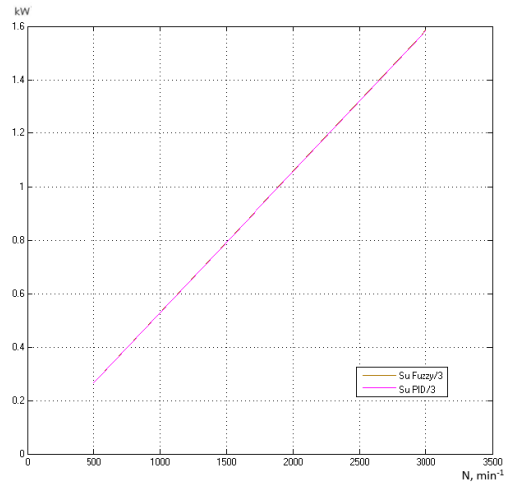
Gauti parametrai kai palaikomas slėgis 0,7MPa:



5.43 pav. Gautų našumų palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

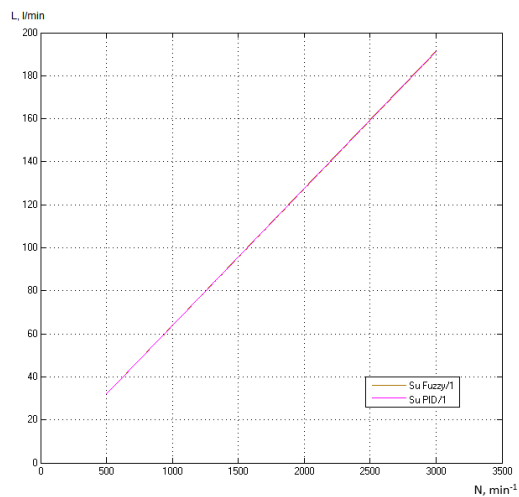


5.44 pav. Gautų slėgių palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

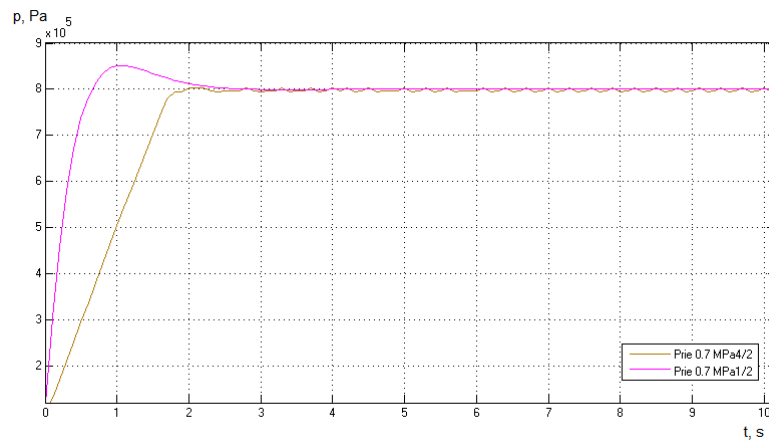


5.45 pav. Gautų galios poreikių palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

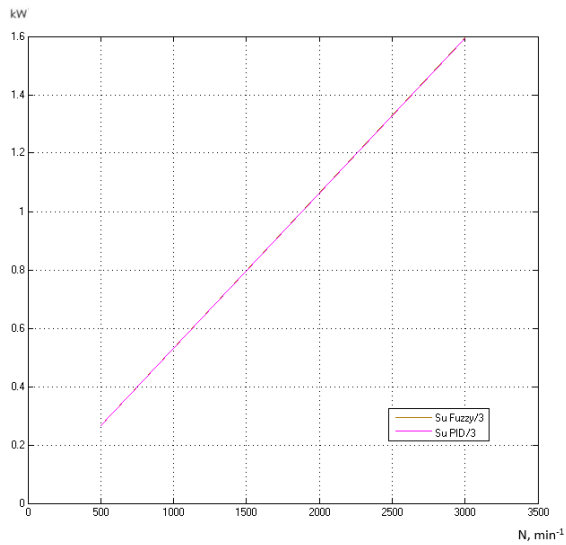
Gauti parametrai kai palaikomas slėgis 0,8MPa:



5.46 pav. Gautų našumų palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

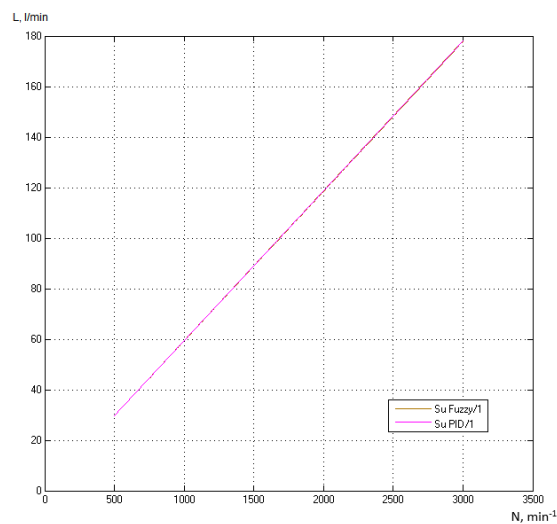


5.47 pav. Gautų slėgių palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

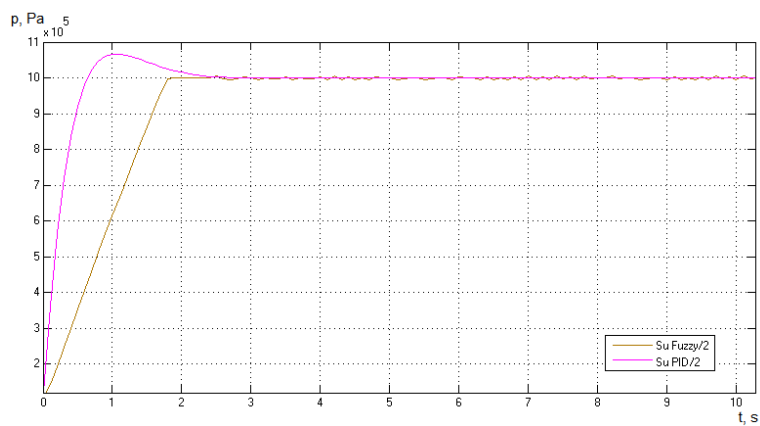


5.48 pav. Gautų galios poreikių palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

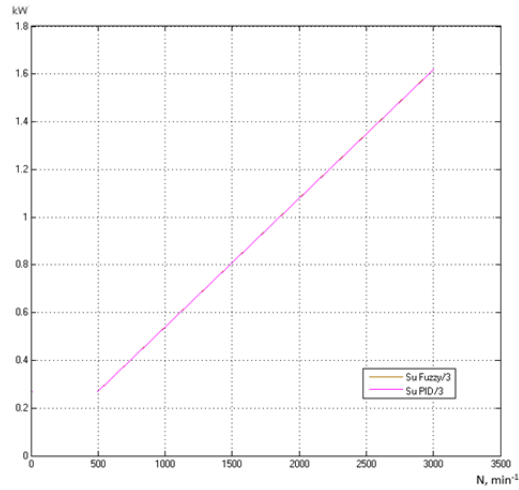
Gauti parametrai kai palaikomas slėgis 1,0MPa:



