



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

Andrius Butkevičius

KOMPIUTERIU VALDOMOS ELEKTROS PAVAROS TYRIMAS
RESEARCH ON THE COMPUTER CONTROLLED ELECTRIC DRIVE

Magistro baigiamasis darbas

Elektros inžinerijos studijų kryptis
Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T104
Mechatroninių sistemų automatikos specializacija

Vilnius, 2010

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(parašas)
doc. dr. Z. Savickienė
2009 m. _____ mėn. ____ d.

Andrius Butkevičius

KOMPIUTERIU VALDOMOS ELEKTROS PAVAROS TYRIMAS
RESEARCH ON THE COMPUTER CONTROLLED ELECTRIC DRIVE

Magistro baigiamasis darbas

Elektros inžinerijos studijų kryptis
Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T104
Mechatroninių sistemų automatikos specializacija

Vadovas	doc. dr. S. Lisauskas (mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)	_____	_____
		(parašas)	(data)
Konsultantas	doc. dr. L. Radzevičius (mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)	_____	_____
		(parašas)	(data)
Konsultantas	doc. dr. Z. Babickienė (mokslinis vardas ir laipsnis, vardas, pavardė)	_____	_____
		(parašas)	(data)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

Technologijos mokslų sritis
Elektros ir elektronikos mokslo kryptis
Elektros inžinerijos studijų kryptis
Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T104
Mechatroninių sistemų automatikos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėja

(Parašas)
Zita Savickienė
(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.
Vilnius

Studentui Andriui Butkevičiui

Baigiamojo darbo tema: Kompiuteriu valdomos elektros pavaros tyrimas (Research on the Computer Controlled Electric Drive)
patvirtinta 200...m. d. dekanų potvarkiu Nr.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2009 m. birželio 1 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

1. ĮVADAS.
2. LITERATŪROS APŽVALGA.
3. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI.
4. TEORINĖ DALIS.
 - 4.1. Nuolatinės srovės elektros pavaros ir jų valdymas.
 - 4.2. Nuotolinio valdymo būdai ir metodai.
 - 4.3 Elektros pavaros valdymas kompiuteriu.
5. TIRIAMOJI DALIS.
 - 5.1. Nuolatinės srovės elektros pavaros modelio sudarymas.
 - 5.2. Imitacijos rezultatų apžvalga ir tyrimas.
 - 5.3. Eksperimentinis tyrimas ir rezultatų palyginimas.
6. TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS.
 - 6.1. Išvados.
 - 6.2. Rekomendacijos ir pasiūlymai.
7. LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: doc. dr. L. Radzevičius
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

doc. dr. Saulius Lisauskas
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)
Andrius Butkevičius
(Vardas, pavardė)
2009 lapkričio 18d.
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Automatikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų Automatikos programos baigiamasis darbas

Pavadinimas Kompiuteriu valdomos elektros pavaros tyrimas
Autorius Andrius Butkevičius
Vadovas dr. Saulius Lisauskas

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame darbe ištirta, suprojektuota ir sukurta kompiuteriu valdoma elektros pvara, kurią galima valdyti nuotoliniu būdu. Sukurtas greičio matavimo standas, skirtas matuoti tyrime naudojamo variklio greitį.

Įvade aptariamos nuotoliniu būdu valdomos elektros pavaros, jų svarba ir panaudojimo sritys.

Teorinėje dalyje apžvelgiami nuolatinės srovės variklių tipai, konstrukcija, charakteristikos. Analizuojami greičio reguliavimo bei matavimo, nuotolinio valdymo būdai. Aprašomi enkoderiai, perduodamų duomenų moduliacijos ir naudojami dažniai Lietuvoje.

Tiriamoje dalyje sudaromas variklio kompiuterinis modelis, aprašomi jo elementai, ir veikimo principai. Sukurtas eksperimentinis greičio matavimo standas, atlikti bandymai ir gauti pereinamieji procesai buvo palyginti su imitacijos rezultatais. Suprojektuotos sistemos veikimui patikrinti, buvo sukurta realus eksperimentinis modelis, kurio kūrimo procesas taip pat aprašomas šioje dalyje.

Išvados ir rekomendacijos pateikiamos tyrimo rezultatų apibendrinančioje dalyje.

Darbą sudaro 7 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, tyrimo tikslai ir uždaviniai, teorinė dalis, tiriamoji dalis, tyrimo rezultatų apibendrinimas, literatūra ir kiti šaltiniai.

Darbo apimtis – 67 p. teksto be priedų, 53 iliustr., 4 lent., 41 bibliografinis šaltinis.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai

Nuolatinės srovės variklis, mikrovaldiklis, siųstuvas, imtuvas, enkoderis, USB sąsaja, Simscape, Matlab.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Automation

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies Automation study programme Master's Thesis

Title Research on the Computer Controlled Electric Drive
Author Andrius Butkevičius
Academic supervisor Dr Saulius Lisauskas

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

In this final project the computer controlled electric drive is presented and created. This system provides a possibility to remote control. In this research the speed measurement test bench is created which is designed for measure motor speed.

In the preface of this project the essentials methods of remote control of electric drives is described, their utilization spheres were described.

In the Theoretical part the DC electric motor types, their construction and characteristics were reviewing. The methods of the speed adjustment, measurement and remote control were analyzed. Encoders, modulation of the transferring data usage frequencies in Lithuania were described.

In the exploratory part computer control drive model is created, reviewed his elements and principles of the functionality. Experimental test bench of the speed measurement is created, carry out tests, and variables processes compared with imitation results. To verify effect of the Presented system real experimental model was created. Process of creation is also described in this part.

Conclusions and recommendations are presented on the part the summarized results of the research.

Structure: Preface, summarize of the literature, purposes and tasks of research, theoretical part, The exploratory part, summarize of research results, literature and others sources.

Thesis consists of: 67 p. text without extras, 53 pictures, 4 tables, 41 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords

Direct current motor, microcontroller, receiver, transmitter, encoder, USB interface, Simscape, Matlab.

Turinys

1.	ĮVADAS	7
2.	LITERATŪROS APŽVALGA	9
3.	TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI	11
4.	TEORINĖ DALIS	12
4.1.	Nuolatinės srovės elektros pavaros ir jų valdymas.....	12
4.2.	Nuotolinio valdymo būdai ir metodai.....	22
4.3.	Greičio matavimo būdai	29
4.3.1.	Variklio greičio jutikliai	29
4.3.2.	Tachogeneratoriai	29
4.3.3.	Sukimosi greičio ir padėties enkoderiai	32
4.4.	Elektros pavaros valdymas kompiuteriu.....	39
5.	TIRIAMOJI DALIS.	43
5.1.	Nuolatinės srovės elektros pavaros modelio sudarymas	43
5.1.1.	Nuolatinės srovės variklio su nuolatiniais magnetais kompiuterinis modelis	43
5.1.2.	Eksperimentinio modelio sudarymas	46
5.2.	Imitacijos rezultatų apžvalga ir tyrimas.....	55
5.3.	Eksperimentinis tyrimas ir rezultatų palyginimas.	57
6.	TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS.....	67
6.1.	Išvados	67
6.2.	Rekomendacijos ir pasiūlymai	68
7.	LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI	69
	PRIEDAI	72
	1 priedas.....	75
	2 priedas.....	81
	3 priedas.....	80

1. ĮVADAS

Šiuolaikinės visuomenės poreikis naudotis pažangiausiomis elektroninėmis valdymo sistemomis vis labiau skatina naudotis nuotoliniu valdymu. Nuo nuotolinio valdymo pultelių televizoriui, vartams atidaryti iki sudėtingų aeronautikos ir kosmoso tyrimo agentūrų sukurtų robotų, skirtų kitų planetų tyrimams.

Valdymas radijo bangomis – tai toks belaidis (nuotolinis) valdymas naudojamas garso, vaizdo ar kitiems elektros įrenginiams valdyti, o duomenų perdavimui naudojamas radijo dažnis. Šis valdymas dažniausiai naudojamas pramonėje, karinių ir mokslinių tyrimų organizacijose įvairių rūšių modeliams valdyti.

Kai žmogaus negali dalyvauti vietoje atliekant darbą, nes jis yra pavojingas, toli, arba nepasiekiamas, naudojami per atstumą valdomi robotai (telerobotai). Robotas gali būti kitoje patalpoje ar kitoje šalyje, ar gali būti labai įvairiu atstumu nuo operatoriaus.

Telerobotika – tai robotikos sritis susijusi su roboto valdymu per atstumą.

Terminas telerobotika turi tris pagrindinius valdymo metodus:

1. Teleoperacija – kai žmogus tiesiogiai valdo nutolusį įrenginį realiuoju laiku;
2. Robotika – kai nutolęs įrenginys perprogramuojamas;
3. Supervizorinis valdymas – kai įtaisas veikia automatiškai kartu dalyvaujant žmogui. Gavęs valdymo komandas, derina automatinę programą kartu su žmogaus nustatytais komandomis [1].

Nuotolinio valdymo kariniai prietaisai paprastai yra ne tik valdomi radijo ryšiu tiesiogiai, bet veikia ir autonomiškai valdant kompiuteriui. Vienas iš geriausiai žinomų valdymo radijo bangomis pavyzdžių – tai Marso robotai Spirit, Opportunity ir Sojourner, sukurti NASA. Nuotoliniu būdu valdomi orlaiviai (angl. *Unmanned Aircraft System*), kurie yra nepilotuojami iš vidaus. Šimtai robotų, pvz., iRobot's, Packbot ir Foster-Miller Talon yra naudojami Irake ir Afganistane JAV kariuomenei nukenksminti pakelės bombas arba savadarbių sprogdinimo prietaisus [2].

Medicinoje naudojama įvairios telerobotikos sistemos, kurios palengvina operacijas, pirmoji ir viena žinomiausių yra „da Vinci Surgical System“. Tai nuotoliniu būdu valdoma sistema, susidedanti iš valdymo pulto, kurį valdo chirurgas ir nuotolinės roboto rankos, kuri labai tiksliai atkartoja tuos judesius ir yra toje pačioje arba kitoje patalpoje nei chirurgas [3].

Šiuo metu vis dažniau elektros pavarų valdyme kompiuteris užima valdiklio vietą, naudojant jo įvedimo ir išvedimo sąsajas gaunama informacija iš pavaros jutiklių, ji apdorojama ir išduodamas atitinkamas valdymo signalas. Kompiuteriu gali būti valdoma viena ar keletas pavarų vienu metu,

tačiau tokiu atveju įmontuojamos specialios duomenų apdorojimo plokštės DAQ (angl. *data acquisition*), kurios turi didelį duomenų pralaidumą. Šios plokštės dažniausiai turi tam tikrą skaičių analoginių ir skaitmeninių įėjimų ir išėjimų. Sudėtingose pavarų ar technologinių procesų valdyme naudojamos plokštės, kurios turi savo procesorių ir realiu laiku apdoroja gaunamus duomenis, neapkraudamos pagrindinio kompiuterio procesoriaus. Tokius produktus gamina *National Instruments*, *Eurotech*, *Advantech*, *Adlink Technology*, *MotionWire*, *OES*, *Aerotech*, *Maxon*, *ABB*, *Siemens* firmos.

Tokios plokštės pasižymi dideliu patikimumu ir funkcionalumu, kadangi yra gaminamos žymių firmų, tačiau jų kaina verčia ieškoti pigesnių analogų. Vienas tokių analogų – „*Motor-Bee*“ firmos kompiuteriu valdoma plokštė. Tokių plokščių valdymo privalumas – lengvai keičiama valdymo programa, nes prieigą prie USB sąsajos programinio valdymo suteikia dinaminės sąsajos biblioteka (angl. *Dynamic Link Library*). Skirtingai nuo ankstesnių firmų gamintojų – ši plokštė neturi tokių funkcijų duomenų perdavimo realiu laiku ar daug skaitmeninių įvedimo (išvedimo) portų, tačiau nustatytas pagrindines funkcijas atlieka gana tiksliai ir be didelių užlaikymų.

Šiuo metu vis dažniau reikalingos nuotoliniu būdu kompiuteriu valdomos pavaros, todėl tokių pavarų tyrimas yra aktualus.

2. LITERATŪROS APŽVALGA

Rengiant šį baigiamąjį magistro darbą, buvo apžvelgta skirtingų šalių specialistų publikuota medžiaga nuotolinio valdymo, duomenų perdavimo, elektros pavarų bei greičio matavimo temomis. Greičio matavimo prietaisai (jutikliai) šiuolaikinėje technikoje nėra naujiena, taigi dar aktuali tema ir mokslinės pakraipos internetinės svetainės, kur straipsnių šia tema galima rasti daug daugiau nei knygų ir informacija yra žymiai naujesnė.

2005 metais išleistoje Algirdo Smilgevičiaus knygoje [20] yra aptariami asinchroninių ir sinchroninių mikrovariklių elektros pavaros, jų veikimo principai, pateiktos charakteristikos. Ypač didelis dėmesys skiriamas naujausioms mikromašinoms: kintamos ir nuolatinės srovės tachogeneratoriams, sukimosi greičio ir padėties enkoderiams ir t.t. Kadangi pastaruoju metu yra sukurta daug naujos kartos mikromašinų, o informacijos apie jas lietuvių kalba yra labai mažai, todėl ši knyga yra labai naudinga.

Knygoje aptariamas tachogeneratoriaus veikimo ir konstrukcijos principas, skirtumai tarp nuolatinės ir kintamosios srovės tachogeneratorių, pateikiamos išėjimo charakteristikos, aptartos pagrindinės tachogeneratorių paklaidos, apibendrinti ir pateikti pagrindiniai kolektorinių tachogeneratorių duomenys, kuriuos pateikia gamintojas.

Taip pat aptariami tiksliai sukimosi greičio, kelio ar erdvinės padėties matavimui valdymo sistemose naudojami enkoderiai. Tai vienintelis šaltinis, kuriame yra išsamios informacijos apie šiuos naujos kartos matavimo prietaisus. Analizuojamas optinio elektroninio enkoderio veikimo principas, jo konstrukcija. Pateikiami pagrindiniai skirtumai tarp prieauginio ir absoliutaus enkoderio. Pateikta informacija, į ką reikėtų atkreipti dėmesį renkantis, šį prietaisą.

1993 metais išleistoje Povilo Kostrausko mokymo priemonėje [19] pateikiama medžiaga apie nuolatinės srovės mašinų apvijas, srovės komutaciją ir magnetinės grandinės skaičiavimai. Trumpai apžvelgtos specialiosios nuolatinės srovės elektros mašinos bei kintamos srovės kolektorinės elektros mašinos. Čia taip pat pateikta nuolatinių srovės varikių žadinimo būdai, bei kartu su [16] „Siemens“ firmos literatūra baigiamajame magistro darbe pateikiamos pagrindinės nuolatinės srovės žadinimo variklių schemos ir variklio konstrukcijos.

Informacija apie radijo dažnių, kuriuos galima naudoti be atskiros leidimo, sąrašas, nacionalinė radijo dažnių paskirstymo lentelė, pateikiama LR Ryšių reguliavimo tarnybos puslapyje [3, 5]. Čia pateikiami teisiniai aktai, apibrėžimai įtaisų, skirtų priimti ir perduoti radijo signalus, naudojamus Lietuvos teritorijoje. Nacionalinė radijo dažnių paskirstymo lentelė yra dokumentas, kuriame nustatytas radijo dažnių pasiskirstymas t. y. radijo ryšio, įskaitant transliavimą, gamybos, mokslo, medicinos ir

kitiems poreikiams. Lentelėje paskirstyta kokios tarnybos naudoja atitinkamus dažnius, dažniai suskirstomi nuo labai žemųjų iki aukštųjų.

Informacija apie impulsinį greičio reguliavimą pateikiama R. K. Masteikos knygoje elektros pavaros [19, 27]. Knyga naudinga tuo, kad yra ne tik teorijos, bet ir projektavimo, uždavinių sprendimo pavyzdžių.

Daug knygų apie elektros pavaras, įvairius greičio matavimo jutiklius yra parašytos užsienio kalbomis, taigi viena iš tokių knygų yra autoriaus Austin Hughes knyga „Electric motors and deives – fundamentals, types and applications“ [31], kurioje yra gana detalai ir aiškiai aprašyti elektros pavarų veikimo principai, charakteristikos ir pateiktos gana aiškos išvados. Plačiai aprašyti dažnio keitiklių veikimo principai, Ši knyga yra skirta ir kvalifikuotiems inžinieriams, ir universitetų studentams.

Knygoje „Robotics and Automation Handbook“ kiekvienas skyrius yra skirtingų autorių iš skirtingų pasaulio šalių, o galutinis apibendrintas variantas pateikiamas autoriaus T. Kurfess. Knygoje plačiai aprašoma programuojamieji loginiai valdikliai, jų sudėtis, veikimas. Kitame knygos skyriuje pateikiami skaitmeniniai ir analoginiai greičio matavimo jutikliai, jų montavimo ir veikimo principai. Plačiau aptariami sukamieji ir tiesiniai, absoliutieji enkoderiai. Tame pačiame skyriuje aptariami vykdikliai. Autoriaus surinkta medžiaga apie medicinoje naudojamus kompiuterizuotus telerobotikos prietaisus.

„Power Electronics Handbook“ knygos M. H. Rashid. autoriaus pagrindinis tikslas pateikti glaustą informaciją, kuri yra naudinga inžinerinių specialybių studentams bei kai kurių sričių specialistams. Mokomojo pobūdžio knygoje organizuotai ir informatyviai pateikiama medžiaga, apima įvairias temas galios elektronikos srityje. Atidžiai pateikiama tiek jau esamų, tiek naujų temų apžvalga. Ypatingas dėmesys skiriamas praktiniam galios elektronikos pritaikymui, bei galios elektronikos naudingumui įvairiose pramonės srityse. Prie šios knygos kūrimo prisidėjo penkiasdešimt keturi autoriai iš viso pasaulio, kurių dalis yra kompetentingi valdžios bei mokslo institucijų darbuotojai. Pateikiamos modernių galios elektronikos įtaisų charakteristikos, kuriuose naudojami puslaidininkiniai raktai, kurie pagerina galios keitimo rodiklius.

3. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Tikslas: sudaryti nuolatinės srovės elektros pavaros kompiuterinį modelį, kuris leistų tirti pavaros pereinamuosius procesus, sukurti eksperimentinę nuotoliniu būdu valdomą nuolatinės srovės pavarą ir gauti eksperimentines pereinamųjų procesų kreives, jas palyginti su imitacijos rezultatais.

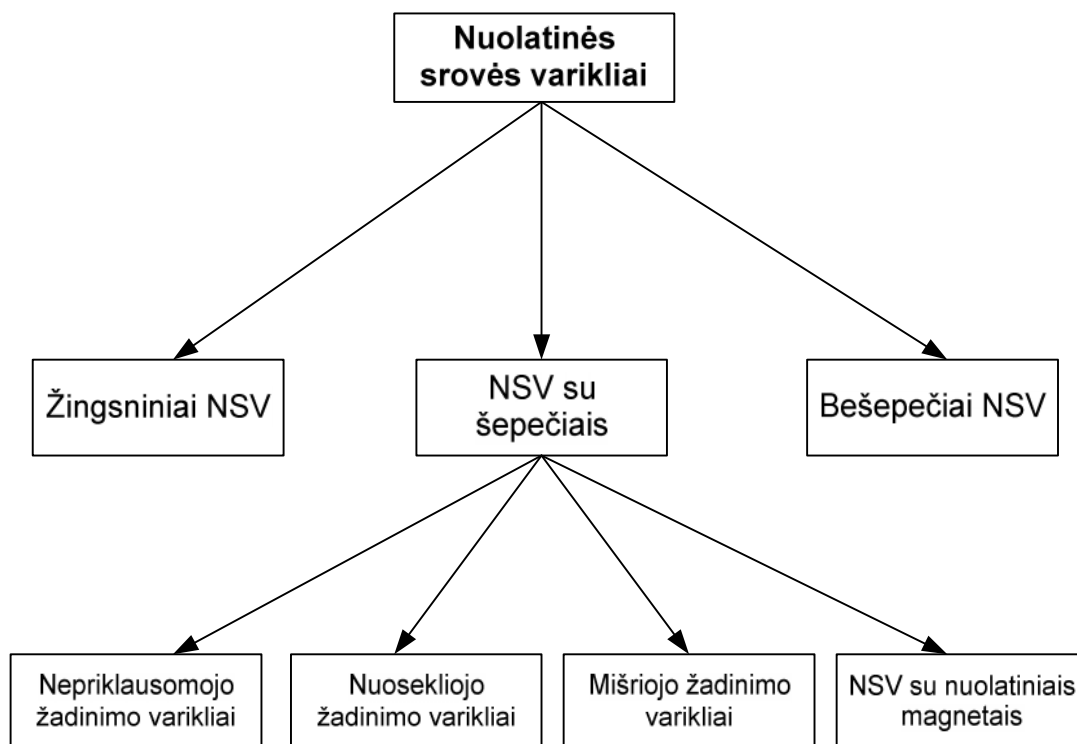
Uždaviniai:

1. Sudaryti nuolatinės srovės elektros pavaros kompiuterinį modelį naudojant *Matlab* programinį paketą ir gauti imitacijos rezultatus;
2. Sukurti eksperimentinę nuotoliniu būdu valdomą nuolatinės srovės pavarą:
 - a) Sudaryti kompiuteriu valdomos elektros pavaros, duomenų perdavimo modulių funkcines, principines elektrines schemas;
 - b) Parinkti kompiuteriu valdomos elektros pavaros mikrovaldiklius, duomenų perdavimo modulius (siųstuvą ir imtuvą) atsižvelgiant į jų privalumus ir trūkumus.
3. Tiriamajam darbui parinkti ir sumontuoti elektros pavaros pereinamojo proceso stebėjimo įrangą;
4. Gauti srovės, greičio pereinamuosius procesus eksperimentiniu būdu iš sudaryto eksperimentinio modelio ir palyginti juos su imitaciniais rezultatais;
5. Naudojant programavimo kalbą „Microsoft Visual Basic“, sukurti programą nuolatinės srovės elektros pavaros valdymui.

4. TEORINĖ DALIS

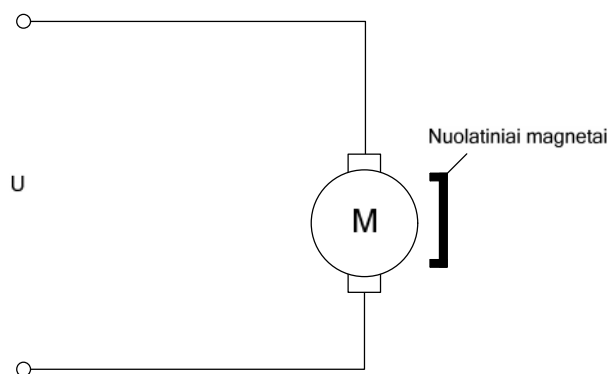
4.1. Nuolatinės srovės elektros pavaros ir jų valdymas

Nuolatiniai srovės varikliai (NSV) naudojami daugelyje pramonės ir buities sričių: automobiliuose, spausdintuvuose, skalbimo mašinose, automatinio valdymo sistemose ir kitur. Nuolatinės srovės variklių tipai pateikti 4.1 paveiksle.



4.1 pav. Nuolatinės srovės variklių tipai

Kai reikalingas aukštas pradinis sukimo momentas ir pagreitis, kompaktiškas dydis ir mažas energijos suvartojimas, nuolatinės srovės elektros varikliai su nuolatiniais magnetais gali būti geras pasirinkimas. Platus šių variklių pasirinkimas turi daug panaudojimo galimybių. Šie varikliai naudojami konvejeriuose, elevatoriuose, liftuose, kėlimo įrenginiuose, karinėje ir jūrų technikoje, medžiagų apdorojimo: plastiko, plieno, popieriaus ir tekstilės srityse. Variklio su nuolatiniais magnetais schema patekta 4.2 paveiksle.



