

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
JŪRŲ TECHNIKOS FAKULTETAS
ELEKTROTECHNIKOS KATEDRA

ELEKTRONIKOS IR ELEKTROS INŽINERIJOS MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ
PROGRAMOS „*PRAMONĖS ELEKTROS ĮRANGA IR AUTOMATIKA*“

(Studijų kodas 612H60002)

BAIGIAMASIS DARBAS

**ŠVYTUOJAMOJO JUDESIO VARIKLIO-
KOMPRESORIAUS SU TIRISTORINIŲ GALIOS
KEITIKLIŲ TYRIMAS**

Rengė: TMPE – 13 gr. Stud. Mantas Bagočius

Klaipėda, 2015

SANTRAUKA

Bagočius M. Švytuojamojo judesio variklio-kompresoriaus su tiristoriniu galios keitikliu tyrimas. Pramonės elektros įrangos ir automatikos programos magistro baigiamasis darbas.

Magistro baigiamąjį darbą sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas ir priedai.

Įvade aptariama problema dėl kurios pasirinkta darbo tema, darbo (temos) aktualumas, aprašomas tiriamasis objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai. Taip pat trumpai apžvelgiami švytuojamieji varikliai, bei jų valdymo būdai.

Pirmajame skyriuje pateikiama literatūros apžvalga nagrinėjama tematika. Trumpai apžvelgiami švytuojamieji varikliai, jų tipai, panaudojimo (pritaikymo) sritys. Detaliau aprašoma keletas švytuojamųjų variklių. Plačiau apžvelgiami galios grandinių valdymo būdai: simistorinis, tiristorinis, tranzistorinis, dažninis.

Antrajame skyriuje pateikiama informaciją apie eksperimento planavimą. Pateikiami aspektai pagal, kuriuos buvo tiriamas švytuojamasis variklis-kompresorius. Aprašoma technologinė tiriamojo darbo schema, pagal kurią buvo padarytas realus tyrimų standas su simistoriniu galios keitikliu, rotamtru, slėgiu davikliu ir kt.

Trečiasis skyrius skirtas tyrimų rezultatams, bei skaičiavimams. Pateikiami variklio elektrinės tyrimo dalies ir mechaninės kompresoriaus dalies rezultatai su dalinėmis išvadomis.

Išvadose aptarta atlikta literatūros apžvalga, gauti eksperimento rezultatai. Konstatuojama apie pasirinkto galios keitiklio pritaikymo plusus ir minusus tiriamajam švytuojamajam varikliui-kompresoriui.

Pagrindiniai žodžiai: tiesiaeigės švytuojamosios elektros mašinos, švytuojamasis elektros variklis-kompresorius, tiristorinis galios keitiklis, simistorius.

SUMMARY

Bagočius M. Investigation of oscillating motor-compressor with semistor converter. Final master thesis of program of Industrial Electrical Equipment and Automatics.

The thesis is consists of introduction, three chapters, general conclusions, references and annexes.

The first chapter includes the references review of analysed subjects as well as a brief survey of oscillating motors, their types and spheres of employment. The chapter presents a detailed description of some oscillating motors and a deep overview of controls ways of converters: triac, thyristor, transistor, frequency converter.

The second chapter presents the experiment planning information and aspects according to which oscillating motor-compressor was investigated. The technological scheme of survey followed by a test bench including triac converter, rotameter, pressure measuring element, etc.

The third chapter presents the results and calculations of survey giving the investigation results both of motors electrical and mechanical compressor's parts with partial conclusions.

Conclusions discuss reference survey and given results of experiment. Pluses and minuses of applying a chooser semistor converter for oscillating motor-compressor are stated.

Main keywords: linear oscillating electrical machine, oscillating motor-compressor, semistor converter, triac.

