



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**Elija Smetonytė**

**DVIEJŲ SUSIETŲ PAVARŲ VALDYMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. Vytenis Sinkevičius

**PANEVĖŽYS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**DVIEJŲ SUSIETŲ PAVARŲ VALDYMO TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologija (621H66001)

**Vadovas**

Prof. Vytenis Sinkevičius

**Recenzentas**

**Projektą atliko**

Elija Smetonytė

**PANEVĖŽYS, 2017**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

---

(Fakultetas)

Elija Smetonytė

---

(Studento vardas, pavardė)

Valdymo technologijos 621H66001

---

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Dviejų susietų pavarų valdymo tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

2017 m. birželio 1 d.  
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, **Elijos Smetonytės**, baigiamasis projektas tema „Dviejų susietų pavarų valdymo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

20..... ..

**BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS**Išduota studentui: Elijai Smetonytei Grupė P ME-5**1. Darbo tema:**Lietuvių kalba: Dviejų susietų pavarų valdymo tyrimasAnglų kalba: Control Analysis of Two Connected Servo GearsPatvirtinta 2017 m. kovo mėn. 30 d. dekanu potvarkiu Nr. V25-13-8**2. Darbo tikslas:**Dviejų susietų pavarų su mažos galios varikliais susiejimas.**3. Reikalavimai  
ir sąlygos:**Dviejų susietų pavarų, su mažos galios varikliais, sistema.**4. Projekto struktūra.** *Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.*

## 1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ

1.1 Servo pavara

1.2 Servo pavarų valdymas

1.3 Pavarų susiejimas

1.4 Modeliavimas

## 2. TIRIAMOJI DALIS

2.1 Atliktas eksperimentas

2.2 Darbo eiga

## 3. SISTEMOS MODELIAVIMAS

3.1 Variklio modelio sudarimas

3.2 PID reguliatorių parinkimas

3.3 Dviejų autonominių pavarų veikimas

## 4. PAVARŲ SUSIEJIMAS

## 5. LITERATŪROS SĄRAŠAS

## PRIEDAI

**5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo projekto dalis.****6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas**

Užduotį gavau:

(studento vardas, pavardė, parašas)(data)

Vadovas:

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)(data)(pareigos, vardas, pavardė, parašas)(data)

## **Turinys:**

<b>1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ .....</b>	<b>7</b>
1.1 Servo pavara .....	7
1.2 Servo pavarų valdymas .....	9
1.2.1 Valdymas pagal srovę .....	9
1.2.2 Padėties valdymas .....	10
1.2.3 Servo sistemų valdymas .....	10
1.2.3.1 SMC technika .....	11
1.2.1.1 fuzzy logika .....	12
1.2.1.2 MPC .....	13
1.2.1.3 PID .....	16
1.3 Pavarų susiejimas .....	21
1.3.1 Pavarų susiejimo metodai .....	21
1.4 Modeliavimas: .....	23
<b>2. TIRIAMOJI DALIS .....</b>	<b>25</b>
2.1 Atliktas eksperimentas .....	25
2.2 Darbo eiga .....	25
2.2.1 $L; r_i$ matavimas .....	25
2.2.2 Tuščiosios eigos bandymai .....	27
2.2.3 Variklio sukimo momento radimas .....	28
2.2.4 Sukimosi greičio matavimas $\omega$ .....	29
<b>3. SISTEMOS MODELIAVIMAS .....</b>	<b>32</b>
3.1 Variklio modelio sudarimas .....	32
3.1.1 Variklio greičio reakcijos kreivės aproksimavimas .....	33
3.2 PID reguliatorių parinkimas .....	35
3.3 Dviejų autonominių pavarų veikimas .....	38
3.3.1 Apskritimo braižymo eksperimentas .....	39
<b>4. PAVARŲ SUSIEJIMAS .....</b>	<b>41</b>
<b>5. LITERATŪROS SĄRAŠAS : .....</b>	<b>48</b>
<b>PRIEDAS Nr 1 .....</b>	<b>49</b>
<b>PRIEDAS Nr2 .....</b>	<b>53</b>

Smetonytė Elija. *Dviejų susietų pavarų valdymo tyrimas*. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Vytenis Sinkevičius; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Valdymo technologijos

Reikšminiai žodžiai: *pavara, siejimas, PID, valdymas, modeliavimas*.

Panevėžys, 2017. 53 p.

### **SANTRAUKA**

Servo pavarų sistema- tai sudėtingas technologinis darinys, kuris gali susidaryti iš įvairaus tipo variklių, keitiklių ar lygintuvų, judesio, koordinačių jutiklių, valdymo bei ryčių terminalų. Viena iš tokių sistemų- tai uždaro veikimo ciklo mechatroninės sistemos, kurios dažnai sutinkamos įvairių pramonės šakų įrengimuose, kur reikalingas tikslus veikimas bei didelis našumas. Tam, kad mechatroninė sistema veiktų tinkamai bei atliktų norimas funkcijas, ji turi būti valdoma. Servo sistemos valdymo algoritmas ar metodas parenkamas pagal norimus pasiekti rezultatus. Kadangi sinchroninėms servo sistemos elementų veikimui labai svarbus tikslumas, kuris pasiekiamas suderinus atskirų dalių (pavarų) greitį bei pasisukimą. Tai gali būti įgyvendinta, pasinaudojant įvairiais pavarų siejimo metodais.

Šiame darbe pateikiama trumpa servo pavaros konstrukcijos, galimų modifikacijų, valdymo būdų bei logikų, taip pat pavarų susiejimo metodų apžvalga. Atliktas eksperimentas, apskaičiuoti bei surasti pavaros variklio parametrai, sudarytas variklio ir servo sistemos modelis. Pasiiekti išsikeltus tikslus pasirinktas PID reguliatorius bei sudarytas dviejų valdymo kontūrų (pagal poziciją ir variklio veleno sukimosi greitį) modelis (pasinaudojus matlab SIMULINK programiniu paketu). Pagal pasirinkta metodą apskaičiuoti reguliatoriaus koeficientai bei atliktas simuliacijos eksperimentas. Apžvelgtas sistemos veikimas, kai pavaros veikia autonomiškai ir susietos. Darbe pateikta literatūros analizė, eksperimentų aprašai bei gauti rezultatai.

Smetonytė Elija. (*Control Analysis of Two Connected Servo Gears*): Master's thesis in supervisor prof. Vytenis Sinkevičius; Panevėžys Faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Research area and field: technology of controlling

Key words: gear, Connection, PID, controlling, modeling

Panevėžys, 2017. 53 p.

## SUMMARY

Servo drive system is a complex gain of technology which consists of variety of motors, converters, sensors of position, coordinates and controlling modules. For example it can be a close loop controlling mechatronic systems, which usually are some producing or processing equipment for industry, so it means the Machin has to work accurate and be productive. The operation quality depends from controlling: the way (how it would be done), logic, connection method and so on.

In this paperwork you find a short review of servo gear construction, modifications, controlling methods and logics variety, the methods of connection as well. The experiment was made in order to find motor parameter and make a model. First step: to reach the goals PID regulator s ware selected and the model of closed loop control system for both position and velocity was made (using Matlab SIMULINK ).The coefficient of PID controller were found using appropriate method ( in this case Ziegler-Nichols) and of course the simulation experiment was done. There is made a short review of autonomously and connected gear working. This paperwork is consisting of literature analysis, description of experiments and conclusion.

## ĮVADAS

Vienos ašies servo varikliai bei sistemos populiarūs ir naudojami praktiškai visur, nuo pramonės, buitinių prietaisų iki radijo bangomis valdomų modelių. Dviejų ir daugiau ašių servo pavarų valdymas ženkliai sudėtingesnis, kai laike ir erdvėje reikia sinchronizuoti visų pavarų judesio greitį ar padėties kitimą.

Pavarų susiejimas, kai vienu metu dirba dvi ir daugiau pavarų, atliekamas taip, kad erdvinis darbinio taško judesys sutaptų su užduota trajektorija. Daugeliu atveju visos pavaros turi perteklinį sukimo momentą ir geba su leistina judesio paklaida nugalėti pasipriešinimo jėgas. Pavarų judesio susiejimas atliekamas tik per užduoties signalus kiekvienai pavarai. Atskiros pavaros nereaguoja į apkrovos ar greičio pokyčius kitose pavarose. Tačiau mažo galingumo susietos pavaros, veikiant kintamai apkrovai, dažniausiai neturi atsargos pagal sukimo momentą ir turi adaptuotis prie kintamos apkrovos – mažinti judesio greitį.

**Tyrimo objektas** –Dviejų susietų pavarų sistema.

**Darbo tikslas** - Dviejų susietų pavarų su mažos galios varikliais susiejimas.

**Darbo uždaviniai:**

1. Atlikti esamų servo pavarų galimų konstrukcijų bei servo mechanizmo siejimo metodų bei valdymo galimybių analizę.
2. Atlikti servo pavarų modeliavimo analizę.
3. Sudaryti servo sistemos modelį.
4. Išanalizuoti dviejų nesusietų pavarų darbą, jas susieti bei išanalizuoti gautus rezultatus.

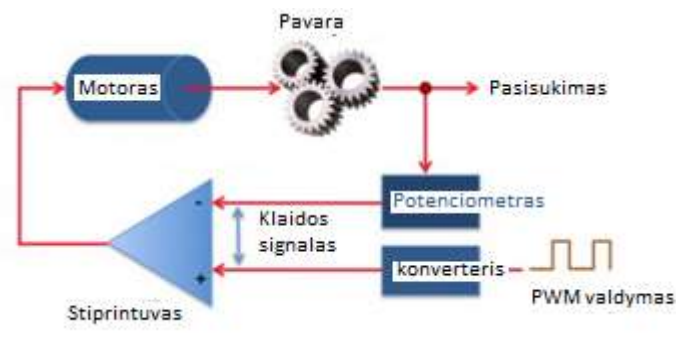
**Tyrimo metodai** – mokslinės literatūros analizė, eksperimentas, modeliavimas MALAB simulink programinių paketu.



# 1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ

## 1.1 Servo pavara

Šiuolaikinė servo elektros pavara - sudėtinga automatinio valdymo sistema, susidedanti iš įvairių tipų servo variklių, inverterių, mechaninės sistemos technologinių parametrų ir koordinačių matavimo jutiklių, reguliuojamų maitinimo įtampos šaltinių, valdymo įtaisų bei ryšio terminalų ir kt.

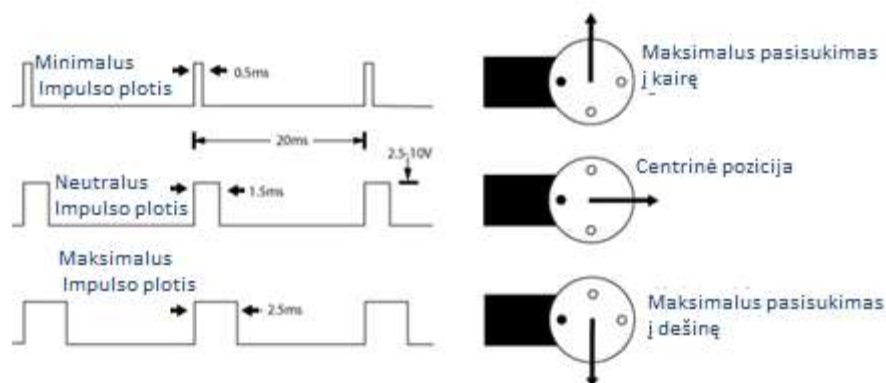


1.1 pav. Servo mechanizmo principinė schema [2]

Paprasčiausiu atveju yra naudojami jutikliai tik kampiniai padėčiai nustatyti. Nustatyta padėtis yra palyginama su į valdiklį perduodama informacija apie padėtį. Jei nustatyta padėtis skiriasi nuo esamos padėties, tada sugeneruojamas paklaidos signalas, pagal kurį valdiklis pasuka variklį taip, kad šis pasiektų reikiamą padėtį [3].

Kalbant apie patį paprasčiausią servo mechanizmą, kaip valdančioji servo mechanizmo sudedamoji dalis naudojamas potenciometras, taip pat gali būti naudojamas enkoderis, kuris reikalingas tam, kad būtų galima nustatyti norimą pasukimo kampą ir variklio sukimosi greitį. Tarkime, potenciometro įtampos reguliavimo rankenėlė įrengta taip, jog išėjimo velenas su kita pavaros dalimi yra sujungtas taip, kad pasisukus pavaros velenui, potenciometro rankenėlė pasisuka ir sukuria potencialų skirtumą. Šis signalas, t.y. potencialo skirtumo atsiradimas su kampinio potenciometro pasisukimu bei sistemos veleno  $0^\circ$  iki  $45^\circ$ . Šis potencialo ar įtampos pasikeitimas fiksuojamas kaip klaida, generuojamas klaidos signalas. Varikliui pasukus veleną nuo  $0^\circ$  iki  $45^\circ$  kampo, potenciometras taip pat pasukamas iki  $45^\circ$  ir užduodama įtampa, kuri atitinka tam tikrą komandą. Esant pasisukimo kampui tokiam, koks jis turėtų būti, potencialų skirtumo tarp įėjimo signalo ir nustatyto potenciometro signalo nėra ir valdymo signalas prie stiprintuvo tampa lygus 0. Išėjimo įtampa, veikia kaip nuolatinės srovės variklio įėjimo įtampa. Variklis bus tokioje pozicijoje tol, kol gaus kitą signalą [4].

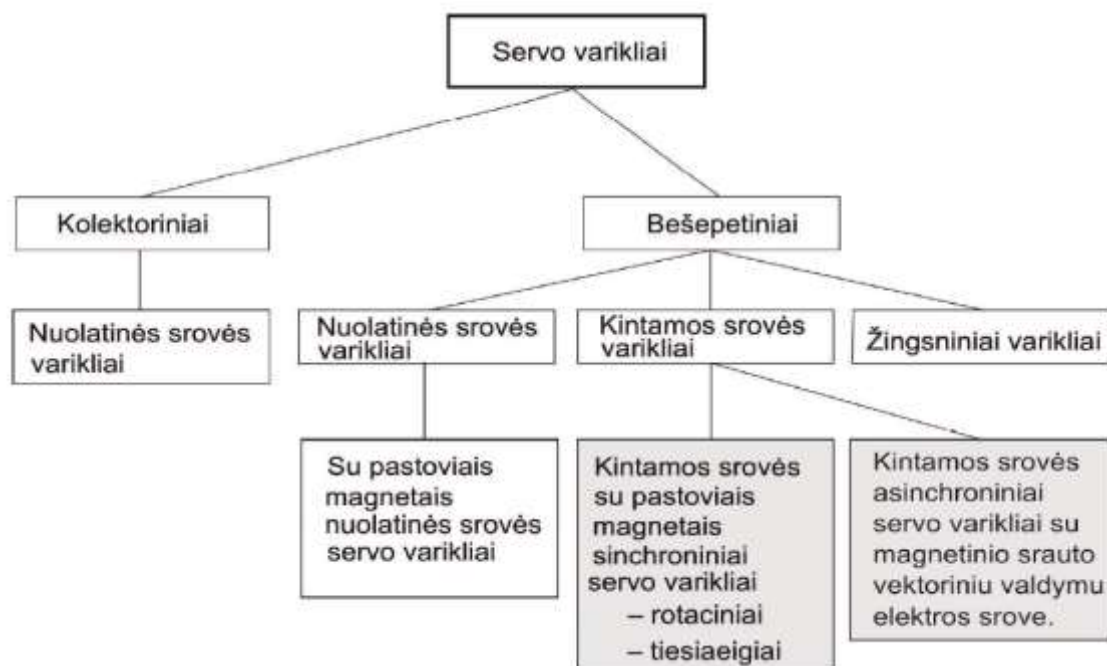
Servo pavaros dažnai naudojamos ten, kur reikia atlikti mechaninius judesius. Kad servo pavara judėtų, reikalingas 50 Hz dažnio signalas ir 1 ms trukmės impulsas (tam, kad servo pavara būtų „centrinėje“ padėtyje). Servo pavaros sukimas vyksta didinant arba mažinant impulso trukmę (1.2 pav.). Impulsai kartojami 50 kartų per sekundę (kas 20 ms), o jų trukmė gali kisti nuo 0,5 ms ar 0,8 ms iki 2,5 ms ar 3,0 ms, priklausomai nuo mechanizmo. Esant 1,5 ms, servo variklis pasuka savo veleną kampu, proporcingu impulso trukmei, o tai atitinka centrinę poziciją - atvebleno poziciją. Norint, jog variklis sukėtųsi 360° kampu nepertraukiamai, reikalingi tam tikri pakeitimai [2].



1.2 pav. Valdymo impulsų diagramos [2]

Servo varikliai bei sistemos populiarūs ir naudojami praktiškai visur, nuo pramonės, buitinių prietaisų iki radijo bangomis valdomų modelių. Visi servo mechanizmai yra iš esmės panašūs, elektrinės dalys panašios, varikliai didesni ar mažesni, kas įtakoja servo pavaros dydį, bei kainą. Žinoma skiriasi medžiagos, kurios naudojamos mechanizmams sudaryti. Kaip sudedamosios dalys pigioms pavaroms gali būti naudojamos plastikinės dalys, kurios tarnauja apie 100 valandų, ar pavaros, turinčios metalines dalis, kurios tarnauja daug ilgiau. Jau minėtas potenciometras gali būti naudojamas „uždaras“ ar pakeistas dekoderiu. Tobulesni servo varikliai turi ne tik padėties, bet ir greičio valdiklius, neretai tai būna PID valdiklis (ašis norima kryptimi pakreipiama greičiau ir tiksliau). [5]

Servo pavarom gali būti naudojami sinchroniniai, asinchroniniai bei sinchroniniai-tiesiaieigiai varikliai. Šie servo varikliai gali būti labai įvairūs (1.3 pav.) tiek nuolatinės, tiek kintamos srovės, sinchroniniai, asinchroniniai, rotaciniai ar tiesiaieigiai.

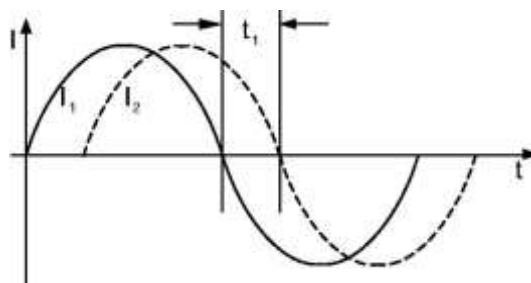


1.3 pav. Galimos servo variklių modifikacijos [5]

## 1.2 Servo pavarų valdymas

### 1.2.1 Valdymas pagal srovę

Servo pavaros judesys priklauso nuo variklio sukimosi momento, kuris sąlygojamas variklio srovės. Tam, kad būtų galima valdyti variklio momentą, kuris būtų priklausomas nuo variklio ašies posūkio kampo, reikalinga valdyti ne tik variklio įtampą, bet ir srovę. Valdomi kintamos srovės varikliai, kurių srovių suma turėtų būti lygi 0. Taigi, du nepriklausomi srovių reguliatoriai tam puikiai tinka. Tačiau šis būdas turi trūkumų. Didėjant variklio greičiui, didėjančio dažnio srovės turi būti valdomos. Taip atsiranda fazinis poslinkis tarp nustatomų srovių reikšmių ir srovių momentinių reikšmių. Valdymo įrenginys gali tik koreguoti sparčiai kintančias nuostatos vertes, taip yra dėl tam tikrų reguliatorių veikimo ypatumų. Didesnis fazinis pokytis, tai didesnis kitimo greitis.



1.4 pav. Skirtumas tarp nustatytos ir momentinės reguliuojamos srovės reikšmės [5]

Skirtumas tarp užduotos srovės vertės ir einamosios srovės vertės išlieka ir nusistovėjus srovės amplitudei. Srovės, kurios kuria sukimo momentą ir magnetinį lauką, yra naudojamos kaip srovių reguliatoriaus nustatomos vertės.

Sinusinės įtampos parametrai gali būti keičiami keičiant PWM impulsų intervalus, tokiu būdu srovės reguliatorius keičia PWM impulsų dažnį. [5].

#### 1.4.1 Padėties valdymas

Padėties valdymui paprastai naudojami proporciniai (PID tipo) reguliatoriai. Hierarchinėse greičio perdavimo sistemose pirmos eilės sistema, tai filtras, antros eilės sistema, tai padėties valdymo sistema. Dažniausiai reikalingas pereinamasis procesas, tačiau be perreguliavimo (be judėjimo už galutinės padėties), šios sąlygos įgyvendinamos esant tik geriausioms P tipo reguliatoriaus charakteristikoms.