5.49 pav. Gautų našumų palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

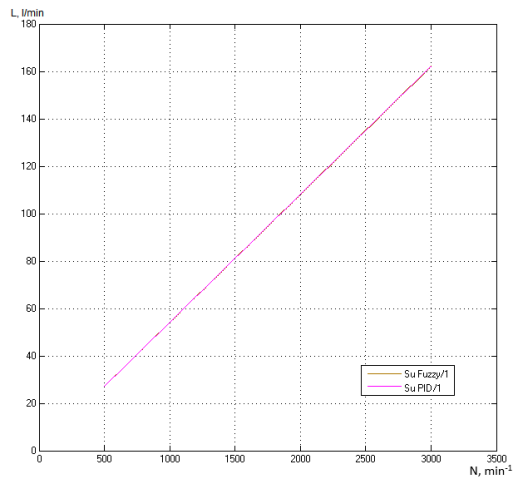


5.50 pav. Gautų slėgių palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

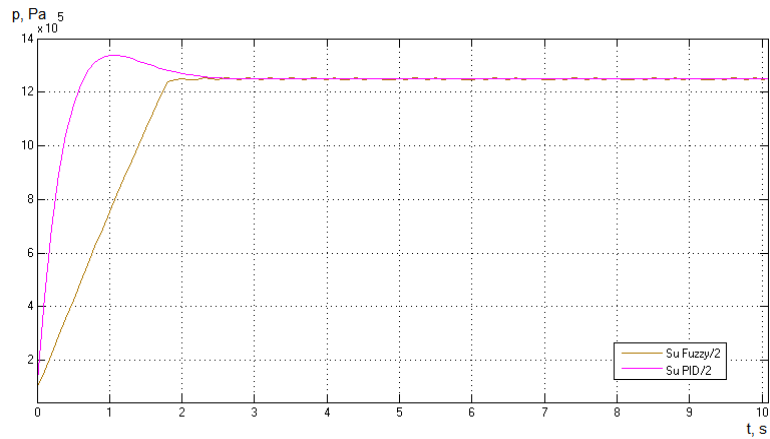


5.51 pav. Gautų galios poreikių palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

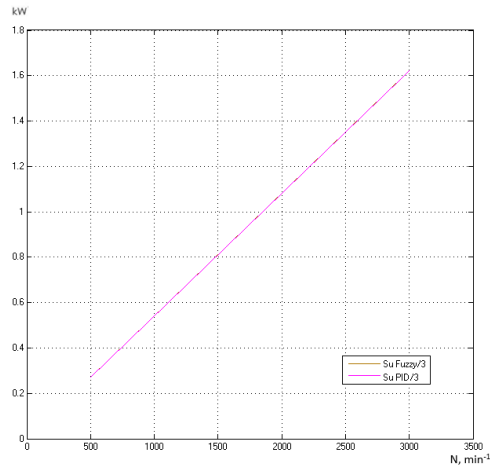
Gauti parametrai kai palaikomas slėgis 1,25MPa:



5.52 pav. Gautų našumų palyginimas (ruda – su **fuzzy**, rožinė – su PID)

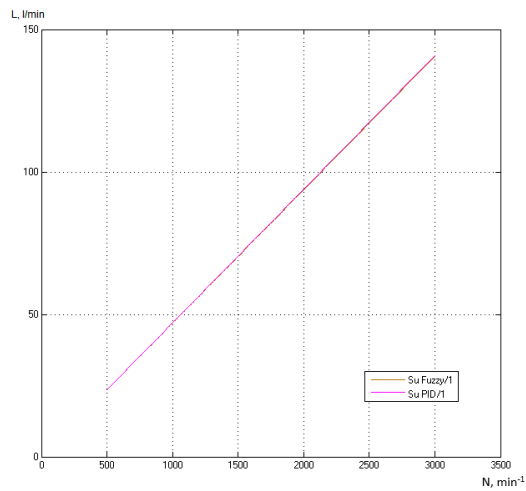


5.53 pav. Gautų slėgių palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

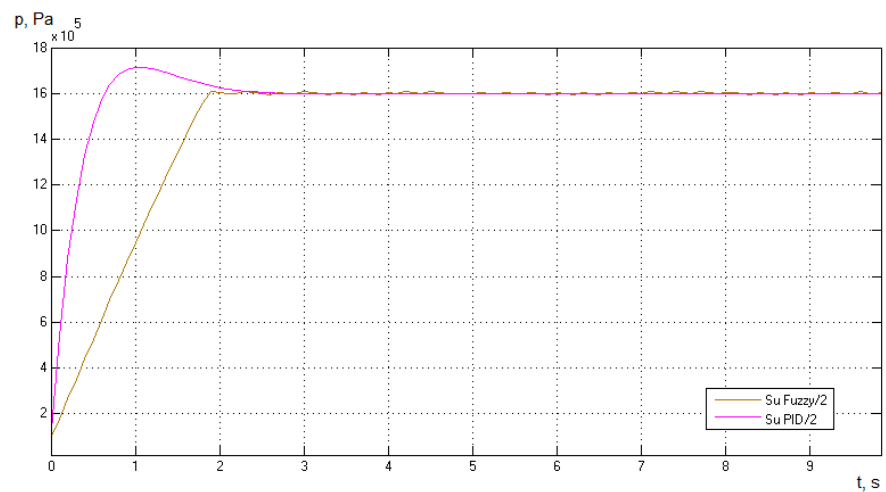


5.54 pav. Gautų galios poreikių palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

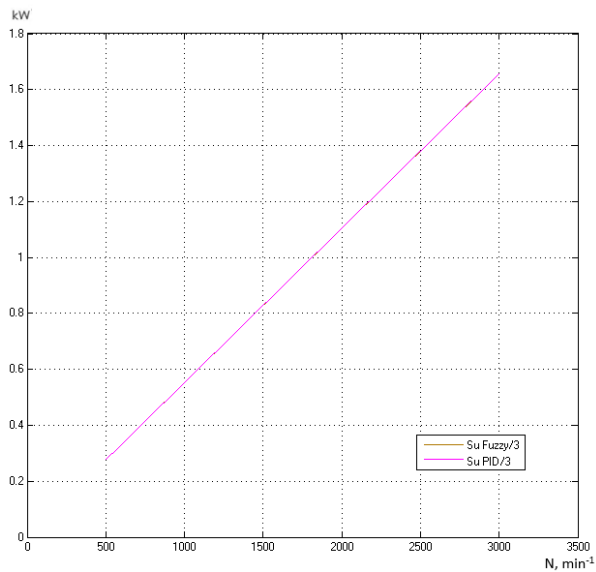
Gauti parametrai kai palaikomas slėgis 1,6MPa:



5.55 pav. Gautų našumų palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)



5.56 pav. Gautų slėgių palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

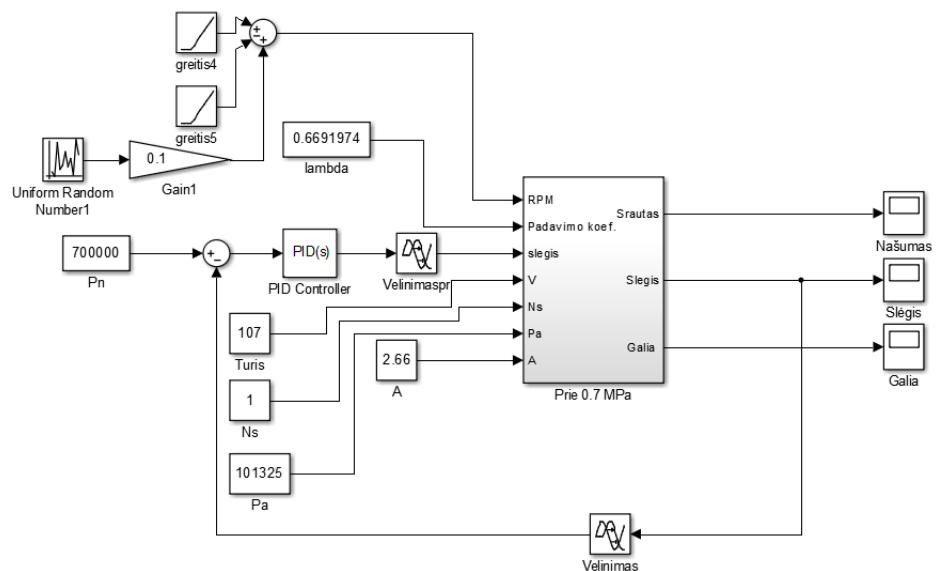


5.57 pav. Gautų galios poreikių palyginimas (ruda – su *fuzzy*, rožinė – su PID)