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Pagrindiniai švytuojamųjų mašinų tipai	6
3.1 lentelė. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, kai vožtuvas 2 atidarytas	34
3.2 lentelė. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, kai vožtuvas 2 pirmoje tarpinėje padėtyje	35
3.3 lentelė. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, kai vožtuvas 2 antroje tarpinėje padėtyje	35
3.4 lentelė. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, kai vožtuvas 2 trečioje tarpinėje padėtyje	36
3.5 lentelė. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, kai vožtuvas 2 uždaras	36
3.6 lentelė. Oro srauto matavimų rezultatai	43
3.7 lentelė. Slėgio matavimų rezultatai	45
3.8 lentelė. Perskaičiuoti slėgio matavimų rezultatai	46
3.9 lentelė. Slėgio matavimo galutiniai rezultatai	46
3.10 lentelė. Kompresoriaus sukuriama oro srauto ir slėgio matavimų duomenys	48

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklio konstrukcijos eskizas	9
1.2 pav. Švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklio konstrukcijos eskizas	10
1.3 pav. Švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklio konstrukcijos eskizas	11
1.4 pav. Simistorius ir jo elektroninė konstrukcija	12
1.5 pav. Simistoriaus voltamperinė charakteristika	13
1.6 pav. Simistoriaus valdymas	13
1.7 pav. Simistoriaus atidarymas	14
1.8 pav. Simistorinio valdymo schemas pavyzdys	14
1.9 pav. Greičio reguliatorius	15
1.10 pav. Tiristorių vaizdavimas: a – fizinė schema; b – ekvivalentinė schema; c- schematinis vaizdavimas	16
1.11 pav. Tiristorinio valdymo pavyzdys	16
1.12 pav. Tiristorių voltamperinė charakteristika	17
1.13 pav. Švytuojamojo sinchroninio pulsuojamąsios srovės variklio ir dvipusio kompresoriaus konstrukcijos schema	18
1. 14 pav. Simistorinio ir tiristorinio valdymo palyginimas	18
1.15 pav. Tranzistoriaus ir jo vidinė veikimo schema	19
1.16 pav. Dvipočio tranzistoriaus sandara (1 - bazė, 2 – emiteris, 3 – kolektorius)	20
1.17 pav. Grandinės su skirtingomis tranzistoriaus būsenomis (a- kai uždarytas, b- atidarytas)	21
1.18 pav. Blokinė diagrama	22
1.19 pav. Palyginimas tarp valdymo reostatais (kairė dalis) ir tranzistorinio valdymo(dešinėje)	22
1.20 pav. Blokinė schema	23
1.21 pav. Struktūrinė dažnio keitiklio schema	24
1.22 pav. Dažnio keitiklis su reguliuojamo dažnio srovės šaltiniu	25
1.23 pav. Impulso pločio moduliacijos pavyzdžiai	28
2.1 pav. Švytuojamasis variklis-kompresorius B0131414T	29
2.2 Kompresoriaus vaizdas iš kelių pusių.	30
2.3 pav. Technologinė tiriamojo darbo schema	31
2.4 pav. Baigiamojo darbo metu padarytas standas tyrimams atlikti	32
2.5 pav. Įtampos valdymo grandinės elektrinė schema	33
3.1 pav. U ir I oscilograma	37
3.2 pav. Įtampos priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo, $U=f(\alpha)$	39

3.3 pav. Srovės priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo, $I=f(\alpha)$	40
3.4 pav. Aktyviosios galios priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo, $P=f(\alpha)$	41
3.5 pav. Reaktyviosios galios priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo, $Q=f(\alpha)$	41
3.6 pav. Sąlyginio galios faktoriaus priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo, $Q=f(\alpha)$	41
3.7 Oro srauto priklausomybės nuo simistoriaus atidarymo kampo	44
3.8 pav. Slėgio priklausomybės nuo simistoriaus atidarymo kampo	47
3.9 pav. $V_s=f(p, \alpha)$	49
3.10 pav. Oro srauto priklausomybė nuo slėgio, kai simistorius pilnai atidarytas (kairėje), oro srauto priklausomybė nuo slėgio, kai simistorius atidarymo kampas 70°	49