#### 1.4.2 Servo sistemų valdymas

Nuolatinės srovės servo varikliai pagrinde yra momento perdavėjai, kurie elektros energiją paverčia mechanine energija (judesiu). Maži servo varikliai dažniausiai naudojami mažesnių gabaritų įrenginiuose ir net laboratorinėje įrangoje, kur reikalingas pozicijos valdymas. Tokio motoro velenas juda pagal paduodamą reguliavimo įtampą, taip valdomas variklio sukimo momentas bei greitis. Prieš sudarant realią sistemą labai svarbu sudaryti, kaip įmanoma realesnes sąlygas atitinkantį matematinį modelį, atlikti sistemos veikimo stebėjimus bei analizę. [6]

Valdymas naudojant MATLAB programinį paketą. Pirma, apskaičiuavus ir pritaikius perdavimo funkciją, kuriamas matematinis PID reguliatoriaus modelis. Matematinis modelis gali būti sukurtas MATLAB Simulink programiniu paketu. Sudarytame modelyje galima pasitikrinti ar integrinės, proporcinės bei diskretinės dedamųjų poveikį. Paprastai servo varikliai turi neaiškias netiesines charakteristikas, kurių našumas nesumažėja, jei naudojamas PID reguliatorius. Kaip žinoma, servo variklis, tai dinaminė, greitai veikianti sistema, kurios periodas trunka milisekundes. Tokioms, greitoms dineminėms sistemoms, taip pat gali būti naudojamas MPC valdiklis (valdymo logika). Žinoma MPC valdiklis buvo kuriamas, atsižvelgiant į PID savybes, bei norint sukurti valdiklį, kuris veiktų greičiau ir tiksliau, nei plačiai naudojamas PID. Tai labai svarbu, nes šiuolaikinėse mechatroninėse sistemose, tikslumas ir greitis, tai du pagrindiniai dalykai užtikrinantis visos sistemos veikimo kokybę. [6]

Žinoma, egzistuoja įvairiausių nuolatinės srovės servo variklių, kurie plačiai naudojami įvairių pramonės šakų įrengimuose, kur reikalingas tikslus veikimas (t.y. greičio valdymas, tikslu pozicija ir pan) bei didelis našumas. Dažniausiai tai yra programuojamos, skaitmeninės apdirbimo mašinos ar robotai. Trumpiau tariant, uždaro veikimo ciklo servo sistemose, kurios gali būti valdomas pagal kelias galimas valdymo/reguliavimo logikas:

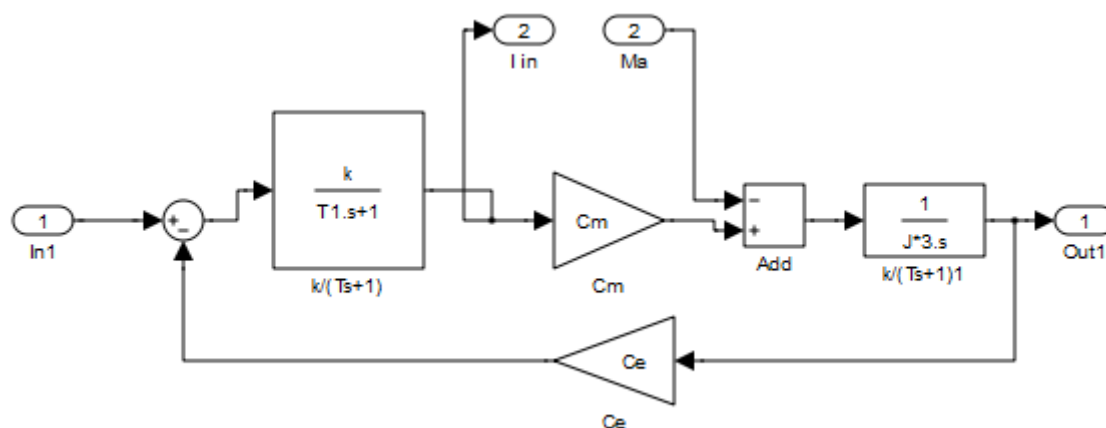
SMC (*angl.* Sliding Mode Contro), tai patikima valdymo strategija, tačiau išėjimo signalas ribojamas vibracijų.

Fuzzy. Šis valdymo metodas greitesnis, paprastesnis bei patikimesnis, tačiau nėra labai stabilus.

MPC (*angl.* Model Predictive Control), „nuspėjamo valdymo modelis“. Esant tokiam valdymui, galima sistemą kontroliuoti realiu laiku.

PID (*angl.* proportional integral derivative), integrinis, proporcinis, diskretinis reguliatorius, kuris gali veikti dviems valdymo metodais: pirmasis-Z-N (*angl.* Ziegler- Nichols), antrasis- *angl.* Good-Gain.

LQR (*angl.* Linear Quadratic Regulat) ir LQG (*angl.* Linear Quadrati, Gussian), t.y. linijinis, kvadratinis reguliatorius ir linijinis, kvadratinis Gauso valdymo metodas. [6]



1.5 pav. Nuolatinės srovės servo variklio modelis

### 1.5.1.1 SMC technika

Sliding-mode control (SMC). Šios technikos šakų egzistuoja kelios tokios kaip: I-SMC (*angl.*- Sliding-mode control), LFC-apkrovos dažnio valdymas (*ang.* Load frequency control) it kt. Kai tokia sistema pasieka savo darbo režimą, sistemos veikimas gali būti grindžiamas keliais būdais: pagrindinis dėmesys skiriamas vidiniam parametrų rinkiniui arba išoriniams trikdžiams. Dinaminės SMC sistemos veikia pagal nustatytą atitinkamą algoritmą.[7]

Dauguma taip valdomų sistemų yra nelinijinės. Tokias sistemas modeliuoti matematiškai yra sudėtinga, todėl pirma jos linearizuojamos atsižvelgiant į duotus valdymo taškus. Valdymo taškų skaičius yra apsprendžiamas valdymo procese, tai ir yra fuzzy valdymo logika. [7]

SMC yra kuriamas dviem etapais: pirmasis-aprašomos dinaminės charakteristikos  $s(x)$ , antrasis-suprojektuojamas valdymo procesas su pertrūkiais, kai  $s(x)=0$ . Kai sistemos būvis  $s(x) = 0, \dot{s}(x) = 0$ , atitinka eksploatacines savybes, kurios suteikia nuo parametro pasikeitimo bei išorinių trikdžių, nepriklausomą judesį. Lygtys, aprašančios sistemos dinamines savybes, gali būti pakeistos ekvivalenčiomis  $u_{eq}$ :

Sliding-mode control (SMC):

Linijinė sistema:

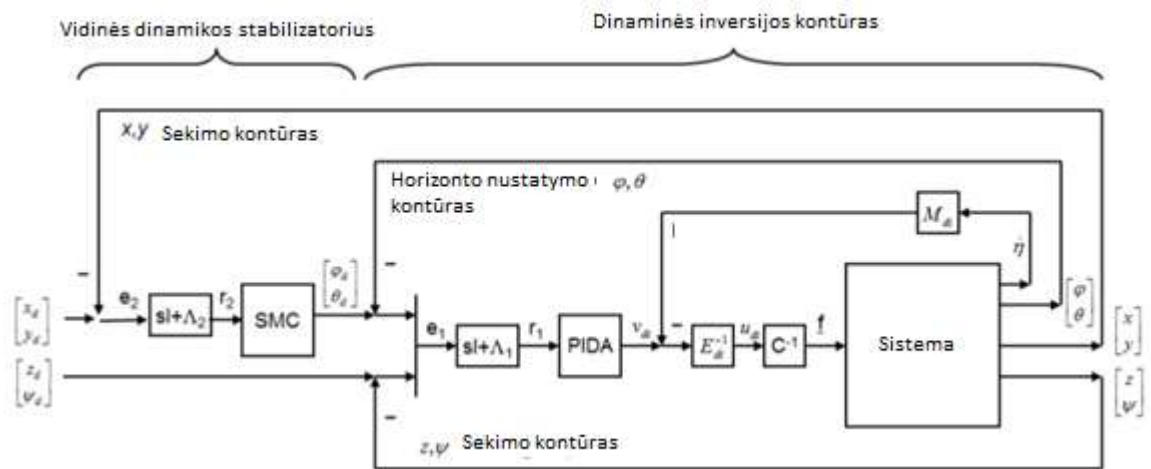
$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1.1)$$

A-  $n \times n$  matrica; B-  $n \times q$  matrica

SMC charakterizuojama:

$$\begin{cases} u^+(x) \text{ for } s(x) > 0, \\ u^-(x) \text{ for } s(x) < 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

$s(x)$ - hipersaitų rinkinys, kuris aprašomas:  $s(x)=Cx=0$ ; C-konstanta, kuri nustatoma  $q \times n$  matricos.

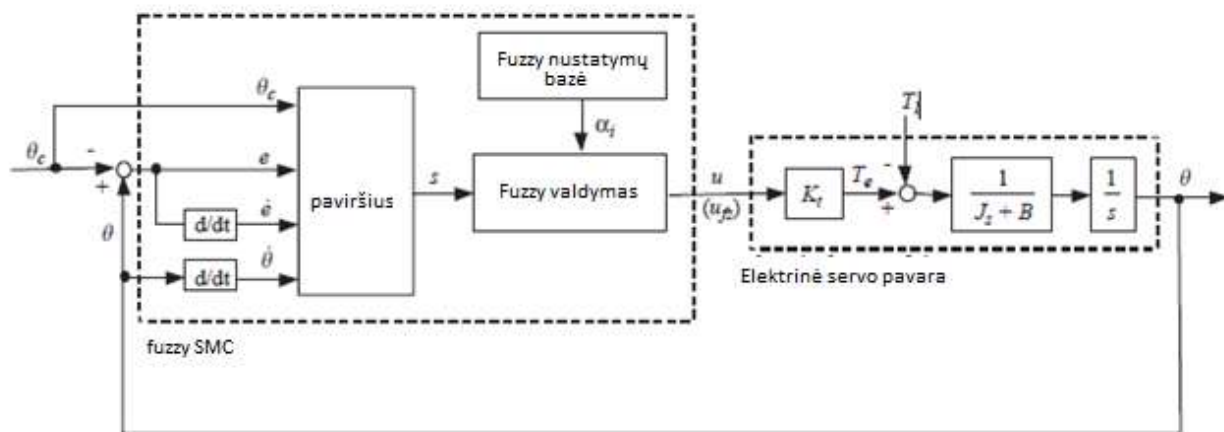


1.6 pav. sliding-mode controller schema [7]

### 1.2.1.1 fuzzy logika

Fuzzy valdymas (FC) yra naudojamas lingvistinei informacijai apdoroti. Pagrindiniai plusai: tvirtumas ir universalumas. Universali aproksimacijos teorema yra pagrįsta tam tikru algoritmu. Kaip bebūtų pagrindinės fuzzy logikos valdymo taisyklės naudojamos sistemose, kuriose reikalingas didelis veikimo tikslumas. To pasekoje buvo sukurti valdikliai FCMC (angl. *fuzzy slide-mode controller*). Pagrindinis tokio valdiklio plusas: fuzzy valdymo logikos įtaka valdymo procese mažesnė nei FLC, kuri dažniausiai naudoja klaidų aptikimui bei jų ištaisymui, kaip įėjime paduodamas fuzzy logikos valdymo signalas. Kaip bebūtų pagrindinis valdymo signalas išlieka Fuzzy logikos, kadangi jo plotis kintamas. Šis valdiklis generuoja perjungimo dydžio absoliutinę vertę „sliding-mode“ valdymo procese, kuriame aptinkamos bei ištaisomos klaidos bei nustatomas linijinio veikimo modelių rinkinys, kas iš esmės ir sudaro valdiklį. Tokią didelio tikslumo sistemą yra sudėtinga analizuoti. Apie 2004 metus fuzzy logikos valdikliai pritaikyti valdyti elektros servo pavaras. Dar prieš 2004 metus buvo iškelta užduotis: adaptuoti mechanizmą, sumažinti galimus parametrų rinkinius (kombinacijas). Tzou ir Lin pasiūlė srovės vektoriaus pasukimo valdymo schemą, kuri nebuvo stabili (elektrinių servo pavarų valdymo parametrų kombinacijos, prisitaikymo

ir išmanusis valdymas, nuolatos tobulėjo). Kaip yra daug galimų sistemos parametrų rinkinių, vibracijos reiškinys įtakoja valdymą. Todėl linijinio valdymo modelio valdiklis sujungtas su internetiniu tinklu, kuris kompensuoja indukcinis trukdžius servo pavaroje. [8]



1.7 pav. „fuzzy sliding-mode controller“, FSMC modelis skirtas servo pavaroms[8]

Sekimo komanda: pagrindinė problema, rasti tinkamą valdymo lygį, kad rotoriaus pozicija galėtų būti stebima bei aptikti sekimo klaidas.

Pirmas sistemos modeliavimo žingsnis- parinkti slydimo paviršių ir sukurti modelį su grįžtamoju ryšiu, kuris kinta laike. Tik tada projektuojamas valdymo signalas, kuris turi būti toks, kad tilptų į slydimo paviršiaus zoną, kuri aprašoma  $k_1$  ir  $k_2$  konstantomis, kurios nelygios nuliui.

Išsamios taisyklės paremtos standartinėmis *Fuzzy* logikos taisyklėmis, kai įėjimų yra  $n$  su  $p^n$  skaičiumi kintamųjų ( $p$ - tai bitų skaičius per signalą). Kai sistemos dydis ar sudėtingumo lygis pakinta (padidėja), logikos elementai (taisyklės) kinta eksponentiškai. Norint apibūdinti slydimo paviršių, kaip įėjimo signalą, kaip *fuzzy* taisyklių kitimas. *Fuzzy* taisyklių kiekis FSMC valdikliuose mažesnis nei FC valdiklyje . [8]

### 1.2.1.2 MPC

MPC (angl. Model Predictive Controller) tai naujausias valdymo būdas, skirtas suvaldyti technologinius procesus. Modeliuose, kuriuose naudojamas MPC , tai tik kompleksinių dinaminių sistemų veikimo atvaizdavimas. MPC tai ne tik algoritmo pavadinimas, bet ir valdymo metodas, kuris leidžia naudoti supaprastintą valdymo signalų modelį, minimizuojant objekto funkciją. Šis valdymo metodas gali būti naudojamas beveik visų tipų sistemose: tiesinėse, netiesinėse, diskretinėse, integrinėse ir t.t. Esti įvairių MPC algoritmų, vienintelis jų visų skirtumas, tai modelis, kuris atvaizduoja procesą, esantys triukšmai bei minimizuojamos funkcijos. Nuspėjamo valdymo modelis (*angl.* Predictive Control Model), tai modelis, kuriame negalime nustatant įėjimo srovę, užduoti norimą įtampą išėjime. Modeliavimo proceso metu, įėjimo ir išėjimo duomenys-tai

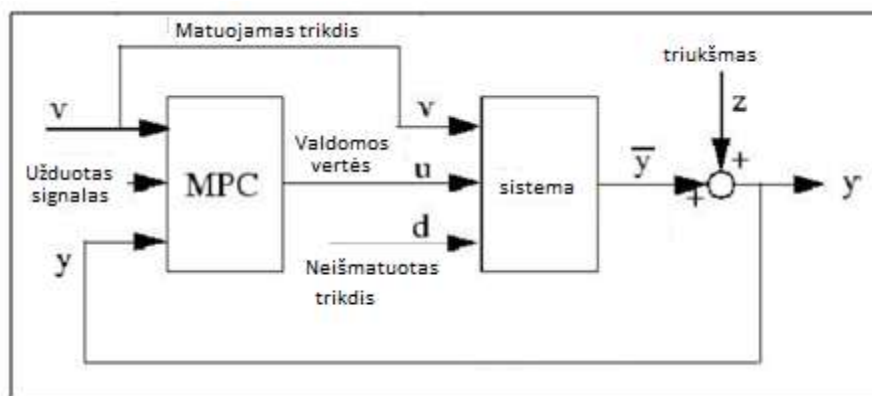


modelio identifikavimas. Taigi turime galimybę efektyviai nustatyti išėjimo signalą. Naudojant „State-space“ modelį (*angl.* State-space) srovės informacija turi būti prognozuojama į priekį. Subjekto funkcija minimizuojama ir pritaikoma apskaičiuoti optimalų vektorių  $(u(k), u(k+1), u(k+2), \dots, u(k+1))$ , nuspėjamo įvesties signalo valdymas, tai signalas  $k$  esant atitinkamam periodui. Galiausiai optimali vektoriaus vertė, nustatoma pagal reikalingą planą. Numanomas „horizonto“ periodas, aprašo konstantą  $k$ . [9]

MPC valdiklio vienas iš plusų- paprastas valdymas ir minimizuoti valdymui skirti kaštai. Tai pranašesnis valdiklis, kuris valdo kintamuosius.

$$J = \sum_{i=1}^N W_{xi}(r_i - x_i)^2 + \sum_{i=1}^N W_{ui}\Delta u_i^2 \quad (1.3)$$

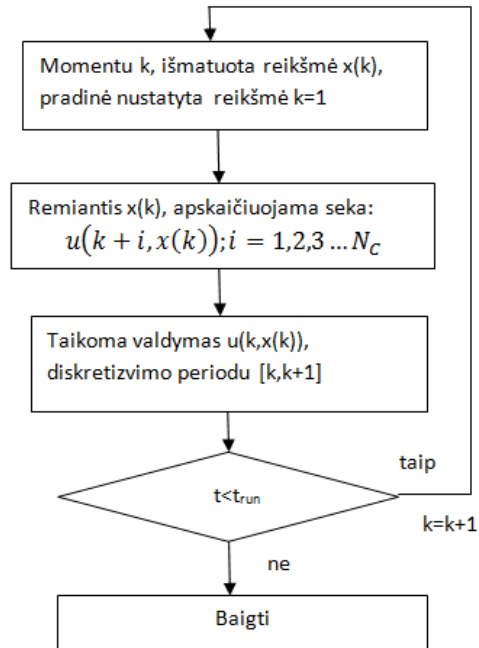
Čia  $x_i$ - valdomas kintamasis;  $r_i$ - atskaitos kintamasis;  $u_i$ -valdomas kintamasis;  $W_{xi}$ -santykinis koeficientas;  $W_{ui}$ -koeficientas.



1.8 Pav. MPC modelis MATLAB Simulink terpėje. [6]

Informacija apie valdymo procesą, ir numanomo proceso generuojamus signalus, kurie valdomi naudojant kintamųjų valdymo modelį. Norint sukurti gerą valdiklį, pirmiausiai reikia sukurti modelį, tokie valdikliai patikimesni, nei tie, kurie nebuvo modeliuojami. Pagrindinis modelio tikslas-prognozuoti signalų vertės įvertinant triukšmą. Modelio identifikacija, tai modelio projektavimo ir kūrimo procesas, kuris sudaromas pagal įėjimo ir išėjimo duomenis. MPC struktūrą sudaro pagrindiniai trys komponentai: proceso modelis, funkcijos sudarymas ir optimizavimas. Tuomet sumažinama klaida iki minimizuotos funkcijos. Paprastai perdavimo funkcija priklauso nuo klaidos signalo, kuris susidaro dėl numanomo kintamojo ir numatomo valdymo kintamojo nepaisant periodo. Paskutinis žingsnis optimizavimo proceso metuose, tai naudoti išėjimo signalą, kuris generuojamas įėjimo signalų sekos. Šis išėjimo signalas skirtas valdyti procesą. [9]





1.9 pav. MPC algoritmas [9]

Standartinei sistemai:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), p(t)), \quad (1.4)$$

Čia  $x(t) \in R^n$ -padėties vektorius,  $u(t) \in R^{m_u}$  -valdymo vektorius,  $p(t) \in R^{m_p}$ - padėties vektorius.