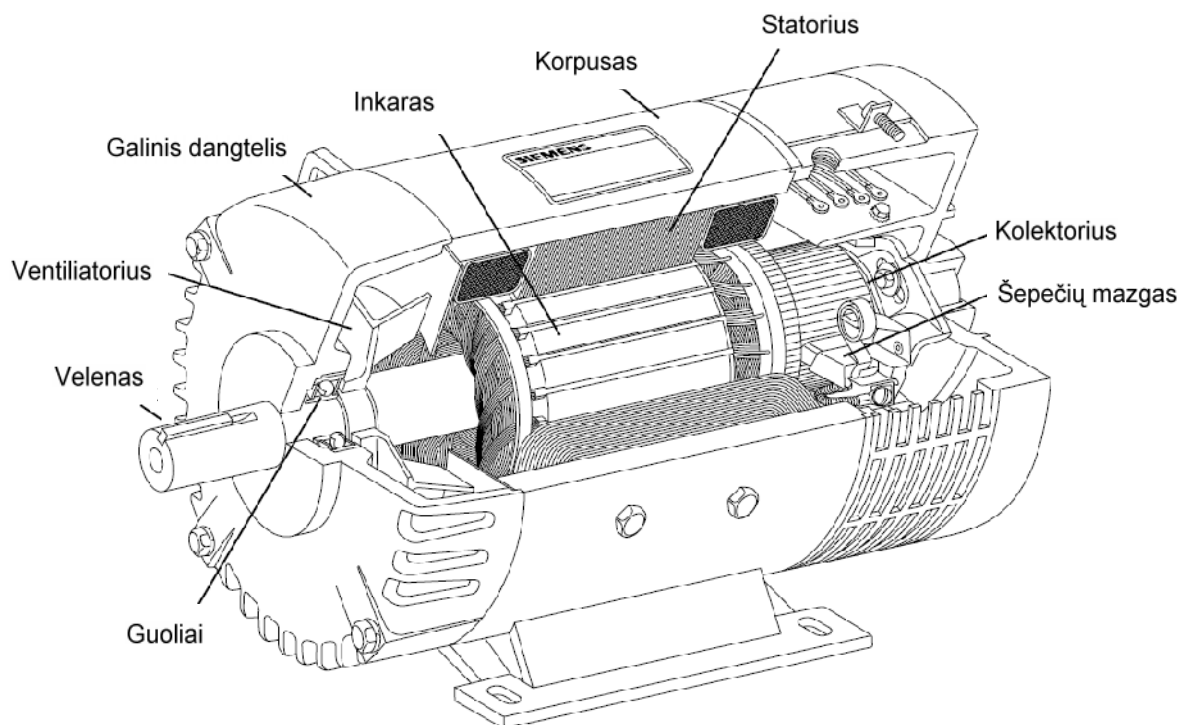
4.2 pav. Nuolatinės srovės variklio su nuolatiniais magnetais schema

Elektromagnetinio žadinimo varikliams magnetinį lauką kuria magnetiniai poliai ant kurių yra žadinimo apvija. Žadinimo polių šerdis dažniausiai surenkama iš šampuotų elektrotechninio plieno lakštų. Kuriamo magnetinio srauto kryptis priklauso nuo srovės ir vijų vyniojimo krypties. Magnetinio lauko linijos turi būti uždarnos, todėl poliai turi būti sujungti magnetiniu jungu. Tarp polių yra sumontuojamas inkaras. Dažniausiai tai sukioji mašinos dalis. Jis visada būna surinktas iš elektrotechninio plieno lakštų ir turi tam tikrą griovelių skaičių. Tuose grioveliuose klojama inkaro apvija ir jos galai jungiami prie kolektoriaus plokštelių. Srovei iš inkaro į išorinę grandinę perduoti naudojami šepečiai. Šepečių paprastai yra tiek, kiek polių (magnetų). Nuolatinės srovės variklį sudaro:

- 1) Žadinimo sistema;
- 2) Inkaras;
- 3) Šepečių mazgas
- 4) Dangčiai su guoliais, kurie įtvirtina inkarą tarp polių ir sudaro nustatytą oro tarpą;
- 5) Išvadų dėžutė;
- 6) Kiti elementai.

Nuolatinės srovės variklio konstrukcija pateikta 4.3 paveiksle.

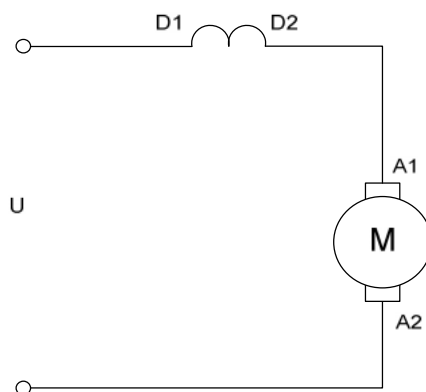
Variklio konstrukcijoje su nuolatiniais magnetais vietoje žadinimo polių ir apvijų naudojami nuolatiniai magnetai. Tačiau tokio tipo magnetai būna nedidelės galios. Nuolatiniai magnetai sukuria magnetinį lauką, todėl nereikalingas išorinis žadinimo srovės šaltinis. Tokia konstrukcija duoda mažą, lengvą, ir efektyviau energiją taupantį variklį [19, 22].



4.3 pav. Firmos *Siemens* nuolatinės srovės variklio konstrukcija

Nuolatinės srovės varikliai su nuolatiniais magnetais (angl. *Permanent Magnet*) plačiai naudojami daugelyje įtaisų, pradedant nuo baterijos maitinamų prietaisų, tokių kaip invalidų vežimėlių ir galios įrankių, iki konvejerių, automatinių durų atidarymo, suvirinimo įrangos, rentgeno ir tomografijos sistemose. Tai geriausia išeitis, kuri dažniausiai naudojama judesių valdymui ir galios perdavimo mechanizmuose, kai reikalingas kompaktiškumas, platus greičio valdymo diapazonas, galimybės prisitaikyti prie įvairių maitinimo šaltinių ir elektros saugos sąlygų užtikrinimas, kadangi naudojama žema įtampa. Jų gebėjimas sukurti didelį sukimo momentą esant mažiems greičiams daro juos tinkamu pakaitalu daugumoje įtaisų. Dėl jų tiesinių greičio-momento charakteristikų, jie ypač tinka reguliuojamam greičiui ir servoreguliuojamame mechanizmuose, kur variklis veiks iki 5000 apsisukimų per minutę [1, 3, 4].

Elektromagnetinio žadinimo varikliai skirstomi į: nuosekliojo, nepriklausomojo, lygiagrečiojo ir mišriojo žadinimo [16,19]. Nuosekliojo žadinimo variklis parodytas 4.4 paveiksle.



4.4 pav. Nuolatinės srovės nuosekliojo žadinimo variklio schema

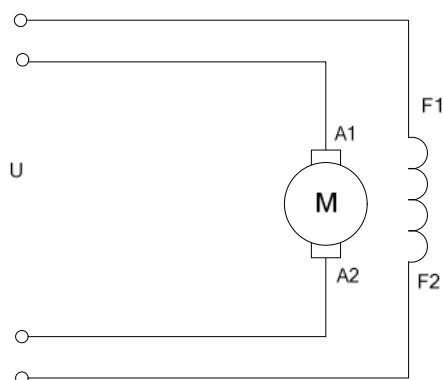
Tokio variklio mechaninė charakteristika yra hiperbolinė funkcija, kurios išraiška pateikta 4.1 formulėje.

$$n = \frac{a}{\sqrt{M}} - b. \quad (4.1)$$

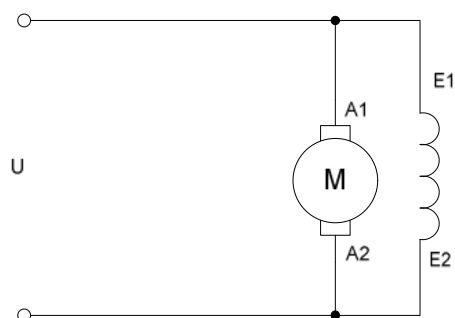
Čia a ir b – pastovieji dydžiai.

Toks variklis negali dirbti neapkrautas, nes mažėjant momentui, greitis artėja prie begalybės. Nuosekliojo žadinimo varikliai turi didelį paleidimo momentą ir dėl didelio mechaninės charakteristikos nuolydžio jam nepavojingi dideli apkrovos momento pokyčiai.

Nepriklausomojo žadinimo ir lygiagrečiojo žadinimo variklių charakteristikos iš esmės yra tokios pat, tačiau lygiagrečiojo žadinimo varikliai naudojami dažniau, nes jiems nereikalingas žadinimo sistemos maitinimo šaltinis. Tokie varikliai parodyti 4.5 ir 4.6 paveiksluose.

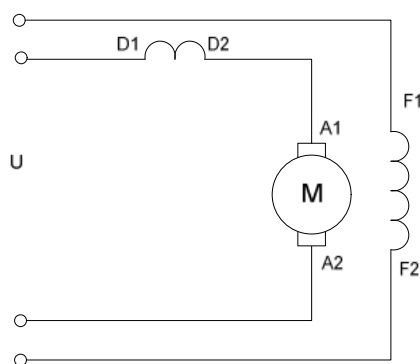


4.5 pav. Nuolatinės srovės nepriklausomojo žadinimo variklio schema

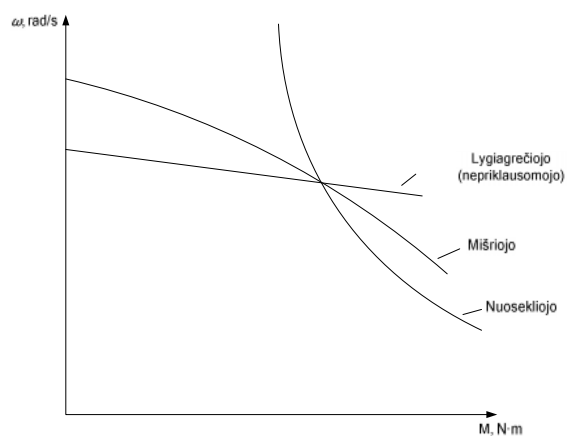


4.6 pav. Nuolatinės srovės lygiagrečiojo žadinimo variklio schema

Mišriojo žadinimo variklis pranašesnis už nuosekliojo žadinimo, nes jis gali dirbti tuščiąja eiga, panašiai kaip lygiagrečiojo žadinimo variklis. Tačiau jie yra brangesni, nes turi dvi žadinimo apvijas. Tokio variklio schema pateikta 4.7 paveiksle. Variklių charakteristikų palyginimas pateiktas 4.8 paveiksle.



4.7 pav. Nuolatinės srovės mišriojo žadinimo variklio schema



4.8 pav. Charakteristikų palyginimas

Greičio reguliavimas

Iš nuolatinės srovės variklio elektromechaninės (greičio) ir mechaninės charakteristikos lygčių matyti, kad kampinį greitį, taigi ir šias charakteristikas keisti galima keičiant:

- a) inkaro grandinės varžą;
- b) įtampą U ;
- c) magnetinį srautą Φ :

$$\omega = \frac{U_{in}}{c \cdot \Phi_z} - \frac{R_{in}}{c \cdot \Phi_z} \cdot I_{in} . \quad (4.2)$$

Nagrinėdami parametrų įtaką mechaninėms charakteristikoms, keičiame tik vieną parametą [8].

1) Inkaro grandinės varžos keitimas.

Šis reguliavimo būdas dažnai vadinamas reostatiniu, nes į inkaro grandinę varžą R_r įvedama reostatais ir kampinį greitį ω galima tik mažinti. Kuo didesnė varža R_r įvedama į grandinę, tuo minkštesnė charakteristika ir tuo mažesnis kampinis greitis, esant tam pačiam apkrovos momentui. Tik šiek tiek pakitus apkrovos momentui, kampinis greitis pasikeis tuo labiau, kuo didesnė įvesta R_r varža.

2) Įtampos U keitimas.

Dažniausiai įtampa $U_{in} = U_v$, tai ją galima tik mažinti. Tuomet variklio kampinis greitis mažės. Varikliui įgyjant įvairias $\alpha \cdot U_v$ reikšmes (α – įtampos kitimo koeficientas), variklio greitis kis α kartų: $\omega = \alpha \cdot \omega_{nat}$.

Tada mechaninė charakteristika :

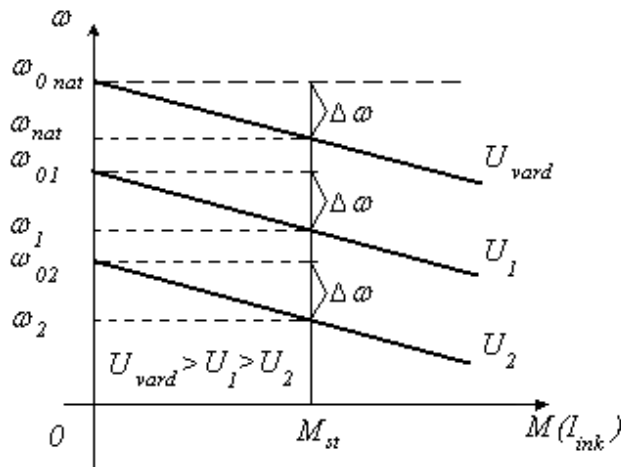
$$\omega = \frac{\alpha \cdot U_v}{c \cdot \Phi_z} - \frac{R_{in}}{c \cdot \Phi_z} \cdot I_{in} . \quad (4.3)$$

Iš šios lygties matome, kad idealios tuščios eigos greitis dirbtinėje charakteristikoje:

$$\omega_{0dirbt} = \frac{\alpha \cdot U_v}{c \cdot \Phi_z} . \quad (4.4)$$

Kintant maitinimo įtampai, charakteristikų polinkis bei kietumas nekinta, nes nekinta varža inkaro grandinėje:

$$\Delta \omega = - \frac{R_{in}}{c \cdot \Phi_z} \cdot I_{in} . \quad (4.5)$$



4.9 pav. Variklio charakteristikos, kai inkaro grandinė maitinama pažeminta įtampa

Šis būdas ekonomiškas, nes variklio naudingumo koeficientas didelis. Trūkumas – reikalingas reguliuojamas įtampos šaltinis.

3) Magnetinio srauto Φ_z keitimas.

Kadangi variklių, dirbančių vardiniu režimu, magnetinė grandinė paprastai būna įsotinta, tai magnetinį srautą Φ_z galima tikrai silpninti, tuomet variklio kampinis greitis didės. Idealios tuščiosios eigos greitis ir statinis greičio sumažėjimas išreiškiamas:

$$\omega_{0dirbt} = \frac{U}{\gamma \cdot c \cdot \Phi_z} = \frac{\omega_0}{\gamma}; \quad (4.6)$$

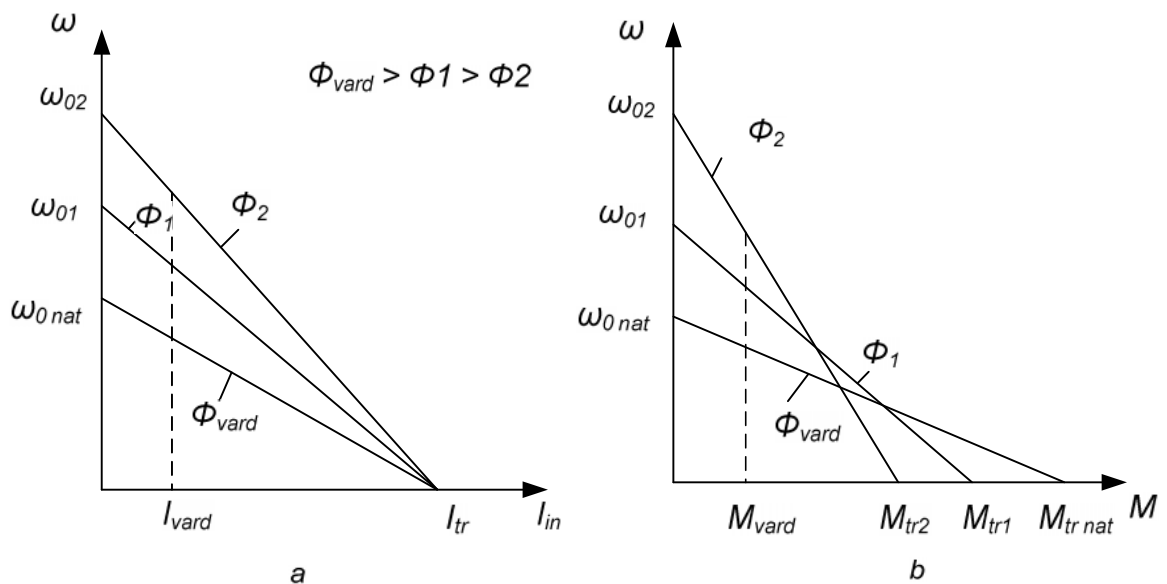
$$\Delta\omega_{dirbt} = -\frac{I_{in}(R_v + R_e)}{\gamma \cdot c \cdot \Phi_z} = \frac{\Delta\omega_{nat}}{\gamma}, \quad (4.7)$$

čia γ – magnetinio srauto susilpnėjimo koeficientas ($\gamma < 1$).

Silpnėjant magnetiniam srautui, elektromechaninės charakteristikos susikerta abscisių ašyje taške, atitinkančiame trumpo jungimo srovę:

$$I_{tr} = \frac{U}{R_\Sigma}. \quad (4.8)$$

Kadangi nekeičiame nei įtampos, nei varžos, todėl elektromechaninės charakteristikos kertasi tame pačiame taške I_{tr} .



4.10 pav. Nepriklausomojo žadinimo variklio, kai silpninamas žadinimo srautas charakteristikos

Mechaninėse dirbtinose charakteristikose (4.10 pav., b) statinis greičio $\Delta\omega$ sumažėjimas, lyginat su sumažėjimu natūraliose charakteristikose, padidėja $1/\Phi_z^2$ kartų. Kadangi trumpojo jungimo momentas $M_{tr} = c \cdot \Phi_z \cdot I_{tr}$, tai silpnėjant magnetiniam srautui Φ_z , variklio M_{tr} mažėja [39].

Kai reikia gauti platesnį greičio reguliavimo diapazoną, greitis mažinamas, mažinant įtampą, o didinamas – mažinant žadinimo srautą Φ_z [8].

Šis reguliavimo būdas labai paprastas, variklio greitis keičiamas sklandžiai. Kadangi žadinimo galia maža, tai nuostoliai reguliavimo reostate nedideli. Variklio naudingumo koeficientas išlieka didelis, todėl šis reguliavimo būdas yra ekonomiškai.

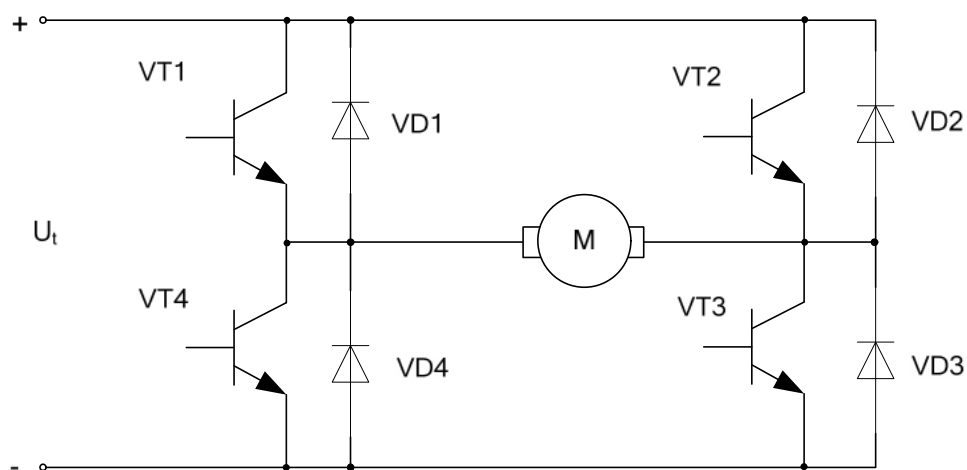
Impulsinė reguliuojamojo greičio nuolatinės srovės pavarą

Tokioje pavaroje variklis yra periodiškai prijungiamas ir atjungiamas komutuojančiu įrenginiu nuo įtampos arba periodiškai keičiami grandinės parametrai. Keičiant variklio įjungtos ar atjungtos būsenos trukmę, reguliuojamas jo sukimosi greitis. Impulsiniam reguliavimui, naudojant elektromechaninius komutatorius, pasireiškia daug esminių trūkumų (lėtaeigiškumas, trumpas jų amžius, ribotas įjungimų dažnis). Dabartiniu metu komutatoriaus funkcijas vykdo puslaidininkiniai prietaisai – tiristoriai ar tranzistoriai. Tokių pavarų geresni techniniai ekonominiai rodikliai.

Tranzistoriai skirstomi į: bipoliarus, MOSFET (angl. *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) ir IGBT (angl. *Insulated Gate Bipolar Transistors*). Šiuo metu vis plačiau naudojami IGBT tranzistoriai, jie turi platų galingumų diapazoną, tinkamą laidumo ir komutacijos dažnį, o tai leidžia žymiai supaprastinti šiuolaikinės dažnio keitiklių valdymą. MOSFET tranzistoriai iš čia paminėtų, mažiausios galios, bet turi didžiausią komutavimo dažnių diapazoną [14].

Impulsiniuose puslaidininkiniuose keitikliuose aukštas komutacijos dažnis (10-20 kHz), didelis naudingumo koeficientas [14, 33]. Todėl impulsinio reguliavimo nuolatinės srovės pavaros turi platų greičio reguliavimo diapazoną bei tikslumą, pereinamieji procesai pilnai tenkina technologinius reikalavimus. Impulsiniai keitikliai naudojami mažos galios precizinėse nuolatinės elektros pavarose [21, 27].

Norint turėti reversinę pavarą reikia keturių raktų, sujungtų tiltelio schema, kaip pavaizduota 4.11 paveiksle. Daug tokių mažos galios modulių viename korpuse gamina gerai žinomos užsienio firmos – *Texas Instruments*, *STMicroelectronics* (ULN2003, L293D). Jie pasižymi plačiomis valdymo įtampos ribomis, šiluminėmis bei iškrovos apsaugomis, integruotais vidiniais apsaugos diodais.



4.11 pav. Reversinės pavaros keturių raktų, sujungtų tilteliu, schema

Šiuo atveju raktai gali dirbti dviem režimais. Vieno režimo metu raktai VT1 ir VT3 veikia kartu, o raktai VT2 ir VT4 – priešinga faze, t. y, jei vienu laiko momentu VT1 ir VT3 yra sujungti ir viršutinis inkaro gnybtas prijungtas prie maitinimo šaltinio teigiamo poliaus, tai kitu laiko momentu sujungti yra raktai VT2 ir VT4, ir tas pats viršutinis inkaro gnybtas yra prijungtas prie neigiamojo maitinimo šaltinio poliaus. Tada vidutinė variklio gnybtų įtampa bus lygi:

$$U_{vid} = \frac{U_1(t_1 - t_2)}{T_K} = (2\varepsilon - 1) \cdot U_t. \quad (4.9)$$

Greičio ir mechaninės charakteristikos:

$$\omega_{vid} = \frac{(2\varepsilon - 1) \cdot U_t - I_{vid} \cdot R_i}{K}; \quad (4.10)$$

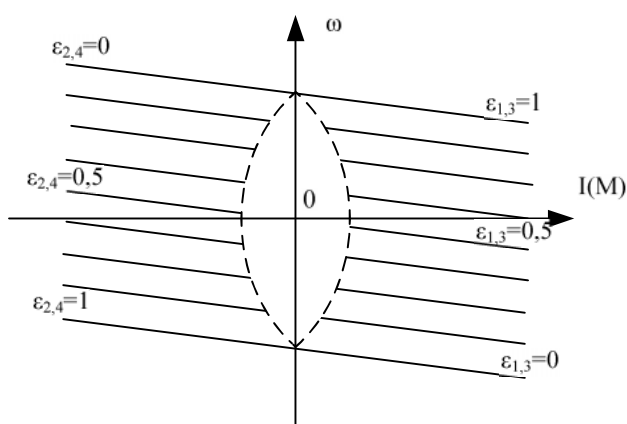
$$\omega_{vid} = \frac{2\varepsilon - 1}{K} \cdot U_t - \frac{R_i}{K^2} \cdot M. \quad (4.11)$$

Keičiant ε keičiamas sukimosi greitis ir jo kryptis. Kai $1 \geq \varepsilon > 0,5$, idealiosios tuščios veikos greitis $\omega_0 = (2\varepsilon - 1) > 0$, o kai $0,5 \geq \varepsilon \geq 0$, greitis yra priešingos krypties, t. y. $\omega_0 < 0$. Priimtina, kad nagrinėjamoju atveju ε rodo santykinę raktų VT1 ir VT3 uždarymo trukmę, t. y. $\varepsilon_{1,3}$ ir atitinkamai VT2 ir VT4 – $\varepsilon_{2,4}$, $\varepsilon_{2,4} = 1 - \varepsilon_{1,3}$. Charakteristikos, kai vienu metu komutuojami VT1, VT3 ir VT2, VT4 raktai, pateiktos 4.12 paveiksle, kuriame brūkšnine linija išskirta kintamosios srovės zona.