TURINYS

ĮVADAS	4
1. ŠVYTUOJAMŲJŲ VARIKLIŲ VALDYMO SISTEMŲ SPRENDINIŲ ANALIZĖ	7
1.1. Tiesiaeigių švytuojamųjų variklių skirtingų konstrukcijų apžvalga	8
1.2. Galios grandinių valdymas	12
1.2.1. Simistorinis valdymas	12
1.2.2. Tiristorinis valdymas	16
1.2.3. Tranzistorinis valdymas	19
1.2.4. Dažninis valdymas	23
1.3. Valdymo būdai	26
2. EKSPERIMENTO PLANAVIMAS ŠVYTUOJAMOJO VARIKLIO SU SIMISTORINIŲ KETIKLIŲ IR TYRIMO STENDO SUKŪRIMAS	29
2.1. Tiriamas objektas – švytuojamasis variklis kompresorius	29
2.2. Eksperimentinė tiriamojo darbo schema	30
2.3. Galios regulatoriaus elektrinė schema	32
3. ŠVYTUOJAMOJO VARIKLIO SU SIMISTORINIŲ KETIKLIŲ EKSPERIMENTO IR JO REZULTATŲ ANALIZĖ	34
3.1. Elektrinių dydžių matavimo rezultatai	34
3.2. Kompresoriaus oro srauto matavimas	42
3.3. Kompresoriaus slėgio matavimai	44
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	51
LITERATŪRA	52
PRIEDAI	56

IVADAS

Elektros mašina yra ne kas kita, kaip energijos keitiklis. Šiose mašinose vyksta elektros energijos ir mechaninės energijos mainai, todėl į elektros mašinas galima žiūrėti kaip į elektromechaninį energijos keitiklį (Gečys ir kt., 2011). Elektros mašinų rūšių yra gana nemažai. Viena iš specialiųjų elektros mašinų rūšių yra švytuojamosios elektros mašinos, kurios pasižymi mechaninio judesio ypatybėmis – judesio periodiškumu, t.y. mašinos judžiosios dalies švytavimu. (Kudarauskas, 2008).

Apie švytuojamosios mašinos sinchronizmą ar asinchronizmą galima spręsti pagal tai, kaip judžiosios dalies švytavimo dažnis yra susijęs su maitinimo šaltinio įtampos dažniu. Jeigu švytavimo dažnis yra griežtai susijęs (lygus ar kartotinis) su apvijų įtampos dažniais (ar dažnių skirtumu), tai turime švytuojamąją sinchroninę mašiną. Jeigu švytavimo dažnis nėra griežtai susijęs su apvijų įtampos dažniais (pavyzdžiui, priklauso nuo apkrovos), turime švytuojamąją asinchroninę mašiną (Kudarauskas, 2008).

Švytuojamieji varikliai paprastai naudotini tais atvejais, kai apkrovos įrenginio vykdomasis elementas taip pat švytuoja. Šie varikliai plačiai pritaikomi:

- vibrotechnologijos įrenginiuose
- kalimo prietaisuose;
- stūmokliniuose kompresoriuose;
- asmens higienos prietaisuose (plaukų kirpimo mašinėlėse, masažuokliuose)

(Kudarauskas, 2004);

- dirbtinėse širdyse (Finocchiaro, 2008; Fukui Y et al., 2004);
- elektrinių vožtuvų pavarose ir automobilio amortizatoriuose (Paulides, 2006; Uchida, 2008);
- ir kitur.

Viena iš pagrindinių tokių variklių problemų yra susijusi su jų valdymu. Yra žinoma, kad švytuojamuosius variklius galima maitinti ir keisti jų valdomuosius parametrus keliais būdais:

1. Maitinant sinusinės įtampos šaltiniu:
 - Keisti įtampos dažnį;
 - Keisti maitinimo įtampos amplitudę;
 - Keisti maitinimo įtampos atidarymo kampą.
2. Maitinant nuolatine įtampa, ją moduliuojant:
 - Keičiant įtampos impulsų trukmę ;
 - Keičiant įtampos dydį;

- Keičiant įtampos impulsų dažnį.

Dažnu atveju, užtikrinant patikimą ir efektyvų imtuvų darbą, būtina valdyti šaltinio teikiamą energiją. Tokiam valdymui yra skirtos galios grandinių valdymo sistemos.