Valdymo vektorius kiekvienu laiko momentu  $t$  nustatomas:

$$J := \varphi(x(t+T), p(t+T)) + \int_t^{t+T} L(x(\tau), u(\tau), p(\tau)) d\tau \quad (1.5)$$

Kiekvienu momentu  $t$ , optimalus valdymas minimizuojant  $J$  yra nustatomas virš horizonto  $[t, t+T]$  ir pradine verte  $t$ , laikomas laiko momentas kai ateina įėjimo signalas. Bendruoju atveju „horizonto“ ilgis  $T$  išreiškiamas funkcija  $T = T(t)$ . Lygybės apribojimai taikomi visame „horizonte“:

$$C(x(t), u(t), p(t)) = 0, \quad (1.6)$$

Čia  $C$  yra  $m_c$  dydžio vektorius, vektorinė funkcija. Optimalus valdymas  $u_{opt}$  tai nustatoma funkcija virš „horizonto“ bei taip pat priklauso nuo  $x(t)$ :

$$u_{opt}(\tau; t, x(t)), (\tau \in [t, t+T]). \quad (1.7)$$

Užduodamas signalas į sistemą išreiškiamas  $u(t) = u_{opt}(t; t, x(t))$

Hamiltono apibrėžimas:

$$H(x, \lambda, u, \mu, p) := L(x, u, p) + \lambda^T f(x, u, p) + \mu^T C(x, u, p), \quad (1.8)$$

Čia  $\lambda \in R^n$  – konst.  $\mu \in R^{m_c}$ - tai Lagrandžo daugiklis, kuris susietas su apribojimu, naudojant Hamiltono transformaciją:

$$L := \varphi(x(t+T), p(t+T)) + \int_t^{t+T} H(x, \lambda, u, \mu, p) - \lambda^T \dot{x} d\tau. \quad (1.9)$$

Optimaliam sprendimui būtinosios sąlygos:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), p(t)), \quad (1.10)$$

$$x(t) = x_0(t), \quad (1.11)$$

$$\dot{\lambda}(t) = H_x^T(x(t), \lambda(t), u(t), \mu(t), p(t)), \quad (1.12)$$

$$\lambda(t+T) = \varphi_x^T(x(t+T), p(t+T)), \quad (1.13)$$

$$H_u(x(t), \lambda(t), u(t), \mu(t), p(t)) = 0, \quad (1.14)$$

$$C(x(t), u(t), p(t)) = 0 \quad (1.15).$$

### 1.2.1.3 PID

Nepaisant išplėtotų valdymo sistemų įvairovės, populiariausias ir paprasčiausias prietaisas sistemą valdyti- PID reguliatorius. Sistemos su PID reguliatoriumi, valdymo algoritmas labai paprastas bei lankstus, lengvai pritaikomas įvairioms sistemų modifikacijoms.

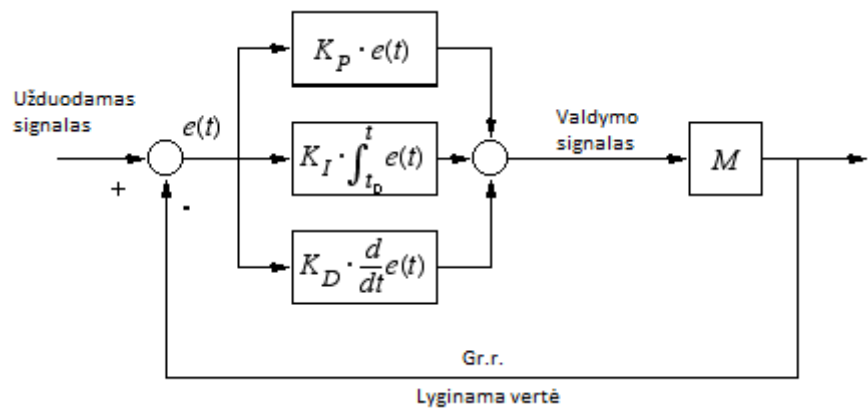
Matematinė PID reguliatoriaus išraiška laike:

$$U(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int_0^t e(t) d(t) + k_d \frac{de(t)}{d(t)} \quad (1.11)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = \lim_{t \rightarrow \infty} x_d - x \rightarrow 0 \quad (1.12)$$

Esant atviram valdymo ciklui, nuolatinės srovės servo variklis, esančios klaidos fiksuojamos pagal tą pačią sistemą. Yra teigiama, jog nėra jokio kito patikimesnio būdo kaip užtikrinti variklio išėjime esančio signalo sekimo, naudojant įėjimo signalą. Atviro ciklo sistemose, blokas- apibūdinantis grįžtamąjį ryšį, nenaudojamas. Dėl to neįmanoma nustatyti tikslios servo variklio veleno pozicijos. Norėdami apeiti šią kliūtį, naudojamos sistemos, veikiančios uždaro ciklo principu (sistemos su grįžtamoju ryšiu). Grįžtamojo ryšio grandinėje galime naudoti kelių rūšių prietaisus: potenciometrą, enkoderį ir pan. Vieno iš šių naudojamų prietaisų išėjime esanti įtampa palyginama su užduotąja (reikalaujama), taip generuojamas klaidos signalas, kuris apdorojamas valdiklyje. Valdiklis generuoja signalą, kuris perduodamas į sistemą, ir tampa servo variklio pozicijos valdymo signalu. Variklio pasisukimo valdymas, tai nestabilus procesas, kuomet valdoma sistema yra uždaro veikimo ciklo tipo. [6]

Šiam procesui kontroliuoti gali būti naudojamas PID reguliatorius, kurio algoritmą sudaro pagrindiniai trys parametrai: proporcinis, integralinis ir diferencialinis. Šie parametrai gali būti aprašomi ar atvaizduojami laiko atžvilgiu: P (proporcinis) priklauso nuo esamo klaidos signalo, I (integralinis)- kaupiamos klaidos aptiktos praetyje, D (diferencialinis), tai numatomos pasitaikančios klaidos ateityje, pagrįstos srovės pakitimo. [6]

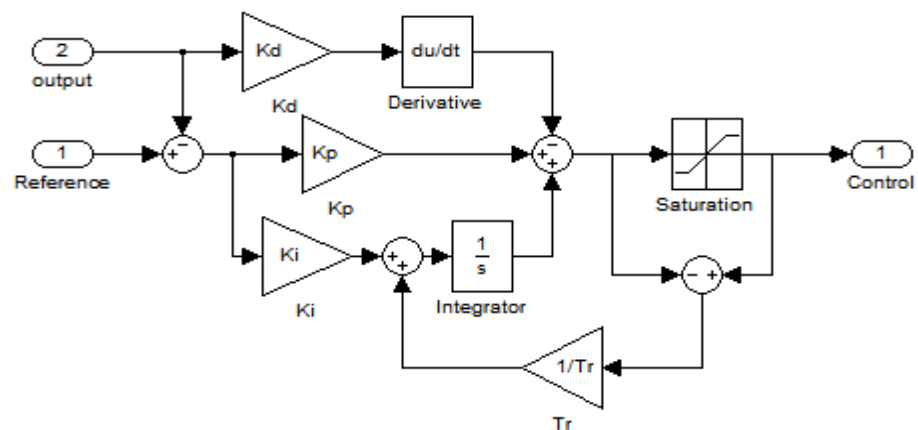


1.20 pav. PID reguliatoriaus struktūra [6]

### PID reguliatoriaus modifikacijos

#### „Anti-windup“

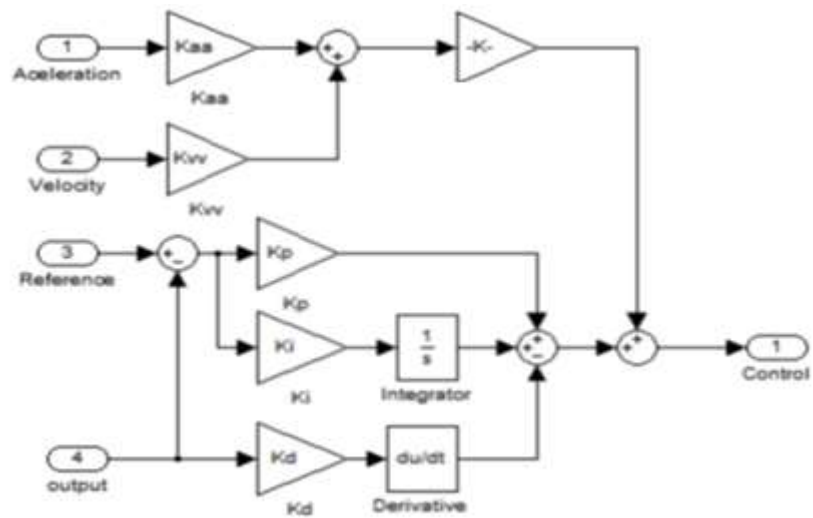
Tokia konfigūracija naudojama nusistovėjusios „klaidos pašalinimui. Tai įgyvendinama atliekant integravimo veiksmus. Tačiau apskaičiuotas valdymo signalas viršija ribas, tokiu atveju reguliatorius negali reaguoti nedelsiant į pasikeitusį klaidos signalą. Egzistuoja daug įvairių būdų kaip išvengti šios problemos. Vienas iš jų, norint išvengti tokios situacijos ir užtikrinti gerą veikimą būtina riboti valdymo signalą bei atlikti reguliatoriaus modifikacijas. [10]



1.21 pav. Modifikuotas PID reguliatorius. Modifikacija „Anti-windup“ [10]

#### Feed-forward control

Tai dar vienas metodas siekiant padidinti sistemos efektyvumą. Iš esmės ši konfigūracija naudojama siekiant sumažinti paklaidas ir dažniausiai naudojama sistemose, kur reikalinga tiksli judesio kontrolė. Tokios konfigūracijos reguliatorius reguliavimus atlieka pagal pagreitį bei greitį.[10]



1.22 pav. Modifikuotas PID reguliatorius. Modifikacija „*Feed-forward control*“ [10].

### PID reguliatoriaus koficientų apskaičiavimas

Parinkti PID reguliatoriaus koeficientus galima keliais metodais: eksperimentiniu bei valdomojo proceso savybėmis paremtais metodais (Ziegler ir Nichols; kappa-Tau ir pan). Populiariausias koeficientų parinkimo metodas Ziegler ir Nichols. Šis koeficientų apskaičiavimo metodas pritaikomas įvairioms sistemoms: kai žinomi du ar trys dinaminiai parametrai, atviraime ar uždaraime kontūre. Kadangi šiuo metodu suderintoje sistemoje amplitudės slopinimo santykis didelis. Siekiant sumažinti proceso parametrų variacijų jautrumą. Šio metodo koeficientų apskaičiavimo formulės patobulintos (sukurtos modifikacijos). [11]

#### Ziegler-Nichols metodas

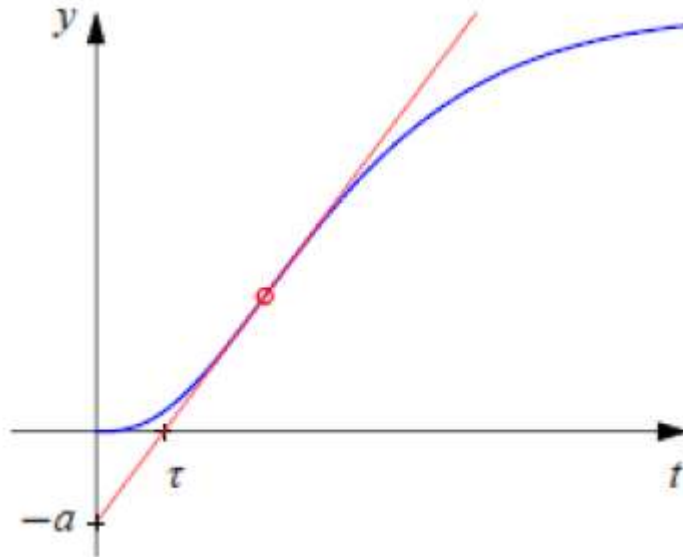
Šis metodas paremtas proceso dinamikos įvertinimu, žinant du dinaminį procesą apibūdinančius parametrus: stiprinimą ir trukmę. Laiko srities metodas paremtas šuoline reakcija atviraime kontūre.

Statinės sistemos be vėlinimo linerizavimas:

$$G(s) = \frac{1}{T_s} G_s(s), \quad (1.13)$$

$G_s(s)$ - stabili sistema be vėlinimo.

$$G(s) = \frac{1}{(T_s+1)^n} \quad (1.14)$$



1.23 pav. Šuolinė reakcijos kreivė [11]

$$\alpha^* = \frac{\alpha}{\Delta u} \quad (1.15)$$

Čia  $\Delta u$ -išėjimo šuolinio pokyčio dydis

Šis metodas taip pat gali būti taikomas pirmos eilės modeliui (procesui su vėlinimu), t.y. žinomi ir naudojami trys dinaminiai parametrai.

1 lentelė

Reguliatorių parametrų nustatymas Ziegler-Nichols šuolinės reakcijos metodu

Regulatorius	$K_r$	$T_i$	$T_d$
P	$1/\alpha^*$	-	-
PI	$0,9/\alpha^*$	$3,33 \tau_a$	-
PID	$1,2/\alpha^*$	$2 \tau_a$	$0,5\tau_a$

2 lentelė

Reguliatorių parametrų nustatymas Ziegler-Nichols su vėlavimu šuolinės reguliatoriaus derinimo formulės

Regulatoriaus tipas	$K_r$	$T_i$	$T_d$
P	$T_a/K_a \tau_a$	-	-
PI	$0,9 T_a/K_a \tau_a$	$3,33 \tau_a$	-
PID	$1,2 T_a/K_a \tau_a$	$2 \tau_a$	$0,5\tau_a$

Choen ir COON atliktos formulų modifikacijos kai  $0,1 < \frac{\tau_a}{T_a} < 1$ .

P:

$$K_r = \frac{T_a}{K_a \tau_a} \left( 1 + \frac{\tau_a}{3T_a} \right) \quad (1.16)$$

PI:

$$K_r = \frac{T_a}{K_a \tau_a} \left( 0,91 + \frac{\tau_a}{12T_a} \right) \quad (1.17)$$

$$T_i = \frac{30 + 3\tau_a/T_a}{9 + 20\tau_a/T_a} \tau_a \quad (1.18)$$

PD:

$$K_r = \frac{T_a}{K_a \tau_a} \left( 1,25 + \frac{\tau_a}{6T_a} \right) \quad (1.19)$$

$$T_d = \frac{6 - 2\tau_a/T_a}{22 + 3\tau_a/T_a} \tau_a \quad (1.20)$$

PID:

$$K_r = \frac{T_a}{K_a \tau_a} \left( 1,33 + \frac{\tau_a}{4T_a} \right) \quad (1.21)$$

$$T_i = \frac{32 + 6\tau_a/T_a}{13 + 8\tau_a/T_a} \tau_a \quad (1.22)$$

$$T_d = \frac{4}{11 + 2\tau_a/T_a} \tau_a \quad (1.23)$$

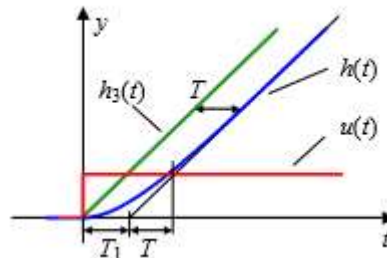
PID reguliatorius astatinėse sistemose

Paprastiausia identifikacija atlikti sistemai, kurios valdymo signalas šuolinis (*angl.* Step response). PID reguliatorius gali būti naudojamas statinėse sistemose, pirmos eilės sistemoms bei pirmos eilės sistemoms su vėlinimu, ir astatinėse (integrinėse) sistemose.

Astatinės sistemos:

$$h_1(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{T_s(T_1 s + 1)} \frac{1}{s} \right\} = \frac{1}{T} \left[ t - 1 - e \left( 1 - e^{\frac{t}{T_1}} \right) \right] 1(t) \quad (1.24)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} h_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{T} \left[ t - 1 - e \left( 1 - e^{\frac{t}{T_1}} \right) \right] 1(t) \right) = \frac{1}{T} (t - T_1) 1(t) \quad (1.25)$$



1.24 pav. Pirmos eilės astatinės sistemos atsakas į šuolinį užduotą signalą [12]

Čia:  $T_1$ -vėlinimo laikas;  $u(t)$ -užduotas signalas;  $h(t)$ -inercinės astatinės sistemos atsakas į užduotą šuolinį signalą;  $h_3(t)$ -integralinės sistemos atsakas į šuolinį užduotą signalą;  $T_1$ -vėlinimo laikas.

Sistemos atsako aproksimuota funkcija, su vėlinimo lauku ( formulė ), inercinei astatinei sistemai ( formulė 1.26) [12]

$$G(s) = \frac{1}{T_s} G_s(s) e^{-T_0 s} \quad (1.26)$$

$$G(s) = \frac{1}{T_s} \frac{1}{T_1 s} G_s(s) e^{-T_0 s} \quad (1.27)$$

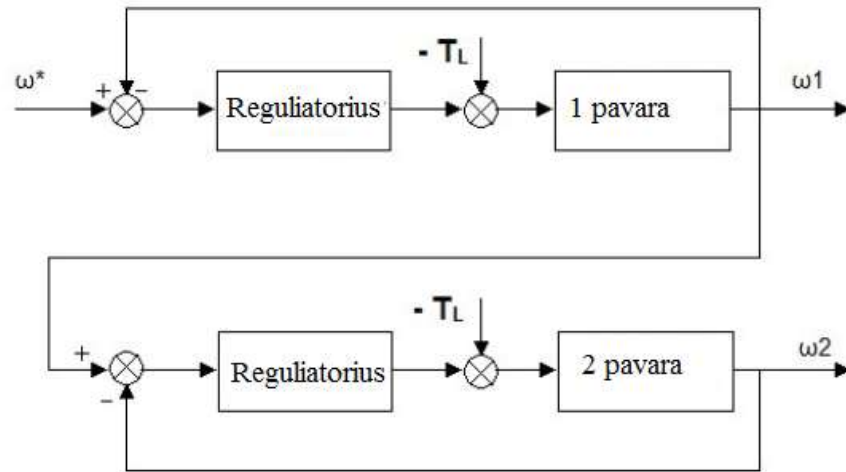
## 1.25 Pavarų susiejimas

Vienos ašies servo varikliai bei sistemos populiarūs ir naudojami praktiškai visur, nuo pramonės, buitinių prietaisų iki radijo bangomis valdomų modelių. Dviejų ir daugiau ašių servo pavarų valdymas ženkliai sudėtingesnis kai laike ir erdvėje reikia sinchronizuoti visų pavarų judesio greitį ar padėties kitimą. Yra žinomi kelių pavarų sinchronizavimo metodai: valdančioji-sekančioji pavaros (angl. Master-Slave), susikryžiuojančioji (angl. Cross Coupling Technique), biašinė besikryžiuojanti (angl. Bi-axial cross coupled), santykinė besikryžiuojanti (angl. Relative Coupling). Šie metodai puikiai naudojami pramoninėse servo pavarose, kurios yra santykinai brangios. Servo pavaros, kurios priskirtinos RC (angl. Radio Control) klasei, kaip taisyklė, jokių priemonių sinchronizuoti judesį neturi, kadangi visos jos yra vienos ašies servo pavaros.