Šiuo atveju:

$$\omega_{rib} \approx \omega_0 \left(2\varepsilon - 1 - \varepsilon \frac{1 - \varepsilon}{2T_i} \cdot T_K \right); \quad (4.12)$$

$$I_{rib} \approx I_{t,j} \frac{\varepsilon(1 - \varepsilon)}{T_i \cdot f_k}. \quad (4.13)$$

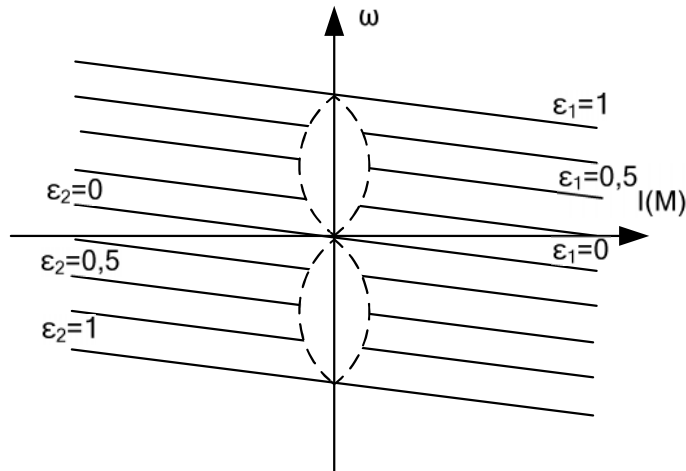


4.12 pav. Reversinės pavaros greičio (mechaninės) charakteristikos

Iš 4.14 formulės matyti, kad ribinė srovė padidėjo 2 kartus, todėl 2 kartus padidėjo ir srovės pulsacijos

$$\Delta I \approx 2I_{t,j} \frac{\varepsilon(1-\varepsilon)}{T_i \cdot f_K}. \quad (4.14)$$

Tai labai padidina energijos nuostolius variklio inkaro grandinėje. Juos galima sumažinti keičiant schemos raktų komutacijos tvarką. Charakteristikos, komutuojuant priešinga faze raktus VT1, VT4 ir VT2, VT3, pateiktos 4.13 paveiksle.



4.13 pav. Reversinės pavaros greičio (mechaninės) charakteristikos

Norint gauti priešingą sukimosi kryptį, priešingomis fazėmis jungiami raktai VT2 ir VT3, visą laiką palaikant uždara VT4 ir atvira VT1. Mechaninės charakteristikos tokiam režimui pateikiamos 4.13 paveiksle. Kintamos srovės zonos plotis, srovės pulsacijų dydis yra tokie pat, kaip ir nereversinės elektros pavaros atveju. Sudėtingesnė yra tik raktų valdymo schema [17, 27].

4.2. Nuotolinio valdymo būdai ir metodai

Sparčiai tobulėjant informacinėms technologijoms ir naujausioms telekomunikacinėms priemonėms vis daugiau prietaisų ir įrenginių yra valdomi nuotoliniu būdu (garažo durų, kiemo vartų, robotų pavaros). Tokiam valdymui nereikia tiesti laidų, nereikia specialios montavimo įrangos bei papildomų išlaidų joms prižiūrėti ir tikrinti. Ypač toks valdymas aktualus esant pavojingai aplinkai (sprogiose sąlygose veikiantys robotai, išminavimo robotai, Marso robotai).

Plačiausiai naudojamos ryšio technologijos ir jų naudojimo sritys:

1. **Bluetooth** – belaidžio ryšio gamybinė specifikacija, naudojama asmeniniuose tinkluose Bluetooth leidžia keisti informaciją tarp tokių įrenginių kaip delniniai ir paprasti asmeniniai kompiuteriai, mobilieji telefonai, nešiojami kompiuteriai, spausdintuvai ir skaitmeniniai fotoaparatai. Protokolas naudoja patikimą, visuotinai prieinamą artimojo ryšio trumpųjų radijo bangų diapazoną (nelicencijuotos 2,45 GHz), siekiant išvengti sąveikos su kitais tą patį dažnį naudojančiais protokolais. *Bluetooth* leidžia įrenginiams bendrauti iki 100 metrų atstumu vienas nuo kito, netgi jei jie yra skirtingose patalpose [7].

2. **IrDA** (angl. *the Infrared Data Association*) – belaidžio ryšio standartas, aprašantis duomenų keitimąsi nedideliu atstumu infraraudonaisiais spinduliais. IrDA naudojamas sujungiant tarpusavyje įvairius įrenginius: asmeninius ar delninius kompiuterius, mobiliuosius telefonus, periferinę įrangą. Veikimo nuotolis - iki septynių metrų. Veikimo zonoje tarp įrenginių neturi būti jokių kliūčių [8].

3. **Wi-Fi** (angl. *Wireless Fidelity*) bevielio ryšio technologija leidžia realizuoti duomenų perdavimo tinklus panaudojant plačiajuostį radijo ryšį. Wi-Fi bevielis ryšys naudoja DSSS (angl. *Direct Sequence Spread Spectrum*) ir OFDM (angl. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) radijo signalų moduliacijos technologijas. Wi-Fi technologija apibendrina IEEE 802.11 standartais reglamentuotas technologijas pateiktas 4.1 lentelėje, kurios yra visiškai suderinamos su labiausiai paplitusiomis personalinių, nešiojamų kompiuterių platformomis bei periferiniais įrenginiais [9].

4.1 lentelė. IEEE 802.11 protokolai

802.11 protokolas	Išleidimo metai	Dažnis, GHz	Maksimalus duomenų perdavimo greitis, Mbit/s	Didžiausias veikimo nuotolis, m
-	1997	2,4	2	100
a	1999	5	54	120
		3,7		5000
b	1999	2,4	11	140
g	2003	2,4	54	140
n	2009	2,4/5	72	230
			150	

Radijo dažniai Lietuvoje, pagal Nacionalinę radijo dažnių paskirstymo lentelę, paskirstyti nuo 9 kHz iki 275 GHz, ir suskirstyti į septynias grupes: labai žemo (LŽD), vidutinio (VD), aukšto (AD), labai aukšto (LAD), ultraaukšto (UAD), superaukšto (SAD), ypač aukšto (YAD). Lentelė yra dokumentas, kuriame nustatytas radijo dažnių paskirstymas radijo ryšio, įskaitant transliavimą, gamybos, mokslo, medicinos ir kitiems poreikiams [13].

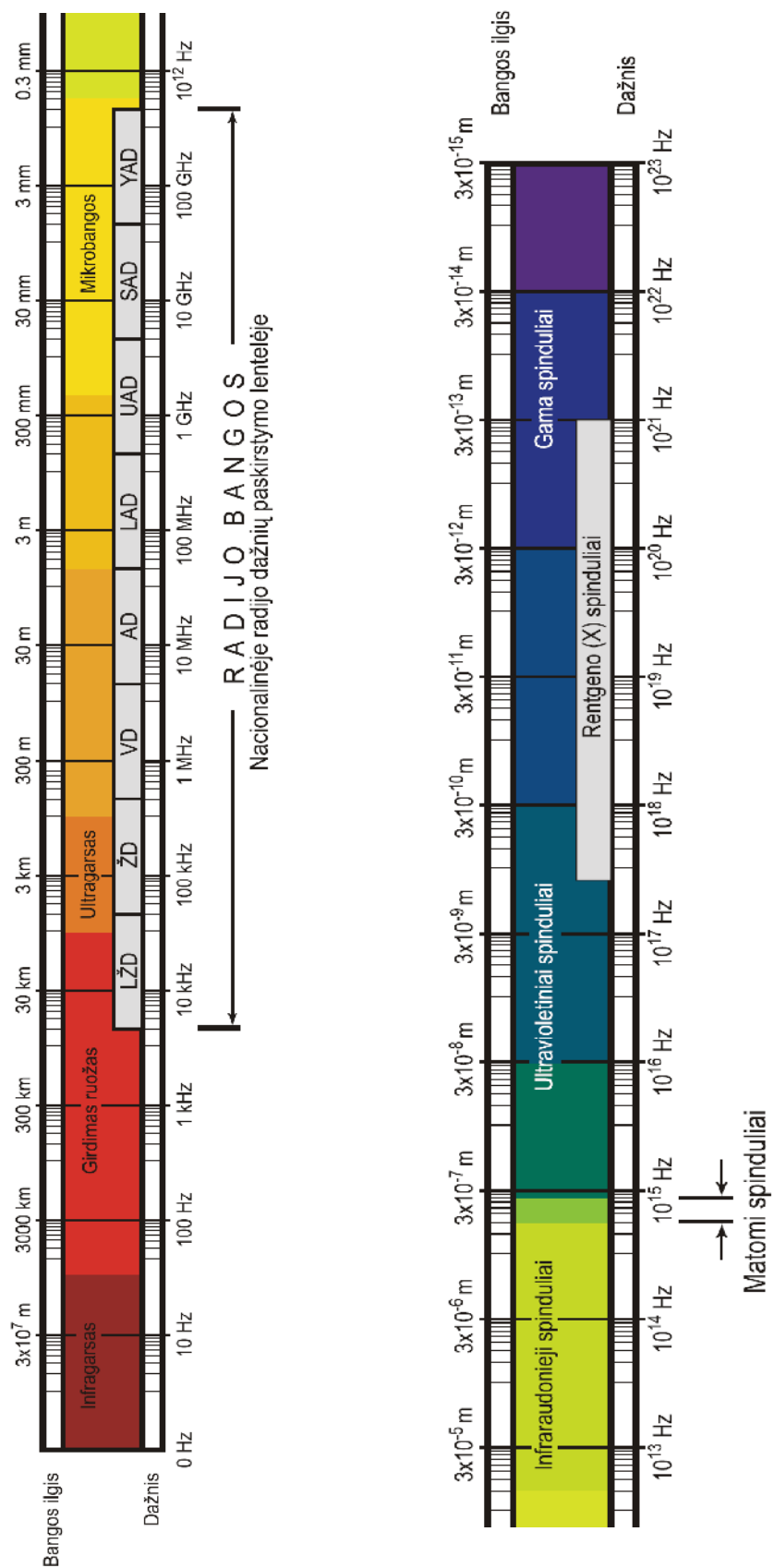
Radijo dažnių (kanalų), kuriuos galima naudoti be atskiro leidimo, sąrašas nustato, kokie radijo dažniai (kanalai) gali būti naudojami be atskiro leidimo ir nustato tų radijo dažnių (kanalų) naudojimo sąlygas. Teisės naudoti radijo dažnius (kanalus) be atskiro leidimo suteikimas supaprastina ir palengvina verslo sąlygas radijo dažnių (kanalų) naudotojams, įrangos teikimą į rinką – gamintojams [4, 5].

4.2 lentelė. Radijo modulių RX433, TX433 naudojimo sąlygos

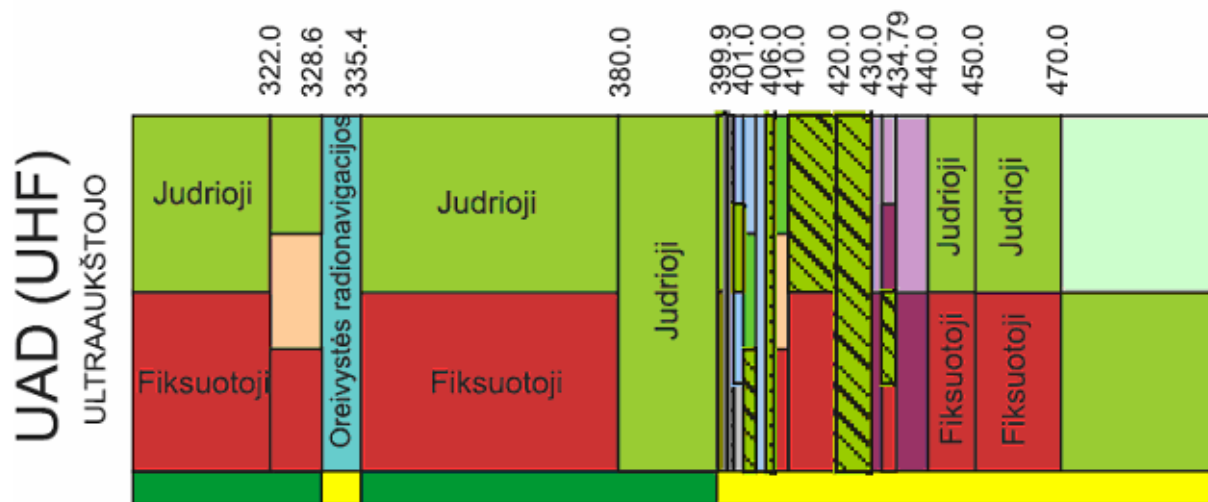
Radijo dažniai	Paskirtis (radijo ryšio įrenginiai, veikiantys radijo dažniais)	Radijo dažnių (kanalų) naudojimo sąlygos	Susiję teisės aktai, standartai ir kiti dokumentai
433,05–434,04 MHz	Nespecifinės paskirties mažojo nuotolio radijo ryšio įrenginiai	Efektyvioji spinduliuotės galia – ne daugiau kaip 1 mW; galios tankis – ne daugiau kaip 13 dBm/10 kHz, esant didesniai kaip 250 kHz moduluojančio signalo juostos pločiui; neleidžiama naudoti garso, balso ir vaizdo signalams perduoti.	2008/432/EB, 2006/771/EB, LST EN 300 220.

Induktyviniai mažojo nuotolio radijo ryšio įrenginiai – (angl. *inductive applications*) mažojo nuotolio radijo ryšio įrenginiai, tokie kaip automobilių imobilizavimo, gyvulių atpažinimo įrenginiai, signalizacijos sistemos, kabelių suradimo, atliekų tvarkymo, asmens atpažinimo, balso perdavimo belaidžiu ryšiu, prieigos kontrolės įrenginiai, artumo jutikliai, apsaugos nuo vagystės sistemos, įskaitant radijo dažnius naudojančias apsaugos nuo vagystės sistemas, duomenų perdavimo į nešiojamus įrenginius sistemos, automatiniai nuskaitymo įrenginiai, belaidės valdymo sistemos, automatinio kelių mokesčio rinkimo įrenginiai.

Mažojo nuotolio radijo ryšio įrenginys – (angl. *Short range device*) mažais atstumais veikiantys nedidelės galios siųstuvai, leidžiantys naudotis vienakrypčiu arba dvikrypčiu ryšiu, skirti bet kuriems naudojimo būdams, atitinkantiems 4.2 lentelėje nurodytas sąlygas (paprastai naudojami telemetrijos, nuotolinio valdymo, signalizacijos, bendrojo duomenų perdavimo ir panašioms tikslams) [4].



4.14 pav. Radijo bangų spektras



4.15 pav. Radijo modelių veikimo dažnis

Elektronikoje moduliacija – tai aukšto dažnio periodinių bangų savybių kitimas, atsižvelgiant į reguliuojamą signalą.

Telekomunikacijose moduliacija – tai procesas, kuris perteikia pranešimą signalu, pavyzdžiui skaitmenine bitų seka (srautu) ar analoginiu garso signalu, į signalą, kuris gali būti perduotas fiziškai.

Moduliavimo rūšys:

1. Analoginė moduliacija;
2. Skaitmeninė moduliacija.

Analoginė moduliacija (angl. *analog modulation*) – tai analoginio signalo parametrų (amplitudės, dažnio ir fazės) keitimas koduojant siunčiamą skaitmeninę informaciją. Moduliuojamas analoginis signalas vadinamas nešančiuoju signalu arba nešančiuoju dažniu. Analoginė moduliacija dažniausiai taikoma skaitmeniniam signalui perduoti analoginio ryšio linijomis.

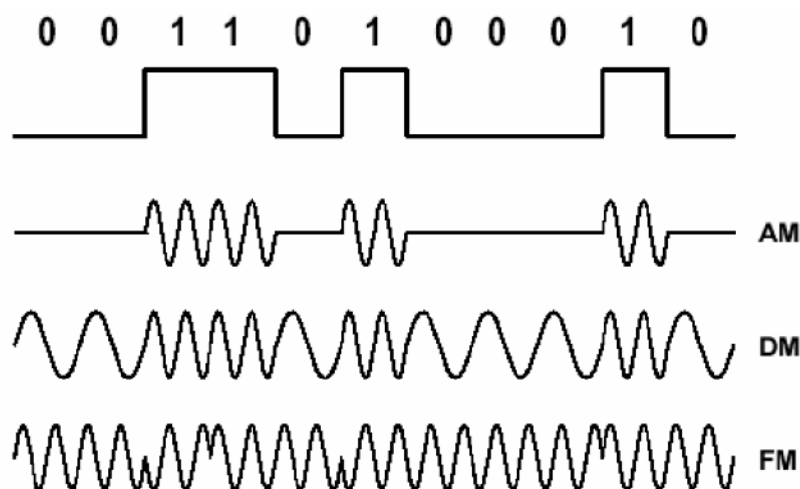
Pagrindiniai analoginės moduliacijos būdai:

1) Amplitudė moduliacija (AM). Nešančiojo signalo amplitudė kinta pagal kintančio signalo momentinę amplitudę. Naudojant amplitudinę moduliaciją skaitmeninio signalo loginiai lygiai keičiami į skirtingos amplitudės periodinius analoginius signalus. Nešančio signalo dažnis dar vadinamas informacinio parametro kitimo greičiu ir matuojamas boudais (angl. *boud*).

2) Dažnio moduliacijos (FM). Čia nešančiojo (pagrindinio) signalo dažnis kinta priklausomai moduliuojamo signalo dažniui. Naudojant dažninę moduliaciją skaitmeninio signalo loginiai lygiai keičiami į skirtingo dažnio periodinius analoginius signalus [6, 37].

3) Fazės moduliavimas (PM). Čia nešančiojo signalo fazės poslinkis kinta pagal moduluojamo signalo poslinkį. Naudojant fazinę moduliaciją, pereinant iš vieno skaitmeninio signalo loginio lygio į kitą, keičiama periodinio analoginio signalo fazė.

Analoginės moduliacijos būdų palyginimas pateiktas 4.16 paveiksle.



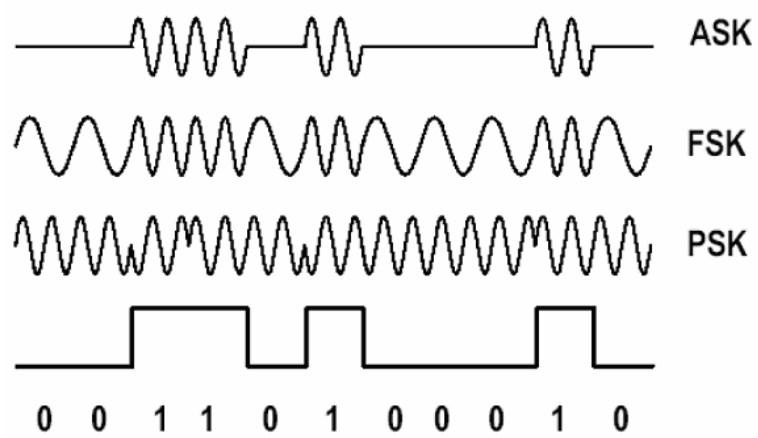
4.16 pav. Amplitudinės, dažninės, fazinės moduliacijos principas

Skaitmeninės moduliacijos (angl. *digital modulation*) metu analoginis nešlio signalas yra moduluojamas skaitmeniniu bitų srautu. Todėl skaitmeninės moduliacijos metodus galima laikyti analoginio signalo į skaitmeninį keitimu.

Dažniausiai naudojamos skaitmeninės moduliacijos būdai:

- 1) Fazės manipuliacija (angl. *Phase-shift keying, PSK*);
- 2) Dažnio manipuliacija (angl. *Frequency-shift keying, FSK*). Tai paprastai būna mažo našumo, pigūs, asinchroniniai modems skirti ryšiui, analoginėmis ryšio linijomis;
- 3) Amplitudės manipuliacija (angl. *Amplitude-shift keying, ASK*). Šiame tyrime naudojami moduliai naudoja būtent šį metodą;
- 4) Amplitudinė kvadratinė moduliacija (angl. *Quadrature amplitude modulation, QAM*). Tai skaitmeninės moduliacijos būdas, kai skaitmeninė informacija yra perduodama nešlio amplitudėje ir fazėje [36, 37].

Skaitmeninės moduliacijos būdų palyginimas pateiktas 4.17 paveiksle.



4.17 pav. Skaitmeninės moduliacijos principas

4.3. Greičio matavimo būdai

4.3.1. Variklio greičio jutikliai

Uždaroje variklio greičio ir pozicionavimo sistemose greičio ir padėties grįžtamasis ryšys su besisukančia sistema realizuojamas keitikliu, kuris mechaninį greičio ar padėties išraiškos dydį keičia į elektrinį, o pastarasis lengvai suderinamas su valdymo sistema.

Dažniausiai naudojami keitikliai:

- Analoginis greičio keitiklis, tai tachogeneratorius, kuris sukimosi greitį keičia į įtampą, o pastaroji yra proporcinga greičiui;
- Skaitmeninis greičio keitiklis, tai sukamasis prieaugio kodavimo įrenginys (angl. *Rotary incremental encoder*), kuris greitį keičia į seriją impulsų, kurių dažnis proporcingas greičiui. Impulsai valdymo sistemai perduodami viena arba keliomis poromis ekranuotų kabelių;
- Skaitmeniniai pozicijos keitikliai, sukamasis absoliutusias kodavimo įrenginys (angl. *rotary absolute encoder*); jis poziciją keičia į bitinį kodą, kurio reikšmė atitinka kampinę padėtį. Toks kodas į valdymo sistemą perduodamas skaitmeniu būdu per įvairias komunikacines priemones.

Analoginiai greičio keitikliai keičiami skaitmeniniais, kadangi juos lengviau suderinti su šiuolaikine skaitmenine valdymo sistema.

Visi minėtieji greičio keitikliai yra mechaniniai, todėl laikui bėgant tikimybė, kad jie suges arba vis didės jų paklaida, taip pat didėja. Taip pat, tokie keitikliai nėra patikimi naudoti agresyviomis sąlygomis, nes patekę nešvarumai gali smarkiai sutrikdyti keitiklio darbą. Be to, tokiems keitikliams įjungti į sistemą reikalingi kabeliai, kurie kartais gali būti gedimo priežastimi (pvz., vizualiai nepastebimas nutrūkimas) bei didina sistemos kainą [40].

4.3.2. Tachogeneratoriai

Tachogeneratoriais (angl. *tachogenerator*, *tacho*) vadinamos elektros mikromašinos, kurių išėjimo įtampa yra proporcinga jų sukimosi greičiui. Tachogeneratoriaus pavadinimas yra kilęs iš graikų kalbos žodžio *ταχος* (*tachos*), reiškiančio greitį, greitumą [20].

Tachogeneratoriai dažniausiai būna nedidelių matmenų, palyginti su variklio gabaritais, ir montuojami prie variklio veleno. Būtina atkreipti dėmesį į variklio ir tachogeneratoriaus velenų sujungimo vietos išcentravimą, kad būtų išvengta problemų ateityje atliekant techninės priežiūros darbus. Tinkamai nepritaikius ir neišcentravus velenų, gali atsirasti vibracijos, dėl kurių atsiras didesnės matavimo paklaidos, taip pat sumažės šepėčių mazgo eksploatacijos trukmė.

Tachogeneratoriai naudojami:

1. Sukimosi greičiui matuoti. Sujungus tachogeneratorių su matavimo prietaisu, gaunamas sukimosi greičio matuoklis – tachometras. Matavimo prietaisas graduojamas sukimosi greičio vienetais, dažniausiai aps/min;
2. Automatinio reguliavimo ir valdymo sistemose – greičio neigiamajam grįžtamajam ryšiui sudaryti;
3. Vykdomųjų variklių rotorų virpesiams slopinti;
4. Diferencijavimo bei integravimo operacijoms vykdyti.