Valdantys elementai pasižymi didele įvairove ir greitu konstrukcijų, jų elementų vystymusi. Tai ypač pastebima elementuose, kurie gaminami mikroelektronikos pagrindu. Priklausomai nuo vietos automatinėje pavaroje, juos galima skirstyti į dvi grupes :

- Elementai, formuojantys užduotį pavaros judesiui ir įtakojantys statines bei dinamines pavaros savybes. Jie sudaro elektros pavaros valdymo sistemą ir yra jo neatskiriama dalis;
- Elementai, formuojantys galios dalies savybes ir esantys jos neatskiriama dalis. Šie elementai tiriant automatines pavaras atskirai nenagrinėjami, o matematinė vykdančiojo elemento išraiška pateikiama įvertinant kartu valdymo elementą.

Šiuo metu plačiausiai naudojami puslaidininkiniai keitikliai: tiristoriniai lygintuvai, tranzistoriniai keitikliai, valdomi impulso pločio moduliacijos pagrindu, srovės bei įtampos tiristoriniai ir tranzistoriniai dažnio keitikliai.

Temos aktualumas. Kaip jau minėta, švytuojamieji varikliai plinta ir keičia įvairių prietaisų įprastines elektros mašinas (kompresorių, technologinio vibravimo, kalimo ir pjovimo įrenginių, asmens higienos prietaisuose). Tačiau platesnį jų pritaikymą ir paplitimą (tarp jų siurblių, šaldytuvų kompresorių, lokatorių ir kt.) riboja nepakankamas šių variklių valdymo teorijos išvystymas bei valdymo principų realizavimo aprašymas (t.y. konkrečių valdymo schemų kūrimas ir jų optimizavimas).

Bendroji švytuojamosios pavaros problema – pavaros valdymas. Pirmiausia reikia išsiaiškinti, kaip švytuojamasis variklis veikia nevaldomoje švytuojamojoje pavaroje ir kokią įtaką pavaros darbui turi pasirinktasis galios grandinės keitiklis bei jo valdymas.

Ne visada įmanoma, kad pavara būtų nevaldoma (išskyrus variklio įjungimą ir išjungimą), ypač jei apkrovos sąlygos keičiasi. Tai yra, variklio ir apkrovos parametrai ne visada gali būti suderinti visoje besikeičiančios apkrovos srityje. Būtina atkreipti dėmesį, kad bet koks valdymas negali padidinti paties variklio naudingumo koeficiento, jeigu jis žemas, net kai apkrova yra optimali (Kudarauskas, 2008).

Darbo objektas: švytuojamasis tiesiaegis pulsuojamasis srovės asimetrinis variklis.

Darbo tikslas: Nustatyti švytuojamojo variklio-kompresoriaus valdymo rodiklių įtaką jo energetiniams rodikliams.

Uždaviniai:

1. Atlikti mokslinių darbų analizę (apžvelgiant, kas yra padaryta šia tema pasaulyje);

2. Nustatyti švytuojamosios elektros mašinos valdymo parametrų įtaką jos energetiniams rodikliams;
3. Sukonstruoti tyrimų stendą;
4. Atlikti eksperimentinį tyrimą;
5. Interpretuoti gautus rezultatus;
6. Pateikti rekomendacijas.

Tyrimo metodai: Mokslinių šaltinių analizė, analitiniai skaičiavimai, eksperimentinis tyrimas.

1. ŠVYTUOJAMŪJŲ VARIKLIŲ VALDYMO SISTEMŲ SPRENDINIŲ ANALIZĖ

Švytuojamosios mašinos skirstomos į sinchronines ir asinchronines. Kai švytuojamosios mašinos judžiosios dalies švytavimo dažnis yra griežtai susijęs (lygus ar kartotinis) su apvijų įtampos dažniais (ar dažnių skirtumu) – švytuojamoji sinchroninė mašina. Kitas variantas, kai švytavimo dažnis nėra griežtai susijęs su apvijų įtampos dažniais - švytuojamoji asinchroninė mašiną (Kudarauskas, 2008).