### 1.25.1 Pavarų susiejimo metodai

#### Vedančioji-sekančioji

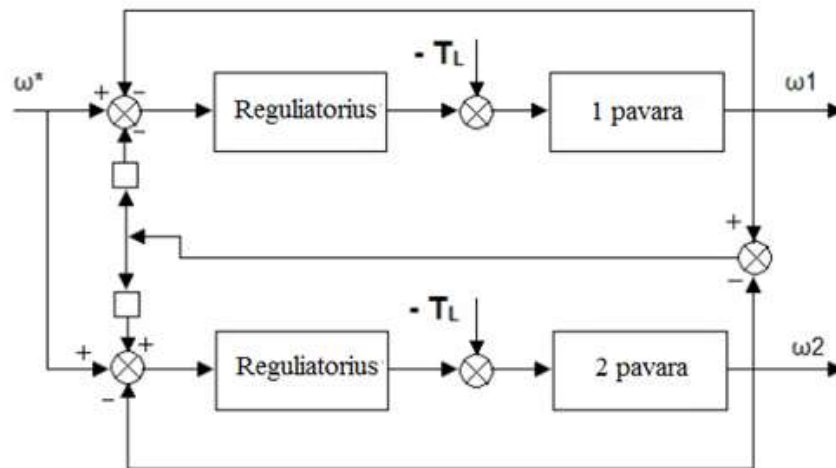
Vedančioji-sekančioji sistemos konfigūracija pavaizduoda 1.25 pav. Vedančiosios pavaros išėjimo greitis, tai užduodamas signalas sekančiajai pavarai. Apkrovos, kurios veikia pavaras neturėtų įtakoti kitos pavaros. Kadangi dėl veikiančių apkrovų tikslus sinchronizavimas tarp ašių nėra įmanomas. Taigi tokia konfigūracija naudojama tokiais atvejais kai, sinchronizavimo greitis ar pozicija gali būti mažiau tiksli. [13]



1.25 pav. „Vedančioji-sekančioji“ pavarų jungimo metodas

Susikryžiuojančioji (angl. Cross Coupling Technique)

Papildomas sugeneruotas signalas, tai grįžtamųjų ryšių (greičio arba pasisukimo kampo) skirtumas tarp pavarų. Tuo šis susiejimo būdas skiriasi nuo pirmojo (15 pav). [13]

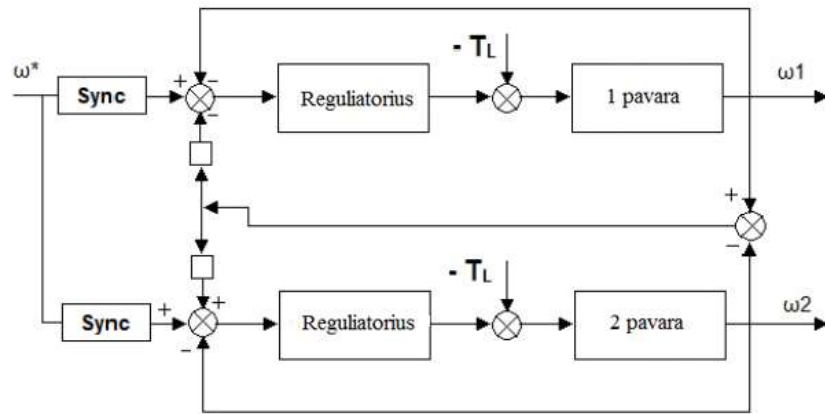


1.26 pav. „Susikryžiuojančių“ pavarų jungimo metodas

Biašinė besikryžiuojanti (angl. Bi-axial cross coupled)

Šis susiejimo metodas naudojamas susieti tik 2 mechanizmų susiejimui. Tai iš esmės ta pati, prieš tai paminėtas metodas, atliekant papildomą sinchronizavimą. Šis metodas kelia diskusijas, mat abiejų mechanizmų valdymas pagal absoliučiąsias ir santykinės reikšmes, kas sinchronizavimo metu trukdo pasiekti tinkama greitį (17 pav). [13]





1.27 pav. „Biašė susikryžiuojančioji“ pavarų jungimo metodas

#### 1.4 Modeliavimas:

DC servo sistemos variklis gali būti apibūdinamas kaip linijinė SISO sistema, kurią aprašo trečios eilės perdavimo funkcija. Greitis bei pozicija gali būti keičiami keičiant srautus, paduodamą įtampa inkaro grandinėje. Nors ir menkiausias srovės pakitimas  $I_a$ , yra reikšmingas naudojamam servo varikliui.

Pagrindinis minusas nuolatinės servo variklio lauko valdyme-lėtesnis dinaminis atsakas į klaidos signalą. Taip yra, nes indukuotoje grandyje sistemos laiko konstanta yra didesnė. Veikia elektromagnetinis laukas. Taigi tai aukšto induktyvumo grandinė, kai atsiranda staigus pokytis, generuojama klaidos signalo įtampa, o srovė, per tam tikrą laiko tarpą, per susidariusį magnetinį lauką, pasieks savo nusistovėjusią vertę. Laiko tarpas priklauso nuo laiko konstantos. [6]

Sukimo momentas  $T$  yra proporcingas inkaro srovės  $I_a$  ir oro tarpo tankiui  $\phi$ :

$$T = \phi \cdot i_a, \quad (1.28)$$

$$\phi = k_f \cdot i_f, \quad (1.29)$$

$$T = k_f \cdot i_f \cdot k_a \cdot i_a, \quad (1.30)$$

$$T = K \cdot i_a, \quad (1.31)$$

Čia  $k_f$ -konstanta,  $k_a$  - proporcinė konstanta.

$$e_b = k_b \frac{d\theta}{dt}. \quad (1.32)$$

Kirchhofo dėsnis. Servo variklis valdomas įtampa  $E_a$ .

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = e_a. \quad (1.33)$$

Srovė, kuri įtakoja sukimo momentą:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} = T. \quad (1.34)$$

Laplaso transformacija:

$$e_b(s) = k_b \cdot s \cdot \theta(s) \quad (1.35)$$

$$(L_a + R_a)I_a(s) + k_b \cdot s \cdot \theta(s) = E_a(s) \quad (1.36)$$

$$(Js^2 + Bs)\theta(s) = K \cdot i_a(s) \quad (1.37)$$

$$\theta(s) = \frac{K}{(Js^2 + Bs)} \left[ \frac{E_a(s) - k_b \cdot s \cdot \theta(s)}{L_a s + R_a} \right] \quad (1.38)$$

$$\theta(s) = \frac{K \cdot E_a(s) - K \cdot k_b \cdot s \cdot \theta(s)}{(Js^2 + Bs)(L_a s + R_a)} \quad (1.39)$$

$$\frac{\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{JL_a s^3 + (JR_a + BL_a)s^2 + (BR_a + Kk_b)s} \quad (1.40)$$

Pasirinkto regulatoriaus parametrų parinkimas [11]

Servo sistemos modeliavimas:

Tuo atveju, kai naudojamas nuolatinės srovės variklis, o valdymo signalas-įėjimo įtampa U.

Momentas T priklauso nuo inkaro srovės  $i_a$ .

$$T = k_m i \quad (1.41)$$

$$e = k_m \omega \quad (1.42)$$

Elektrinė lygtis:

$$U - e = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (1.43)$$

Čia R-varža, L-induktyvumas

Sukimo momentas perduodamas per apkrovą:

$$J_m \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m + b(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_L) + k(\theta_m - \theta_L) = k_m i \quad (1.44)$$

$$J_m \ddot{\theta}_L - b(\dot{\theta}_m - \dot{\theta}_L) - k(\theta_m - \theta_L) = 0 \quad (1.45)$$

Indeksas m- motoro, indeksas L-apkrovos apibūdinimui; b-slopinimo konstanta.

Aprašomas padėties vektorius  $x = [i, \theta_m, \dot{\theta}_m, \theta_L, \dot{\theta}_L]^T$

$$x = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -k'_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_m}{J_m} & -\frac{k}{J_m} & -\frac{b+b_m}{J_m} & \frac{k_m}{J_m} & \frac{b_m}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{k}{J_L} & \frac{b}{J_L} & -\frac{k}{J_L} & -\frac{b}{J_L} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u. \quad (1.46)$$

Jei velenas nelankstus tokiu atveju  $k \rightarrow \infty, \dot{\theta}_m = \dot{\theta}_L$

Sujungus dvi mechanines sistemas

$$J_m \ddot{\theta}_m + J_L \ddot{\theta}_L + b_m \dot{\theta}_m = k_m i \quad (1.47)$$

$$(J_m + J_L) \ddot{\theta}_m + b_m \dot{\theta}_m = k_m i \quad (1.48)$$

Bendras inercijos momentas  $J = J_m + J_L$ , tokiu atveju padėties

vektorius  $x = [i, \theta_m, \dot{\theta}_m]^T$

$$x = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & -k'_m \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_m}{J_m} & 0 & -\frac{b_m}{J_m} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad . (1.49)$$

## 2. TIRIAMOJI DALIS

### 2.1 Atliktas eksperimentas

**Tikslas:** eksperimentiškai iširti bei rasti pavaros (nuolatinės srovės variklio) parametrus:

$L$ ;  $r_i$ ;  $J$ ;  $C_E$ ;  $C_M$ .

Plataus vartojimo mažos galios variklių techninėje dokumentacijoje dalies išvardintų parametrų nėra. Jie nustatyti atliekant eksperimentą.

Nuolatinės srovės variklį aprašanti lygčių sistema:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = U - \omega \cdot C_E - i \cdot r_i \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_V - M_A = C_M i - M_A \end{cases} \quad (2.1)$$

Čia:  $L$  – variklio inkaro grandinės induktyvumas;  $U$  – įtampa, prijungta prie inkaro grandinės;  $\omega$  – kampinis variklio veleno sukimosi greitis;  $C_E$  – generatorinė evj;  $i$  – inkaro grandinės srovė;  $r_i$  – inkaro grandinės varža;  $J$  – besisukančių masių inercijos momentas;  $M_V$  – variklio sukimo momentas;  $M_A$  – variklio apkrovos momentas;  $C_M$  – variklio momento pastovioji.

### 2.2 Darbo eiga

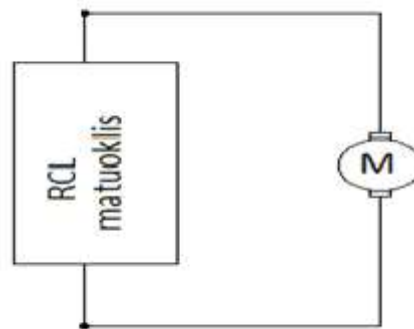
Eksperimentui atlikti panaudota: pavara su mažo galingumo varikliu (matuojami variklio parametrai), optinis jutiklis, įtampos šaltinis, multimetras, RCL matuoklis, diskas, pakaba bei svarstyklės.

Prie variklio veleno pritvirtinus plokštelę, ant kurios tvirtinama apkrova ir vėliavėlė. Svarstyklės bei pakaba (kuri naudojama kaip apkrova), panaudotos duomenims, kurie reikalingi momentui ( $M$ ) apskaičiuoti, gauti. Smulkesnis aprašymas pateiktas eksperimento eigos aprašyme.

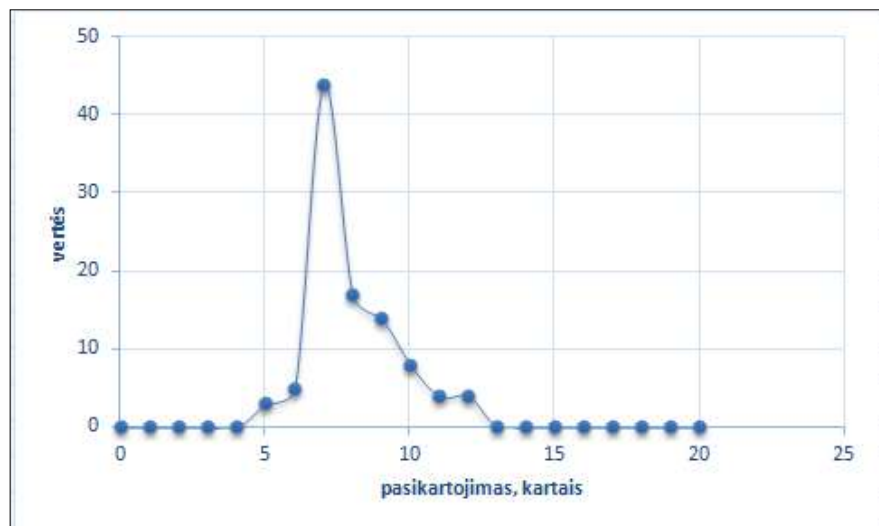
#### 2.2.1 $L$ ; $r_i$ matavimas

RCL matuoklio pagalba išmatuojami induktyvumas ir varža. Matavimams atlikti naudojamas RCL matuoklis. Pajungus matuoklį į grandinę (17 pav. ), variklio ašį sukant ranka, išmatuotos  $L$  ir  $r_i$  vertės (1

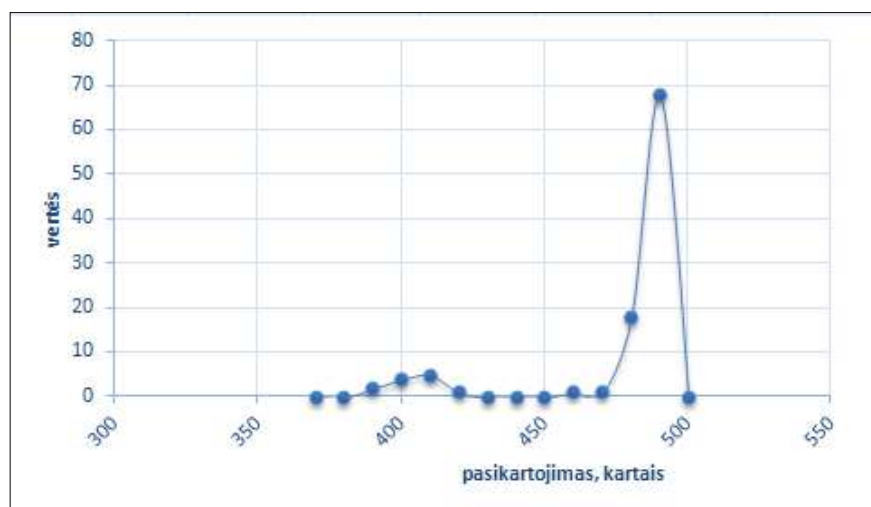
lentelė). Siekiant kuo tikslesnių rezultatų, užfiksuota 100 abiejų elementų verčių. Tolesniame darbe panaudotos dažniausiai pasikartojusios vertės ( 2.2 ir 2.3 pav.). Surinkti duomenys pateikti Priedo Nr 1, 1 lentelėje.



2.1 pav. RCL elementų matuoklio prijungimo schema.



2.2 pav. Varžos,  $r_i$  matavimo rezultatai



2.3 pav. Induktyvumas L, mH

Išmatavus 100 verčių 44%  $r_i$ :  $7,0 \Omega > r_i > 8,0 \Omega$ , o 68% L:  $490 \text{ mH} > L > 500 \text{ mH}$

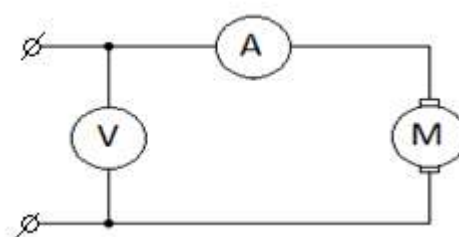
### 2.3.1 Tuščiosios eigos bandymai

Atliekat tuščiosios veikos bandymus, į grandinę pajungiami ampermetras (A) bei voltmetro (V) (schema pateikta 2.4 pav.). Matuoklių pagalba surinkti duomenys pateikti 2 lentelėje, priedas Nr 1. Norint padidinti eksperimento tikslumą, šie matavimai atliktas ne vienu prietaisu: vienas iš jėgtampos šaltinis, kitas- multimetras. Matuotų parametų (I ir U) priklausomybė pateikta 2.5 pav.

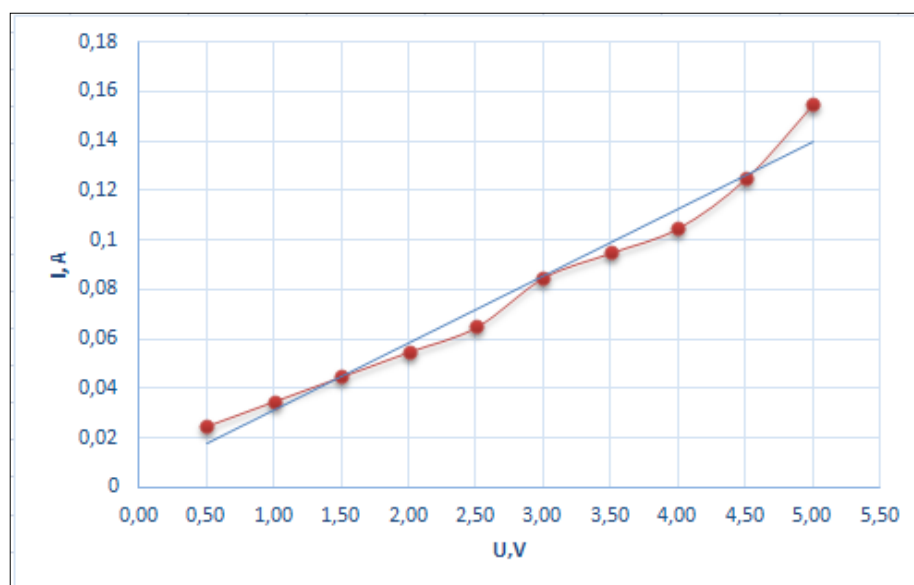
$$\begin{cases} 0 = U - \omega \cdot C_E - i \cdot r_i \\ 0 = M_V - M_A = C_M i - M_A \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\omega C_E = U - i \cdot r_i \quad (2.4)$$

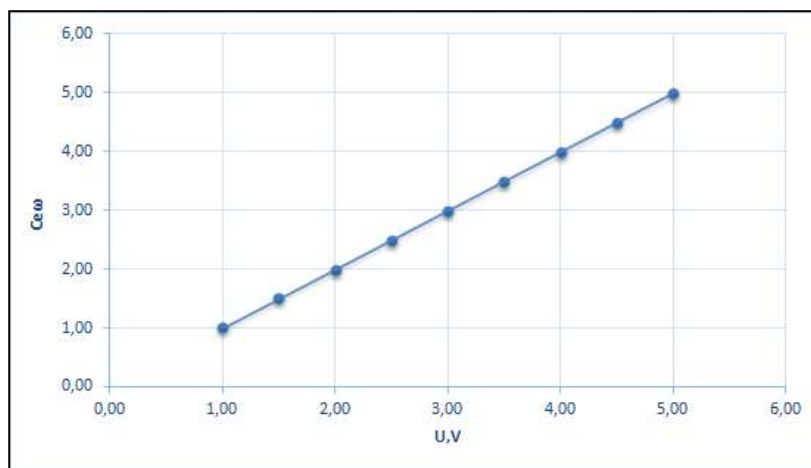
$$C_E = \frac{U - i \cdot r_i}{\omega} \quad (2.5)$$



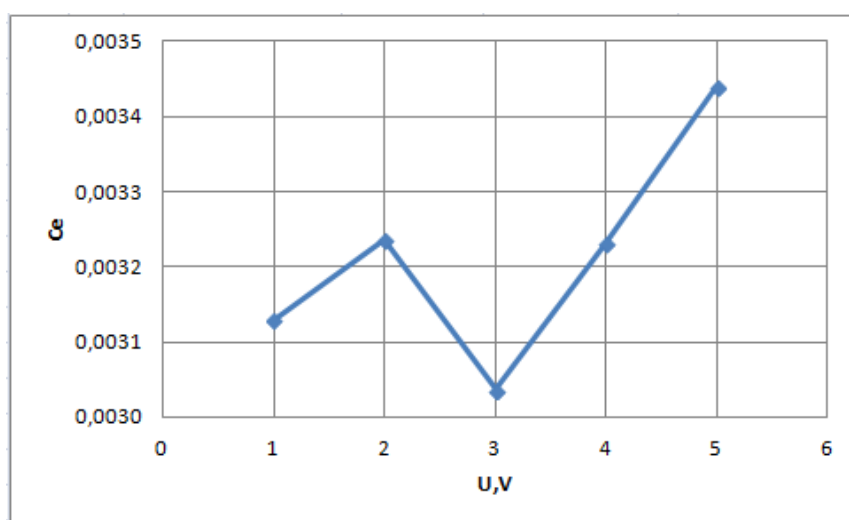
2.4 pav. Tuščiosios veikos bandymo, ampermetro ir voltmetro jungimo schema



2.5 pav . Srovės priklausomybė nuo įtampos U(I)



2.6 pav.  $C_e\omega$  priklausomybė nuo U.  $U(C_e\omega)$



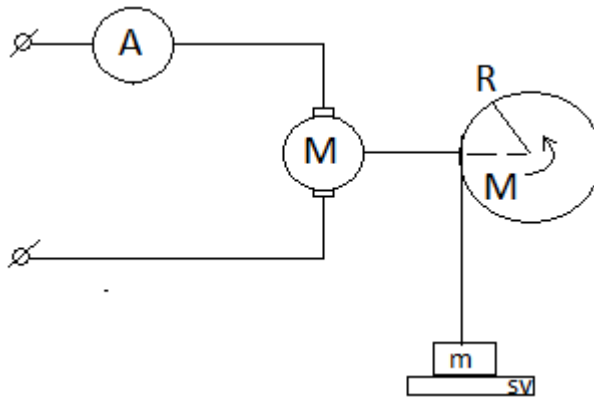
2.7 pav. Apskaičiuotos  $C_e$  reikšmės esant skirtingoms įtampoms

### 2.3.2 Variklio sukimo momento radimas

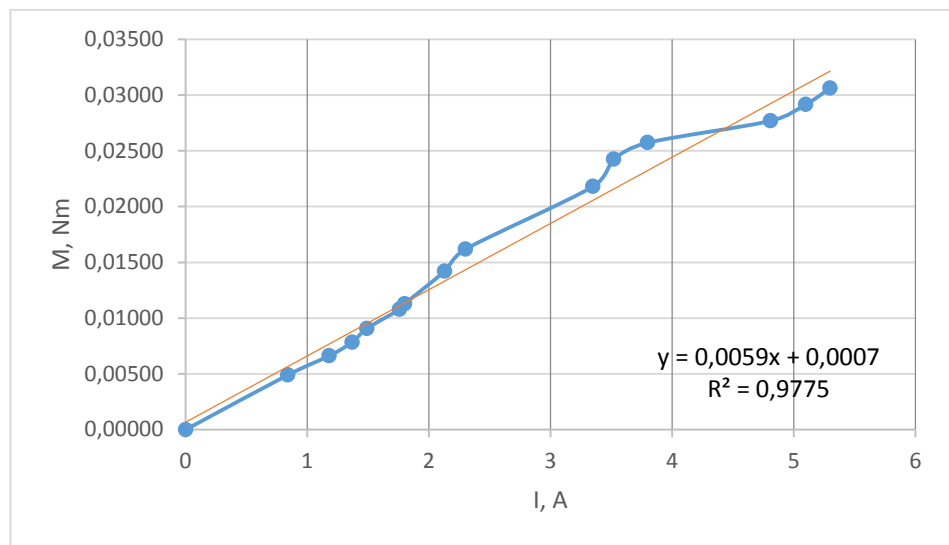
Ant variklio veleno pritvirtintas diskas ( $R = 0,025 \text{ m}$ ), prie kurio prikabinta apkrova (pakaba su svoriu) (schema pateikta 2.8 pav.). Pakabos svoris  $m_{pr} = 0,125 \text{ kg}$ . Eksperimento pradžioje, pakaba pilnai savo svoriu veikia svarstyklės, fiksuojami rodmenys. Didinant srovę (sukimo momentą), pakaba po truputį kyla, tai atvaizduoja kintantys svarstyklių rodmenys (pakabai kylant, pakabos svoris-mažėja). Apskaičiavus jėgas veikiančias pakabą, įvertinus petį R galime apskaičiuoti sukimo momentą. Srovės, svorio bei kitos, pagal 2.6 ir 2.7 formules apskaičiuotos vertės, pateiktos 3 lentelėje, priede Nr 1, o apskaičiuoto momento priklausomybė nuo srovės (t.y. apkrovos) pateikta 26 pav. Naudotos formulės:

$$M = F \cdot R \quad (2.6)$$

$$F = \Delta P \cdot R = \Delta m \cdot g \cdot R \quad (2.7)$$



2.8 pav. Sistemos, kuri skirta apskaičiuoti sukimo momentą  $M$ , schema.