Kad tachogeneratoriai galėtų atlikti tokias funkcijas, jiems keliama šie reikalavimai: tiesiška ir stabili išėjimo charakteristika, didelis perdavimo koeficientas, simetriška išėjimo įtampa ir minimali nuolatinės srovės tachogeneratorių nejautrumo sritis, kuo mažesnės išėjimo įtampos pulsacijos, mažas inkaro (rotoriaus) inercijos momentas, maža elektromechaninė laiko pastovioji, maža masė ir matmenys.

Šie reikalavimai priklauso nuo tachogeneratoriaus paskirties. Jeigu tachogeneratoriai naudojami greičio grįžtamojo ryšio grandinėse arba sekimo sistemų virpesiams slopinti, tai svarbiausias rodiklis yra didelis perdavimo koeficientas (išėjimo charakteristikos statumas), o jos tiesiškumas – antraeilis dalykas. Tačiau naudojant tachogeneratorius diferencijavimo arba integravimo operacijoms vykdyti yra atvirkščiai – svarbiausias rodiklis yra išėjimo charakteristikos tiesiškumas ir jos stabilumas.

Kadangi elektros mašinose generuojamoji elektrovara yra proporcinga sukimosi greičiui, tai tachogeneratoriais gali būti įvairių tipų elektros mašinos: nuolatinės srovės, asinchroninės, sinchroninės ir induktorinės. Automatikoje dažniausiai naudojami nuolatinės ir kintamosios srovės tachogeneratoriai [20].

Nuolatinės srovės tachogeneratoriai yra įprastinės konstrukcijos nuolatinės srovės mašinos, kurių magnetinį srautą kuria žadinimo apvija, maitinama iš nuolatinės įtampos šaltinio, arba nuolatiniai magnetai [20]. 4.18 pav. parodytas nuolatinės srovės tachogeneratorius.



4.18 pav. *Radio Energy* firmos tachogeneratorius

Kai kurie tachogeneratorių konstrukcijos ypatumai: inkaro grioveliai dažniausiai pasukami per vieną griovelio žingsnį (sumažėja magnetinio srauto pulsacija), polių ir inkaro magnetolaidžiai gaminami iš elektrotechninio plieno lakštų, didelis kolektoriaus plokštelių skaičius, specialūs šepečiai [20].

Tachogeneratoriaus išėjimo įtampos vertė priklauso nuo kai kurių konstrukcijos bei technologijų ypatumų, į kuriuos reikia atsižvelgti projektuojant ir perkant tachogeneratorius konkreitiems tikslams. Tai susiję su paklaidomis, kurias galimas sumažinti arba jų išvengti, jeigu bus aiškos jų atsiradimo priežastys [20].

Pagrindinės nuolatinės srovės tachogeneratorių paklaidos:

- 1) apkrovos varžos įtaka;
- 2) tiesiškumo paklaida;
- 3) kalibravimo paklaida;
- 4) šepečių kontakto varžos įtaka;
- 5) inkaro reakcijos įtaka;
- 6) išėjimo įtampos asimetrija.

Bendruoju atveju tachogeneratorių tikslumą lemia kolektoriaus ir šepečių mazgas. Senesnio modelio tachogeneratorių kolektoriai buvo gaminami iš vario, o šepečiai iš grafito, todėl kolektoriaus

paviršiuje susidarydavo vario oksido sluoksnis, kurio pereinamoji varža yra nepastovi ir negalima tiksliai nustatyti mažų sukimosi greičių, padidėja išėjimo įtampos pulsacijos.

Kintamosios srovės tachogeneratoriai yra labai panašūs į nuolatinės srovės tachogeneratorius, skirtumas tas, kad kintamos srovės tachogeneratoriaus išėjime gaunama kintama įtampa, kuri tiesiogiai proporcinga variklio sukimosi greičiui. Dažniausiai, valdymo sistemoje, kintama išėjimo įtampa yra išlyginama (angl. *rectified*) ir keičiama į nuolatinę įtampą. Kintamos srovės tachogeneratoriai yra netinkami įrenginiams, kurie keičia savo sukimosi kryptį, nes išlygintos įtampos poliškumas gali būti tik teigiamas arba neigiamas. Esant mažiems greičiams įtampos signalo pastebimos didelės pulsacijos, ko pasekoje kintamosios srovės transformatoriai tampa netinkami naudoti mažų greičių įrenginiuose. Dėl savo trūkumu kintamosios srovės tachogeneratoriai retai naudojami kintamo greičio įrenginiuose.

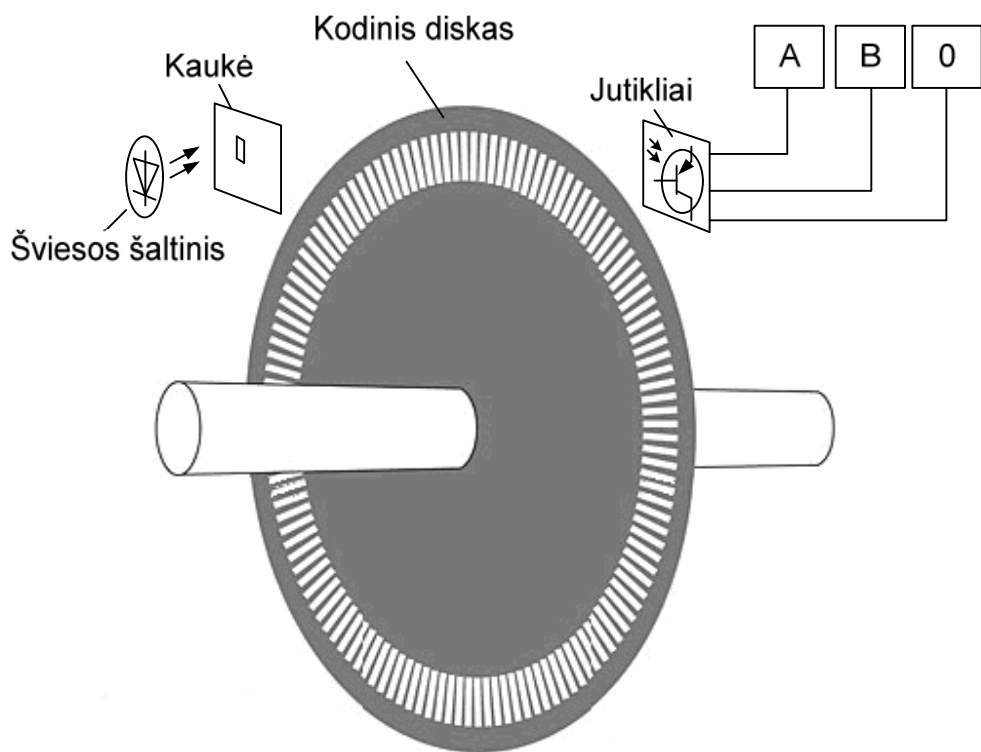
Apibendrinant galiam daryti išvadą, kad pagrindiniai tachogeneratorių trūkumai, ribojantys jų panaudojimą, būtų kolektoriaus ir šepečių mazgas bei nestabilus darbas mažų greičių diapazone.

4.3.3. Sukimosi greičio ir padėties enkoderiai

Enkoderis (angl. *encoder*) yra analoginis arba skaitmeninis keitiklis, kurio išėjime gaunamas analoginis signalas arba tam tikras impulsų skaičius, proporcingas sukimosi greičiui, posūkio kampui arba nueitam atstumui. Enkoderio pagalba galime nustatyti variklio sukimosi greitį, veleno pasisukimo kampą ar mechanizmo nueitą atstumą. Enkoderis gali būti sukusis arba tiesiaiegis, išėjimo signalas skaitmeninis arba analoginis, kintantis sinuso ar kosinuso dėsnio [20].

Jautriojo matavimo elemento darbas pagrįstas optiniu veikimo principu.

Optinio elektroninio enkoderio veikimo principas pateiktas 4.19 paveiksle.



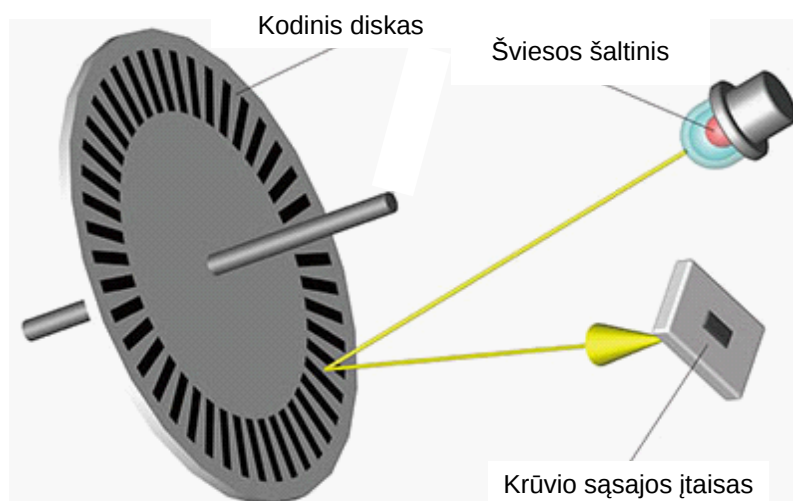
4.19 pav. Optinis enkoderis

Pagrindiniai enkoderio konstrukcijos elementai: kodinis diskas, šviesos šaltinis, kaukė, jutikliai, A ir B išėjimai bei atskaitos signalo O kanalas. Kaip šviesos šaltinis ir jutikliai naudojami šviesos diodai. Naudojami įvairių bangų ilgių diodai, tačiau dėl mažesnės saulės šviesos įtakos naudojami infraraudonųjų spindulių (IR) diodai. Jie būna kelių rūšių:

1. Infraraudonųjų spindulių (IR) diodai ir IR fotodetektoriai. Tai pats paprasčiausias sprendimas impulsų fiksavimui. Didelis tokių jutiklių trūkumas – jiems didelę įtaką turi šviesa, todėl impulsų fiksavimas yra sudėtingas.

2. Moduluoto signalo IR jutikliai. Jie spinduliuoja moduluotą IR šviesą ir „mato“ tik to pačio dažnio moduluotą šviesą. Tokiems jutikliams šviesa turi labai mažai įtakos. Jų trūkumas – reikalingas taktavimo šaltinis, kadangi diodai dažniausiai veikia 38 kHz diapazone.

3. Trianguliaciniai IR jutikliai. Juose atsispindėjęs nuo objekto IR spindulis patenka į krūvio sąsajos įtaisą (angl. *charge coupled device*) ir elektronika apskaičiuoja atstumą iki objekto. Tokie jutikliai beveik absoliučiai nejautrūs aplinkos šviesai ir objekto spalvai. Enkoderis su tokiais jutikliais pateiktas 4.20 paveiksle [12, 25, 35].



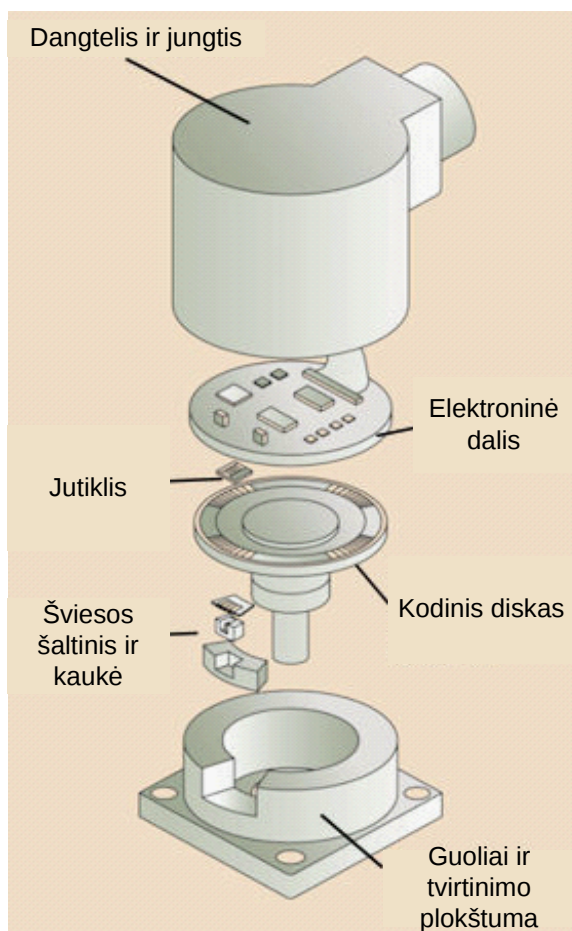
4.20 pav. Enkoderis su trianguliaciniu jutikliu

Kodinis diskas plastmasinis arba stiklinis, priklausomai nuo prietaiso klasės. Paprasčiausiems enkoderiams, montuojamiems į spausdintuvus, naudojamas plastmasinis diskas su uždažytais juodais brūkšneliais. Tiksliuose prietaisuose ant stiklinio disko brūkšneliai padaromi elektrocheminiu būdu. Bet kokių atveju matavimui skirta disko radialinė juosta padalijama į šviesai laidžius ir nelaidžius tarpelius. Kaip matyti principinėje schemoje, vienoje kodinio disko pusėje randasi šviesos šaltinis, kitoje – jutiklis. Kaukė suformuoja siaurą šviesos spindulių pluoštelį, kuris praeinant per kodinį diską yra moduluojamas ir jutiklio keičiamas į elektrinį signalą. Toliau elektriniai signalai yra apdorojami ir, esant reikalui, keičiami į valdymo schemoms priimtina lygį bei koduotę. Enkoderio signalai gali būti tiesiogiai perduodami skaičiavimo įtaisui arba tinkliniu įrenginiu perduodami į valdymo sistemos kompiuterius. Kadangi nuo enkoderio sudėtingumo ir jo matavimo bei ryšių galimybių priklauso jo kaina, gaminami įvairaus sudėtingumo prietaisai [20, 39].

Optinio enkoderio konstrukcija pateikta 4.21 paveiksle.

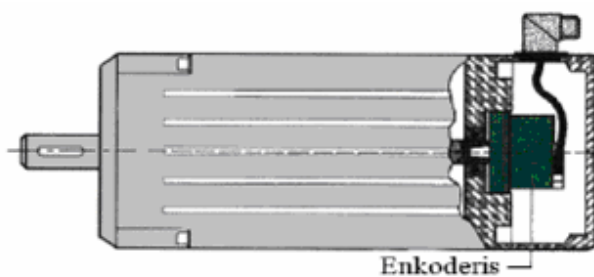
Ją sudaro šviesos šaltinis, kodinis diskas, jutiklis, elektroninė dalis, tvirtinimo ir konstrukcijos detalės.

Paprasčiausi enkoderiai yra vieno išėjimo kanalo. Tokie enkoderiai negali nustatyti veleno sukimosi krypties. Krypčiai nustatyti reikalingas dviejų kanalų prietaisas. Sudėtingiausias ir universaliausias būtų trijų kanalų enkoderis, kuriame trečias kanalas naudojamas kaip atskaitos signalas. Toks enkoderis gali matuoti posūkio kampą, sukimosi kryptį ir sukimosi dažnį.



4.21 pav. Optinio elektroninio enkoderio konstrukcija

Yra enkoderio konstrukcijų su reduktoriais ir keletu kodinių diskų. Prie variklio veleno enkoderis dažnai montuojamas bendrame korpuse, kaip parodyta 4.22 paveiksle.



4.22 pav. Enkoderio montavimas

Šiuo metu naudojami prieauginiai ir absoliutieji optiniai elektroniniai enkoderiai.

Prieauginiai optiniai elektroniniai enkoderiai

Prieauginiai enkoderiai (angl. *incremental encoder*) yra optiniai elektroniniai matavimo keitikliai, kurių veleno sukimosi greičio arba kampinės padėties vertė gaunama sumuojant matavimo prieaugius. Kodinis diskas turi ne vieną, o kelis takelius: matavimo ir atskaitos su radialiais brūkšneliais. Šviesos šaltinio spinduliuojama šviesa yra sukoncentruojama lęšio ir optinė kaukė dalina į keletą atskirų pluoštelių, nukreipiamų į kodinio disko takelius. Kiekvienam šviesos pluošteliui skirtas atskiras šviesos elementas, kuris, sukantis kodiniam diskui, moduliuoja šviesą į elektrinį signalą.

Šviesos elementų išėjimuose gaunami keturi matavimo signalai ir vienas atskaitos. Jų fazės skiriasi 90° . Toliau signalai sumuojami ir gauname du sinusinius signalus, kurių tarpusavio fazė yra 90 laipsnių. Kadangi signalų tarpusavio fazė priklauso nuo veleno sukimosi krypties, tai elektroninių loginėmis schemomis galime išrinkti signalus, kurių dažnis, fazė ir amplitudė priklausys nuo kontroliuojamo įrenginio sukimosi greičio bei krypties ir signalai turės TTL lygio stačiakampę formą.

Enkoderio veikimo tikslumą nulemia jo konstrukcinės savybės. Kuo daugiau kodiniame diske sužymėta brūkšnelių, tuo mažesnę pasisukimo kampą fiksuos prietaisas. Tačiau esant dideliame žymių tankiui, labai greit kyla reikalavimai kodinio disko kokybei. Todėl kodinio disko kokybė lemia viso enkoderio kokybę ir, žinoma, kainą. Paprastai enkoderis parenkamas pagal reikiamą kampinių ar tiesiaiegių poslinkių tikslumą ir reikiamą impulsų dažnį [20, 39].

Absolūtieji optiniai elektriniai enkoderiai

Absolūtieji enkoderiai (angl. *absolute encoder*) yra optiniai elektroniniai matavimo keitikliai, kuriuose veleno kampinės padėties vertė gaunama tiesioginio nuskaitymo būdu nesumuojant pavienių matavimo prieaugių.

Skirtingai negu prieauginiai enkoderiai, turintys vieną matavimo takelį, absolūtieji turi daugelį takelių, kurių kiekis priklauso nuo matavimo tikslumo. Kodinio disko padėties informacija nuskaitoma dviem taktais, tai yra kiekviename takelyje turi suveikti du jutikliai ir tik tada fiksuojamas informacijos pasikeitimas. Tai atliekama pasitelkus logines schemas.

Absolūtieji enkoderiai daugiausia naudojami įrenginiuose, kur matavimo velenas juda vieno apsisukimo ribose. Jeigu būtina, kad matavimas vyktų esant didesnėms apsuksoms, naudojami reduktoriai. Kadangi skaičiavimas vyksta dvejetainiu pagrindu ir esant didesniems reikalavimams tikslumui, būtina turėti atitinkamą kiekį matavimo takelių [20, 39].

Veikiant absoliučiam enkoderiui, gauname tam tikro skaičiaus, atitinkančio enkoderio veleno padėtį, dvejetainį kodą. Šis skaičius gali būti klaidingas, kadangi sunku sinchronizuoti perėjimus nuo vieno sektoriaus prie kito. Todėl yra naudojami įvairūs papildomi kodavimo būdai, kuriais padidiname nuskaitymo tikslumą ir patikimumą.

Optinių enkoderių trūkumai:

1. Kodinis diskas esant vibracijoms ar patekus pašaliniais daiktams gali deformuotis ar sulūžti;
2. Netikslumas dėl guolių esant smūgiams;
3. Neatsparumas dėl vandens, nešvarumų.

Magnetiniai enkoderiai

Magnetinis informacijos nuskaitymas naudojamas prieauginiuose enkoderiuose, kurie ant nuskaitymo juostos ar žiedo turi kietamagnetės medžiagos padalas. Kodinė plokštelė ar diskas turi specialias juostas, kurių varža priklauso nuo magnetinio lauko stiprio. Toks magnetinis laukas fiksuojamas magnetiniais varžiniais arba Holo jutikliais.

Pirmieji jutikliai sudaryti iš puslaidininkinės plokštelės ir prie jos pritvirtintų kontaktų. Tekant srovei, pagrindiniai krūvininkai, veikiami magnetinio lauko, pasislenka prie kurios nors iš plačiosios plokštelės plokštumos, krūvininkų rekombinacijos greitis padidėja ar sumažėja ir pasikeičia jų skaičius, dalyvaujantis pernešant krūvį, todėl pasikeičia ir visos plokštelės varža, o kartu ir įtampos kritimas plokštelėje. Šis įtampos kritimo pokytis beveik tiesiškai proporcingas magnetinio lauko indukcijai ir pratekančios srovės stiprumui [18, 20, 21].

Holo jutikliai sudaryti iš puslaidininkinės plokštelės ir elektrodų. Tekant srovei, atitinkamo ženklo krūvininkai, veikiami magnetinio lauko, pastumiami prie elektrodų, todėl tarp šių elektrodų sukuriama potencialų skirtumas – Holo elektrovaros jėga, kuri mažai priklauso nuo srovės ar magnetinės indukcijos dažnio.

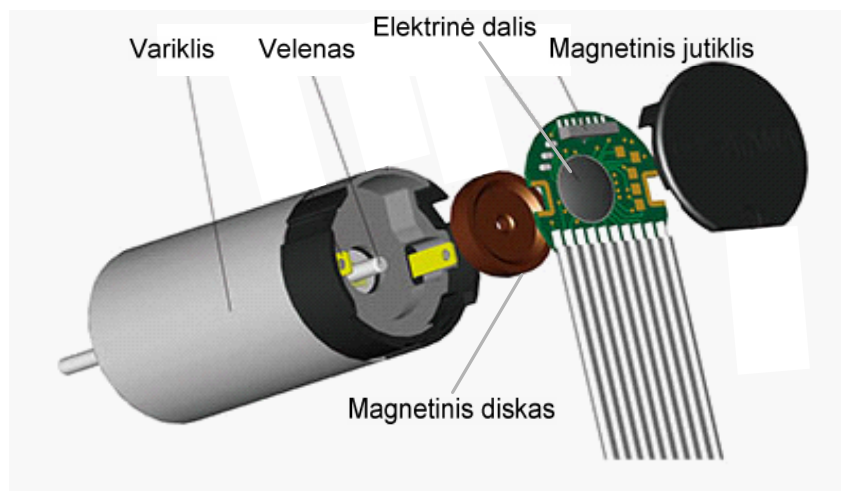
Magnetinis enkoderis pateiktas 4.23 paveiklėse.



4.23 pav. Avtron firmos magnetinis enkoderis

Tokio tipo sukimosi greičio matavimo prietaisai paprasti, ilgaamžiški ir tikslūs. Lengvai prijungiami prie skaitmeninių matavimo ir reguliavimo sistemų. Esant reikalui jutiklį galima patalpinti reduktoriuje prie darbinių krumpliaračių arba tiesiogiai prie variklio veleno korpuso viduje. Išėjimo signalas silpnėja mažinant sūkius. Kadangi prietaiso veikimas remiasi magnetinio lauko pokyčiu, būtina saugotis trikdančių magnetinių laukų. Holo jutikliai yra pigesni už magnetinius varžinius, tačiau turi didesnę išėjimo signalo paklaidą.

Magnetinio enkoderio montavimas pateiktas 4.24 paveiksle.



4.24 pav. Variklis, su įmontuotu magnetiniu enkoderiu

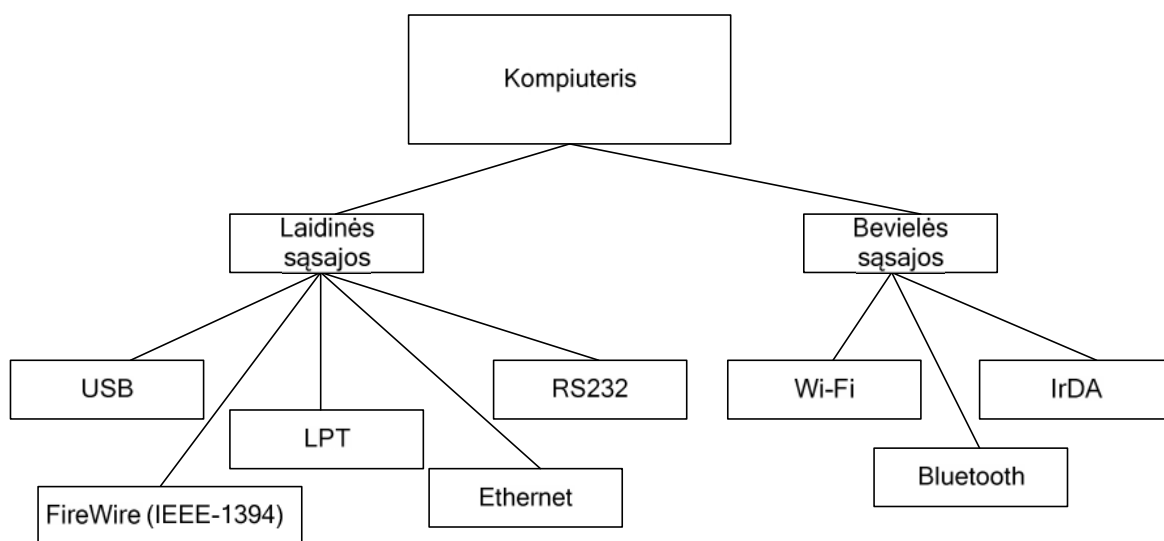
Šie enkoderiai pigesni, jų ilgesnė eksploatavimo trukmė, nei optinių enkoderių. Magnetiniai enkoderiai neturi paklaidos dėl įvairių nešvarumų, dulkių, vandens, o tikslumas toks pat kaip optinių enkoderių. Trūkumas – kelis kartus mažesnis impulsų skaičius per apsisukimą, lyginant su optiniais enkoderiais.