Švytuojamųjų elektros mašinų tipai surašyti 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė Pagrindiniai švytuojamųjų mašinų tipai (Kudarauskas, 2008)

Magnetovarų kiekis	Magnetovarų pobūdis		Mašinos tipas
	Pirmoji	Antroji	
<u>Viena</u>	Kintamoji	—	Sinchroninė reaktyvioji
	Pulsuojamoji	—	Sinchroninė pulsuojamosios srovės
<u>Dvi</u>	Kintamoji	Nuolatinė	Sinchroninė žadinamoji
	Kintamoji	Kintamoji (kito dažnio)	Sinchroninė dvipusio maitinimo
	Kintamoji	Kintamoji pasyvioje grandinėje	Asinchroninė

Vienos magnetovaros švytuojamosios elektros mašinos gali būti tik sinchroninės. Be to, magnetovara turi būti periodiškai kintanti. Ji gali būti suformuojama apvijoje, prijungtoje prie kintamosios įtampos tinklo arba keitiklio, sukuriančio dvipusius įtampos impulsus. Tuo atveju gauname švytuojamąją sinchroninę reaktyviają elektros mašiną. Taikomas ir kitas būdas periodinei magnetovarai formuoti – apvija maitinama kintamąja įtampa per nevaldomą ar valdomą diodą, sukuriant vienkrypčius srovės impulsus. Kadangi tokios mašinos neturėjo bendro pavadinimo, tai švytuojamųjų mašinų tyrimo pradžioje jos buvo pavadintos pulsuojamosios srovės mašinomis

(Kudarauskas, 2008). Nežadinamųjų elektros mašinų tyrimai paplitę Lietuvos mokslininkų darbuose (Brazaitis et al., 2011; Brazaitis et al., 2010; Guseinovicė et al., 2002; Jankūnas et al., 2009; Simanyniecė, 2002; Urmonienė, 2011).

Kalbant apie užsienio mokslininkų darbus, galima teigti, kad jie sutelkti ties švytuojamojo judesio sinchroninių žadinamųjų elektros mašinų tyrimais. Tokių švytuojamųjų elektros mašinų populiarumą užsienyje lemia tai, kad šių mašinų naudingumo koeficientas didesnis, priimtinesnis galios ir masės santykis lyginant su nežadinamosiomis elektros mašinomis. Užsienio mokslininkų darbuose palčiai išnagrinėti matematiniai modeliai, analizuojant įtaisų judžiosios dalies švytavimų poslinkio amplitudės valdymą ir jų konstrukcijos ypatumus.

Kai švytuojamoji elektros mašina turi du magnetovarus šaltinius ir viena iš tų magnetovaru yra pasyvi, t. y. kai šią magnetovara sukurianti apvija yra uždara ir joje nėra išorinių elektrovaros šaltinių, gauname švytuojamąją asinchroninę mašiną. Šios apvijos srovę (kartu ir magnetovara) sukuria tik tai pačioje apvijoje indukuota elektrovara. Be to, tarpusavio magnetinis laidis turi priklausyti nuo judžiosios dalies koordinatės. Šiomis sąlygomis pasyvioje apvijoje indukuojama elektrovara, kurios dažnis priklauso nuo elektros srovės pirmoje apvijoje dažnio, taip pat nuo judžiosios dalies švytavimo dažnio, taigi, nėra griežtai susietas su pirmosios apvijos įtampos dažniu. Kintamasis tarpusavio magnetinis laidis (magnetomechaninis keitiklis) gali sukurti švytavimo dažnio kintamąją jėgą ir taip gali būti išvystoma mechaninė galia. Taigi, galima gauti asinchroninę mašinos veiką švytavimo dažniui priklausant nuo konkrečių apkrovos sąlygų.