Peržvelgus gautus rezultatus galima teigti jog gauti našumai bei galios poreikiai galima sakyti identiški. Iš gautų slėgių charakteristikų galima teigti jog regulatoriai taip pat gerai sureguliuoja slėgį, sureguliuavimo laikas apytiksliai tas pats, visame laiko intervale nusistovi tolygiai. Taip pat padavus staigius greičio šuolius sistema greit sureagoja ir nusistovi.

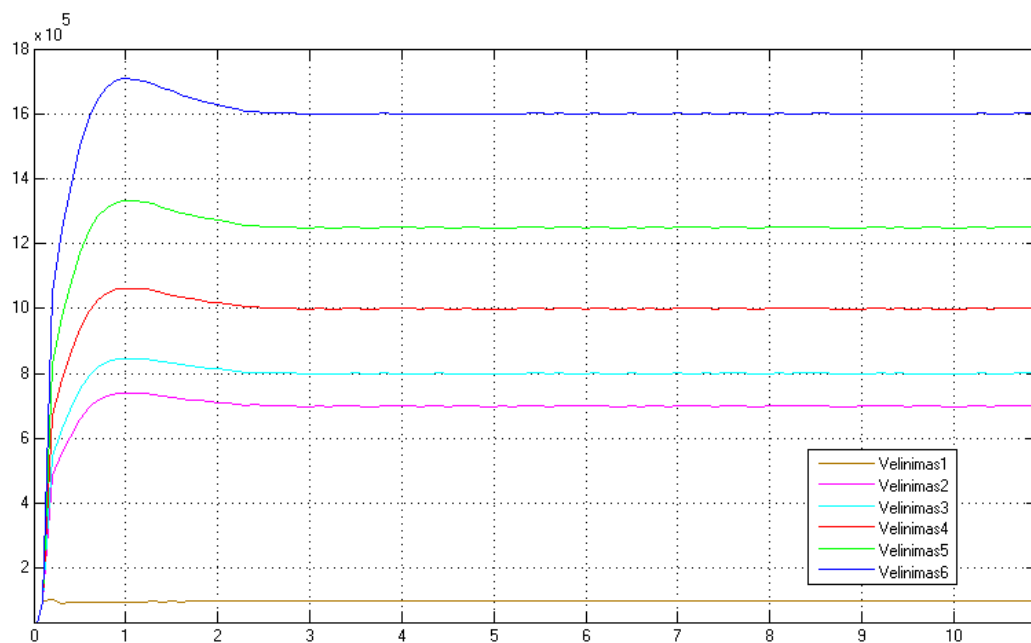
Toliau atlikta keletas bandymų įvedant variklio greičio paklaidą. Tam *MATLAB Simulink* aplinkoje sukurto modelio greičio įėjime panaudotu *Uniform Random Number* bloku generuojama atsitiktinė paklaida.

Modelis su įterpta paklaida pateiktas 5.26 paveiksle.

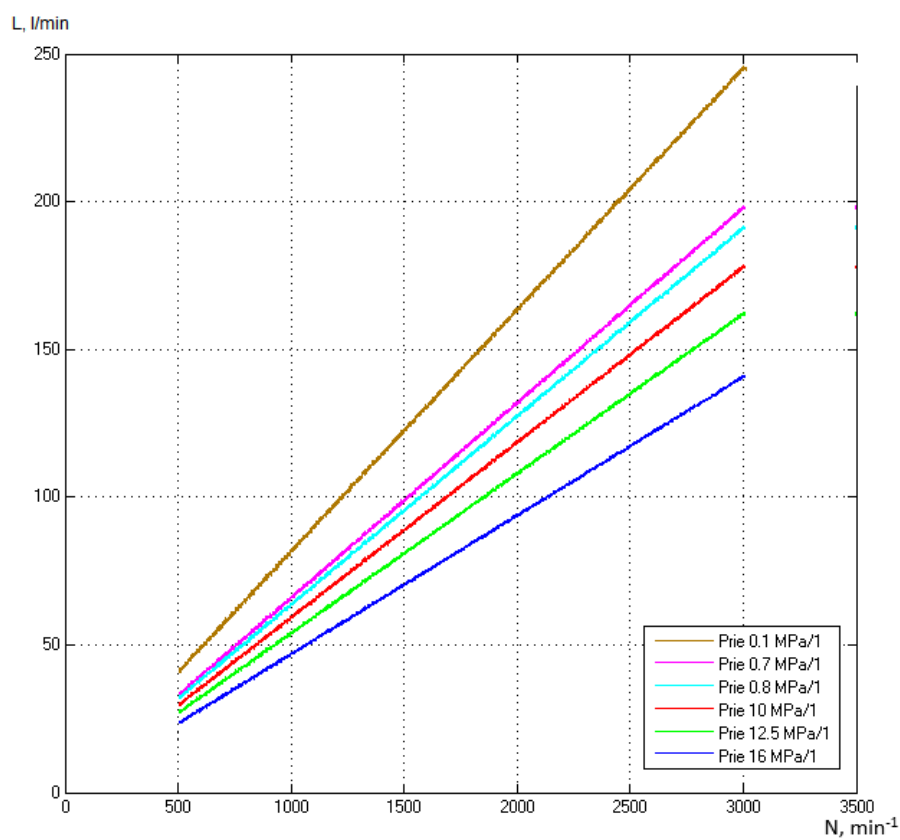


5.58 pav. Proceso modelis su greičio paklaida

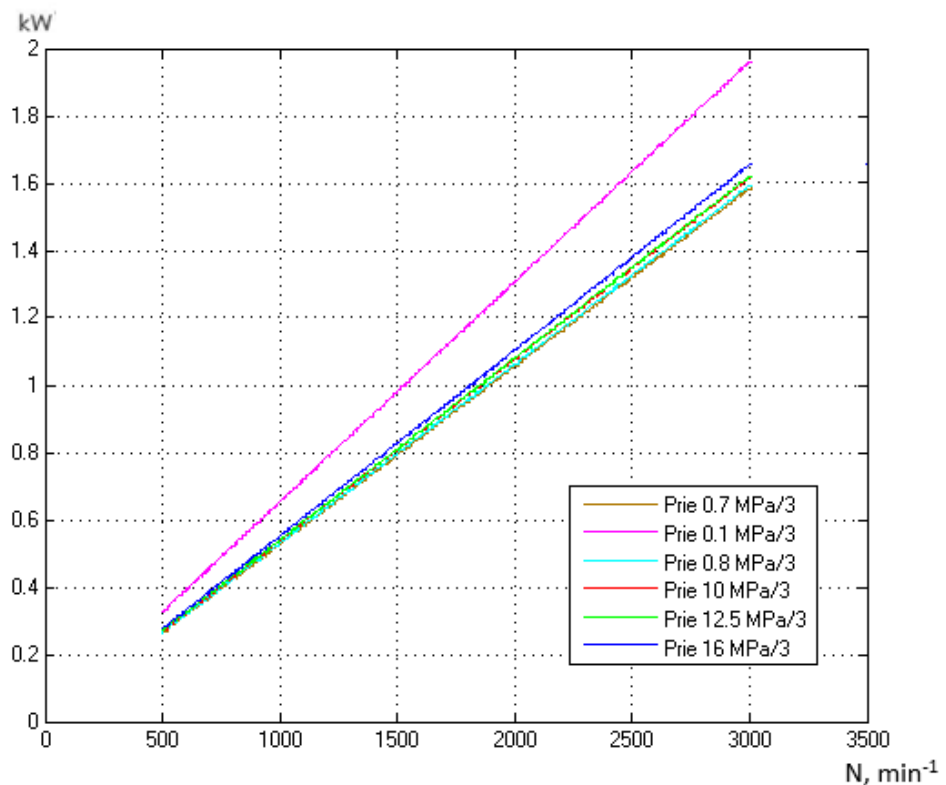
Įvedus $\pm 100 \text{ min}^{-1}$ apsisukimų paklaidą, gautos tokios charakteristikos:



5.59 pav. Slėgio palaikymas PID regulatoriumi esant greičio paklaidai



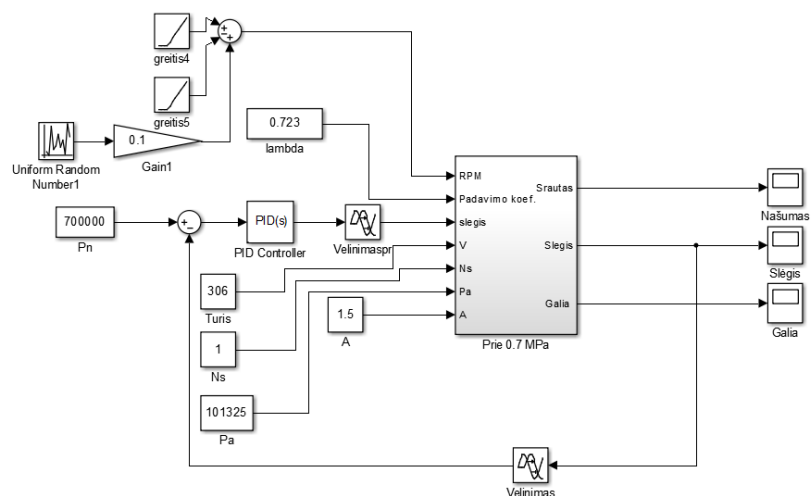
5.60 Gautas našumas esant greičio paklaidai



5.61 pav. Gautas galios poreikis esant greičio paklaidai

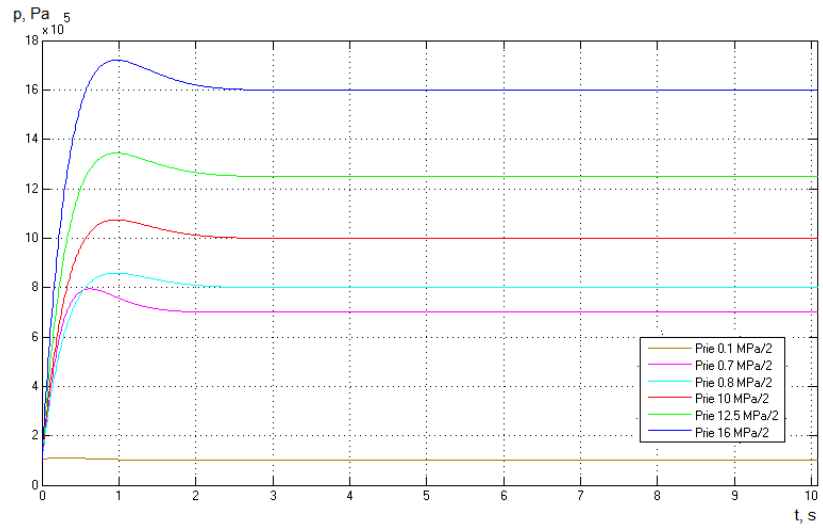
Atlikus šį bandymą pastebėta jog ir esant gan nemažai greičio paklaidai ($\pm 100 \text{ min}^{-1}$), sistemos modelis išgauna reikiamas kompresorių našumo bei galios poreikio charakteristikas, tik atsiranda nežymūs švytavimai, kurie sureguliuojami ir nekyla reguliavimo paklaidų.

Toliau atlikta keletas bandymų pakeičiant kompresorių į 4111-300 modelį su 306mm³ darbinio tūriu, padavimo koeficientas 0,723. Jo parametrai nustatomi modelyje atitinkamuose laukeliuose.