4.4. Elektros pavaros valdymas kompiuteriu

Šiuo metu daugėja įrenginių ir elektros pavarų valdymo sistemų, kur vietoj valdiklio naudojamas asmeninis kompiuteris. Toks būdas gali būti naudojamas ir nuotolinio valdymo įrenginių ir pavarų sistemose. Yra daugybė būdų ir galimybių valdyti įrenginius nuotoliniu būdu. Pagrindiniai nuotolinio valdymo būdai:

1. Valdymas internetu;
2. Valdymas radijo bangomis (įvairūs IR, RC pulteliai, valdymas GSM ryšiu).

Kompiuteris valdomų įrenginių informaciją gauna ir perduoda sąsajomis. Pagrindinės nuotolinio valdymo kompiuteriu, sąsajos pateiktos 4.25 paveiksle.



4.25 pav. Nuotolinio valdymo kompiuteriu, sąajos

Tačiau norint valdyti įtaisus kompiuteriu vien tik jo neužtenka. Duomenų perdavimui ir kitoms įvairiausioms operacijoms (grįžtamojo ryšio nustatymui, indikacijai, variklių valdymui) atlikti naudojami mikrovaldikliai. Jie susieja kompiuterį su valdikliu per vieną ar kelias iš 4.24 paveiksle paminėtų sąsajų. Valdomo įtaiso susiejimas su kompiuteriu laidinėmis sąsajomis nereikalauja daug papildomos įrangos. Pavyzdžiui, mikrovaldiklį sujungti su kompiuteru LPT sąsaja galima tiesiogiai, kadangi daugumos valdiklių loginiai lygiai sutampa. O tiems mikrovaldikliams, kurių loginiai lygiai nesutampa, galima keisti maitinimo įtampą, tuomet keisis ir loginiai lygiai. RS232 signalų lygiams reikalingas IG MAX232 keičiantis į TTL lygių signalus [15]. Sudėtingesnis valdymas USB ir Ethernet sąsajomis, kadangi reikalingi valdikliai, palaikantys šias sąsajas, tačiau jų kaina ir programavimas nusprendžia tolesnę projekto eigą.

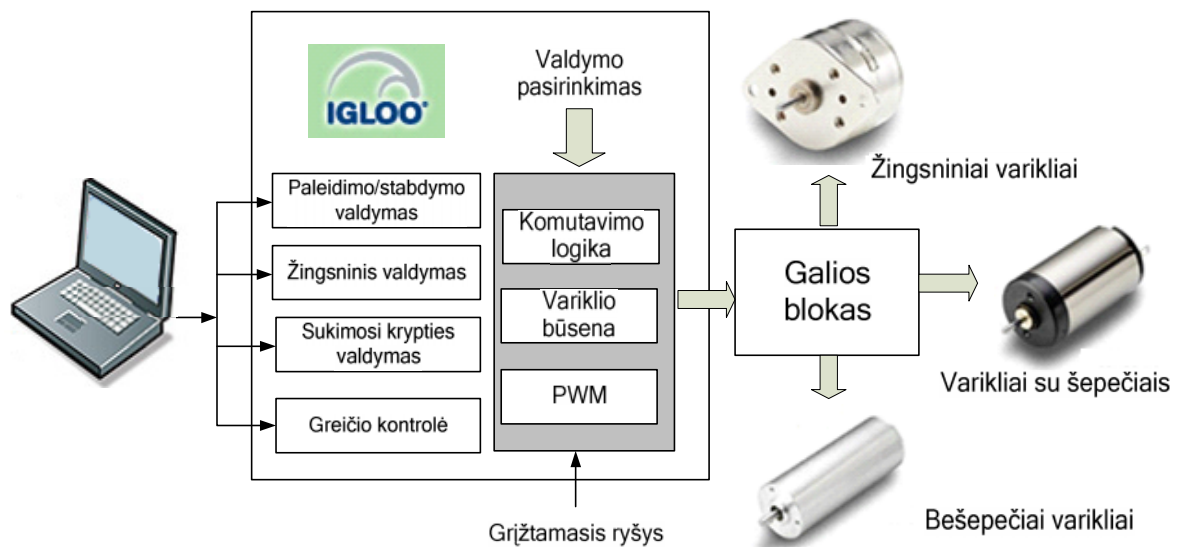
Skirtingai nuo laidinių sąsajų, valdymas bevieliu būdu reikalauja papildomų išlaidų. Pagrindinis šio valdymo komponentas – ryšio modulis. Kalbant apie Wi-Fi, Bluetooth, IrDA technologijas, šiuolaikiniuose nešiojamuose kompiuteriuose yra integruoti moduliai, kurie palengvina valdymo procesą nuotoliniu būdu. Tada reikalingas tik imtuvas, sujungtas su valdomu įtaisu, kuris siunčiamus signalus paverčia mikrovaldikliui suprantamu, šiuo atveju skaitmenine kodų seka.

Šiuo metu yra daug įvairių gabaritų ir galingumo variklių valdymo plokščių (angl. *Motor control boards*), kuriose yra integruoti:

1. Galios modulis, pasižymintis mažais energijos nuostoliais;
2. Galvaninis atskyrimas;
3. Indikacijos (variklio sukimosi krypties, maitinimo, valdymo signalų) elementai;

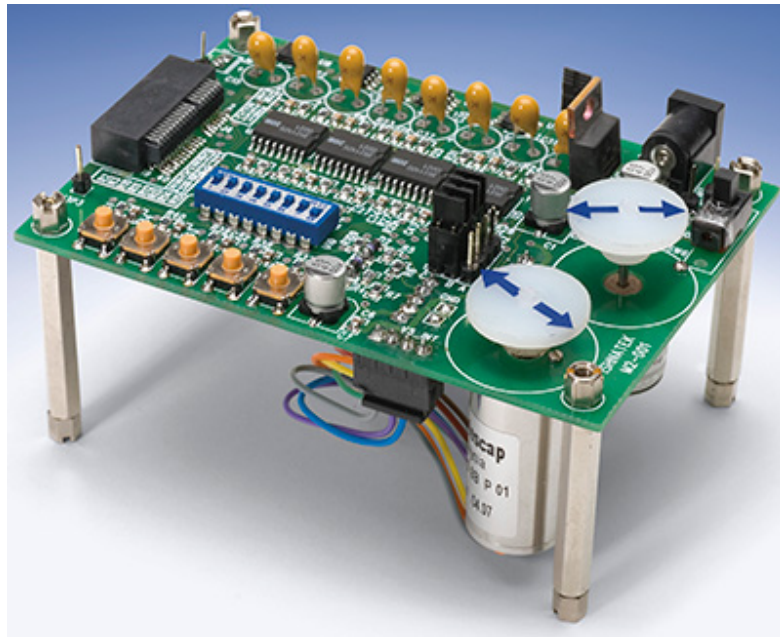
4. Sukimosi greičio ir krypties valdymo modulis;
5. Skaitmeninė sąsaja, suderinama su daugeliu kompiuterių ir mikrovaldiklių, skirta nustatyti sukimosi greitį, momentą ir kitus parametrus realiu laiku.

Tokios plokštės tinka valdyti mažos galios nuolatinės srovės variklius su šepečiais, bešepečius ir žingsninius variklius. Didesnės galios varikliams pritaikomi atskiri (neintegruoti) galios moduliai. Šios plokštės gali būti naudojamos kaip uždaro, ar kaip atviros valdymo sistemos. Tokios plokštės valdymo schema pateikta 4.26 paveiksle.



4.26 pav. Firmos Actel variklių valdymo plokštės schema

Valdymo plokštės vaizdas pateiktas 4.27 paveiksle.



4.27 pav. Firmos Actel Igloo šeimos variklių valdymo plokštė

5. TIRIAMOJI DALIS.

5.1. Nuolatinės srovės elektros pavaros modelio sudarymas

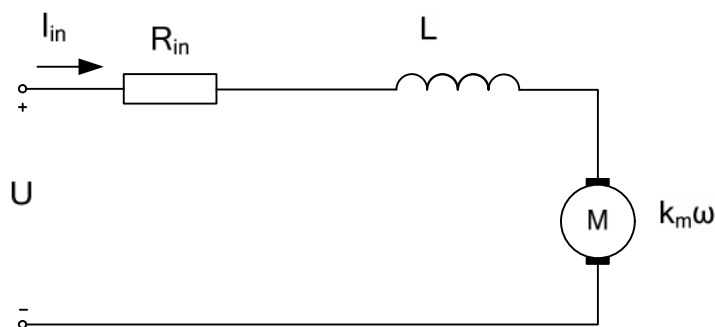
Elektros pavarą sudaro variklis (angl. *Mabuchi motor*), variklio valdymo blokas (L293B), kartu su imtuvo moduliu (RX433). Signalas siunčiamas iš kompiuterio USB sąsaja į siųstuvo modulį (TX433), o modulis perduoda valdymo signalą radijo bangomis, todėl nereikalingi jokie papildomi sujungimai tarp pavaros ir kompiuterio. Tai ir yra nuotolinis valdymas, kurio galimybės bus plačiau nagrinėjamos baigiamajame magistro darbe. Šiuo metu plačiau panagrinėjamas tik pats variklis ir jo sudarytas modelis, kadangi tobulinant vis labiau šią elektros pavarą, keičiasi ir ją sudarantys elementai, todėl sunku sudaryti galutinį modelį, kuris ir bus naudojamas toliau atliekant tyrimą.

5.1.1. Nuolatinės srovės variklio su nuolatiniais magnetais kompiuterinis modelis

Matlab modeliai sudaromi norint gauti imitacinius rezultatus. Modeliui sudaryti naudojamas *Simscape*, kuris praplečia *Simulink* galimybes kartu su įrankiais, skirtais modeliuoti sistemas, apimančias mechanines, elektrines, ir kitas fizines sritis. *Matlab*, kurios viena iš dalių *Simscape*, kalba įgalina tekstu pagrįstą fizinių modeliavimo komponentų, sričių, ir bibliotekų kūrimą.

Tokių tyrimų pasirinkimą lemia tai, kad daugelis eksperimentinių būdų yra brangūs ir jų atlikimas yra sudėtingas bei sunkiai prieinamas. Tačiau šiame projekte bus atliktas ir eksperimentinis tyrimas kompiuterinio modelio adekvatumui patikrinti.

Nuolatinės srovės variklio ekvivalentinė schema pateikiama 5.1 paveiksle, o ją aprašančios lygtys 5.1, 5.2, 5.3 formulėse.



5.1 pav. Nuolatinės srovės variklio su nuolatiniais magnetais ekvivalentinė schema

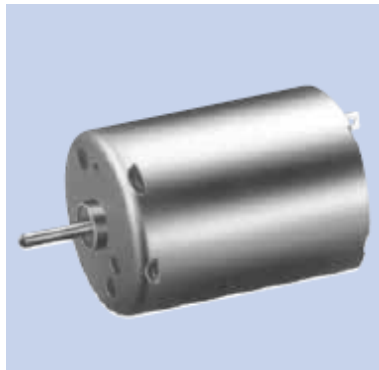
Variklio ekvivalentinės lygtys:

$$U = I_{in}R_{in} + L \frac{dI_{in}}{dt} + k_M \omega; \quad (5.1)$$

$$M_{em} = k_M \cdot I_{in}; \quad (5.2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{em} - M_{st} - M_{tr}. \quad (5.3)$$

Tyrime naudojamo variklio parametrai pateikti 5.1 lentelėje.



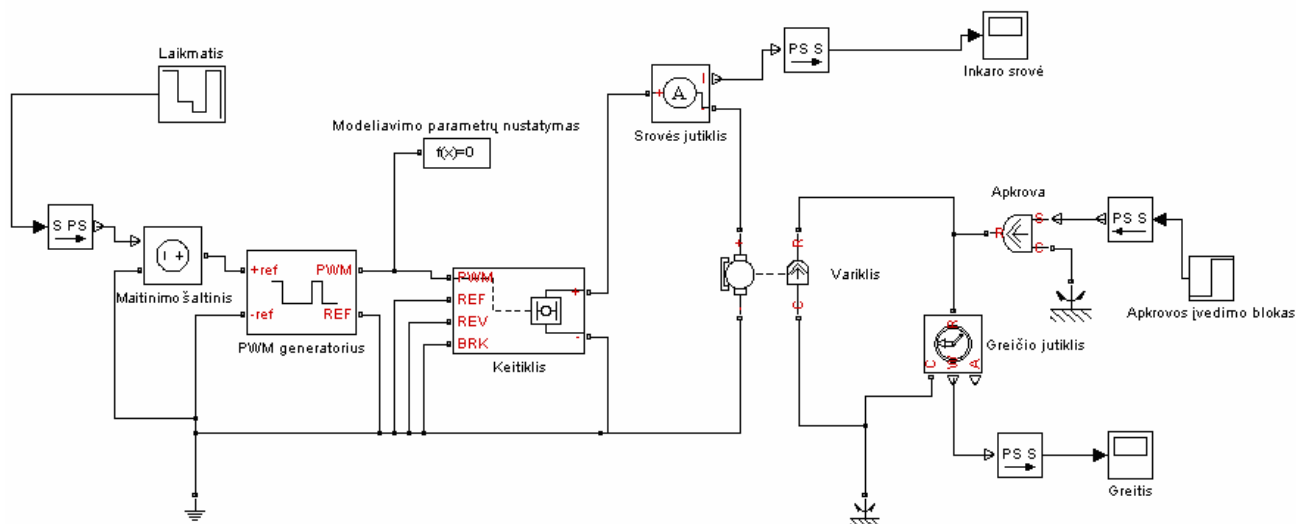
5.2 pav. „Mabuchi Motor“ firmos variklis

5.1 lentelė. Variklio duomenys

Modelis	Įtampa		Be apkrovos		Inercija	Trumpas jungimas		
	Įtampos ribos, V	Vardinė įtampa, V	Greitis	Srovė		Momentas		Srovė
			Aps/min	A		mN·m	g·cm	A
RS-365	12-32	15	6430	0,08	12	3,6	30,6	0,3

Simscape modeliai naudoja fizinį modeliavimo metodą, jungdami tarpusavyje blokus ir atitinkančius fizinius elementus, tokius kaip siurbiai, varikliai, ir operaciniai stiprintuvai. Šis metodas leidžia apibūdinti fizinę, o ne matematinę sistemos struktūrą. Iš modelio, kuris artimai primena schematišką, *Simscape* automatiškai sudaro lygtį, kuri charakterizuoja sistemos elgesį. Šios lygtys yra sujungtos su likusia *Simulink* modelio dalimi. *Simscape* programinė įranga veikia *Simulink* aplinkoje ir suderinama su *Matlab* skaičiavimo aplinka. Toks *Simscape* modelis yra paprastesnis, vaizdingesnis, o atlieka tas pačias funkcijas, kaip iš atskirų blokų sudarytas sistemos matematinis modelis.

Šis kompiuterinis modelis reikalingas palyginti gautus eksperimentinius rezultatus su modeliavimo rezultatais.

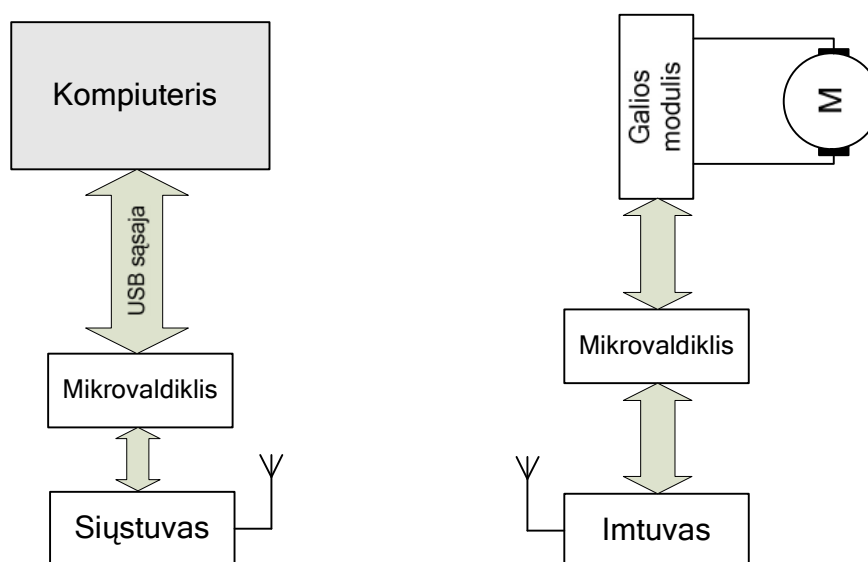


5.3 pav. Nuolatinės srovės elektros pavaros *Simulink* modelis

Nuolatinės srovės elektros variklio valdymo sistemą sudaro variklis, srovės jutiklis, greičio jutiklis, maitinimo šaltinis, inverteris, keitiklis, įžeminimas. Variklio modelis suskirstytas į dvi dalis: elektrinę ir mechaninę, tam kad geriau atvaizduotų jame vykstančius procesus. Elektrinėje grandinėje prie vieno išvado nuosekliai jungiamas srovės jutiklis, keitiklis, prie kito – elektrinis įžeminimas. Taip pat elektrinėje variklio dalyje reikalingas maitinimo šaltinis, impulsų generatorius. Srovės jutiklis jungiasi, per *PS-Simulink* keitiklio bloką, į *Simulink* bloką, skirtą stebėti srovės pereinamajam procesui. Iš mechaninės pusės, grandinę sudaro variklio mechaninė dalis, apkrova, greičio jutiklis. Greičio jutiklis jungiasi, per *PS-Simulink* keitiklio bloką, į *Simulink* greičio stebėjimo bloką.

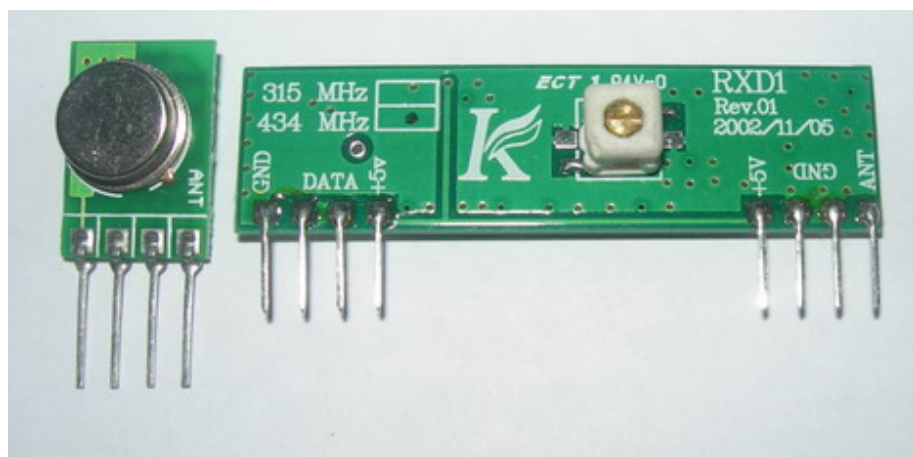
Variklio apkrovos metu kintančiam greičiui nustatyti naudojamas greičio jutiklis, kuris jungiasi prie variklio veleno. *Simulink* žingsnio pokyčio blokas (angl. *step*) suteikia valdymo signalą. *Simulink-PS* keitiklio blokas paverčia valdymo signalą į fizinį t. y. įtampą, kitais atvejais srovę ar greitį. Modelis taip pat turi modeliavimo parametrų nustatymo bloką, kuris yra reikalingas bet kokiame *Simulink* modelyje. Jis savyje turi parametrus, reikalingus skaitmeniniams algoritmams *Simulink* imitavimui.

5.1.2. Eksperimentinio modelio sudarymas



5.4 pav. Kompiuteriu valdomos elektros pavaros funkcinė schema

Radijo dažnius (RF) ir infraraudonuosius spindulius (IR) naudojančios sistemos sparčiai populiarėja. Daugelis automatinių sistemų gamintojų turi eilę RF produktų [29]. Šie produktai turi tendenciją būti mažiau patikimais dėl trikdžių ir mažo veikimo nuotolio, tačiau duomenys yra koduojami ir siunčiami paketais, o gauti duomenys patikrinami paprastu algoritmu, todėl padidėja saugumas ir atsparumas trikdžiams. Todėl būtent dėl šių privalumų buvo pasirinkti radijo moduliai TX433 ir RX433. Radijo moduliai pateikti 5.5 paveiksle, o jų charakteristikos 1 lentelėje.



5.5 pav. Radijo moduliai

1 lentelė. Radijo modulių charakteristikos, kai $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{cc} = 3,6\text{ V}$, $F = 433,92\text{ MHz}$

Charakteristika	Simbolis	Reikšmė	Vienetai
Veikimo dažnis, esant 200 KHz moduliacijai	F	433,92	MHz
Duomenų perdavimas	ASK	8	Kbps
Momentinė įėjimo srovė, esant $V_{cc} = 12\text{ V}$	ITP	45	mA
Momentinė išėjimo galia	PO	10	mW
Įsijungimo/išsijungimo laikas	T_{on}/T_{off}	1	μs
Maitinimo įtampos ribos	V_{cc}	3-12	V
Veikimo temperatūra	TA	-20 ... +85	$^{\circ}\text{C}$

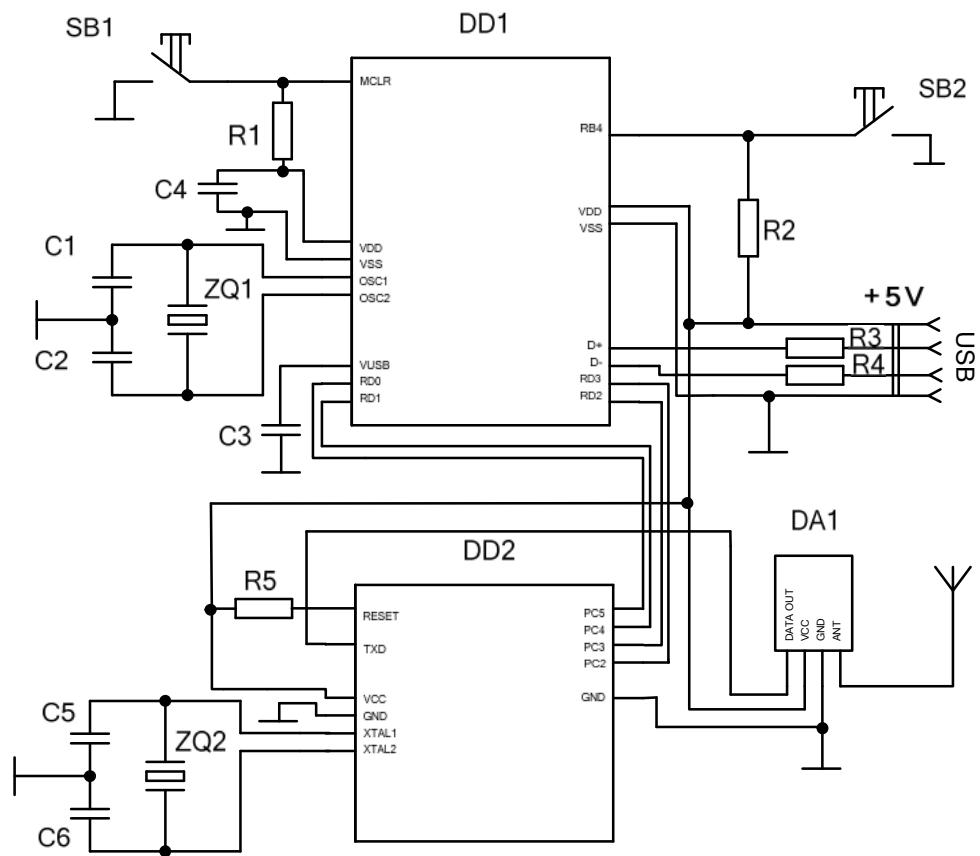
Bevielės valdymo sistemos svarbiausias privalumas tas, kad ji gali veikti per įvairias kliūtis, pvz., per sienas. Nuotolinio valdymo sistema veikia nelicencijuotame 433.92 MHz dažnių diapazone. Veikimo nuotolis pastatuose priklauso nuo būsto konstrukcijų ir gali svyruoti 10-50 metrų, atviroje vietovėje iki 150 metrų.