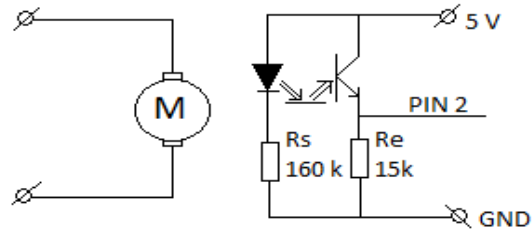


2.9 pav.  $M$  priklausomybė nuo  $I$ .

### 2.3.3 Sukimosi greičio matavimas $\omega$

Esamo variklio sukimosi greičiui matuoti buvo panaudotas optinis jutiklis (jungimo schema pateikta 2.10 pav.). Kad būtų įmanoma išmatuoti sukimosi greitį bei gauti pereinamojo proceso kreivę, prie variklio veleno pritvirtinamas diskas, o ant jo juoda juodas brūkšnys-apskritimo spindulys (t.y. vėliavėlė). Variklio sukimosi greičiui apskaičiuoti panaudotas valdiklis ARDUINO MEGA 2560 (programos kodas pateiktas priede Nr. 2).

Parašyta programa skaičiuoja laiką per kurį ant disko esanti vėliavėlė apsisuka 10 kartų. Atlikus skaičiavimus (pagal 2.8 formulę) rezultatai pateikti 4 lentelėje, priede Nr. 1. Siekiant, kad eksperimentas būtų kuo tikslesnis, vertės fiksuojamos esant skirtingoms įtampoms (1-5V) ir paimitos 15 verčių. Sukimo greičio priklausomybė nuo įtamos pateikta 2.11 pav. Atlikus paskaičiavimus pagal 2.9 formulę, 28 pav. atvaizduojamas pereinamasis procesas.

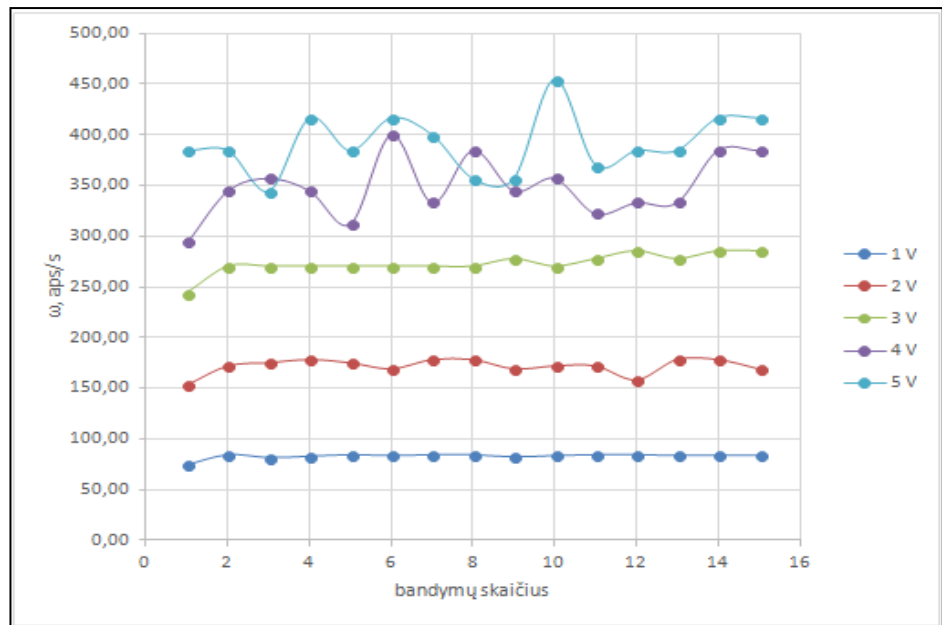


2.10 pav. Sistemos (DC variklis-optinis jutiklis ) jungimo schema.

Naudotos formulės:

$$\omega_{aps} = \frac{aps.sk}{t_{išmatuotos}}, aps/s \quad (2.8)$$

$$\omega = \omega_{aps} \cdot 2\pi, rad/s \quad (2.9)$$



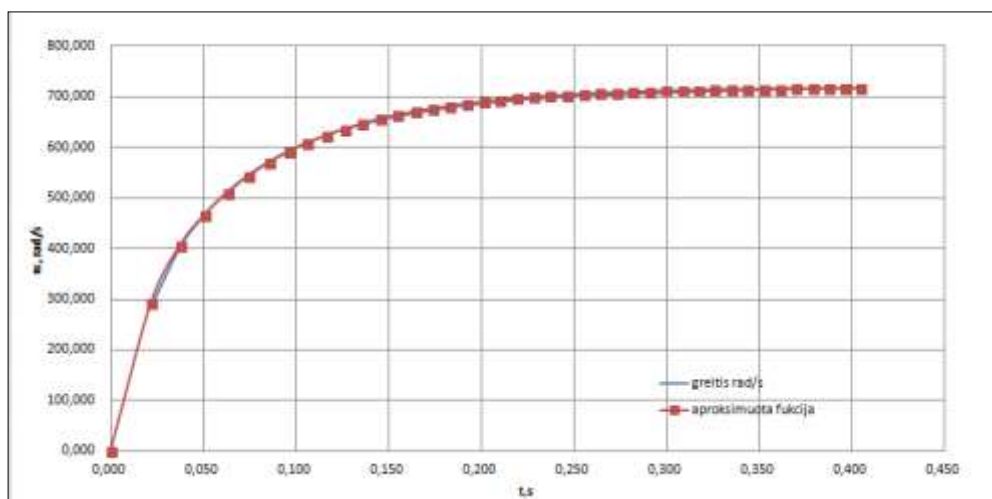
2.11 pav. Sukimosi greičio  $\omega$  (aps/s) priklausomybė nuo maitinimo įtamos

2.12 pav. atvaizduoto pereinamojo proceso duomenys bei pagal 2.10 formulę atliktų skaičiavimų rezultatai pateikti 5 lentelėje, priede Nr. 1.

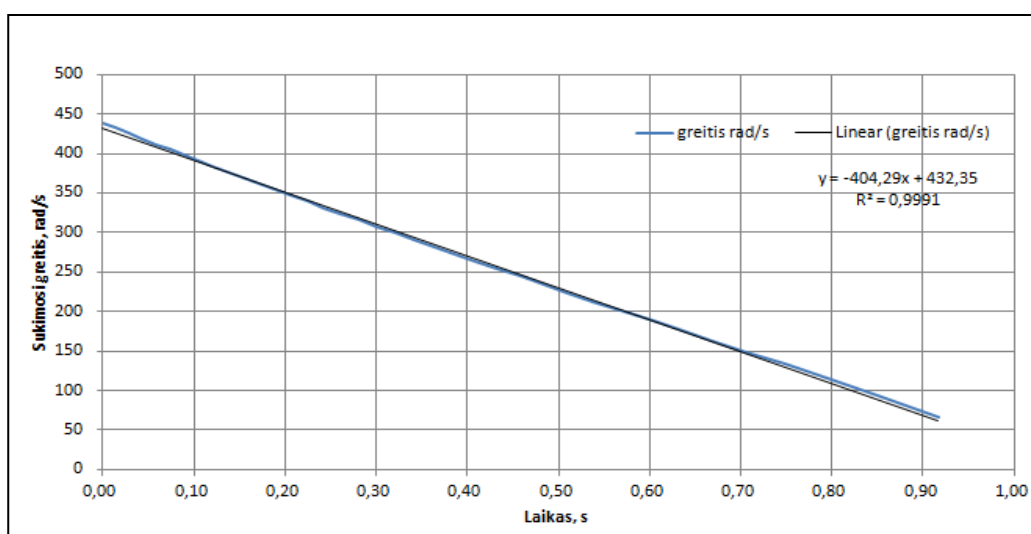
Pirmasis variklio pereinamojo proceso taškas, parinktas naudojant *solver add-in* aplikaciją, kuri skirta lygčių sprendimui bei optimizavimui (mažiausių kvadratų metodo panaudojimas). 2.12 pav. pavaizduota raudona pereinamojo proceso kreivė.

$$\omega = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \quad (2.10)$$





2.12 pav. Variklio paleidimo pereinamasis procesas,  $\omega$ , rad/s



2.13 pav. Pereinamasis variklio lėtėjimo procesas,  $\omega$ , rad/s

3 lentelė

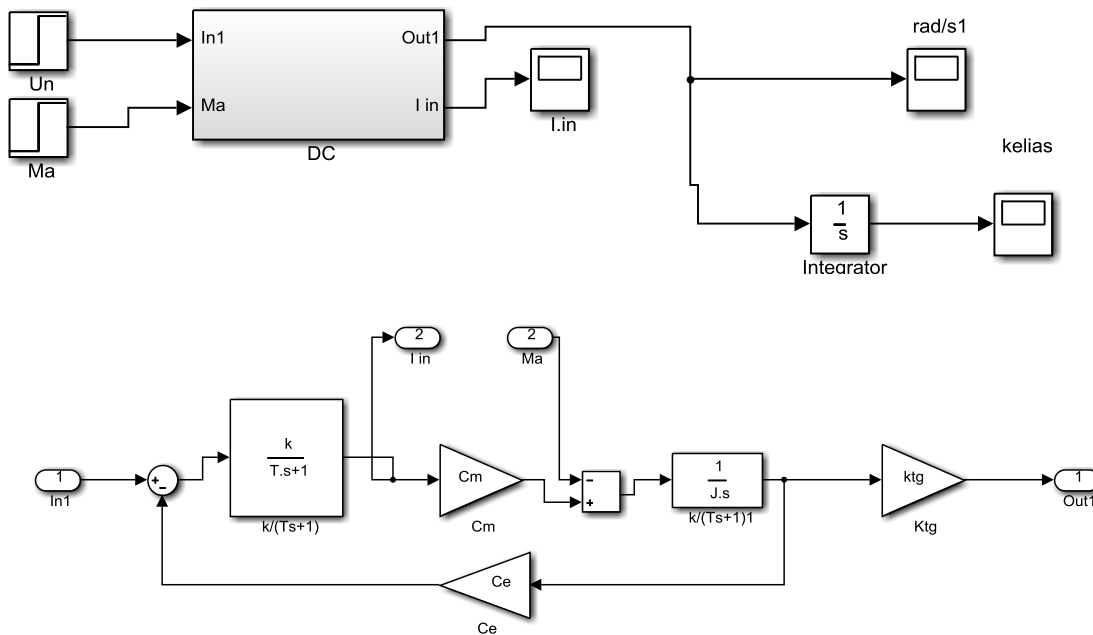
Išmatuotos ar apskaičiuotų koeficientų reikšmės

Parametras	Vertė	Pastabos
L	490 mH	Imant 100 išmatuotų reikšmių, dažniausiai pasitaikiusi reikšmė.
$r_i$	7,44 $\Omega$	Imant 100 išmatuotų reikšmių, dažniausiai pasitaikiusi reikšmė.
$C_E$	0,0031 Vs/rad	Apskaičiuotų reikšmių vidurkis.
$C_M$	0,0059 Nm/A	Atlikus skaičiavimus kiekvieno iš 15 matavimų, dažniausiai pasitaikiusi reikšmė
J	$1.1476 \cdot 10^{-7}$	Gauta atlikus skaičiavimus, duomenys paimti tarp dviejų gretimų taškų.

### 3. SISTEMOS MODELIAVIMAS

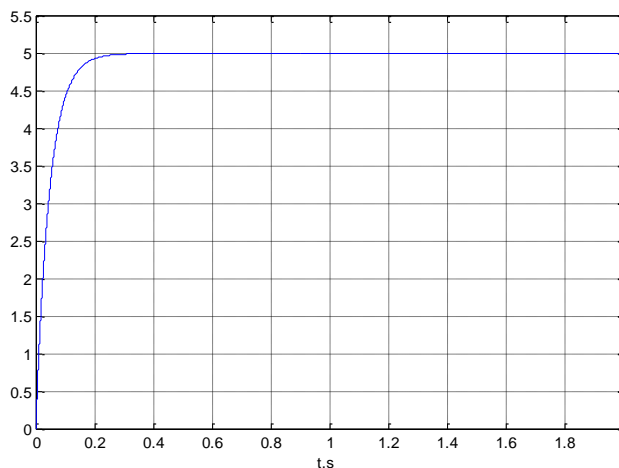
#### 3.1 Variklio modelio sudarymas

Sudarome tiriamojo nuolatinės srovės variklio (NSV) *Simulink* modelį ( 3.1 pav.). Modeliui sudaryti panaudojame prieštai atlikto eksperimento duomenis bei apskaičiuota aperiodinės grandies perdavimo koeficientą  $k$  ir laiko pastoviąją  $T$ :

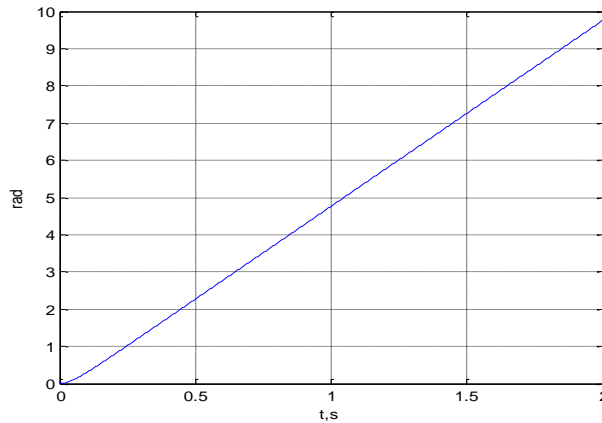


3.1 pav. NSV *Simulink* modelis.

Sudarytas NVS modelis, urio struktūra pavaizduota 3.1 pav. Jei užduodama šiuoliškai kintantį valdymo siganlą, gausime 3.2 pav.ir 3.3 pav. pavaizduotą .variklio srovės ir reakcijos kreivės:



3.2 pav. NSV greičio reakcijos kreivė, kai varikliui paduodamas įtampos šuolis.



3.3 pav. NSV pagreičio pasisukimo kreivė, kai varikliui paduodamas įtampos šuolis

### 3.3.1 Variklio greičio reakcijos kreivės aproksimavimas

Norint teisingai parinkti reguliatorių ir jo parametrus, reikia aproksimuoti variklio greičio reakcijos kreivę, užrašyti variklio perdavimo funkciją. Tam atlikti reikia : nustatyti perdavimo koeficientą ( $k_a$ ), vėlinimą ( $\tau_a$ ) ir laiko pastoviąsias. ( $T_a$ ).

$$W(s) = \frac{k_a e^{-\tau_a s}}{T_a s + 1} \quad (2.11)$$

Reikiamų dydžių apskaičiavimas:

$$b = \frac{\omega_i}{\omega_{nust}} \quad (2.12)$$

Čia  $\omega_i$  – NSV greitis reakcijos kreivės lūžio taške;  $\omega_{nust}$  – nusistovėjęs NSV greitis

$$T_a = (1 - b)T_0 \quad (2.13)$$

$T_0$  – laiko pastovioji, gauta iš reakcijos kreivės, nubrėžus liestinę lūžio taške.

Vėlinimas  $\tau_a$

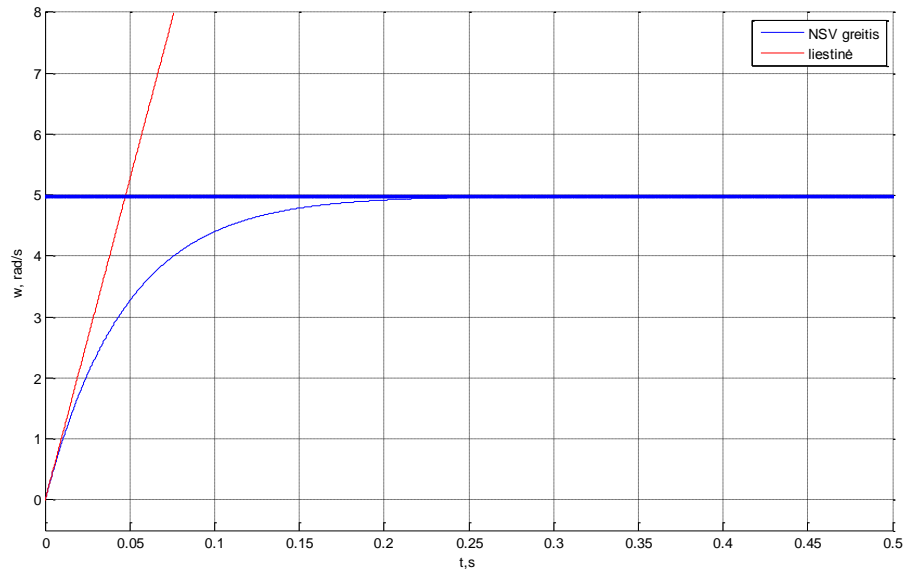
$$\tau_a = t_i - (1 - b)T_0 \cdot \ln \frac{1}{1 - b} \quad (2.14)$$

Čia  $t_i$  – NSV reakcijos kreivės lūžio taško laikas.

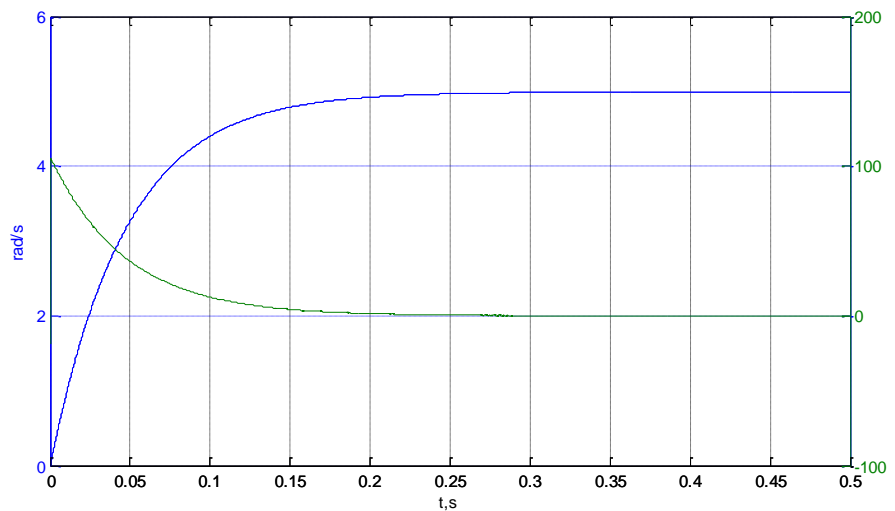
Perdavimo koeficientas  $k_a$ , kai NSV paduodamas 10 % įtampos šuolis ( $\Delta u = 0,5 \text{ V}$ )

$$k_a = \frac{\omega_{nust}}{\Delta u} \quad (2.15)$$

Šiems dydžiams apskaičiuoti reikia rasti NSV reakcijos kreivės išvestinės pagal laiką ir pagal maksimalią išvestinės vertę nustatyti lūžio tašką (3.5 pav.).