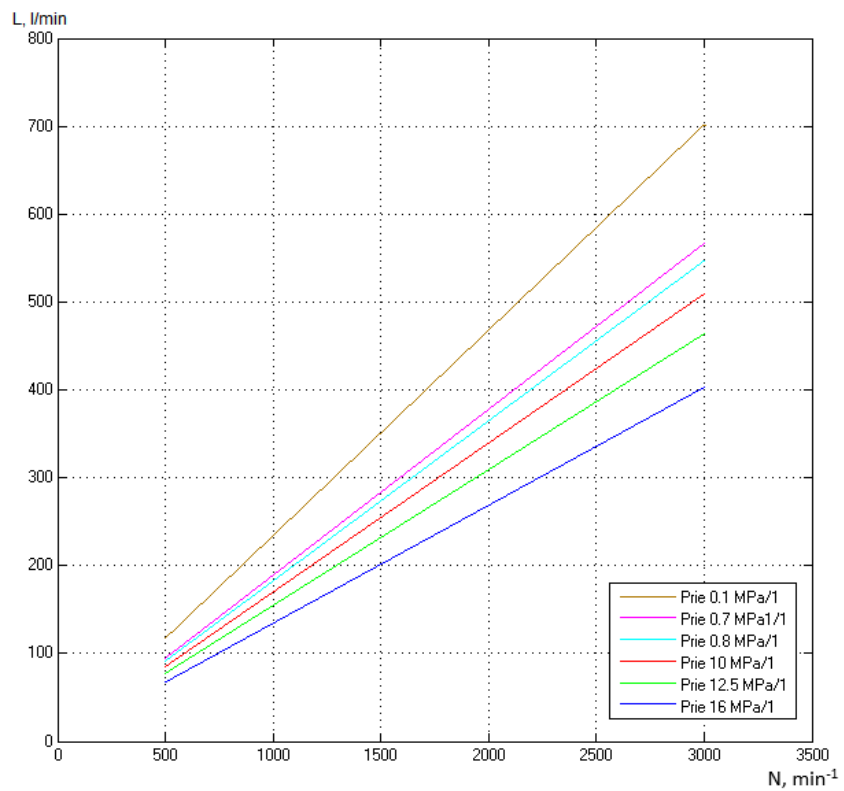


5.62 pav. Proceso modelis su didesnio kompresoriaus parametrais

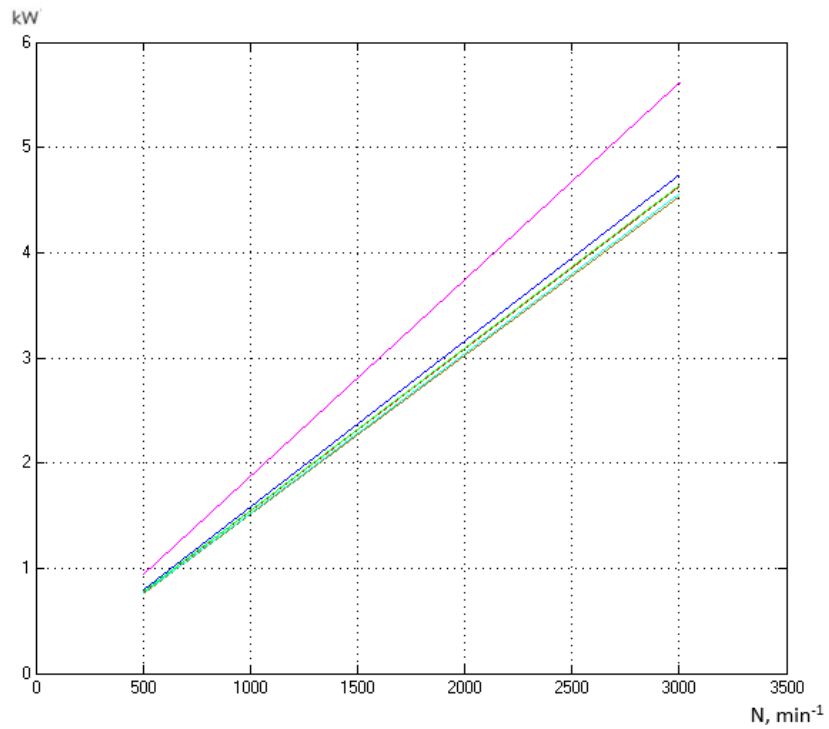
Atliktų bandymų su modeliu rezultatai pateikti grafinėje formoje taip pat kaip ir bandymų atliktų su mažesniu kompresoriumi.



5.63 pav. Slėgio palaikymas PID reguliatoriumi nesant greičio paklaidai

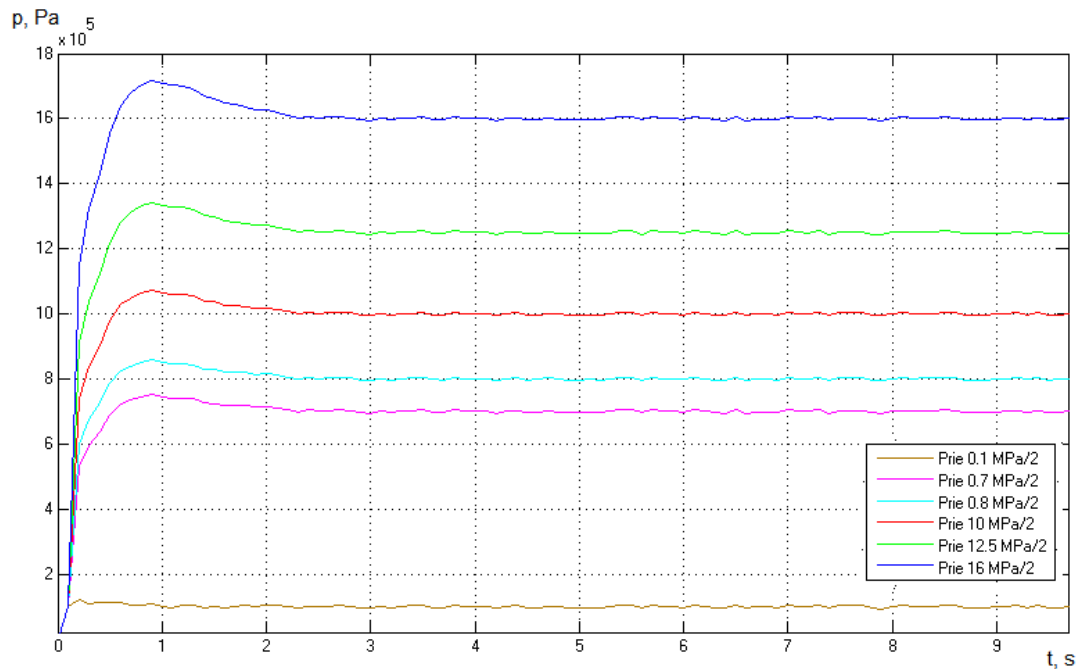


5.64 Gautas našumas nesant greičio paklaidai

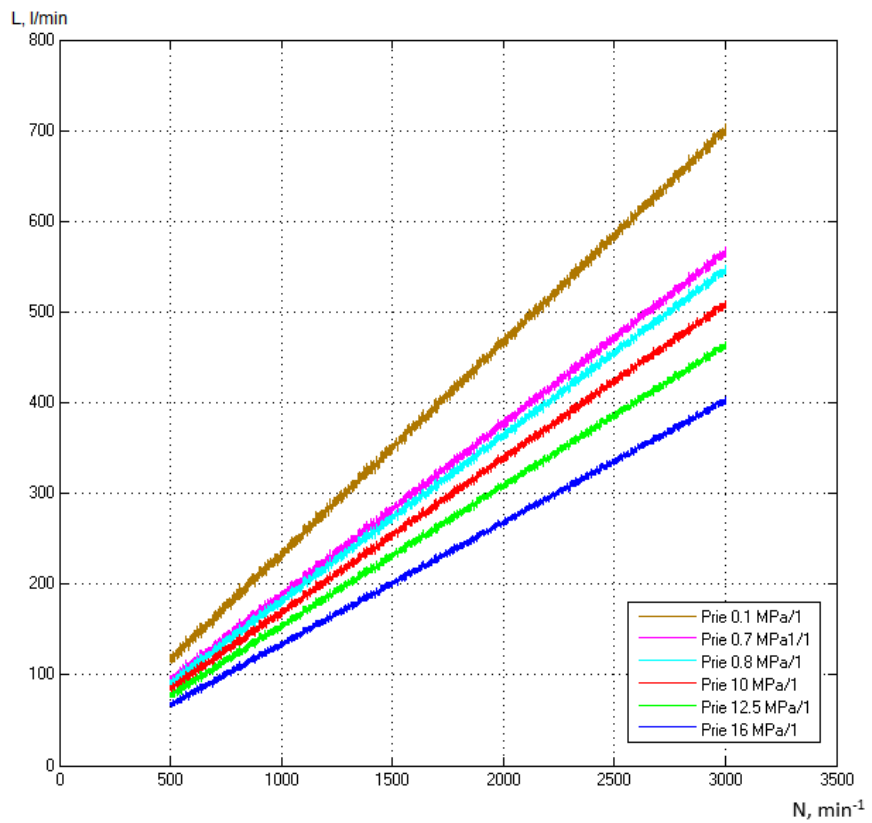


5.65 pav. Gautas galios poreikis nesant greičio paklaidai

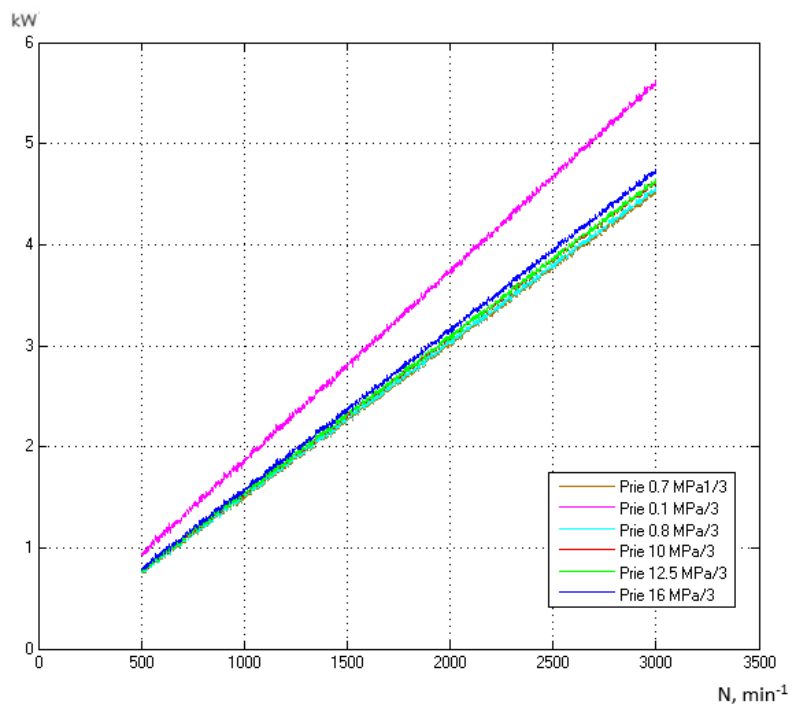
Toliau analogiškai atliekamas bandymas kaip ir su pirmuoju kompresoriumi, įvedant variklio greičio paklaidą. Gauti rezultatai pateikti grafinėje formoje.