Kompiuteriu valdomos elektros pavaros struktūrinę schemą sudaro dvi pagrindinės dalys: siųstuvas ir imtuvas. Siųstuvo elektrinė schema pateikta 5.6 paveiksle.

Siųstuvo modulio sistemą sudaro mikrovaldikliai DD1 ir DD2, siųstuvas DA1, bei sistemai funkcionuoti reikalingi elementai (varžos, kondensatoriai, kvarciniai rezonatoriai). Pagrindinę bevielio duomenų perdavimo funkciją atlieka mikrovaldiklis DD2, kuriame įrašyti jam pačiam tinkamai funkcionuoti reikalingi nustatymai bei pagrindinė programa. Mikrovaldiklis DD1 yra tarpinis elementas ir atlieka duomenų mainų funkciją tarp kompiuterio ir mikrovaldiklio DD2.

Mikrovaldiklis pradeda veikti iš karto prijungus maitinimo įtampą. Kvarciniai rezonatoriai ZQ1, ZQ2 skirti mikrovaldiklių veikimui taktiniais impulsais (CLK) sinchronizuoti. Tarp jų ir USART moduliui, bei USB sąsajos su kompiuteriu sinchronizavimui. Kondensatoriai C1, C2, C5, C6 reikalingi kvarcinio rezonatoriaus stabilumui užtikrinti.

Nuspaudus pradinio nustatymo mygtuką SB1, tuo pat metu įvertinama ar buvo nuspaustas SB2 mygtukas, paleidžiama *Microchip Bootloader* paprogramė ir mikrovaldiklis pereina į programavimo režimą, arba vykdo vartotojo įrašytą programą, esančią 0x000800 adresu. Ši paprogramė leidžia laisvai keisti valdymo programą.



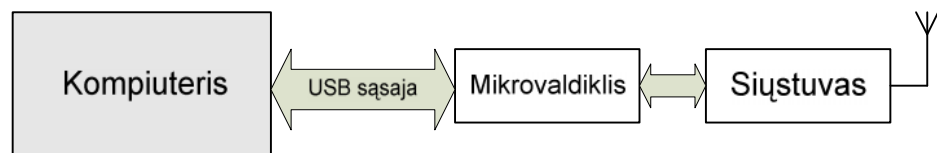
5.6 pav. Siųstuvo moduly principinė elektrinė schema

Kondensatorius C4 užtikrina matavimo sistemos bei kompiuterio suderinamumą, kitaip kompiuteris neatpažins prijungto prietaiso, nes bus siunčiami iškraipyti duomenys į kompiuterį. Kondensatoriaus talpa gali siekti iki 1 μ F.

Varža R1 skirtos riboti srovę mikrovaldiklio pradinio nustatymo įėjimui MCLR, o varža R2 – riboja srovę programavimo režimo nustatymo įėjimui.

Duomenų moduliavimo ir perdavimo funkciją atlieka siųstuvas DA1.

Siųstuvo struktūrinė schema pateikta 5.7 paveiksle.



5.7 pav. Nuotolinio valdymo siųstuvo struktūrinė schema

Pradinėje stadijoje ši schema neturėjo valdymo USB sąsaja, nes buvo valdoma paprasčiau, programuojama LPT sąsaja, todėl buvo nereikalingas PIC valdiklis, palaikantis USB 2.0 versiją. Nepaisant to, kad maitinant mikrovaldiklį ir siųstuvą iš LPT, apkrovus, įtampa siekia tik 3 – 3,6 V, mikrovaldiklyje buvo nustatytas BODEN bitas, kad valdiklis veiktų nuo 2,7 V įtampos. Tačiau dabartiniai nešiojamieji kompiuteriai neturi LPT sąsajos, todėl buvo reikalingas greitas sprendimas. Tolesniam projekto vystymui buvo atkreiptas dėmesys į šias problemas:

1. Mikrovaldiklis Atmega8 neturi integruoto USB modulio, todėl programiškai yra sudėtinga jį realizuoti;
2. Reikalingas didelio dažnio taktinis impulsų generatorius;
3. Sudėtinga sinchronizuoti su naujesniais nešiojamais kompiuteriais dėl USB 2.0 palaikymo bei loginių lygių (2.8-3.6 V) nesuderinamumas su valdikliu (senesniuose kompiuteriuose USB 1.1 versija);
4. Mažas duomenų perdavimo greitis lyginant su tam skirtais keitikliais, pvz. Cypress firmos.

Įvertinus visas šias problemas buvo panaudotas PIC18F4550 valdiklis, maitinamas penkių voltų USB sąsajos įtampa, todėl nereikalingas atskiras maitinimo šaltinis. Valdiklis Atmega8 atlieka duomenų kodavimą bei nuoseklų perdavimą siųstuvui TX433, kuris savo ruožtu perduodamus duomenis moduliuoja ASK (angl. *Amplitude-shift keying*) principu. Duomenų perdavimo greitis nustatomas vidiniu dalikliu, bei į atitinkamus registrus įrašius reikšmes, kurios apskaičiuojamos programiškai pagal formulę:

$$UBRR = \frac{f_{clk}}{N \cdot F_1} - 1, \quad (5.4)$$

$UBRR$ – skaičiuojama duomenų perdavimo greičio registro reikšmė;

f_{clk} – taktinio generatoriaus dažnis, Hz;

N – vidinis daliklis;

F_1 – reikalingas duomenų perdavimo greitis, bit/s.

Kadangi buvo panaudota USB sąsaja, tai reikalinga ir programinė įranga, kuri susietų kompiuterio valdymą klaviatūra ir pele su siųstuvo moduliu. Tam buvo panaudota „Microsoft“ sukurta *Visual Basic* programavimo kalba ir jos pagalba sukurta valdymo programa, kurios langas pateiktas 5.8 paveiksle.



5.8 pav. Valdymo programa

Didelis privalumas, tai kad valdyti galima klaviatūra, o ne tik pele. Realiam vaizdui gali būti naudojama bevielė interneto kamera, tačiau šiame projekte ji nebus naudojama, nes pagrindinis dėmesys skiriamas variklio greičio reguliavimui ir nenutrūkstamam valdymui.

Programos veikimas parašytas *Visual Basic* programavimo kalba. Priėjimą prie USB sąsajos programinio valdymo suteikia dinaminės sąsajos biblioteka (angl. *Dynamic Link Library*), šiuo atveju naudojama "mpusbapi.dll" biblioteka. Jos pagrindinės funkcijos pateikiamos trumpame programos kodo fragmente:

```
Public Declare Function MPUSBGetDLLVersion Lib "mpusbapi.dll" Alias
"_MPUSBGetDLLVersion" () As Integer
Public Declare Function MPUSBGetDeviceCount Lib "mpusbapi.dll" Alias
"_MPUSBGetDeviceCount" (ByVal pVID_PID As String) As Integer
Public Declare Function MPUSBOpen Lib "mpusbapi.dll" Alias "_MPUSBOpen" (ByVal
instance As Integer, ByVal pVID_PID As String, ByVal pEP As String, ByVal dwDir As
Integer, ByVal dwReserved As Integer) As Integer
Public Declare Function MPUSBClose Lib "mpusbapi.dll" Alias "_MPUSBClose" (ByVal
handle As Integer) As Integer
Public Declare Function MPUSBRead Lib "mpusbapi.dll" Alias "_MPUSBRead" (ByVal
handle As Integer, ByVal pData As Integer, ByVal dwLen As Integer, ByRef pLength As
Integer, ByVal dwMilliseconds As Integer) As Integer
Public Declare Function MPUSBWrite Lib "mpusbapi.dll" Alias "_MPUSBWrite" (ByVal
handle As Integer, ByVal pData As Integer, ByVal dwLen As Integer, ByRef pLength As
Integer, ByVal dwMilliseconds As Integer) As Integer
Public Declare Function MPUSBReadInt Lib "mpusbapi.dll" Alias "_MPUSBReadInt"
(ByVal handle As Integer, ByRef pData() As Byte, ByVal dwLen As Integer, ByRef
pLength As Integer, ByVal dwMilliseconds As Integer) As Integer
```

Pirmiausia aprašomi sistemos kintamieji:

```
Private pirmyn As Boolean
Private atgal As Boolean
Private kairen As Boolean
Private desinen As Boolean
Private temp As Boolean
```

Valdymui klaviatūra reikalingos dvi būsenos: klaviatūros mygtukas nuspaustas ir atleistas.

Jas vykdo funkcijos:

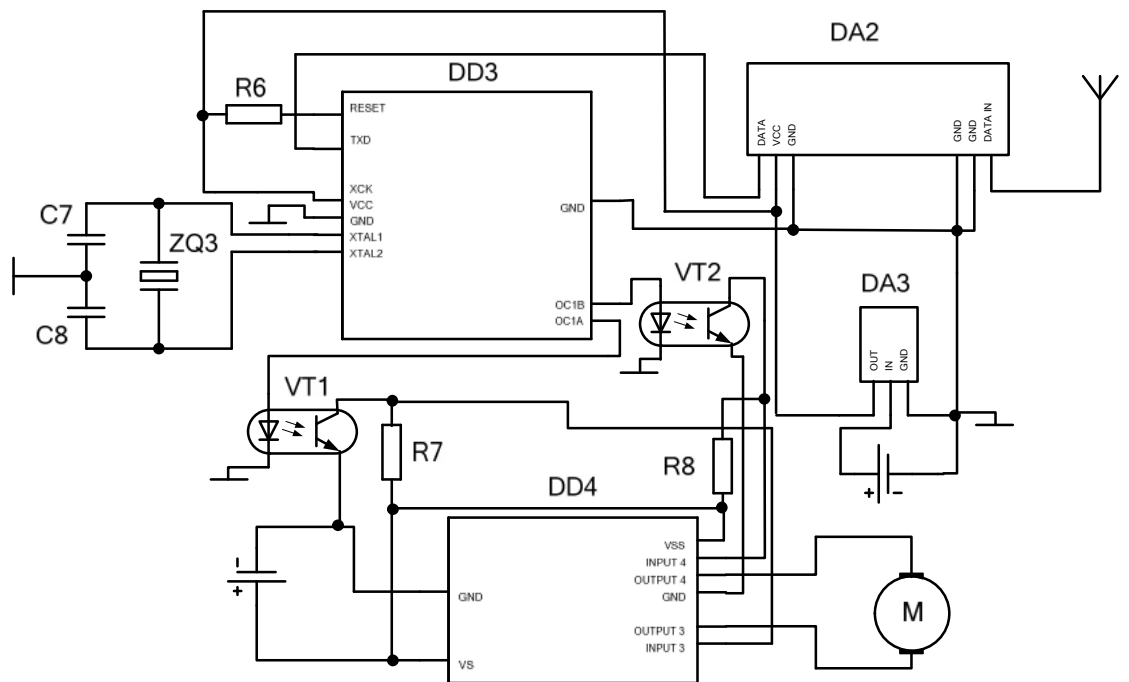
```
Form1_offpirmyn(),
Form1_onpirmyn(),
Form1_onatgal(),
Form1_offatgal(),
Form1_onkairen(),
Form1_offkairen(),
Form1_ondesinen(),
Form1_offdesinen().
```

Tada mygtukų būseną tikrina šis paprogramės fragmentas:

```
If e.KeyCode = Keys.Up Then
    pirmyn = True
    Form1_offpirmyn()
If e.KeyCode = Keys.Down Then
    pirmyn = True
    Form1_onpirmyn()
```

Toliau nagrinėjama imtuvo struktūrinė schema, pateikta 5.9 paveiksle.

Imtuvo modulio sistemą sudaro mikrovaldiklis DD3, imtuvas DA2, variklis M, bei sistemai funkcionuoti reikalingi elementai (varžos, kondensatoriai, kvarcinis rezonatorius, įtampos stabilizatorius DA3). Gautus moduluotus duomenis imtuvas DA2 paverčia valdikliui DD3 suprantama skaitmenine kodų seka. Taigi tolesnį gautų duomenų apdorojimą atlieka mikrovaldiklis DD3, kuriame įrašyti jam pačiam tinkamai funkcionuoti reikalingi nustatymai bei pagrindinė programa. Jei gautų duomenų kadre yra gautas valdymo impulsas, tuomet prie OCR1A išvado prijungtas variklio valdiklis DD3 formuoja atitinkamą signalą. Tie signalai gali būti tiek variklio paleidimas ar stabdymas, tiek greičio reguliavimas.



5.9 pav. Imtuvo modulyje principinė elektrinė schema

Mikrovaldiklio OCA1 išėjime generuojamas dažnis apskaičiuojamas taip:

$$f_{PWM} = \frac{f_{clk}}{N \cdot (1 + TOP)} \quad (5.5)$$

Šiuo atveju TOP atitinka ICR1 registro reikšmę, taigi išsireiškiame TOP :

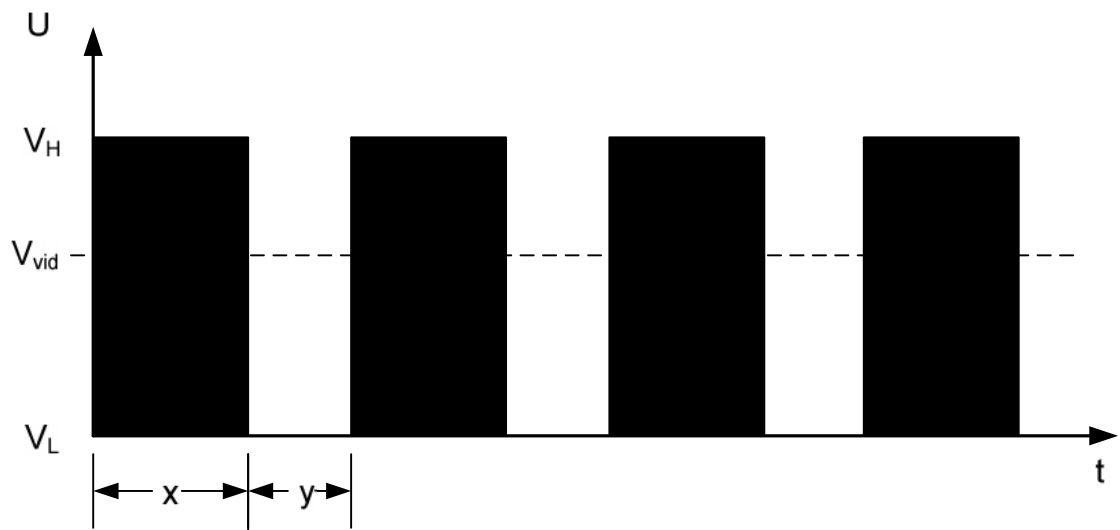
$$TOP = \frac{f_{clk}}{f_{PWM} \cdot N} - 1, \quad (5.6)$$

f_{PWM} – generuojamas dažnis;

f_{clk} – sistemos taktavimo dažnis;

N – vidinis daliklis.

Tai atvejais, kai nepakanka stebėti laikmačio perpildymą, naudojamos palyginimo pertrauktys. Išėjimo palyginimo registras gali būti užpildytas nuo nulio iki maksimalios reikšmės, kurį laikmatis tikrins kiekvieną savo ciklą. Kai laikmatis pasiekia palyginimo reikšmę, atitinkama žyma (angl. *Output Compare Flag*) registre TIFR nustato loginį vienetą. Laikmatis taip pat gali būti nustatomas ištrinti skaičiavimo registrą, įvykus palyginimui [10]. Impulsų pločio moduliacijos sudarymas pateiktas 5.10 paveiklėse.



5.10 pav. Impulsų pločio moduliacijos sudarymas

Vidutinė išėjimo įtampa gauna taip:

$$V_{vid} = \frac{V_H \cdot x + V_L \cdot y}{x + y}, \quad (5.7)$$

čia V_{vid} – vidutinė išėjimo įtampa;

x, y – impulsų trukmė, s;

V_H, V_L – įtampa atitinkamai esant aukštam ir žemam loginiam lygiui, V.

Impulsų trukmė apskaičiuojama atsižvelgiant į registrų ICR1 ir OCRx reikšmes:

$$x = OCRx \cdot 2; \quad (5.8)$$

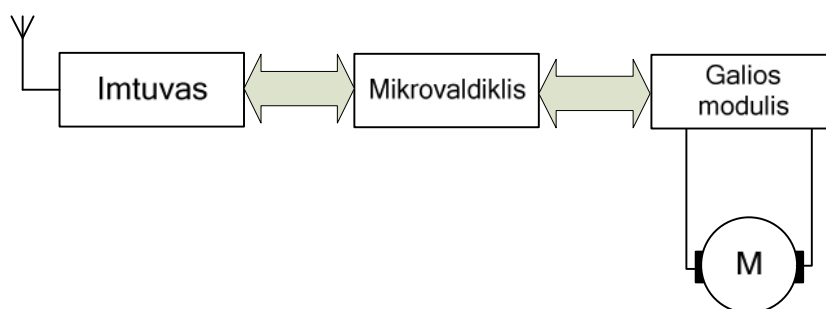
$$y = (TOP - OCRx) \cdot 2; \quad (5.9)$$

$$V_{vid} = \frac{(V_H \cdot OCRx + V_L \cdot (TOP - OCRx))}{TOP}. \quad (5.10)$$

Kvarcinis rezonatorius ZQ3 skirtas mikrovaldiklio veikimui taktiniais impulsais (CLK) sinchronizuoti, bei duomenų priėmimo ir laikmačio modulio (greičio reguliavimui) veikimui.

Varža R6 skirtos riboti srovę mikrovaldiklio pradinio nustatymo įėjimui. Kondensatoriai C7, C8 reikalingi kvarcinio rezonatoriaus stabilumui užtikrinti.

Imtuvo struktūrinė schema pateikta 5.11 paveiksle. Pagrindinės dalys: imtuvas (RX433), mikrovaldiklis (ATMEGA8), galios modulis (L293B) ir variklis (RS-365).

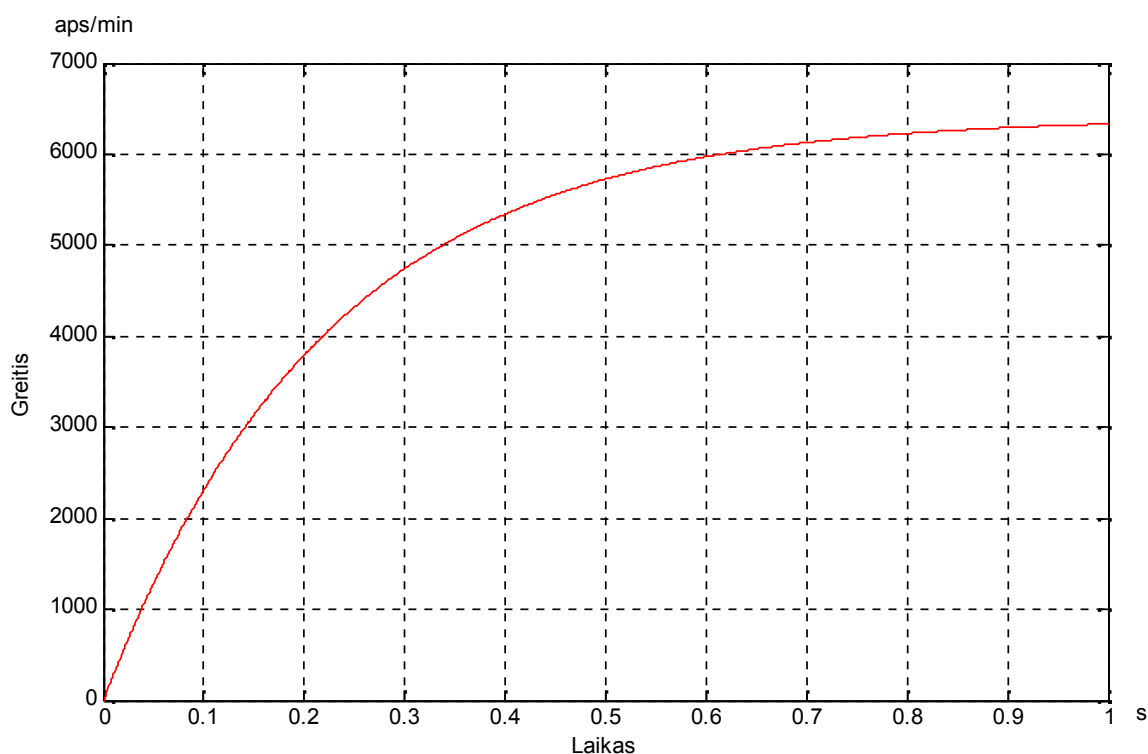


5.11 pav. Nuotolinio valdymo imtuvo struktūrinė schema

Gavęs valdymo signalą imtuvas demoduliuoja gautą informaciją, ją perduoda mikrovaldikliui, kuris sujungtas per galios modulį su valdomuoju varikliu.

5.2. Imitacijos rezultatų apžvalga ir tyrimas

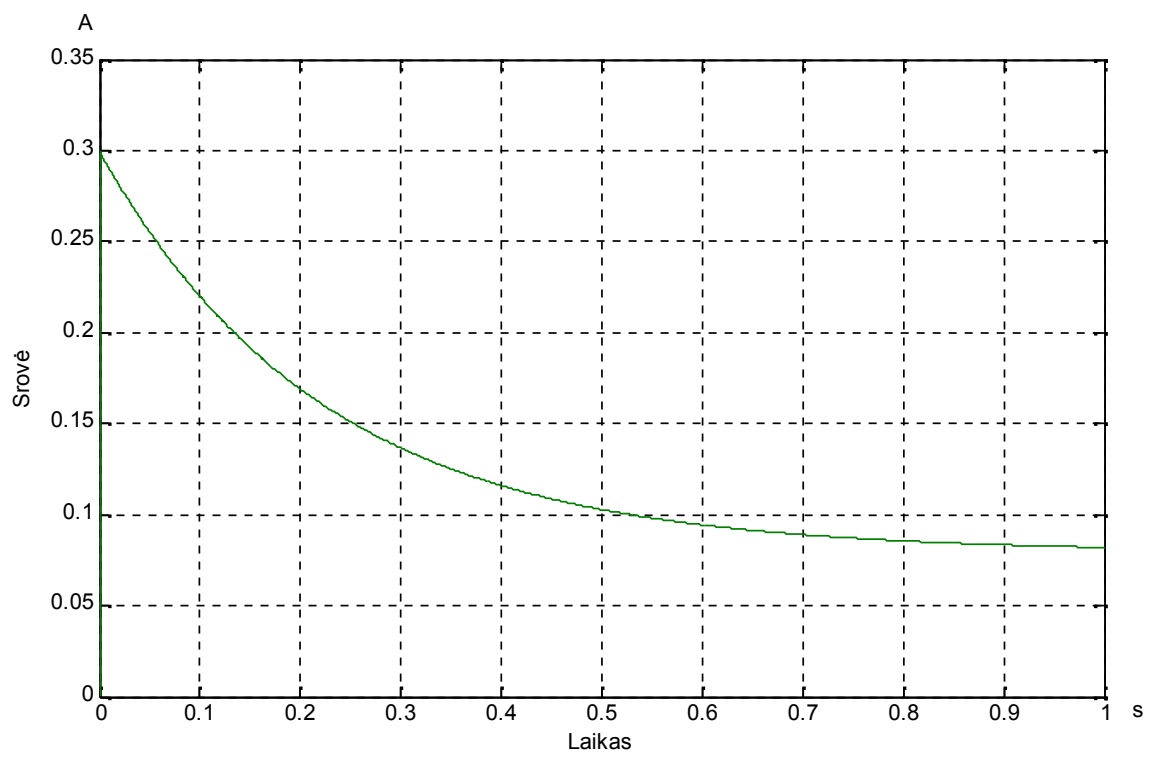
Imitacija atliekama pagal 5.3 paveiksle pateiktą schemą įrašius visus reikiamus parametrus, nuspaudus „Start simulation“ piktogramą. Gautas greičio pereinamasis procesas pateiktas 5.12 paveiksle.