3.4 pav. Liestinė NSV greičio reakcijos kreivei



3.5 pav. NVS variklio reakcijos kreivė bei jos išvestinė

4 lentelė

Apskaičiuoti bei iš grafiko nustatyti parametrai (pagal 2.11-15 lygtis)

Parametras	Žymėjimas	Vertė
Lūžio taško numeris	$i$	13
Variklio apsisukimai lūžio taške	$\omega_i$	0,0158
Laikas lūžio taške	$t_i$	5,247e-004
Nusistovėjusi variklio greičio reikšmė	$\omega_{nust}$	4,991
Vėlinimas	$\tau_0$	7,6553e-005
Laiko pastovioji	$T_0$	0,1415
	$b$	0,0032
Laiko pastovioji	$T_a$	0,1410
Vėlinimas	$\tau_a$	4,4582e-004
Perdavimo koeficientas	$k_a$	0,9982

### 3.2 PID reguliatorių parinkimas

PID tipo regulatoriaus perdavimo funkcija yra:

$$W(s) = k_r \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = k_r + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (2.16)$$

Čia  $k_r$  – proporcinis perdavimo koeficientas;  $T_i$  – integravimo laiko pastovioji;  $k_i$  – integravimo koeficientas;  $T_d$  – diferencijavimo laiko pastovioji;  $k_d$  – diferencijavimo koeficientas

PID regulatoriaus parametrai apskaičiuojami:

$$K_r = \frac{T_a}{K_a \tau_a} \left( 1,33 + \frac{\tau_a}{4T_a} \right) \quad (2.16)$$

$$K_r = \frac{T_a}{K_a \tau_a} \left( 1,33 + \frac{\tau_a}{4T_a} \right) \quad (2.17)$$

$$K_r = \frac{T_a}{K_a \tau_a} \left( 1,33 + \frac{\tau_a}{4T_a} \right) \quad (2.18)$$

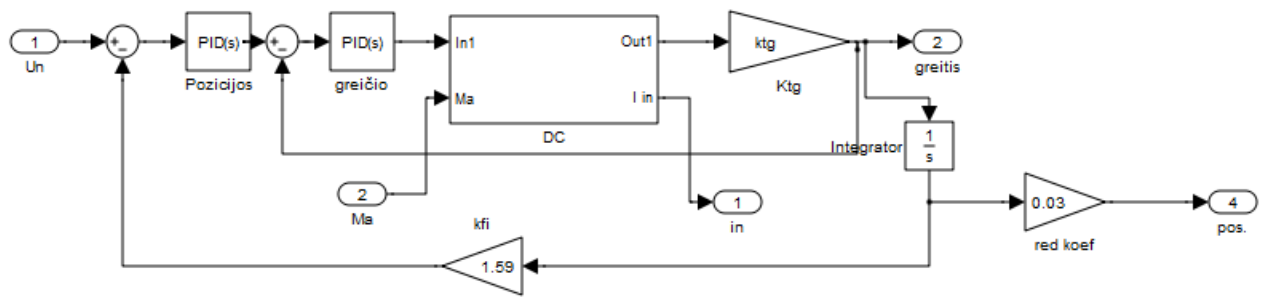
$$k_i = \frac{k_r}{T_i} \quad (2.19)$$

$$k_d = k_r T_d \quad (2.20)$$

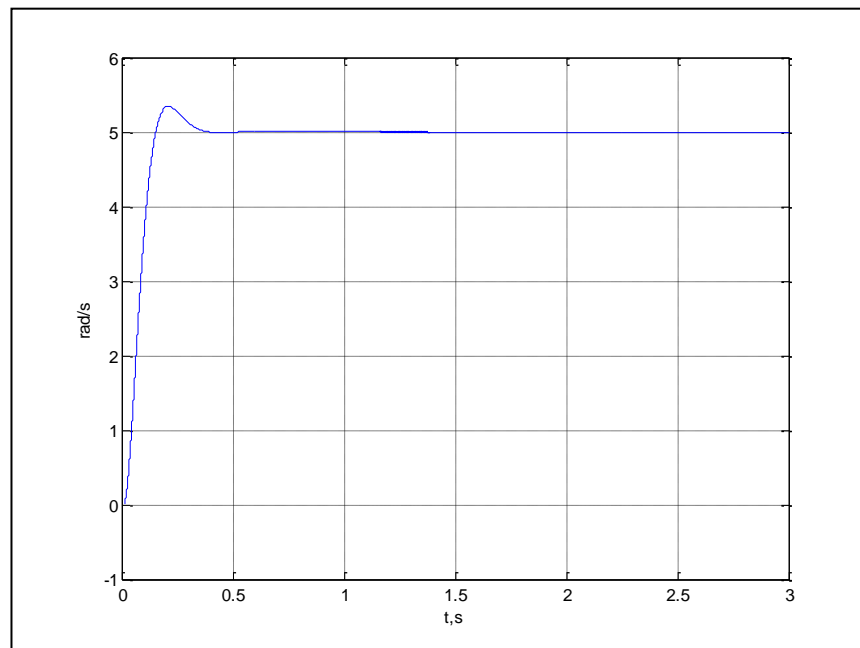
5 lentelė

Apskaičiuotų parametų reikšmės.

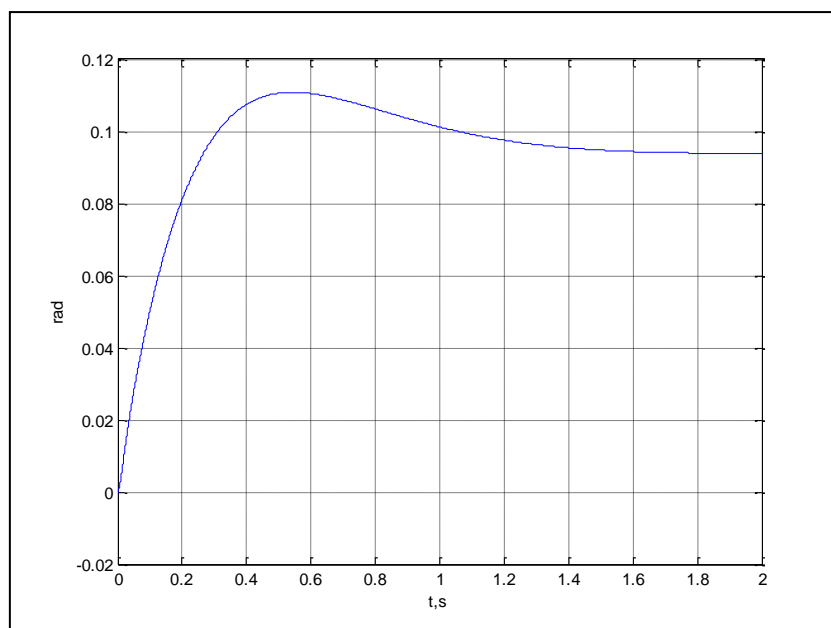
Greičio regulatoriaus parametrai, kai J tris kartus didesnis		
proporcinis perdavimo koeficientas	$k_r$	25,4697
integravimo koeficientas	$k_i$	1.4332e003
diferencijavimo koeficientas	$k_d$	0,0684
Greičio regulatoriaus parametrai		
proporcinis perdavimo koeficientas	$k_r$	23,758
integravimo koeficientas	$k_i$	3,7422e003
diferencijavimo koeficientas	$k_d$	0,0228
Kampo apskaičiuoti parametrai parametrai, kai J tris kartus didesnis		
proporcinis perdavimo koeficientas	$k_r$	2,88
integravimo koeficientas	$k_i$	11,2036
diferencijavimo koeficientas	$k_d$	0,1304
Kampo apskaičiuoti parametrai parametrai, kai J tris kartus didesnis		
proporcinis perdavimo koeficientas	$k_r$	2,852
integravimo koeficientas	$k_i$	10,8158
diferencijavimo koeficientas	$k_d$	0,1305



3.6 pav. Pavaros su reguliavimu sudarytas modelis

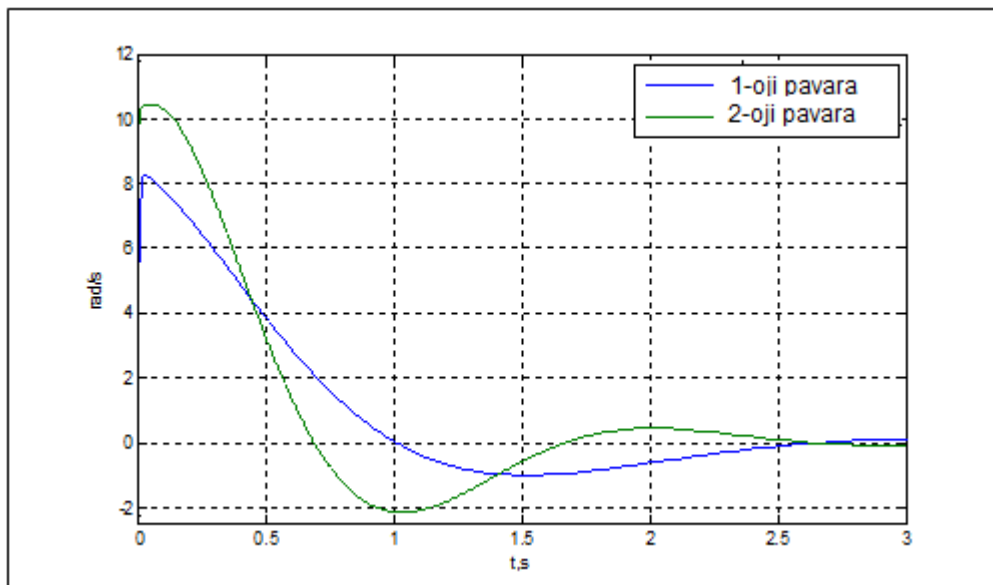


3.7 pav. NVS sukimosi greičio kontūras su PID reguliatoriumi (atsakas į šuolinį signalą)

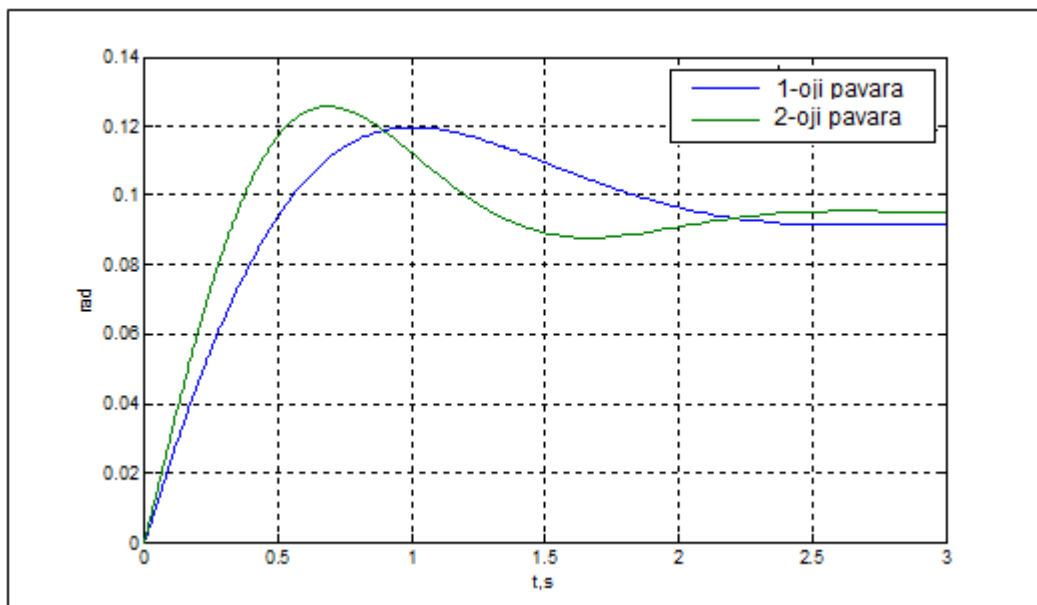


3.8 pav. Pavaros pasisukimo kontūro su PID reguliatoriumi (atsakas į šuolinį signalą).

Abiejų servo pavarų (sudarytos sistemos) atsakas į šulinį valdymo signalą 3.9 pav. – greičio reakcijos kreivės, 3.10 pav.- pasisukimo reakcijos kreivės



3.9 pav. PID reguliatoriais reguliuojamų pavarų greičio reakcijos kreivės, kai sudaryta dviejų kontūrų sistema bei užduodamas šulinis signalas-5V.

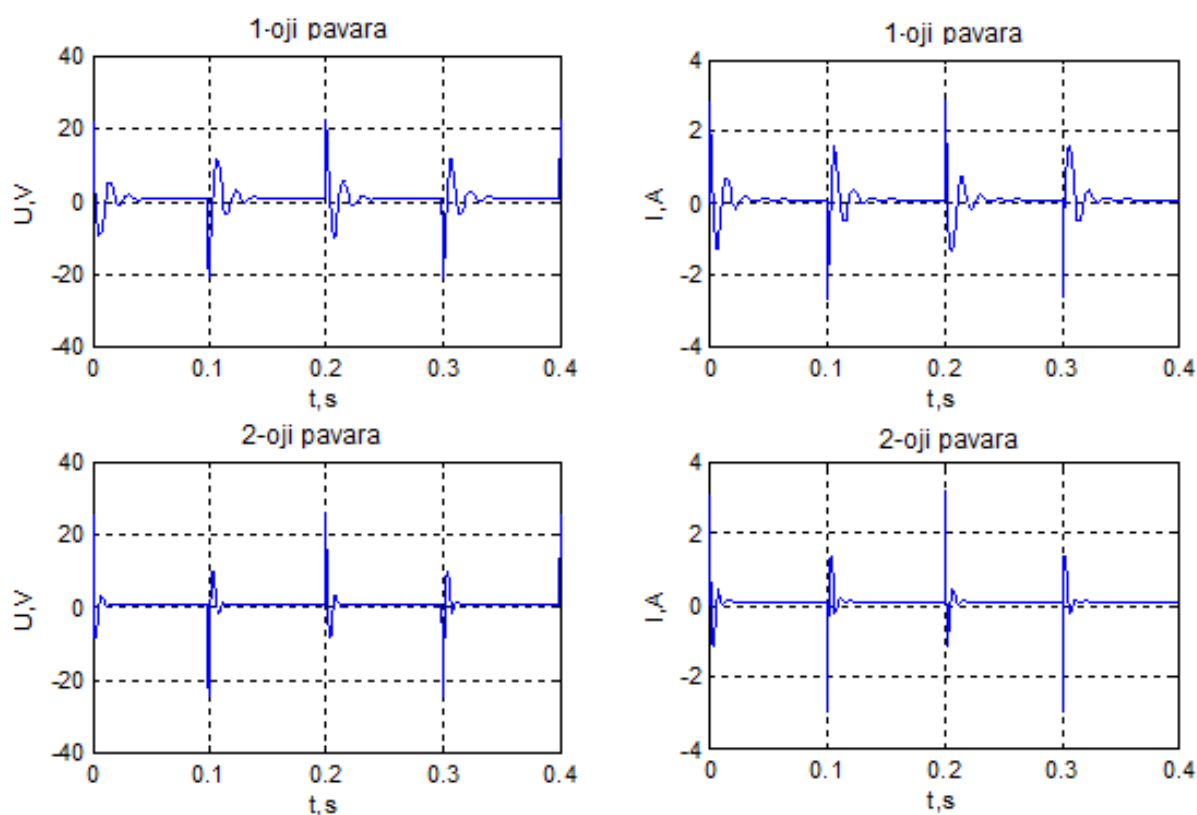


3.10 pav. PID reguliatoriais reguliuojamų pavarų pasisukimo reakcijos kreivės, kai sudaryta dviejų kontūrų sistema bei užduodamas šulinis signalas-5V

### 3.3 Dviejų autonominių pavarų veikimas

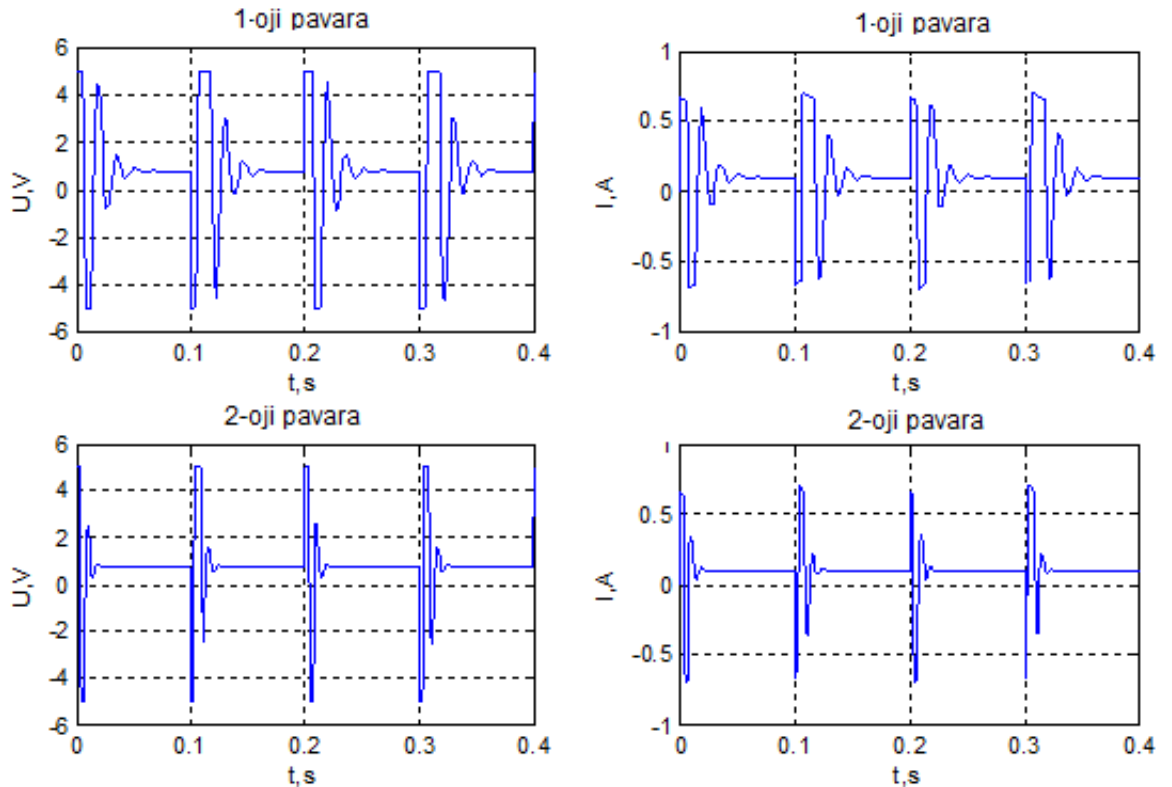
Sudarytos sistemos variklių inkaro srovės bei variklių įtamos, kai užduodamas impulsinis valdymo signalas.

Sudarius abiejų servo pavarų modelius, eksperimentas tęsiamas, atliekamos simuliacijos.. Iš 3.11 pav. pateiktų grafikų matome, jog sudarytas modelis nėra visiškai tikslus, neatitinka relių sąlygų (t.y. užduodamos įtamos bei variklio inkaro srovės vertės gerokai didesnės). Kad modelis atitiktų realias sąlygas, panaudotas apribojimas ( MATLAB simulink modeliavimo aplinkoje, „saturation“ blokas), kuris atitinka nominalią NVS įtampą, +/- 5 V). Gauti rezultatai pateikti 3.12 pav.