5.66 pav. Slėgio palaikymas PID regulatoriumi esant greičio paklaidai



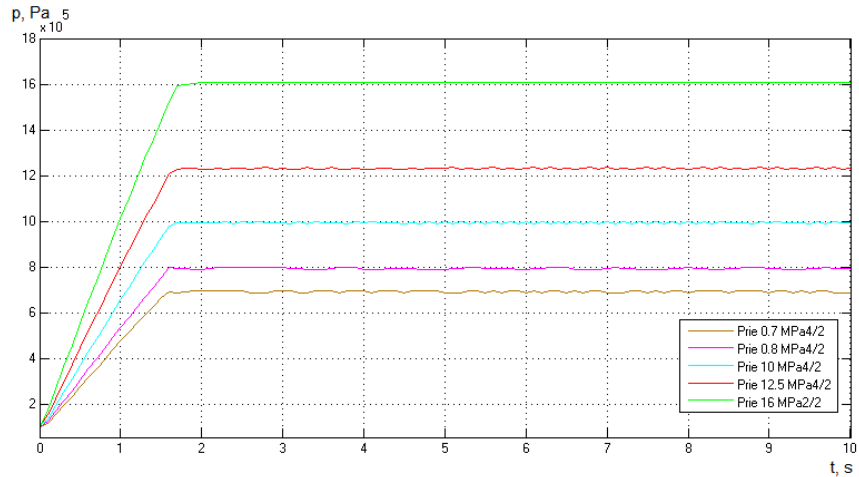
5.67 Gautas našumas esant greičio paklaidai



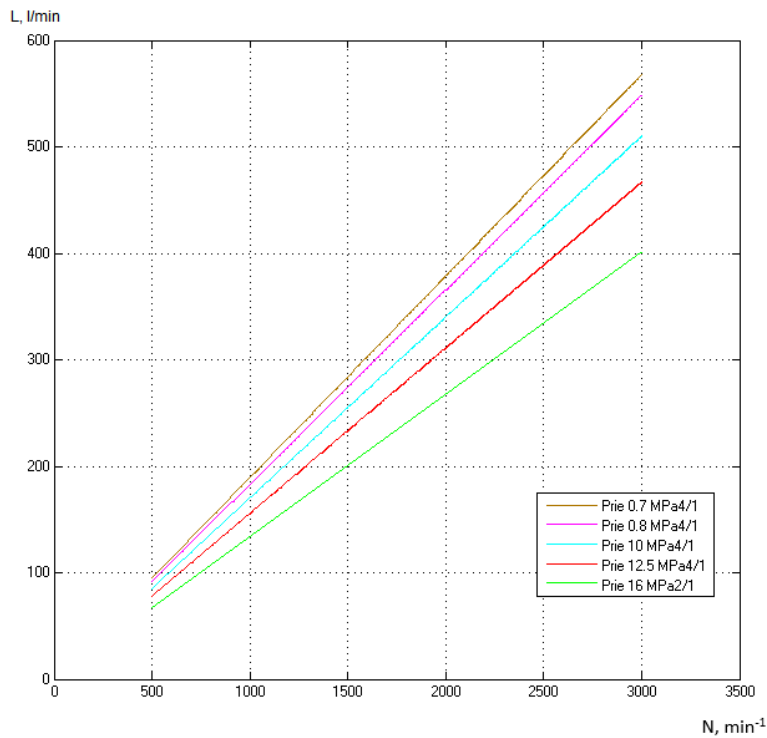
5.68 pav. Gautas galios poreikis esant greičio paklaidai

Iš gautų rezultatų, galima teigti jog gauti regulatoriaus parametrai taip pat gerai susitvarko su oro sistemos valdymu su didesniu bei našesniu kompresoriumi. Tik esant greičio paklaidai pastebimi nežymiai didesni proceso švytavimai, tačiau sistema sureguliuojama sėkmingai.

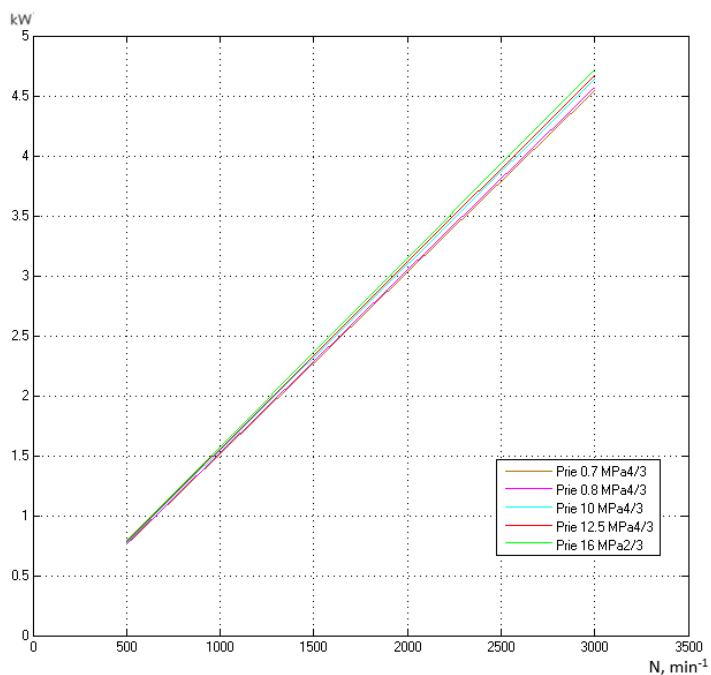
Toliau analogiškas eksperimentas atliktas su didesniu kompresoriumi kai regulatorius pakeičiamas į *fuzzy* regulatorių su dviem įėjimais. Pirmiausia pažiūrima kaip sistema susitvarko nesant trikdžiams, ir vėliau jau su greičio paklaida.