5.12 pav. Greičio pereinamasis procesas, kai variklis neapkrautas

Greičio nusistovėjusi reikšmė pasiekama per 0,7 s, o greitis tuo metu yra 6080 aps/min. Palyginus gautą nusistovėjusį greitį (6330 aps/min) su 5.1 lentelėje pateiktu, paklaida yra 2 procentai. Tai praktiškai atitinka deklaruojamą vertę.

Srovės pereinamasis procesas, pateiktas 5.13 paveiksle, skiriasi 5 procentais, todėl ji atitinka realaus modelio deklaruojamą vertę. Srovė pradiniu paleidimo momentu pakyla iki 0,3 A, po to nusistovi iki 0,08 A, nes imitacijos metu įvertinamas apkrovos momentas, atsirandantis dėl trinties jėgų.

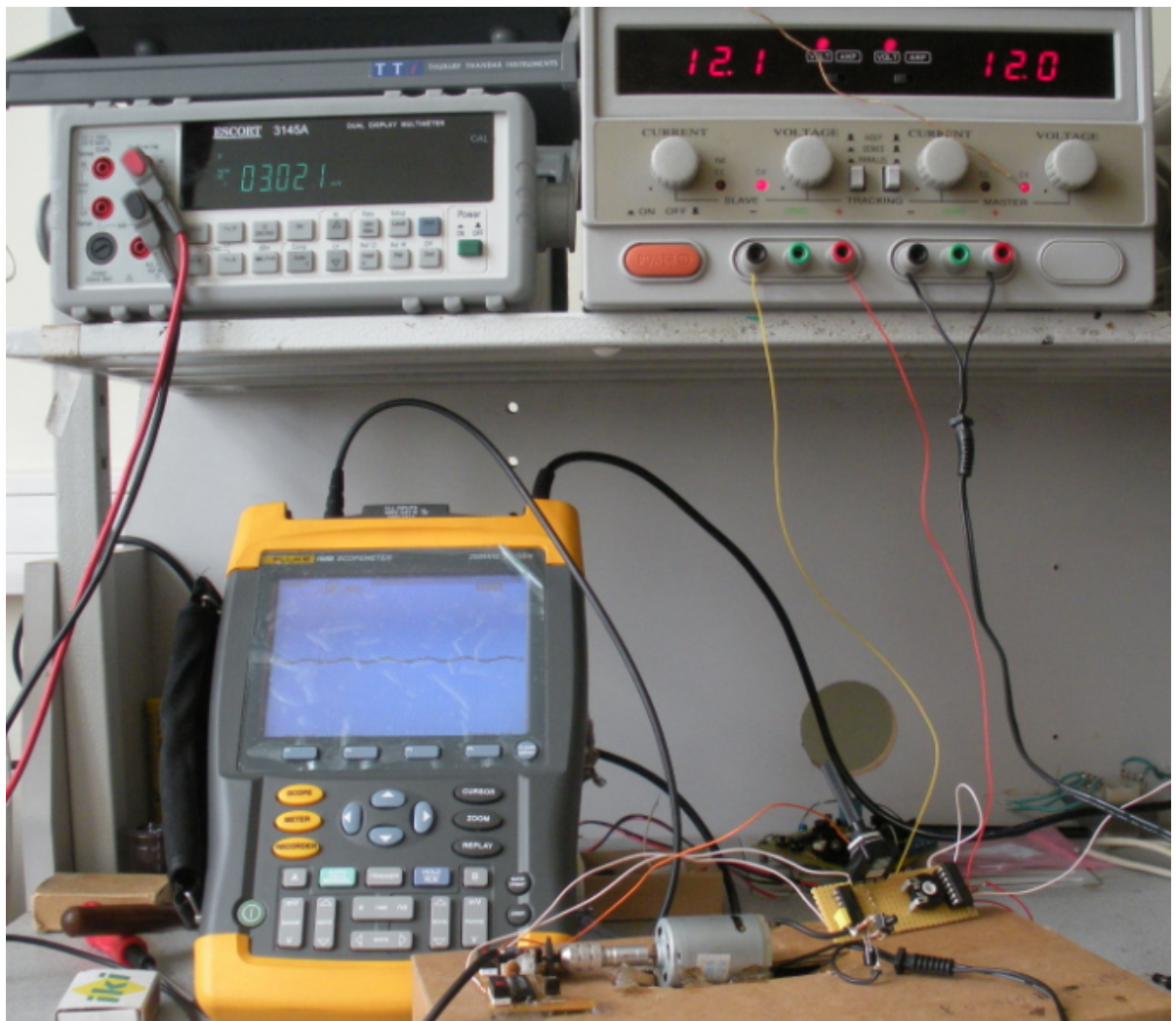


5.13 pav. Srovės pereinamasis procesas, kai variklis neapkrautas

Maksimali srovė paleidimo metu atirinka 5.1 lentelėje pateiktą vertę.

5.3. Eksperimentinis tyrimas ir rezultatų palyginimas.

Eksperimentiniam greičio nustatymui buvo sumontuotas greičio matavimo stendas pavaizduotas 5.16 paveiksle.



5.14 pav. Greičio matavimo stendas

Vienas iš pagrindinių tiriamojo stendo matavimo prietaisų – skaitmeninis dviejų kanalų oscilografas FLUKE 199B, pateiktas 5.17 paveiksle. Skaitmeninio oscilografo vienas iš privalumų lyginant su analoginiu – „one shot“ funkcija, kartu nustatant signalo pokytį, kurio metu bus atliekamas matavimas. Gautus rezultatus galime peržiūrėti ekrane arba perkelti į kompiuterį skaitmeniniu formatu, kas leidžia vėliau apdoroti duomenis pavyzdžiui *Matlab* programų paketu, taikant sudėtingus

algoritmus (statistiniai skaičiavimai, netiesioginių matavimų rezultatų ir paklaidų skaičiavimai, Furjė transformacijos ir kt.).



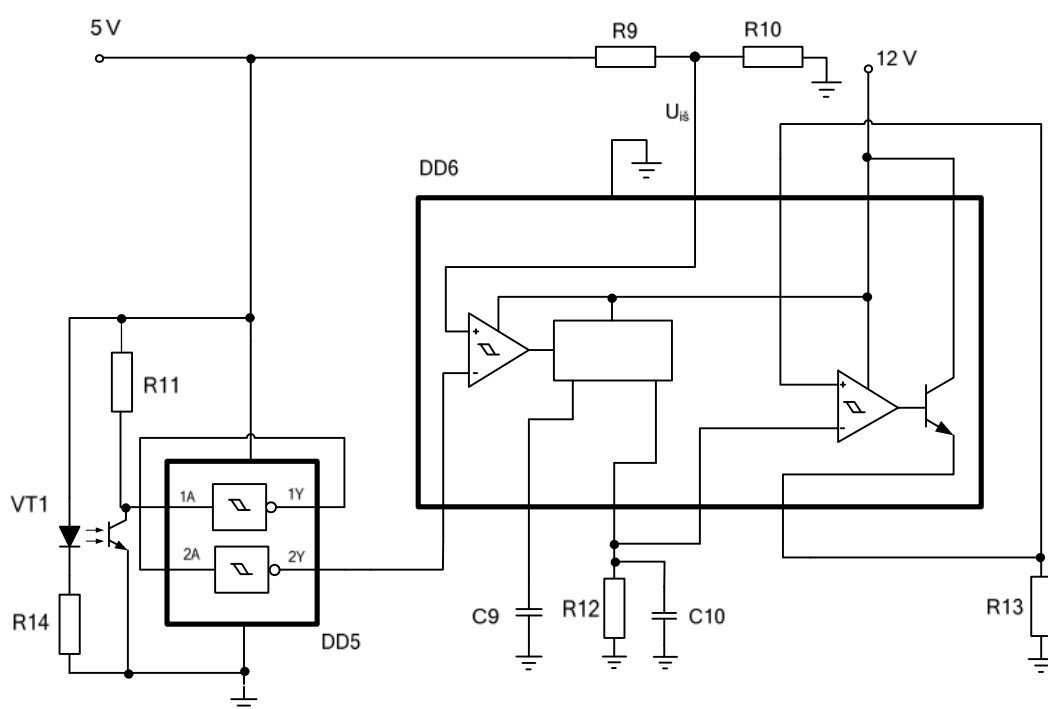
5.15 pav. Dviejų kanalų skaitmeninis oscilografas *FLUKE 199B*

Kitas tiriamojo stendo prietaisas – dviejų kanalų laboratorinis maitinimo šaltinis MASTECH HY-3005-2, pateiktas 5.18 paveiksle. Vienas kanalas naudojamas įtampos keitikliui LM2907, kitas – variklio maitinimui.

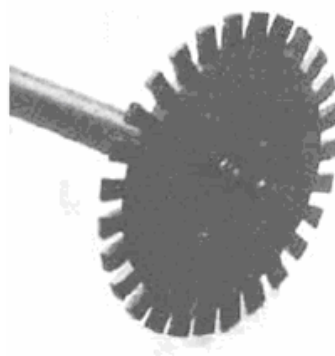


5.16 pav. Dviejų kanalų laboratorinis maitinimo šaltinis MASTECH HY-3005-2

Tipinė greičio matavimo schema pateikta 5.19 paveiksle.

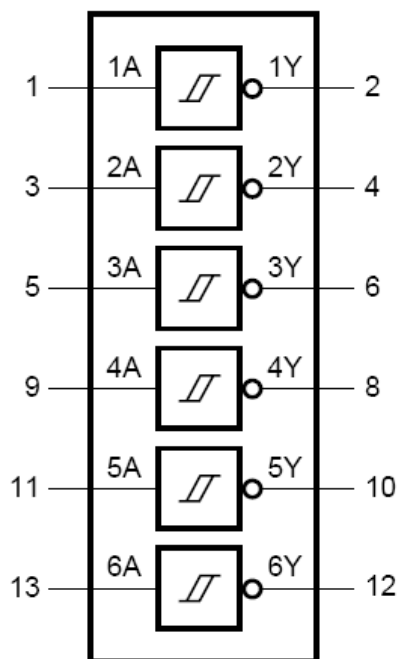


5.17 pav. Greičio matavimo schema

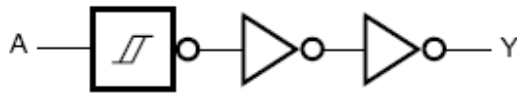


5.18 pav. Enkoderio diskas

Sukantis enkoderiui, kodinio disko impulsus fiksuoja infraraudonųjų spindulių imtuvas. Tuo metu kai kodinio disko išpjova uždengia spinduliuotį, įtampa sumažėja iki 0,7 V, kitu atveju, kai tiesioginis spindulys apšviečia imtuvą – pasiekia didžiausią reikšmę 4,5 V. Tačiau šiuo atveju įtampa kinta sinusiniu dėsniu, todėl loginiams lygiams užtikrinti naudojamas Šmito trigeris realizuotas 74HC14 mikroschemoje. Jos funkcinė diagrama pateikta 5.21 paveiksle.



5.19 pav. 74HC14 Funkcinė schema



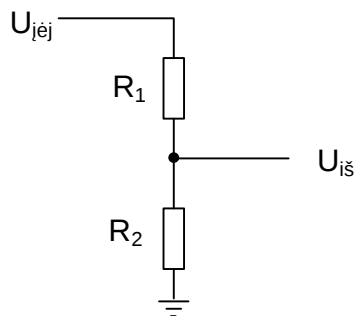
5.20 pav. Šmito trigerio loginė diagrama

Gautas loginis signalas toliau keliauja į keitiklį, kuris keičia savo išėjime įtampą, priklausomai nuo įeinančiojo dažnio. Kuo didesnis įeinantysis dažnis, tuo didesnė įtampa gaunama išėjime. Didžiausia išėjimo įtampa esant didžiausiam įėjimo dažniui apskaičiuojama pagal formulę [23, 24]:

$$U_{i\check{s}} = U_{mait} \cdot R1 \times C1 \cdot f^{\epsilon\omega} . \quad (5.11)$$

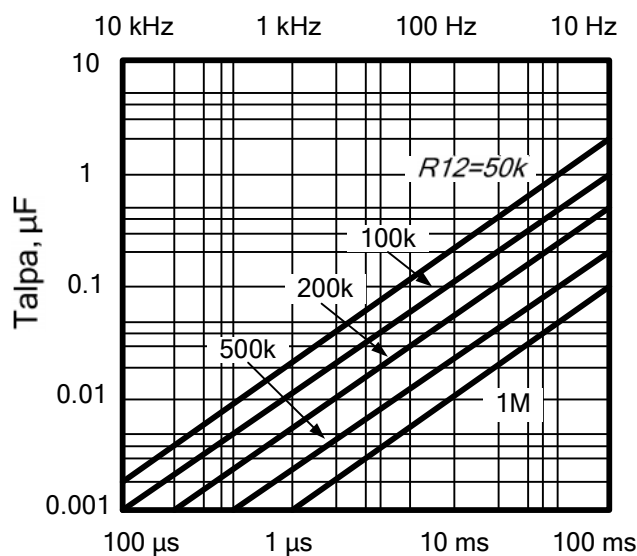
Pagal aprašymą parenkama rekomenduojama 12 V maitinimo įtampa. Atramos įtampa parenkama 2,5 V realizuojama varžų dalikliu pagal 5.6 formulę ir žemiau pateiktą schemą.

$$U_{i\check{s}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U^{\epsilon\omega} . \quad (5.12)$$



5.21 pav. Įtampos daliklis

Išėjimo įtampos ribos nustatomos parenkant RC grandinės parametrus skaičiuojant, arba pasinaudojus charakteristika, pateikta 5.24 paveiksle.



5.22 pav. Išėjimo įtampos parinkimo priklausomybė

Nominalus variklio greitis matuojamas esant vardinei maitinimo įtampai, panaudojus greičio matavimo schemeje pateiktus elementus, o gautus rezultatus fiksuoja oscilografas. Pagal 5.7 formulę imama dešimties periodų loginio signalo trukmė, trukmė padalinama iš dešimties periodų (gaunami tikslesni rezultatai nei imant iškarto vieną periodą) ir gauta laiko reikšmė padauginama iš keturiasdešimties išpjovų. Taip gaunamas laikas, kurį užtrunka variklis apsisukdamas vieną kartą (per vieną apsisukimą). Gautas rezultatas 9,38 ms per vieną variklio apsisukimą. Taigi per vieną sekundę t.y. 1000 ms padaliname iš gautojo skaičiaus ir gauname 106,6 aps/s.

$$t = \frac{t_T}{T}, \quad (5.13)$$

T – periodų skaičius;

t_T – T periodų kitimo laikas, ms;

t – vieno impulso kitimo laikas lygus 0,2345 ms;

$$n = \frac{1000}{40 \cdot t} \cdot 60, \quad (5.14)$$

n – apsisukimai per minutę, aps/min.

Kadangi didžiausias variklio greitis yra 6400 aps/min, arba 106 aps/s, todėl kitimo dažnis 4,2 kHz. Dėl šių priežasčių buvo parinktas keraminis 1 nF kondensatorius, ir derinamas 250 kΩ rezistorius,

norint maksimaliai išplėsti išėjimo įtampos ribas, pagal kurias ir bus skaičiuojamas variklio apsisukimų skaičius.

Taigi pagal 5.9 formulę gauname, kad didžiausia išėjimo įtampa:

$$U_{i\check{s}} = 12\text{ V} \cdot 165\text{ k}\Omega \times 1 \cdot 10^{-9}\text{ F} \cdot 40 \cdot 106,6\text{ Hz}. \quad (5.15)$$

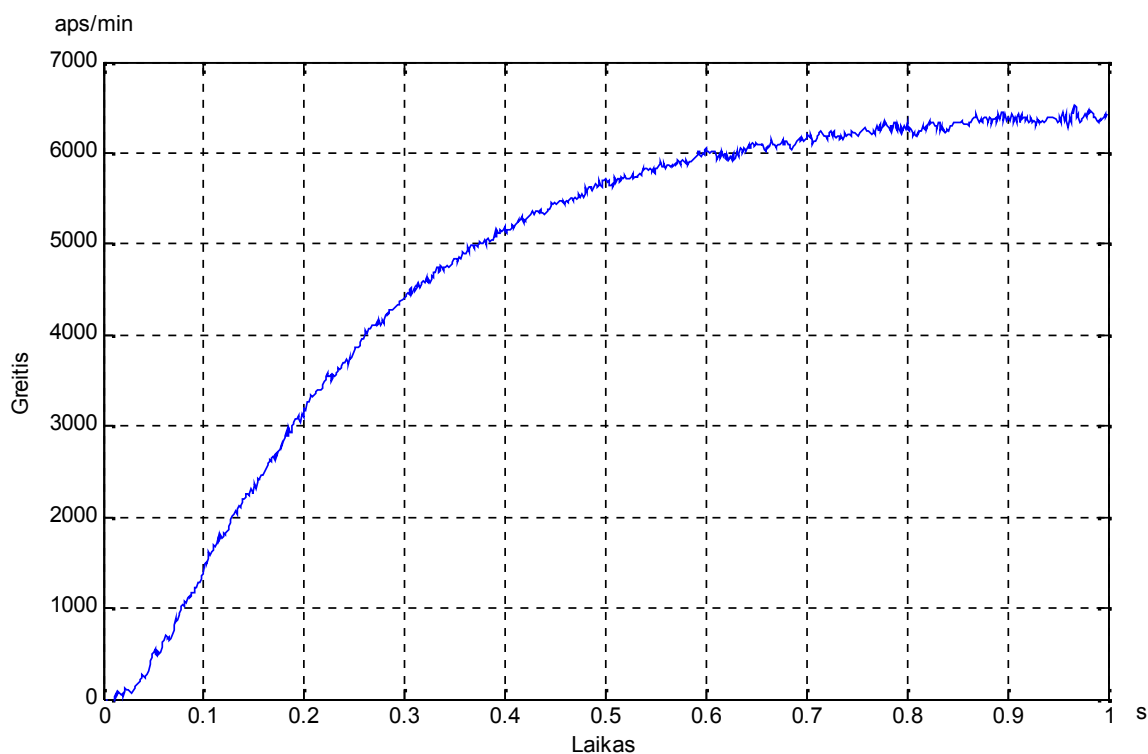
$U_{i\check{s}} = 8,44\text{ V}$, taigi ši reikšmė atitinka didžiausią apskaičiuotą sukimosi greitį – 6400 aps/min.

Taigi koeficientas, iš kurio reikia padauginti kiekvienu laiko momentu gautas reikšmės yra:

$$k = \frac{6400}{8,44} = 758,29. \quad (5.16)$$

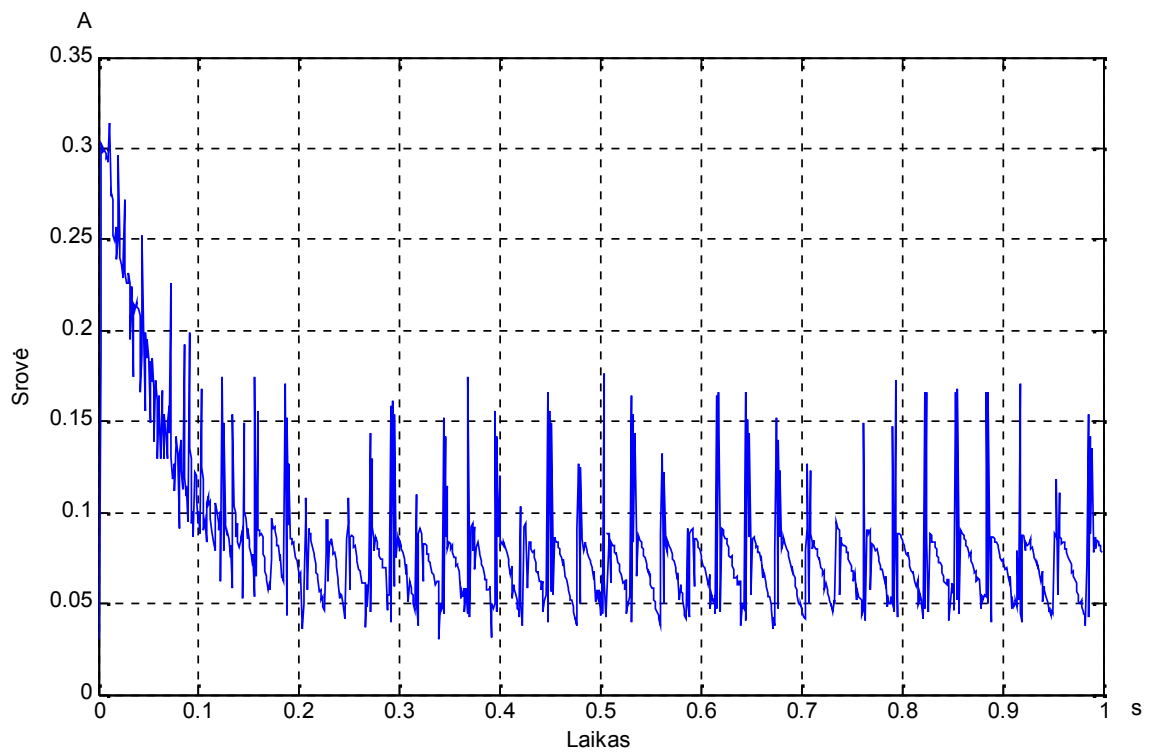
Srovės pereinamajam procesui gauti buvo panaudotas $0,33\ \Omega$ rezistorius, taigi ir koeficientas iš kurio reikės padalinti yra $k = 0,33$.

Gauti eksperimentiniai rezultatai pateikti 5.25 ir 5.26 paveiksluose.



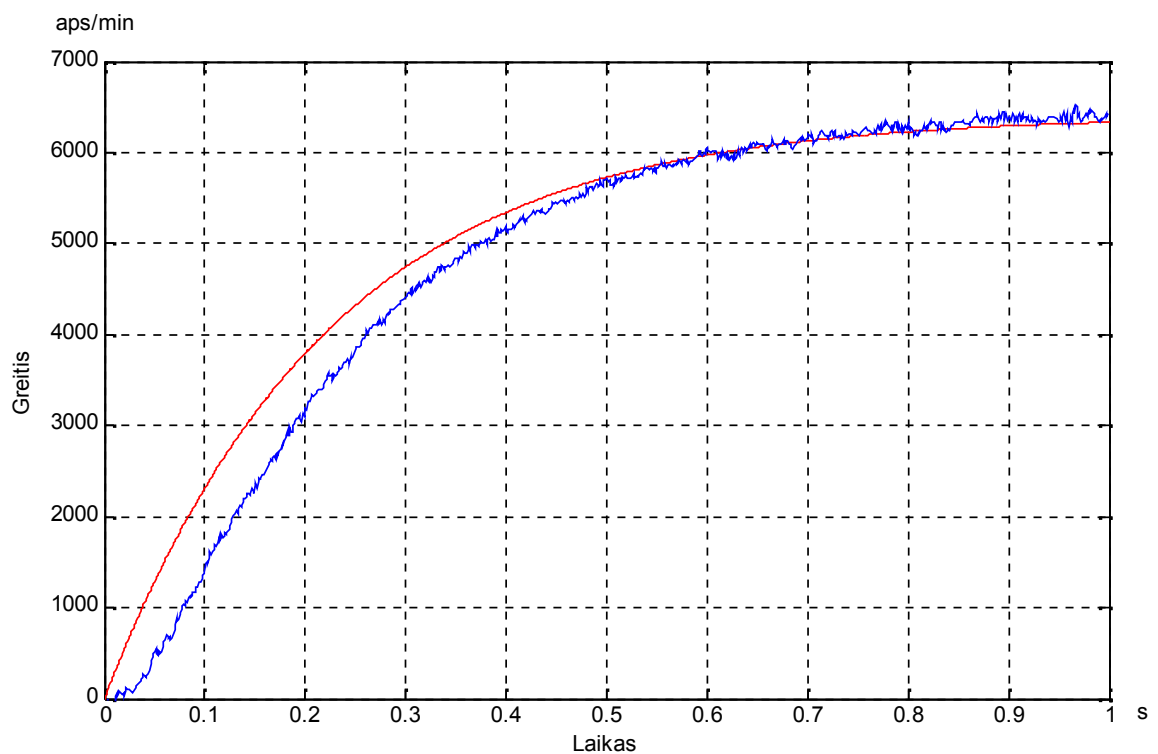
5.23 pav. Greičio pereinamasis procesas

Greičio nusistovėjusi reikšmė pasiekama per 0,6 s, o greitis pasiekia 6000 aps/min.