3.11 pav. Abiejų pavarų a) įtamos, ateinančios į variklius, b) variklio inkaro srovės, kai sudarytame modelyje apribojimas nenaudojamas



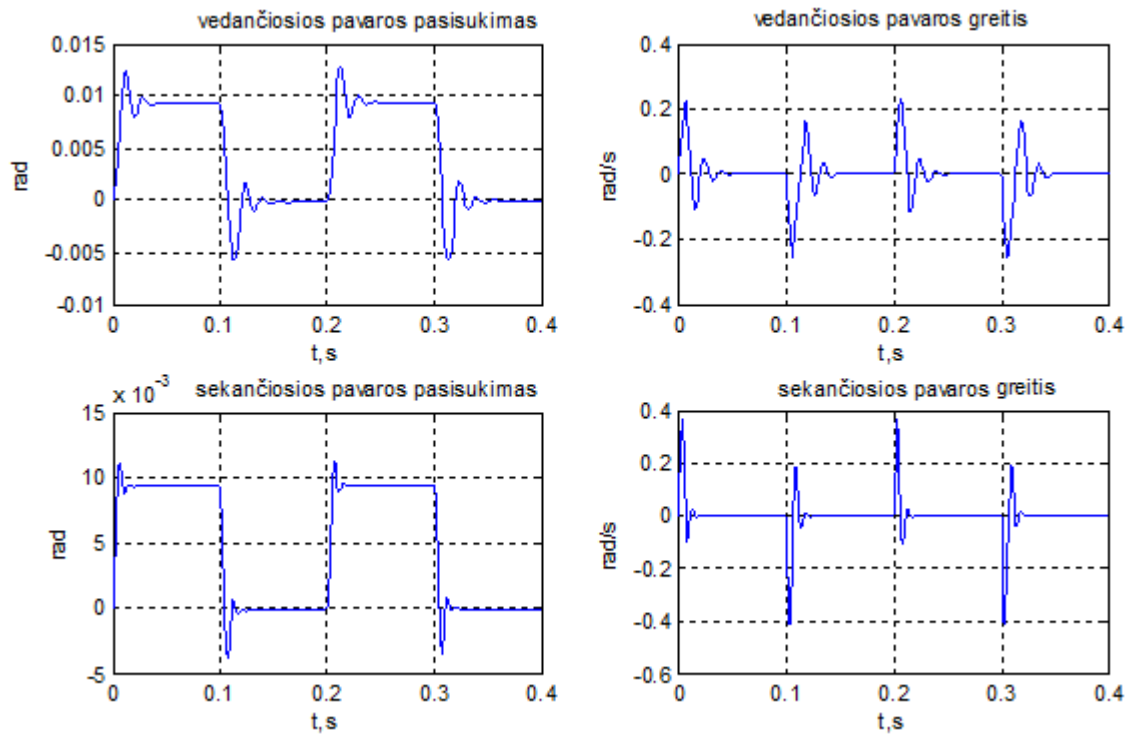


3.12 pav. Abiejų pavarų a) įtampos, ateinančios į variklius, b) variklio inkaro srovės, kai sudarytame modelyje panaudotas „apribojimas“

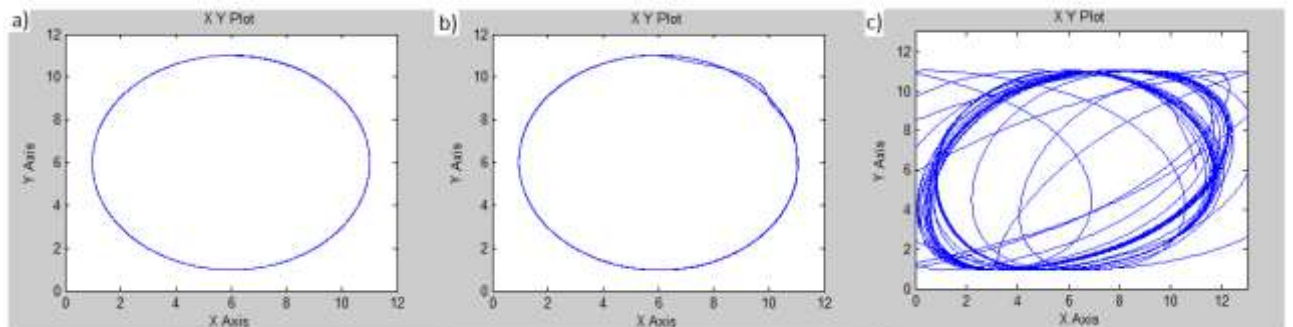
3.13 pav. pateikti grafikai atspindi sumodeliuotos sistemos variklių greičius bei pavarų pasisukimo kampus, kai užduodamas impulsinis signalas. Iš grafikų matyti jog, pavarų greičiai yra nevienodi. Pavara, kuri apkrauta labiau („1-oji pavara“), lėtesnė. Tai labai svarbu, norint susieti šių pavarų veikimą (pavaras susieti).

### 3.3.1 Apskritimo braižymo eksperimentas.

Vienai iš pavarų uždavus sinusinį signalą, o kitai kosinusinį, tokių atvejų sistema juda apskritimu. Keičiant signalų dažnį, sistemos judėjimo trajektorija kinta (3.13 pav.- atlikto eksperimento rezultatai). Keičiant užduodamo signalo dažnį, sistemos paklaidos didėja, o trajektorija nukrypsta nuo užduotosios. Kai užduodamas 1Hz dažnis, judėjimo trajektorija- apskritimas. Didinant dažnį iki 5 Hz, pastebimi trajektorijos nukrypimai, pereinamieji procesai. Dažnį padidinus iki 10 Hz, išryškėja pavarų skirtumai, judėjimo trajektorija tampa panaši į elipsę. Dėl pereinamųjų procesų bei sistemos inertiškumo trajektorija nenusistovi.



3.13 pav. Sumodeliuoto sistemos t.y. abiejų pavarų pasisukimo kampas bei variklių sukimosi greičiai

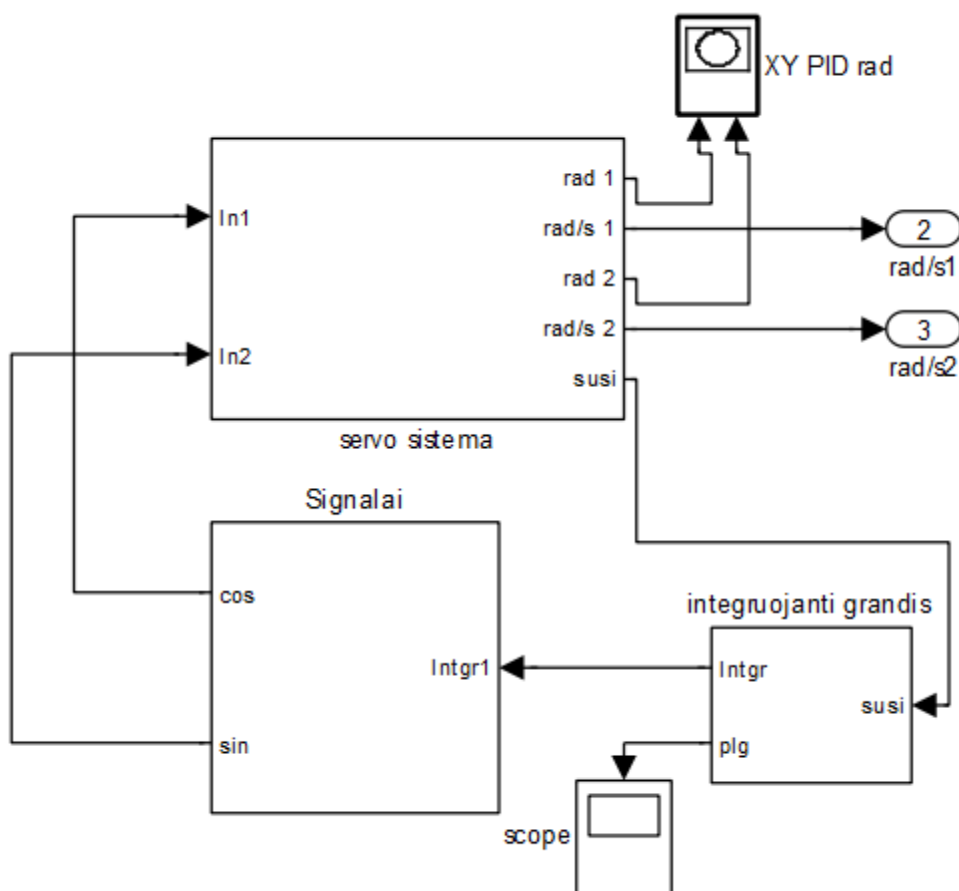


3.14 pav. Brėžiamos trajektorijos, esant skirtingiems dažniams: a) kai signalų dažnis 1 Hz kai , b)kai signalų dažnis 5 Hz; c) kai signalų dažnis 10 Hz

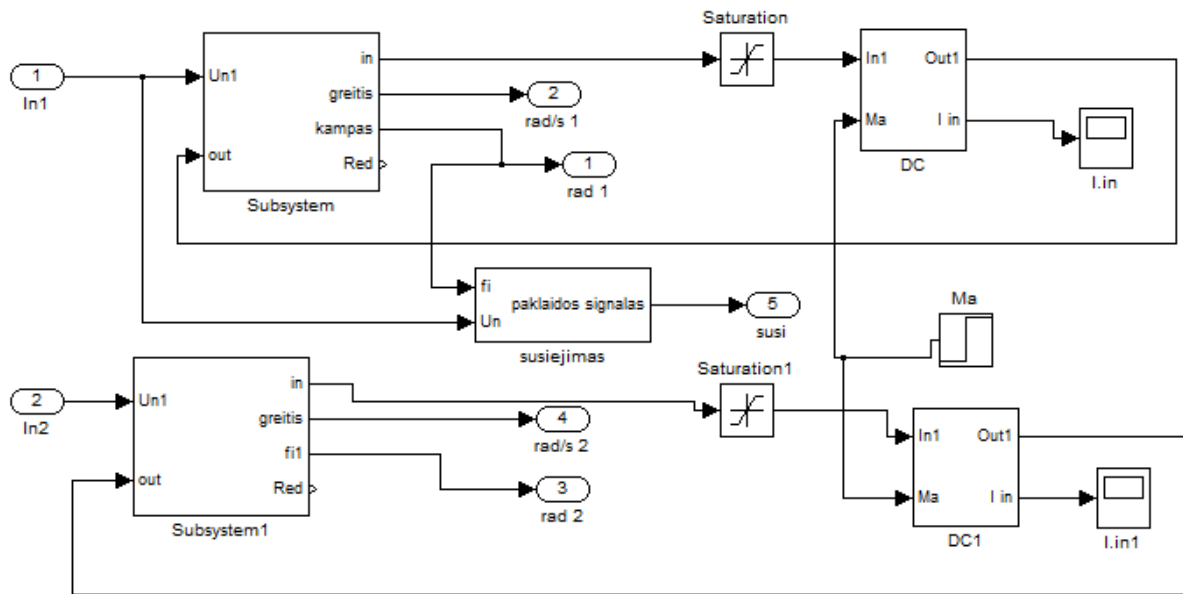
#### 4. PAVARŲ SUSIEJIMAS

Šiuolaikiniams gamybos procesams vykdyti dažniausi reikalingi kelių veikimo ašių mechanizmai, kurių judesys priklausomas vienos nuo kitos, todėl reikalinga sinchronizacija. Tai įmanoma padaryti pasinaudojant vienu iš kelių metodų. Šiuo atveju „Vedančiosios-sekančiosios“ pavarų metodas, kai vienas iš sistemos elementų judės, atsižvelgdamas į kito elemento judėjimą, poziciją. Sinchronizavimas taip pat įmanomas, jeigu elementų pozicijos sekimas klaidingas, bet yra žinomi ir sulyginami klaidų signalai. Toks „suderintų/sulygintų klaidų“ sinchronizavimo algoritmas naudojamas įrankių valdymui, kuomet pozicijos ciklas standartizuotas (santykinės paklaidos). (Visos sistemos ir sistemos posistemių struktūra pateikta 4.1-4.4 pav.)

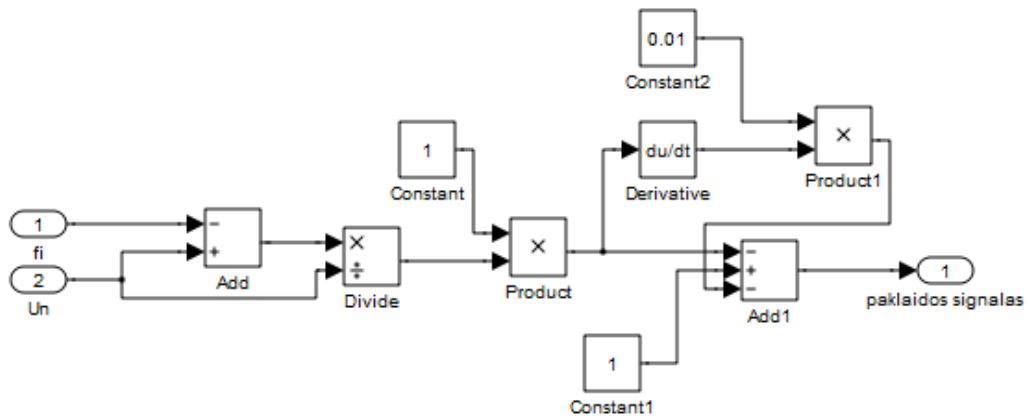
Sistemos dalis (posistemė), kuri yra senkantysis elementas (šiuo atveju sekančioji pvara), seka vedančiosios dalies padėtį. Sekančioji dalis paprastai yra našesnė, šiuo atveju greitesnė, taigi visa sistema priklauso nuo sekančiosios pavaros pagreičio, greičio, pozicijos. Norint, kad paklaida būtų kaip įmanoma mažesnė (artimesnė nuliui), mechanizmai sinchronizuojami pagal greitį bei pagreitį, atsižvelgiant į padėties komandą (4.1 pav.). Jei naudojami skaitmeniniai servo mechanizmai, realiai sekama tik pozicija. [14]



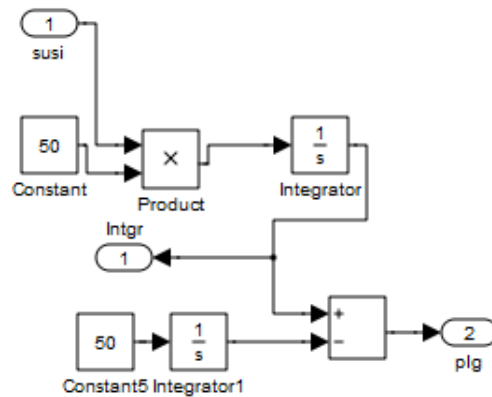
4.1 pav. Susietų pavarų sistemos struktūrinė schema



4.2 pav. Servo pavarų susiejimas (sistemos posistemė)

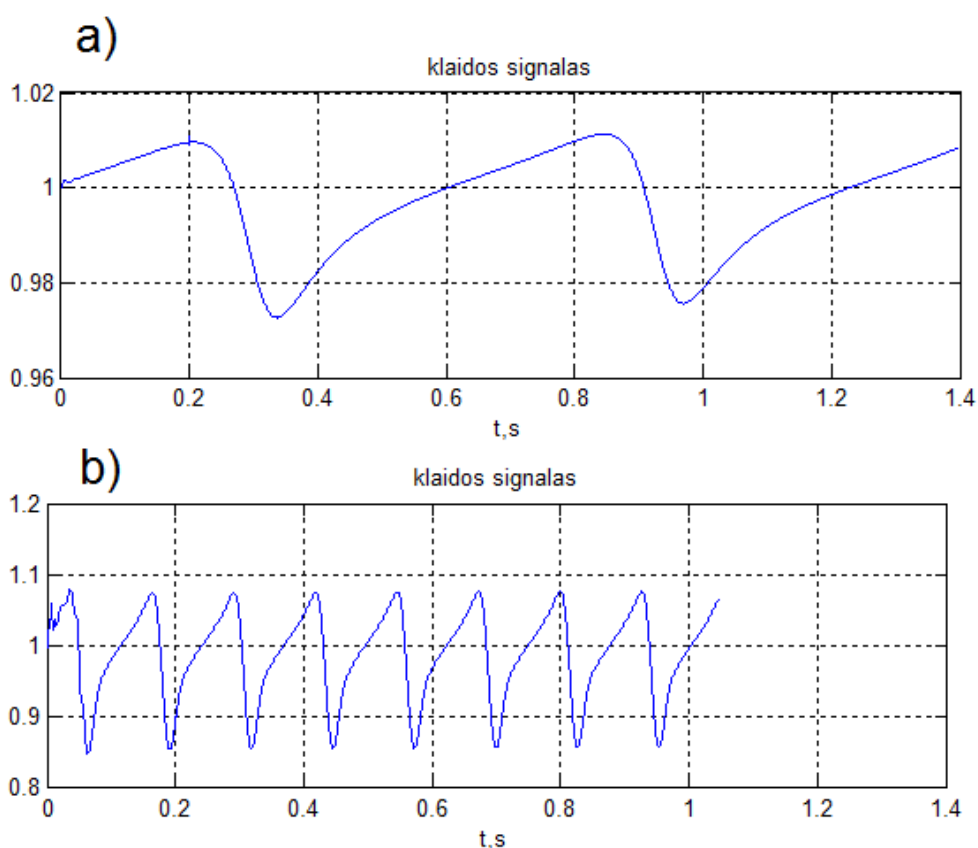


4.3 pav. Susiejimo posistemės struktūra

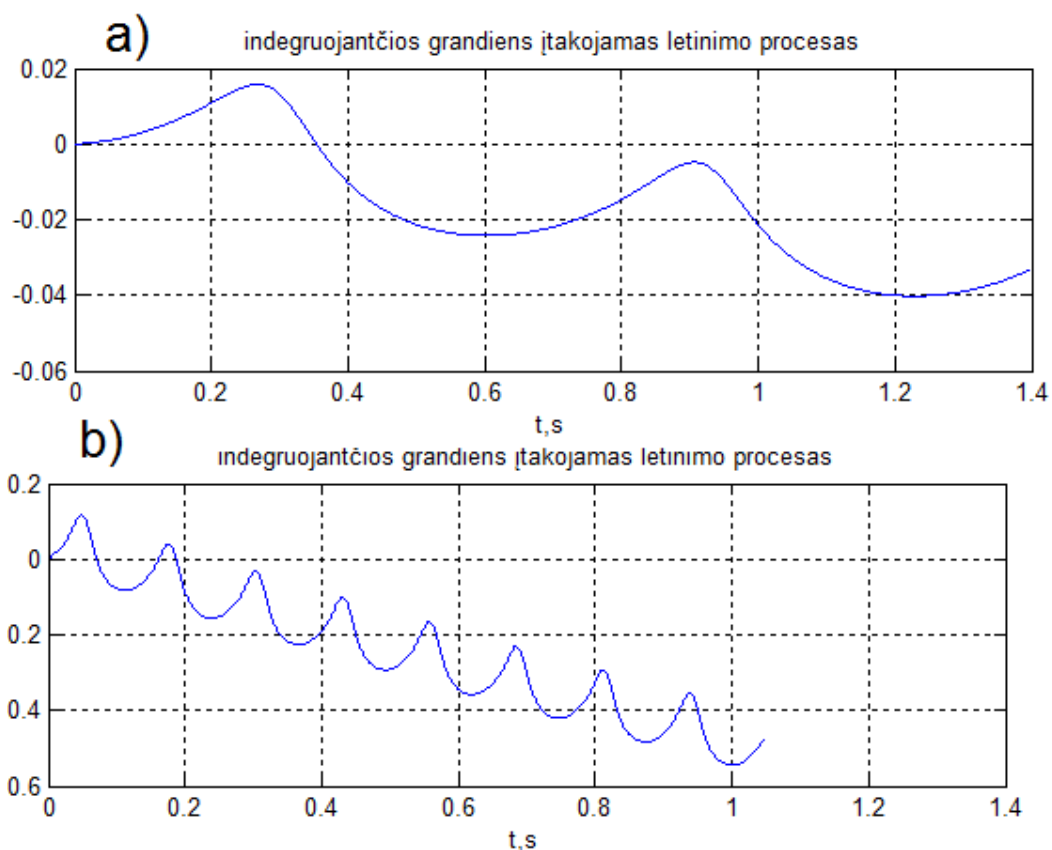


4.4 pav. Integruojančios grandies struktūrinė schema

Kadangi sistemos pavaros skirtingos, viena už kitą greitesnė, tai sinchronizuojant judesį, reguliuojame greičius. Vienas iš būdų tai padaryti- įvertinti išėjimo signalo nuokrypi, santykinę paklaidą (4.3 pav. ). Paklaidos signalas (iš posistemės „susiejimas“ ) perduodamas į integruojančią grandį. Jei paklaida lygi 0, tokiu atveju klaidos signalas yra lygus 1 (4.4; 4.5 pav. a), sistema veikia, kaip veikusi. Generuojamas klaidos signalas svyruoja nežymiai, kai užduodami mažo dažnio signalai (4.5 pav. b). Padidinus užduodamų signalų dažnį, dėl pavarų greičių skirtumų atsiranda paklaida, kuri formuoja kintantį paklaidos signalą. Tokiu atveju suveikia integruojanti grandis (posistemė „integruojanti grandis“), t.y. posistemė ilgina laiko tarpą, per kurį signalai pasiekia sistemą, taip mažindama užduodamo signalo dažnį, taip sulėtindamas pavaras, kad šios judėtų užduota trajektorija (lėtinimo procesas pateiktas 4.6 pav.).