5.69 pav. Slėgio palaikymas *Fuzzy* regulatoriumi nesant greičio paklaidai

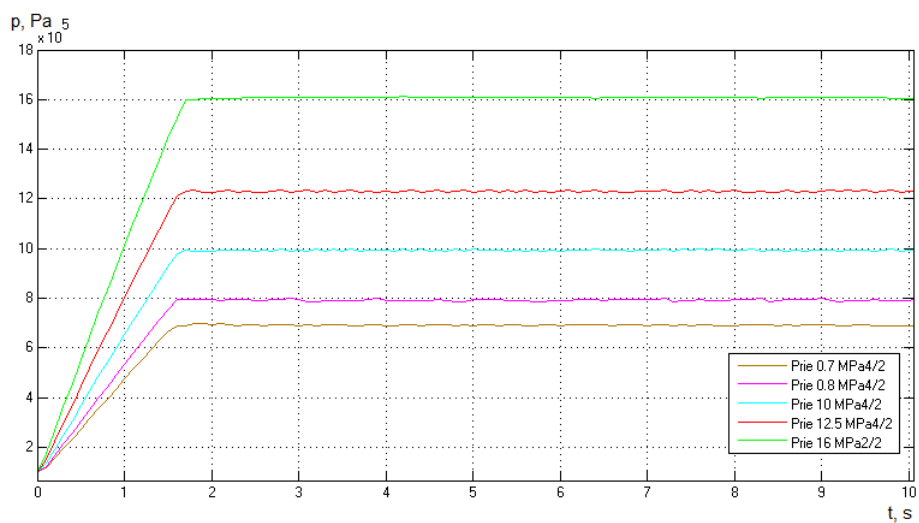


5.70 Gautas našumas nesant greičio paklaidai

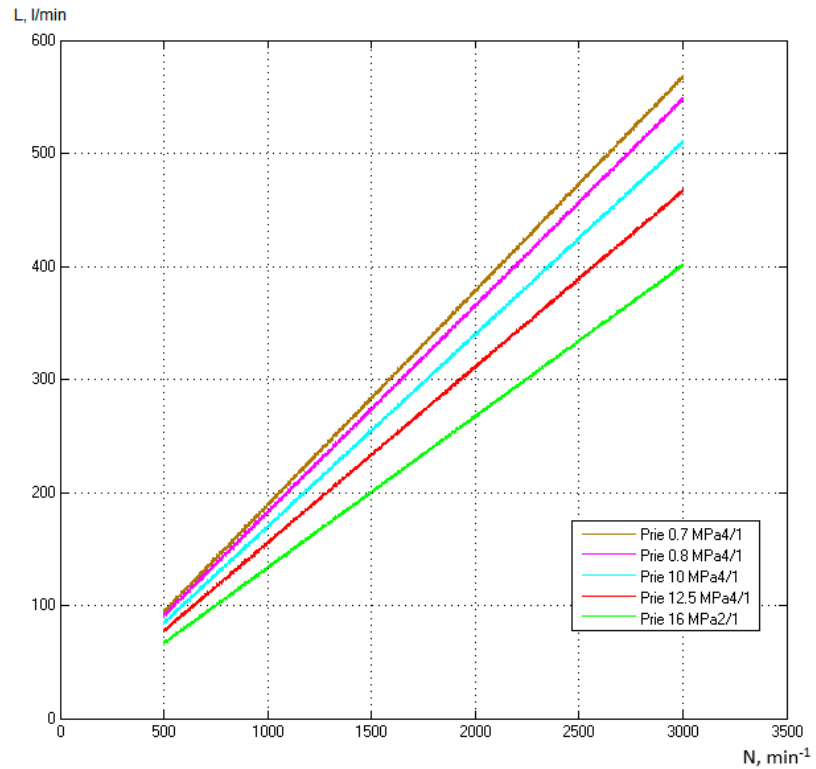


5.71 pav. Gautas galios poreikis esant greičio paklaidai

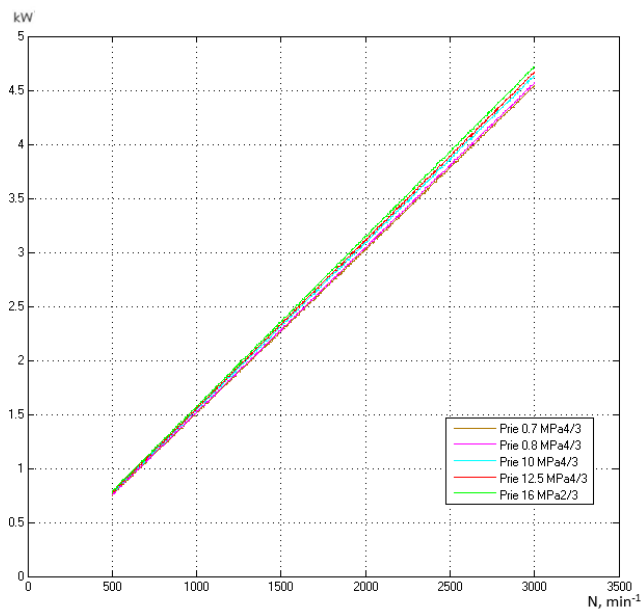
Toliau analogiškai kaip ir ankstesniuose bandymuose įvedama variklio greičio paklaida.



5.72 pav. Slėgio palaikymas *Fuzzy* regulatoriumi esant tai pačiai greičio paklaidai



5.73 Gautas našumas esant greičio paklaidai



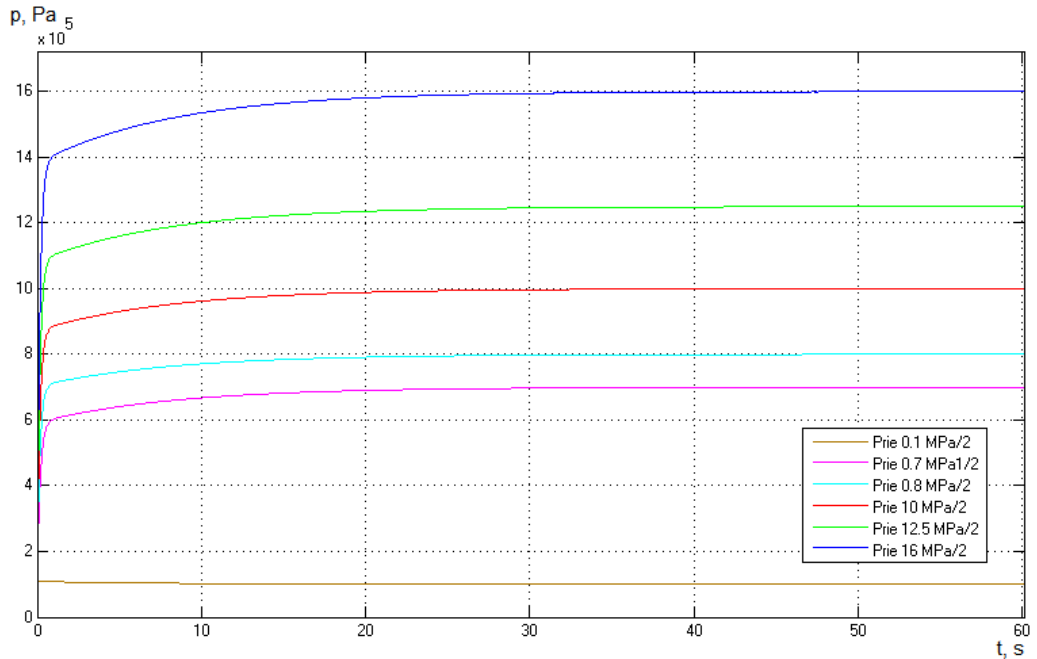
5.74 pav. Gautas galios poreikis esant greičio paklaidai

Kaip ir buvo tikėtasi *fuzzy* reguliatorius taip pat puikiai susitvarko su užduotimi pasikeitus kompresoriui. Tai patvirtina apie reguliavimo parametrų tinkamumą šiam modeliui.

6. Bandymai su realiu objektu

Kadangi kol kas nėra galimybės atlikti bandymu su realiu kompresorių bandymų stendu keičiant reguliatorių iš PID į *Fuzzy*, nuspręsta ištirti PID reguliatoriaus parametrus nustatytus kompresorių bandymo stende oro slėgiui palaikyti.

Prieš tai buvę nustatyti objekte reguliatoriaus parametrai yra tokie: $P=7$, $I=0,01$, $D=4$. Gamintojo duomenimis reguliatorius buvo derintas rankiniu būdu, stebint kaip nusistovi slėgis. Atliktas eksperimentas šiuos parametrus nustačius matematinio modelio PID reguliatoriui.