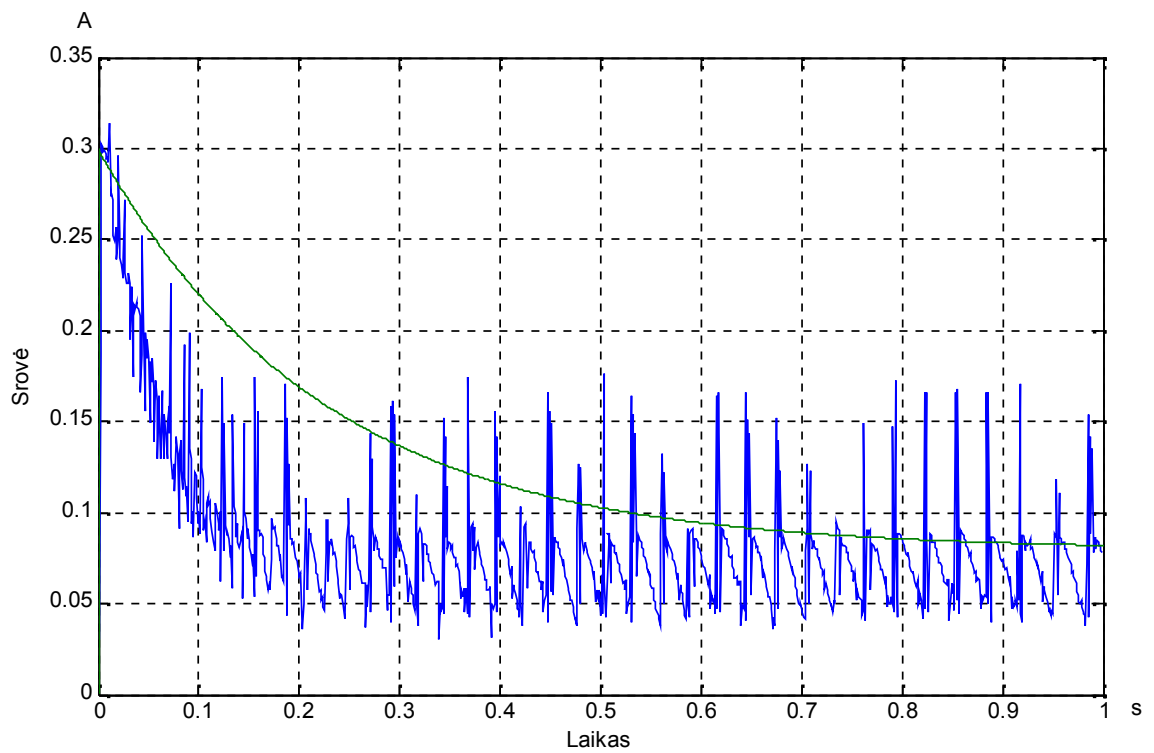
5.24 pav. Srovės pereinamasis procesas

Eksperimentinis srovės pereinamasis procesas pateiktas 5.25 paveiksle. Srovė pradiniu paleidimo momentu pakyla iki 0,32 A, po to nusistovi iki 0,07 A. Srovės pulsacijas nulemia nepastovi pereinamoji šepetčių kontakto varža.



5.25 pav. Greičio pereinamasis procesas, kai variklis neapkrautas

Palyginus imitacijos ir eksperimentinius rezultatus iš 5.28 paveikslo matyti, kad iki 6000 aps/min eksperimentinis greičio rezultatas skiriasi gana žymiai daugiausiai 15 %, o greičiui nusistovint – paklaida tarp gautų rezultatų mažėja ir yra 1 %.



5.26 pav. Srovės pereinamasis procesas, kai variklis neapkrautas

Palyginus imitacijos ir eksperimentinius rezultatus iš 5.29 paveikslo matyti, kad imitacijos metu srovė pakyla iki 0,3 A, o eksperimento metu – iki 0,32 A. Paklaida yra 6 %. Imitacijos metu nusistovėjusi srovė yra 0,08 A, o eksperimente – 0,07 A.

6. TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

6.1. Išvados

1. Sukurtas nuolatinės srovės variklio kompiuterinis modelis leidžia tirti pavaros pereinamuosius procesus. Gauti imitaciniai rezultatai palyginti su eksperimentiniais. Modeliuojamo variklio greitis pasiekia nusistovėjusią vertę per 0,7 s ir yra 6080, o eksperimento metu nusistovi per 0,6 s ir yra 6000 apsisukimų per minutę, kuri skiriasi 3 % .

Tokios paklaidos nėra didelės, todėl modelis gali būti naudojamas pavarų tyrimuose.

2. Sukurta eksperimentinė įranga leidžia gauti nuolatinės srovės variklio greičio ir srovės pereinamuosius procesus ir juos palyginti su imitacijos rezultatais.

3. Duomenų perdavimo moduliai ir sukurta kompiuterinė programa leidžia valdyti variklio greitį nuotoliniu būdu, todėl tokia pavana gali būti naudojama automatiniam vartų atidarymui, radijo bangomis valdomiems modeliams. Karinėje pramonėje – valdant išminavimo robotus.

4. Šiame projekte sukurta nuotoliniu būdu kompiuteriu valdoma pavara pritaikyta automobilio mini modeliui.

5. Kompiuteriu valdomos elektros pavaros privalumai – lengvai keičiama valdymo programa; reguliuojamas greitis plačiose ribose; suderinama sąsaja su bet koku kompiuteriu turinčiu USB, bei Windows programinę įrangą; didelis valdymo atstumas (iki 100 m, su papildoma įranga galima jį padidinti iki 150 m); perduodamų duomenų kodavimas bei gautų patikrinimas, apsaugant nuo pašalinių trikdžių.

6.2. Rekomendacijos ir pasiūlymai

Sukurta nuotoliniu būdu kompiuteriu valdoma nuolatinės srovės elektros pavara gali būti pritaikyta įvairiose srityse. Šio įtaiso privalumai:

- Lengvai keičiamos valdymo programos komandos;
- Reguluojamas greitis, kuris gali būti keičiamas plačiose ribose;
- Suderinama sąsaja su bet koku kompiuteriu turinčiu USB, bei Windows programinę įrangą;
- Didelis valdymo atstumas (iki 200 m), su papildoma įranga galima jį padidinti;
- Valdymas klaviatūra, pele;
- Siųstuvo bei imtuvo moduliai kompaktiški, neužima daug vietos;
- Perduodamų duomenų kodavimas, apsaugant nuo pašalinių trukdžių;
- Yra galimybė pritaikyti vaizdo kamerą, aplinkos stebėjimui.

Šio darbo metu sukurtas automobilio modelis gali būti pritaikytas stebėjimo tikslams, o įmontavus vaizdo kamerą, su vaizdo perdavimu į kompiuterį – paieškos tikslams.

7. LITERATŪRA IR KITI ŠALTINIAI

1. Weisbin, C. R. 1992. NASA telerobotics research program. [žiūrėta 2010 vasario 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.springerlink.com/content/un777566wl81n712/>
2. Autonomous Planetary Mobility. 2008. Nasa. [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: http://marsrover.nasa.gov/technology/is_autonomous_mobility.html
3. Intuitive surgical. 2010. [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.davincisurgery.com/>
4. Įsakymas dėl radijo dažnių (kanalų), kuriuos galima naudoti be atskiro leidimo, sąrašo patvirtinimo. 2003. Ryšių reguliavimo tarnyba [žiūrėta 2010 balandžio 10 d.]. Prieiga per internetą: http://www3.lrs.lt/pls/inter3/dokpaieska.showdoc_bin?p_id=329893
5. Techniniai reikalavimai radijo stotims. 2010. Ryšių reguliavimo tarnyba [žiūrėta 2010 vasario 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.rtt.lt/index.php?1584269713>
6. Modulation. 2009. Wikipedia [žiūrėta 2010 balandžio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Modulation>
7. Bluetooth. 2010. Wikipedia [žiūrėta 2010 gegužės 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://wikipedia.org/wiki/Bluetooth>
8. Wikipedia. 2010. IrDA. [žiūrėta 2010 vasario 22 d.]. Prieiga per internetą: <http://lt.wikipedia.org/wiki/irda>
9. Wikipedia. 2010. IEEE 802.11. [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://lt.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>, http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11
10. Atmel. Setup and Use the AVR Timers. [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prodocuments/doc2505.pdf>
11. R. Masteika. 2003. Elektros pavaros. Kaunas: Technologija, 125 p.
12. Nehmhzow, U. 2003. Mobile Robotics: A Practical Introduction. Second Edition. London: Springer, 521 p.
13. Nacionalinė radijo dažnių paskirstymo lentelė. 2010. Ryšių reguliavimo tarnyba [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.rtt.lt/index.php?-1276614847>
14. Danfoss. 2006. Преобразователи частоты. Москва. 165p.
15. Narvydas, G. 2006. Autonominių mobilių robotų valdymas. Kaunas. [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.personalas.ktu.lt/AutMobRobotuValdymas.pdf>
16. Basics of DC devices. 2009. [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www3.sea.siemens.com/step/templates/lesson.mason?dcd:2:1:1>

17. R. Masteika. 2003. Elektros pavaros. Kaunas: Technologija, 125 p.
18. Čepulis, V. 2001. Elektroninė optika, Kaunas: Technologija, 200 p.
19. Kostrauskas, P. 1993. Nuolatinės srovės elektros mašinos. Kaunas: Technologija, 79 p.
20. Smilgevičius, A. 2005. Automatikos mikromašinos. Vilnius: Technika, 344 p.
21. Magnetic Encoders. 2010. Avtron [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.avtron.com/pdf/encoders/WP-mag-encoders-solve-prob.pdf>
22. Marazas S. 1989. Elektros mašinos. I d. Vilnius: Mokslas, 303 p.
23. Application Note: LM2907 Tachometer/Speed Switch Building Block Applications. 2008. National Semiconductor [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.national.com/an/AN/AN-162.pdf>
24. Application Note: LM2907/LM2917 Frequency to Voltage Converter. 2008. National Semiconductor [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: www.national.com/ds/LM/LM2917.pdf
25. Rodnov, V. 2006. Padovanokite savo robotui regėjimą. [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.elektronika.lt/projects/theme/162/5613/>
26. Pleskas, S. 2008. Mechatronikos Pagrindai. Vilnius. Prieiga per internetą: http://eif.viko.lt/s_pleskas/Pleskas%20S.%20Mechatronikos_pagrindai.pdf
27. Masteika, R. K. 2002. Elektros pavaros. Kaunas: Technologija. 125 p.
28. Geleževičius V.; Kriščiūnas, K.; Kubilius, V. 1990. Elektros pavarų valdymo sistemos. Vilnius: Mokslas. 360 p.
29. Sidekerskienė, T. 2007. Namų kompiuterizavimas. Kaunas. [žiūrėta 2010 kovo 12 d.]. Prieiga per internetą: http://elen.ktu.lt/namo_kompiuterizavimasts.doc
30. Čilikinas, M. 1978. Automatizuotų elektros pavarų pagrindai. Vilnius: Mokslas. 422 p.
31. Hughes, A. 2006. Electric motors and devices: fundamentals, types and applications. Linacre Huose: Burlington. 404 p.
32. Werner L. 2001. Control of electrical devices. Springerlink: Berlin. 460 p.
33. Muhammad R. 2007. Power Electronics handbook. Elsevier: Burkingston. 1172 p.
34. Optical Encoder Design and Operation. 2010. BEIsensors [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: http://www.motion-control-info.com/encoder_design_guide.html
35. Rotary encoders. 2008. Citizen-micro [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.citizen-micro.com/tec/encoder.html>
36. Thomas, W. 2003. Electronic Communications System: Fundamentals Through Advanced. Prentice Hall. 1184 p.

37. KTU. 2010. Kompiuterinių tinklų laboratorija: Moduliacijos principai.. [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://ktl.kauko.lt/Tinklai/Kodavimaskonspektas.pdf>
38. Optical vs. Magnetic Encoders. 2010. Avtron [žiūrėta 2010 vasario 10 d.]. Prieiga per internetą: http://www.avtron.com/optical_vs_magnetic.htm
39. Urmonienė, L. Elektros pavarų teorijos konspektas. Klaipėda, 2009. Prieiga per internetą: <http://elektra-ku.lt/Studijuojantiems.php>
40. Kriauciūnas, J. Dažninės elektros pavaros tyrimas. Baigiamasis magistro darbas. Vilnius. 2009.

PRIEDAI

1 priedas.

```

//***** Kompiuteriu valdomos elektros pavaros tyrimas*****
// Imtuvo, enkoderio, variklio valdymo programa
// Atliko MSAm-08 grupės studentas Andrius Butkevičius
//*****

//----- PAGRINDINĖ PROGRAMA -----
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/sfr_defs.h>
#include <string.h>
#include <avr/pgmspace.h>
#include <util/delay.h>

#ifndef F_CPU      //apibrėžiamas taktinio generatoriaus dažnis
#define F_CPU 7372800
#endif
#define BAUDRATE 1200    //nustatomas duomenų priėmimo greitis
#define UBRRVAL ((F_CPU/(BAUDRATE*16UL))-1) //skaičiuojama registro reikšmė
#define SYNC 0XAA        //apibrėžiami sinchronizacijos signalai
#define RADDR0 0x99
#define outp(a, b) b = a
#define LEDON0 0x02       //mygtuko nuspaudimo fiksavimas
#define LEDON1 0x04
#define LEDON2 0x06
#define LEDON3 0x08
#define LEDON4 0x10
#define LEDON5 0x12

#define LEDON6 0x14       //apibrėžiami vienu metu nuspaudžiami du mygtukai
#define LEDON7 0x16       //b1+b4
#define LEDON8 0x18       //b1+b5
#define LEDON9 0x20       //b1+b6
#define LEDON10 0x22      //b2+b3
#define LEDON11 0x24      //b2+b4
#define LEDON12 0x26      //b2+b5
#define LEDON13 0x28      //b2+b6
#define LEDON14 0x30      //b3+b5
#define LEDON15 0x32      //b3+b6
#define LEDON16 0x34      //b4+b5

#define LEDOFF0 0x00      //mygtuko atleidimo fiksavimas

volatile uint16_t tick=0;    //kintamųjų apibrėžimai
int gretis=0;
int impulsai=0;
int laikas=0;

int main(void)
{
    Main_Init();
    USART_Init();           //duomenų priėmimo programa
    while(1){}             //ciklas
    return 0;
}

```

1 priedo tęsinys

```
void Main_Init(void)
{
    ICR1=921; //dažnis
    TCCR1A|=(0<<COM1A0)|(1<<COM1A1)|(0<<COM1B0)|(0<<COM1B1)|
    (0<<FOC1A)|(0<<FOC1B)|(1<<WGM11)|(0<<WGM10);
    TCCR1B|=(0<<ICNC1)|(0<<ICES1)|(1<<WGM13)|(1<<WGM12)|
    (0<<CS12)|(1<<CS11)|(0<<CS10);
    OCR1A=100; //

    outp(0xFF, DDRC //PORTC nustatomi išvedimui
    outp(0x00, DDRD); // PORTD nustatomas įvedimui (mygtukams)
    outp((1<<INT0)|(1<<INT1), GICR); // nustatome pertrauktis
    outp((0<<ISC11)|(0<<ISC10), MCUCR); //įjungiamo pertraukčių palaikymą
    outp((1<<ISC01)|(0<<ISC00), MCUCR);
    outp(0xFF, DDRB);
    outp(0x05, TCCR0); //nustatomas vidinis daliklis
    outp(0x00, TCNT0); //laikmatis skaičiuoja nuo nulio
    TIFR = (1<<TOV0);
    TIMSK =(1<<TOIE0);

    sei(); //įjungiamo pertrauktis
}
//-----
//----- P A P R O G R A M E S -----
void USART_Init(void) //-----
{
    UBRR1L=(uint8_t)UBRRVAL; //duomenų priėmimo greitis, žemesnysis baitas
    UBRR1H=(UBRRVAL>>8); //aukštesnysis baitas
    /*Nustatomas duomenų priėmimo kadro formatas: asinchroninis, be lygiavimo, 1 stop
    bitas, 8 bitų kadrą*/
    UCSRC=(1<<URSEL)|(0<<UMSEL)|(0<<UPM1)|(0<<UPM0)|
    (0<<USBS)|(0<<UCSZ2)|(1<<UCSZ1)|(1<<UCSZ0);
    UCSRB=(1<<RXEN)|(1<<RXCIE);//(1<<TXEN); // USART pertrauktis
}
uint8_t USART_vReceiveByte(void) //--- imtuvo požymio paprogramė -----
{
    while((UCSRA&(1<<RXC)) == 0); //laukiama gautų duomenų
    return UDR; //grįžimas į paprogramę
}
ISR(USART_RXC_vect) //----- duomenų priėmimo pertrauktis -----
{
    uint8_t raddress, data, chk; //siųstuvo perduoti duomenys
    raddress=USART_vReceiveByte(); //tikrinimas
    data=USART_vReceiveByte(); //leidimas priimti
    chk=USART_vReceiveByte(); //tikrinimą ar visi duomenys gauti
```

1 priedo tęsinys

```
if(chk==(raddress+data)) //palyginami gauti duomenys su apskaičiuotais
{
    if(raddress==RADDR0)
    {
        if(data==LEDON2)//ATGAL
        {
            PORTC=(1<<DDC2);
        }
        if(data==LEDON5)//PIRMYN
        {
            PORTC=(1<<DDC5);
        }
        if(data==LEDON3)
        {
            OCR1A+=50; //didinamas greitis
        }

        if(data==LEDON4)
        {
            OCR1A-=50; //mažinamas greitis
        }

        if(data==LEDOFF0)
        {
            PORTC=(0<<DDC0)|(0<<DDC2)|(0<<DDC3)|(0<<DDC4)|(
            0<<DDC5);
        }
    }
}

//----- PERTRAUKTYS -----
ISR(INT0_vect)
{
    tick++;
}

ISR(TIMER0_OVF_vect)
{
    laikas++;

    if (laikas==1)
    {
        rpm=tick;
        if (rpm<=5&&rpm<=4){ //tikrinamas greitis
        }
        else {
            laikas=0;
            tick=0;
        }
    }
}
```

1 priedo tęsinys

```
//***** Kompiuteriu valdomos elektros pavaros tyrimas*****  
// Siųstuvo valdymo programa  
// Atliko MSAm-08 grupės studentas Andrius Butkevičius  
//*****  
//----- PAGRINDINĖ PROGRAMA -----  
  
#include <avr/io.h>  
#include <util/delay.h>  
#ifndef F_CPU      //apibrėžiamas taktinio generatoriaus dažnis  
    #define F_CPU 7372800  
#endif  
#define BAUDRATE 1200    //nustatomas duomenų priėmimo greitis  
#define UBRRVAL ((F_CPU/(BAUDRATE*16UL))-1) //skaičiuojama registro reikšmė  
#define SYNC 0XAA        //apibrėžiami sinchronizacijos signalai  
#define RADDR0 0x99  
  
#define LEDON0 0x02      //mygtuko nuspaudimo fiksavimas  
#define LEDON1 0x04  
#define LEDON2 0x06  
#define LEDON3 0x08  
#define LEDON4 0x10  
#define LEDON5 0x12  
  
#define LEDON6 0x14      //apibrėžiami vienu metu nuspaudžiami du mygtukai  
#define LEDON7 0x16      //b1+b4  
#define LEDON8 0x18      //b1+b5  
#define LEDON9 0x20      //b1+b6  
#define LEDON10 0x22     //b2+b3  
#define LEDON11 0x24     //b2+b4  
#define LEDON12 0x26     //b2+b5  
#define LEDON13 0x28     //b2+b6  
#define LEDON14 0x30     //b3+b5  
#define LEDON15 0x32     //b3+b6  
#define LEDON16 0x34     //b4+b5  
#define LEDON17 0x36     //b4+b6  
  
#define LEDOFF0 0x00     //mygtuko atleidimo fiksavimas  
  
unsigned char mm=0;  
int b1=0, b2=0, b3=0, b4=0, b5=0, b6=0, b7=0, f1=0, f2=0, f3=0, f4=0, f5=0,  
    f6=0, f7=0; //apibrėžiame kintamuosius ir priskiriame pradines reikšmes  
  
int main(void)  
{  
  
    PORTC=1;  
    PORTC=(1<<DDC2)|(1<<DDC3)|(1<<DDC4)|(1<<DDC5);  
  
    USART_Init();  
  
    while(1)  
    {  
  
        mm++;
```

1 priedo tęsinys

```
f3=PINC;
if (f3&(1<<DDC2)) //ATGAL
    b3=0;
else b3=1;

mm++;
f4=PINC;
if (f4&(1<<DDC3)) //I KAIRE
    b4=0;
else b4=1;

mm++;
f5=PINC;
if (f5&(1<<DDC4)) // I DESINE
    b5=0;
else b5=1;

mm++;
f6=PINC;
if (f6&(1<<DDC5)) //PIRMYN
    b6=0;
else b6=1;
mm++;

if ((b6==1)&(b5==1))
    {(Send_Packet(RADDR0, LEDON14));} //PIRMYN DESINE
else
if ((b3==1)&(b5==1))
    {(Send_Packet(RADDR0, LEDON15));} //ATGAL DESINE
else
if ((b6==1)&(b4==1))
    {(Send_Packet(RADDR0, LEDON16));} //PIRMYN KAIRE
else
if ((b3==1)&(b4==1))
    {(Send_Packet(RADDR0, LEDON17));} //ATGAL KAIRE
else
{
if (b3==1)
    {(Send_Packet(RADDR0, LEDON2));} //ATGAL
if (b4==1)
    {(Send_Packet(RADDR0, LEDON3));} //I KAIRE
if (b5==1)
    {(Send_Packet(RADDR0, LEDON4));} //I DESINE
if (b6==1)
    {(Send_Packet(RADDR0, LEDON5));} //PIRMYN
else
{
if ((b3==0)&(b4==0)&(b5==0)&(b6==0))
    {(Send_Packet(RADDR0, LEDOFF0));}
}
}
}
return 0;
}
```

1 priedo tęsinys

```
//-----  
//----- P A P R O G R A M E S -----  
void USART_Init(void) //-----Duomenų perdavimo inicializacija-----  
{  
/*Nustatomas duomenų priėmimo kadro formatas: asinchroninis, be lygiavimo, 1 stop  
bitas, 8 bitų kadrą*/  
  
    UBRRL=(uint8_t)UBRRVAL;  
    UBRRH=(UBRRVAL>>8);  
    UCSRC=(1<<URSEL)|(0<<UMSEL)|(0<<UPM1)|(0<<UPM0)|  
        (0<<USBS)|(0<<UCSZ2)|(1<<UCSZ1)|(1<<UCSZ0);  
    UCSRB=(1<<TXEN);  
}  
void USART_vSendByte(uint8_t u8Data) //-----  
{  
    //laukiama kol visi duomenys bus išsiųsti  
    while((UCSRA&(1<<UDRE)) == 0);  
    UDR = u8Data; //perduoti duomenis  
}  
void Send_Packet(uint8_t addr, uint8_t cmd) //-----  
{  
    USART_vSendByte(SYNC); //siunčiamas sinchronizacijos bitas  
    USART_vSendByte(addr); //siunčiamas imtuvo adresas  
    USART_vSendByte(cmd); //sekanti komanda  
    USART_vSendByte((addr+cmd)); //siunčiamų duomenų patikrinimas  
}  
void delayms(uint8_t t) //-----delsa-----  
{  
    uint8_t i;  
    for(i=0;i<t;i++)  
        _delay_ms(1);  
}
```

2 priedas.

Elementų sąrašas

DD4	Galios modulis L293D	1		
DA1	Siųstuvas TX433	1		
DA2	Imtuvas RX433	1		
DA3	Stabilizatorius LM7805	1		
R1, R2, R5, R6, R7, R8	Varža	6	10 k Ω	
R3, R4	Varža	2	10 Ω	
C1, C2, C5, C6, C7, C8	Kondensatorius	4	15 pF	
C3	Kondensatorius	1	470 nF	
C4	Kondensatorius	1	1 μ F	
ZQ1	Kvarcinis rezonatorius	1	20 MHz	
ZQ2, ZQ3	Kvarcinis rezonatorius	2	8 MHz	
SB1	Mygtukas	1		Pradinio nustatymo mygtukas
SB2	Mygtukas	1		Programavimo mygtukas
VT1, VT2	Optronas CNX82A	2		