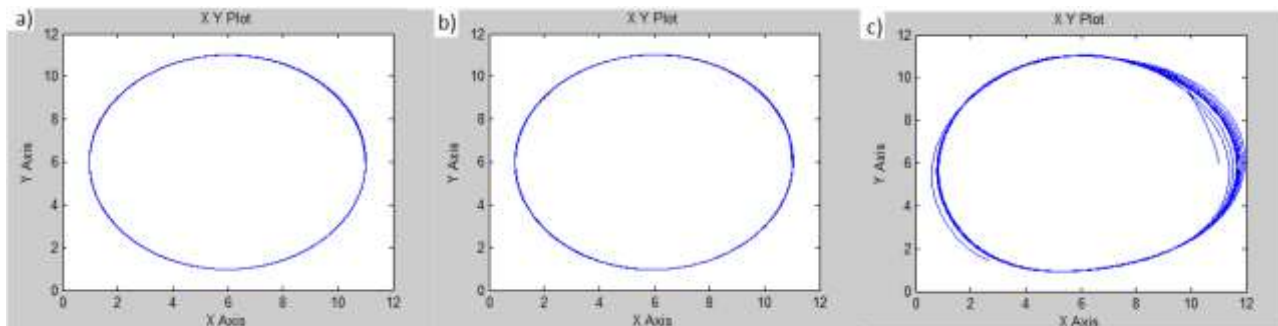


4.5 pav. Generuojamas klaidos signalas a) kai sistemos dažnis mažas b) kai sistemos dažnis didesnis



4.6 pav. Integruojantčios grandies įtakojamas lėtėjimo procesas

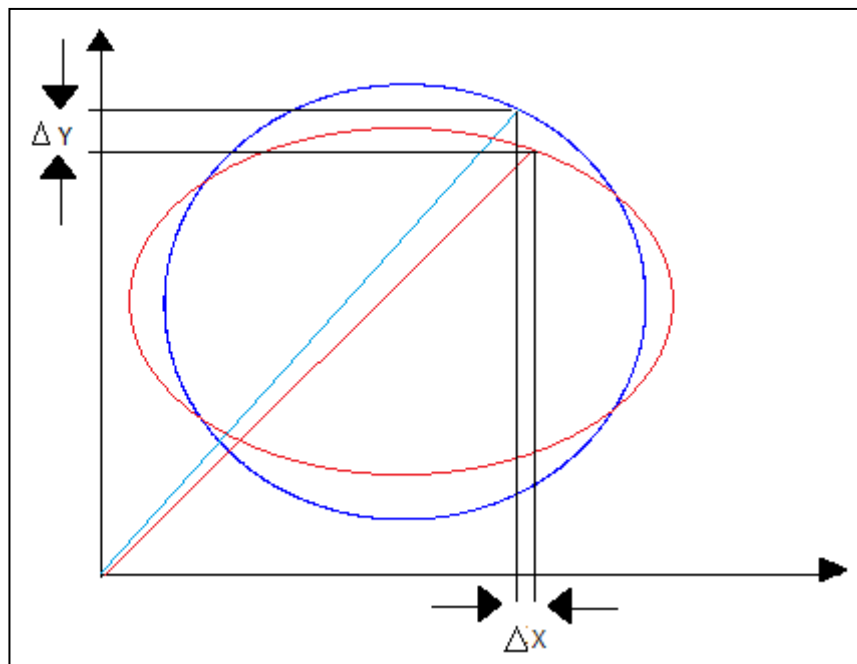
Pakartotas apskritimo braižymo eksperimentas, kai pavaros susietos.



4.7 pav. Brėžiamos trajektorijos, esant skirtingiems dažniams kai sistemos pavaros susietos: a) kai signalų dažnis 1 Hz; b) kai signalų dažnis 5 Hz c) kai signalų dažnis 10 Hz

#### 4.1 Paklaida

Nuokrypis nuo trajektorijos, t.y. trajektorijos netikslumai, skirtumas nuo užduotosios ir gautos gali būti apskaičiuojamas kaip atstumas tarp dviejų taškų ( pagal 2.21 formulę).



4.8 pav. Trajektorijos nuokrypis, paklaidos skaičiavimas

$$A = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad (2.21)$$

## 5. IŠVADOS:

1. Mechatroninė sistema, tai sudėtingas technologinis darinys, kuris susideda iš įvairių tipų servo variklių, keitiklių ar lygintuvų, technologinių parametrų bei judesio ar koordinacių jutiklių, enkoderio, valdymo bei ryšių terminalų. Naudojamų servo mechanizmo, variklių modifikacijų, galimų modulių kombinacijų yra pačių įvairiausių. Šiuolaikinės sistemos valdomos skaitmeninių signalų pagalba. Valdymas priklauso pagal servo variklio sukimo momentą ar pasisukimo kampą ir pan. Valdikliai bei reguliatoriai skirti signalams suvaldyti bei modernizuoti pačius procesus. Servo sistemos valdymo algoritmas ar metodas parenkamas atsižvelgiant į norimus pasiekti rezultatus. Servo sistemų sinchronizavimui i svarbu tikslumas, tai galima pasiekti tik suderinus atskirų dalių (pavarų) greitį bei pasisukimą. Atlikta literatūros analizė.
2. Plataus vartojimo mažos galios variklių techninėje dokumentacijoje dalies išvardintų parametrų nėra. Jie buvo nustatyti eksperimento būdu. Visi eksperimento metu surasti ir apskaičiuoti variklio parametrai pateikti 3 lentelėje. Šie parametrai buvo panaudoti nuolatinės srovės variklio modelyje. Kai kurie parametrai nėra pastovūs. Variklio temperatūra, kai apkrova yra didelė, gali pakilti, dėl to pasikeičia inkaro grandinės  $r$  varžos dydis. Jei sistema (pvz., roboto ranka) kilnoja įvairios masės krovinius, tai inercijos momentas, privestas prie variklio veleno, pasikeičia. Todėl sprendžiant valdymo klausimus, reikia visuomet patikrinti, kokiame diapazone galios optimalus variklio reguliatorių suderinimas.
3. Sudarius dviejų autonomiškai veikiančių pavarų modelį, kurios turi valdymo sistemoje reguliatorius pagal greitį ir padėtį. Pirmoji pavara, kuri būna daugiausiai apkrauta (roboto atveju pirmoji pavara judina mechaninę jungtį, ant kurios yra antroji pavara su savo jungtimis), juda pagal padėties užduoties signalą. Antroji pavara taip pat gauna padėties užduoties signalą, tačiau jis yra palyginamas su esama tuo metu pirmosios pavaros padėtimi ir perskaičiuojamas taip, kad antrosios pavaros judesys būtų susietas su pirmosios pavaros judesiu. Tas yra aktualu net tada, kai apkrova yra nežymi, tačiau vyksta išibėgėjimo ar stabdymo procesas, ir tuo metu srovės kontūras tampa netiesiniu – veikia maksimalios srovės apribojimas.
4. Sudarius pavarų modelius, nagrinėjamas jų veikimas viena kitos atžvingu. Skiriasi pavaras veikiančios apkrovos, todėl atsiranda pavarų greičio skirtumai. Norint pavaras susieti, būtina reguliuoti pavarų greičius viena kitos atžvilgiu. Generuojamas antikinės paklaidos signalas, paveiktas integruojančios grandies, atitinkamai ilgina užduodamo signalo laiką, mažina dažnį. Tokiu principu veikia šiuolaikinės skaitmeninio valdymo pavaros. Keičiant susiejimo



posistemės koeficientą, sistemos judėjimo trajektorijos paklaida keičiasi. Kadangi didinant dažnį, matyti integruojančios grandies įtaka (4.5, 4.6, 4.7 pav.), bei atvaizduojama apskritimo trajektorija nėra tiksli, tačiau sąlyginai artima užduotajai. Atlikus susiejimą, greičių pritaikymą viena kitos atžvilgiu trajektorija tampa tikslesnė. Kai dažnis didesnis, trajektorijos netikslumai, t.y. paklaida tarp užduotos trajektorijos, yra didesni lyginant trajektorijos braižymą, kai užduodamas mažesnio dažnio signalas.

## 5. LITERATŪROS SĄRAŠAS :

1. Prieiga per internetą: <http://servo.lt/produktai/elektros-varikliai/servo-varikliai> žiūrėta [2016-03-01]
2. Prieiga per internetą: <http://ksuarduino.tumblr.com/> žiūrėta [2016-03-01]
3. Prieiga per internetą: [http://www.robotplatform.com/knowledge/servo/what\\_makes\\_a\\_servo.html/](http://www.robotplatform.com/knowledge/servo/what_makes_a_servo.html/) žiūrėta [2016-03-01]
4. Hakan Gürocak. *Industrial Motion Control Motor Selection, Drives, Controller Tuning, Applications*. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2016 ISBN 9781118350812.
5. J. Valickas, G. Dervinis, D. Žiūkas, V. Kubilius. *Sew - Eurodrive Servo Elektros Pavaros*.
6. S. Javiya and A. Kumar. Comparison of Different Controller for Positioning Tracking of DC Servo Motor, 02, 2016, vol. 12. pp. 966 ISSN 2278-8875.
7. X. You. Z. Man. Design of Fuzzy Sliding-Mode Control System, 2000, 1998, vol. 10. pp. 295 Fuzzy sets and systems.
8. Rong-Jpng Wai ir kt. Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Control for Electrical Servo Drive, 2004, vol. 16 Fuzzy sets and systems.
9. MEAGHAN CHARESTN, R.D. MPC Enhancement for Tracking of Complex profiles — the Basic Technique. *Control Engineering Practice*, 2014, vol. 12. pp. 136 ISSN 33 (2014).
10. Nourdine Aliane\* and Javier Fernández Andrés. An Interactive Tool for Servo Systems Learning. *Sistemas Informáticos Automática y Comunicaciones, Universidad Europea De Madrid*, 2012, vol. 16. pp. 397 *Sistemas Informáticos Automática y Comunicaciones, Universidad Europea de Madrid*. ISSN TIN2008-06083-C03/TS.
11. Donatas Levišauskas. *Automatinio Reguliavimo Sistemų Derinimas*. Vilnius: VPU leidykla, 2008 Available from: ISBN 978-9955-20-280-6. DOI 10.5755/c01.9786090203767.
12. J. Kurek. Identification of Nertial Model for Astatic System. *Institute of Automatic Control and Robotics Warsaw University of Technology*, 2013, vol. 4. pp. 692 IEEE. ISSN 978-1-4673-5508-7/13.
13. Vismay Chauhan, Prof. V.P. Patel. Multi-Motor Synchronization Techniques.// *International Journal of Science* , 2014, vol. 4, no. 2. pp. 319-322 IJSETR.
14. Parker Hannifin. Fundamentals of Servo Motion Control. *Electromechanical Automation*, vol. 12 ISSN 800-358-9070.

**PRIEDAS Nr 1**

1 lentelė

Išmatuoti L ir r<sub>i</sub> elementai

	L, μH	r <sub>i</sub> , ohm		L, μH	r <sub>i</sub> , ohm		L, μH	r <sub>i</sub> , ohm		L, μH	r <sub>i</sub> , ohm
1	482,9	6,622	26	483,4	6,164	51	464,5	7,346	76	483,2	7,737
2	403,4	6,876	27	482,3	8,644	52	482,4	6,415	77	477	10,229
3	479,3	6,034	28	481,6	8,994	53	405,9	5,522	78	480,6	6,63
4	485	6,263	29	482,3	11,245	54	483,5	9,091	79	485,7	7,186
5	484,6	6,374	30	480,7	6,88	55	478,8	11,011	80	481,2	6,699
6	480,6	6,032	31	485,4	8,122	56	481,9	9,932	81	483,8	7,463
7	396,7	5	32	479,3	7,834	57	476	6,045	82	481,6	7,886
8	481,1	10,24	33	480,1	6,325	58	483,7	6,723	83	481,6	6,515
9	485,5	7,619	34	482,6	6,22	59	482,6	6,451	84	480,7	6,75
10	482,2	9,48	35	479,6	6,201	60	479	11,306	85	382	4,964
11	392,5	7,755	36	404,8	6,687	61	482,3	9,866	86	483,2	8,237
12	477,7	7,239	37	483,6	6,077	62	478,6	10,711	87	481,3	8,248
13	482,1	6,801	38	479,6	6,183	63	481,2	8,42	88	480,8	9,863
14	482,7	6,882	39	390,1	4,898	64	475,9	5,989	89	478,7	9,944
15	478,4	8,888	40	484,5	7,791	65	485	6,133	90	484,2	6,898
16	479	8,563	41	409,4	7,09	66	483,5	6,512	91	399,5	5,031
17	478,4	8,592	42	484,3	7,863	67	419,1	5,463	92	481,3	6,084
18	485,6	7,488	43	482,6	6,516	68	477,3	7,482	93	480,9	6,287
19	484,6	8,544	44	483,6	9,577	69	481,6	11,378	94	481,1	6,306
20	409,7	6,054	45	483,5	6,219	70	482	7,297	95	483,2	8,915
21	481,5	6,801	46	485,9	6,283	71	481,1	8,49	96	482,9	10,43
22	481,1	8,446	47	485,5	6,311	72	481,3	7,376	97	480,6	6,036
23	483,4	7,183	48	483,9	9,896	73	480,3	6,254	98	480	6,41
24	476,9	6,045	49	456,6	8,34	74	381,1	5,748	99	480,8	6,077
25	482,1	6,374	50	480,1	6,636	75	482	6,513	100	481,6	6,387

Šaltinio išmatuoti rodmenys, palyginamoji lentelė.

Šaltinio rodmenys		Multimetrai	
U, V	I, A	U, V	I, A
<b>5,50</b>	<b>0,29</b>	<b>5,46</b>	<b>0,27</b>
5,00	0,28	4,91	0,26
4,50	0,25	4,43	0,24
4,00	0,23	4	0,22
3,50	0,22	3,48	0,2
3,00	0,21	2,92	0,18
2,50	0,19	2,48	0,17
2,00	0,18	1,94	0,16
1,50	0,17	1,49	0,15
1,00	0,16	1,02	0,15
0,50	0,15	0,56	0,13

Variklio sukimo momento eksperimento duomenys bei skaičiavimai.

	<b>I, A</b>	<b>m, kg</b>	<b><math>\Delta m, k g</math></b>	<b>M, Nm</b>
1	0	0,125	0	0
2	0,84	0,105	0,02	0,00490
3	1,18	0,098	0,027	0,00662
4	1,37	0,093	0,032	0,00784
5	1,49	0,088	0,037	0,00907
6	1,76	0,081	0,044	0,01078
7	1,8	0,079	0,046	0,01127
8	2,13	0,067	0,058	0,01421
9	2,3	0,059	0,066	0,01617
10	3,35	0,036	0,089	0,02181
11	3,52	0,026	0,099	0,02426
12	3,8	0,02	0,105	0,02573
13	4,81	0,012	0,113	0,02769
14	5,1	0,006	0,119	0,02916
15	5,3	0	0,125	0,03063

Pagal išmatuotas laiko reikšmes, apskaičiuotas sukimosi greitis  $\omega$ , aps/s, esant skirtingoms įtampoms.

kartai	U,V				
	1	2	3	4	5
1	468,66	966,15	1531,71	1847,06	2415,38
2	527,73	1082,76	1697,30	2165,52	2415,38
3	510,57	1101,75	1697,30	2242,86	2165,52
4	519,01	1121,43	1697,30	2165,52	2616,67
5	527,73	1101,75	1697,30	1962,50	2415,38
6	523,33	1064,41	1697,30	2512,00	2616,67
7	527,73	1121,43	1697,30	2093,33	2512,00
8	527,73	1121,43	1697,30	2415,38	2242,86
9	514,75	1064,41	1744,44	2165,52	2242,86
10	523,33	1082,76	1697,30	2242,86	2854,55
11	527,73	1082,76	1744,44	2025,81	2325,93
12	527,73	996,83	1794,29	2093,33	2415,38
13	523,33	1121,43	1744,44	2093,33	2415,38
14	523,33	1121,43	1794,29	2415,38	2616,67
15	523,33	1064,41	1794,29	2415,38	2616,67
<b>vidurkis</b>	<b>519,74</b>	<b>1081,01</b>	<b>1715,09</b>	<b>2190,39</b>	<b>2459,15</b>

Išmatuotas laikas bei pagal 2.8 formulę apskaičiuotas sukimosi greitis. Pereinamasis greitėjimo bei lėtėjimo proceso duomenys.

	įsibėgėjimas			Lėtėjimas dėl trinties		
	t išmatuota, micro s	T, s	greitis rad/s	t išmatuota, micro s	T, s	greitis rad/s
1	0	0	0	10156776	10,1568	438,6700196
2	9685808	9,685808	288,0205467	10171092	10,1711	432,03082
3	9707612	9,707612	404,8478597	10185628	10,1856	425,3589813
4	9723124	9,723124	469,3572496	10200392	10,2004	418,555052
5	9736504	9,736504	514,0798952	10215396	10,2154	411,7492788
6	9748720	9,74872	547,6107429	10230648	10,2306	404,9522827
7	9760188	9,760188	573,6207526	10246156	10,2462	397,9721166
8	9771136	9,771136	594,2467827	10261936	10,2619	390,936255
9	9781704	9,781704	611,3707165	10278000	10,2780	383,8630807
10	9791976	9,791976	625,498008	10294360	10,2944	376,9507803
11	9802016	9,802016	637,1753247	10311020	10,3110	369,1511874
12	9811872	9,811872	646,8891636	10328032	10,3280	362,0848708
13	9821580	9,82158	655,2587646	10345376	10,3454	354,6419697
14	9831164	9,831164	662,4472574	10363084	10,3631	347,0380195
15	9840644	9,840644	668,6541738	10381180	10,3812	339,3860787
16	9850036	9,850036	674,3986254	10399684	10,3997	331,5733897
17	9859348	9,859348	679,6536797	10418624	10,4186	323,7113402
18	9868588	9,868588	684,3940715	10438024	10,4380	315,5778894
19	9877764	9,877764	687,6916338	10457924	10,4579	307,4211866
20	9886896	9,886896	691,3254073	10478352	10,4784	298,9906684
21	9895980	9,89598	694,0760389	10499356	10,4994	290,4717854
22	9905028	9,905028	696,8486462	10520976	10,5210	281,7154136
23	9914040	9,91404	698,7093903	10543268	10,5433	272,7114817
24	9923028	9,923028	700,8928571	10566296	10,5663	263,5554809
25	9931988	9,931988	702,4608501	10590124	10,5901	254,0864218
26	9940928	9,940928	704,0358744	10614840	10,6148	244,3579767
27	9949848	9,949848	704,6678636	10640540	10,6405	234,293389
28	9958760	9,95876	706,5706571	10667344	10,6673	223,8380382
29	9967648	9,967648	707,5259126	10695400	10,6954	212,967987
30	9976524	9,976524	708,8036117	10724888	10,7249	201,6180814
31	9985384	9,985384	710,085934	10756036	10,7560	189,7051716
32	9994228	9,994228	711,0507246	10789140	10,7891	177,0410465
33	10003060	10,00306	712,0181406	10824612	10,8246	163,5927894
34	10011880	10,01188	712,9881926	10863000	10,8630	149,0270527
35	10020688	10,020688	713,9608913	10905140	10,9051	133,0057608
36	10029484	10,029484	714,610833	10952356	10,9524	115,0098894
37	10038272	10,038272	715,5879672	11006960	11,0070	93,70337213
38	10047048	10,047048	716,2408759	11073980	11,0740	65,55049894
40	10055816	10,055816	716,8949772	11169784	11,1698	-0,562231105
41	10064576	10,064576	717,5502742			
42	10073328	10,073328	718,2067704			
43	10082072	10,082072	718,5354691			
44	10090812	10,090812	718,8644689			

Naudotų programų kodai (pritaikyta ARDUINO)

a) }

```
void loop()
{
  bState=digitalRead(2);

  delay(100);
  if (bState == HIGH)
  {
    if (u>1);
    {i=0;
      attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), isr, RISING);
    while (t>300)
      { delay(2);

        }
      detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2));
    }
  }
}
void isr()
{
  mas[t]=millis();
  Serial.print(" laikas ");
  Serial.println(millis());
  t++;
}

unsigned long time;
int i=0;
```

b)

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), isr, RISING); //attaching the interrupt
}
void loop(){
  i=0;

}
void isr()
{
  Serial.print(" ");
  // time = micros();
  //prints time since program started
  Serial.println(micros());
  // wait a second so as not to send massive amounts of data
  // delay(10);
}
```