6.1 pav. Modelio sureguliuotas slėgis PID reguliatorių suderinus pagal objekto parametrus

Iš šio eksperimento matosi jog slėgis lyginant su tyrimo metu gautais nusistovi gerokai vėliau, jei sumodeliavus nusistovi per maždaug 30s, o su paskaičiuotais parametrais per 2,5s, tai yra nemažas reguliavimo skirtumas, dėl kurio galima būtų daryti prielaidą jog blogą našumą lemia blogi reguliatoriaus parametrai.

Išvados

1. Atlikti praktiniai bandymai su objektu, kurių metu buvo gauta informacija problemos tyrimui.
2. Remiantis sukauptais duomenimis apie realų objektą, jo bei kompresorių gamintojo dokumentacija ir literatūra sudarytas kompresorių bandymo stendo suspausto oro valdymo kontūro matematinis modelis.
3. Pagal antrąją *Ziegler'io-Nichols'o* reguliatorių derinimo metodą suderinti PID reguliatoriaus parametrai ($K_P=4,8$ $K_I=9,6$ $K_D=0,6$), bei atlikti eksperimentai esant variklio greičio paklaidai $\pm 100 \text{min}^{-1}$ ir be jos, kurių metu slėgio paklaida buvo iki $\pm 100 \text{Pa}$;
4. Suderintas neraiškios logikos reguliatorius, pirmiausia trimis narystės funkcijomis, bei trimis taisyklėmis, kuomet gauta slėgio reguliavimo paklaida $\pm 100 \text{Pa}$, vėliau suderinus kitą *fuzzy* reguliatorių, bei įvedant paklaidos integralą, su papildomomis narystės funkcijomis ir aprašant penkiolika taisyklių, suderintas leidžiant tą pačią paklaidą ir ± 20 paklaidos integralu, atlikti eksperimentai vienodomis sąlygomis (nesant trikdžiams ir esant greičio paklaidos trikdžiui) ir pastebėta jog antru atveju išėjimas nenukrypsta nuo užduoties daugiau nei maždaug $\pm 50 \text{Pa}$, kuomet pirmu atveju svyravimai vyko $\pm 100 \text{Pa}$;
5. Modelio PID reguliatoriui nustačius objekto PID reguliatoriaus parametrus atliktas bandymas su modeliu ir pastebėta, jog slėgis nusistovi gerokai vėliau, su tyrimo metu gautais reguliatoriaus parametrais per 2,5s, o su objekto parametrais per 30s.

Literatūra

1. V. Aleksa. Technologinių procesų automatizavimas. „Technologija“, Kaunas, 2004. ISBN9955-09-445-1
2. A. Ivanauskas. Automatinio valdymo teoriniai pagrindai. „Technologija“, Kaunas, 2005. ISBN9955-09-964-X.
3. PID Controller [žiūrėta 2016 m. gegužės 15d.]. http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
4. Fuzzy systems. [žiūrėta 2016 m. gegužės 17d.]. http://ac.els-cdn.com/S0952197614000384/1-s2.0-S0952197614000384-main.pdf?_tid=484a3b2c-229c-11e6-931f-00000aacb361&acdnat=1464196710_98b7d1b7531676444a1a252ace4bc445
5. Design of non-parametric process-specific optimal tuning rules for PID control of flow loops [žiūrėta 2016 m. rugsėjo 22d.]. http://ac.els-cdn.com/S0016003213003487/1-s2.0-S0016003213003487-main.pdf?_tid=03bc8676-229d-11e6-9c48-00000aab0f6c&acdnat=1464197025_f9452406aa1063dc623e27d00f6cbff9
6. Process Control – Instrument Engineers Handbook [žiūrėta 2016 m. spalio 7d.]. https://books.google.lt/books?id=mOZbCQAAQBAJ&pg=PA653&dq=air+pressure+regulator&hl=lt&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=air%20pressure%20regulator&f=false
7. Process Control – Modeling, Design, and Simulation [žiūrėta 2016 m. spalio 7d.]. <https://books.google.lt/books?id=PdjHYm5e9d4C&printsec=frontcover&dq=process+control&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwiZu8G64PXMAhWBmiwKHWrRCPMQ6AEIMzAA#v=onepage&q=process%20control&f=false>
8. Industrial Process Control– Advances and Applications [žiūrėta 2016 m. spalio 7d.]. <https://books.google.lt/books?id=S--EOz6fqCsC&printsec=frontcover&dq=process+control&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwiZu8G64PXMAhWBmiwKHWrRCPMQ6AEIQzAC#v=onepage&q=process%20control&f=false>
9. Process Control Engineering [žiūrėta 2016 m. lapkričio 11d.]. <https://books.google.lt/books?id=D1z07OaBi5EC&printsec=frontcover&dq=process+control&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwiZu8G64PXMAhWBmiwKHWrRCPMQ6AEIYTAG#v=onepage&q=process%20control&f=false>

10. Compressor Handbook– Principles and Practice [žiūrėta 2016 m. lapkričio 11d.]
<https://books.google.lt/books?id=J2BdQLtpMocC&printsec=frontcover&dq=compressor&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwjDg7f54PXMAhXGhywKHY5dBNsQ6AEIOTAC#v=onepage&q=compressor&f=false>
11. Flow Measurement [žiūrėta 2016 m. lapkričio 11 d.]
https://books.google.lt/books?id=_x0FAAAACAAJ&dq=flow+measurement&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwiY7fk4fXMAhVJiiwKHXyWCj8Q6AEIKzAB
12. ASCO Series 290/390 [žiūrėta 2016 m. lapkričio 15 d.]
http://www.asco.com/ASCO%20Asset%20Library/Pressure%20Operated%20Valves-2_2-3_3-Bronze%20body-Stainless%20steel%20body-290-CAT-00196GB.pdf
13. Srauto matuoklio instrukcija [žiūrėta 2016 m. spalio 7d.]
<https://foxthermalinstruments.com/products/pdf/ft2a/ft2a-manual.pdf>
14. Srauto matuoklio žinynas [žiūrėta 2016 m. spalio 7d.]
<https://foxthermalinstruments.com/products/pdf/ft2a/ft2a-datasheet.pdf>
15. Kompresorius 4111-300 [žiūrėta 2016 m. spalio 7d.]
<http://www.aurida.lt/portfolio/4111-300/>
16. Kompresorius 22-3509015 [žiūrėta 2016 m. spalio 7d.]
<http://www.aurida.lt/portfolio/22-3509015/>
17. Slėgis [žiūrėta 2016 m. spalio 10d.] <https://lt.wikipedia.org/wiki/Slėgis>
18. Simulink mokymai Intermediate Thermodynamics [žiūrėta 2017 m. sausio 30 d.]
<https://sites.google.com/site/aaronklapheckswebsite/csu-sacramento/classes-by-semester/me-127---intermediate-thermodynamics>
19. Matlab kompresoriaus modeliavimas [žiūrėta 2017 m. sausio 30 d.]
https://books.google.lt/books?id=UzqX4j9VZWcC&pg=PA1018&lpg=PA1018&dq=matlab+air+compressor+model+download&source=bl&ots=s3u9jPo1_5&sig=WbH2uJPc34nQmtSPIgt-PJ8xTaw&hl=lt&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
20. Fuzzy reguliatoriai [žiūrėta 2017 m. kovo 7 d.]
<http://www.seattlerobotics.org/encoder/mar98/fuz/flindex.html>
21. „Compressor Handbook“, Paul C. Hanlon [žiūrėta 2017 m. kovo 30d.]