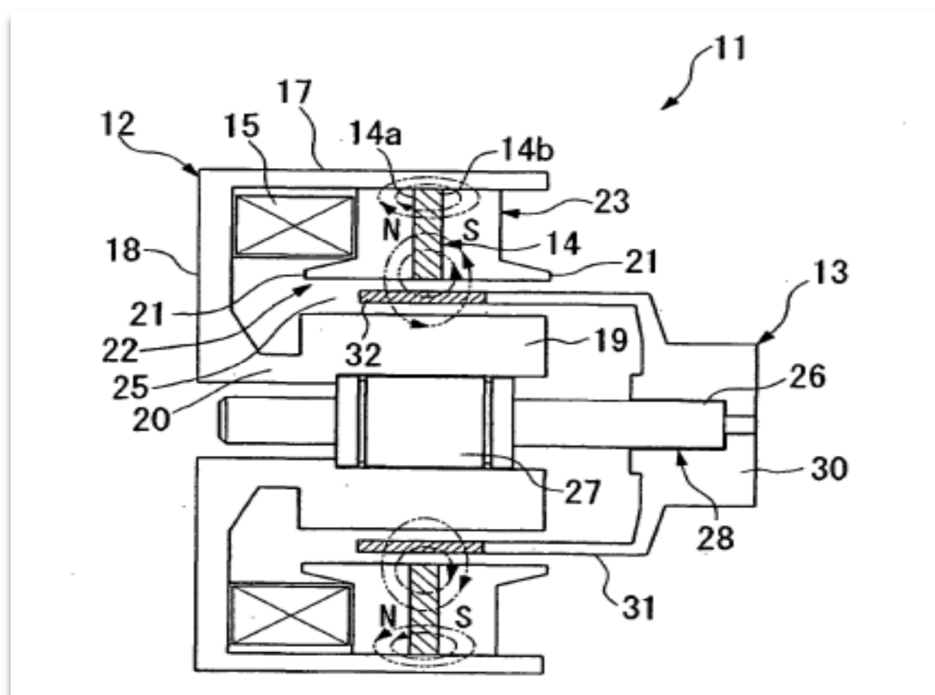
Dviejų magnetovaru švytuojamosios mašinos taip pat yra sinchroninės, kai apvijos prijungtos prie išorinių įtampos šaltinių, taip pat, kai viena magnetovara suformuojama nuolatiniais magnetais. Taigi, jei viena magnetovara pastovi (nuolatinės srovės žadinimo apvija ar nuolatinis magnetas), turime paprastą švytuojamosios sinchroninės mašinos atvejį. Jei abi apvijos prijungtos prie skirtingo dažnio įtampų, turime dvipusio maitinimo švytuojamąją sinchroninę mašiną (Kudarauskas, 2008).

1.1. Tiesiaeigių švytuojamųjų variklių skirtingų konstrukcijų apžvalga

Nakagawa H., Kato K., Miki T pristatė (užpatentavo) švytuojamąjį elektros variklį. Šis švytuojamasis tiesiaeigis elektros variklis, pavaizduotas 1.1 pav., yra sudarytas iš judžiosios dalies (13) ir nejudančiosios dalies - statoriaus (12). Prie statoriaus yra pritvirtintas žiedo formos nuolatinis magnetas (14) ir vienfazė apvija (15). Statorius yra sudarytas iš cilindrinės formos išorinės dalies (17), šoninės dalies (18), jungiamosios dalies (20) ir vidinės dalies (19). Visos šios dalys sudaro statoriaus magnetolaidį.

Nuolatinis magnetas (14) pagamintas iš ferito. Šiaurinis magneto polius (14a) ir pietinis magneto polius (14b) yra išdėstyti vienas šalia kito ašine kryptimi. Magnetinių polių konstrukcijos yra L-formos, taip yra padidinama judžiosios variklio dalies švytavimų amplitudė.

Judančiąją variklio dalį (13) sudaro pagrindas (30), cilindrinė dalis (31), kurios pagamintos iš sintetinės dervos, ir cilindrinė dalis (32), kuri pagaminta iš feromagnetinės medžiagos. Ši variklio dalis įvorės (28) pagalba sujungiama su velenu (26). Velenas taip pat eina per įvorę (27), kuri pritvirtinta prie statoriaus magnetolaidžio vidinės dalies (19).



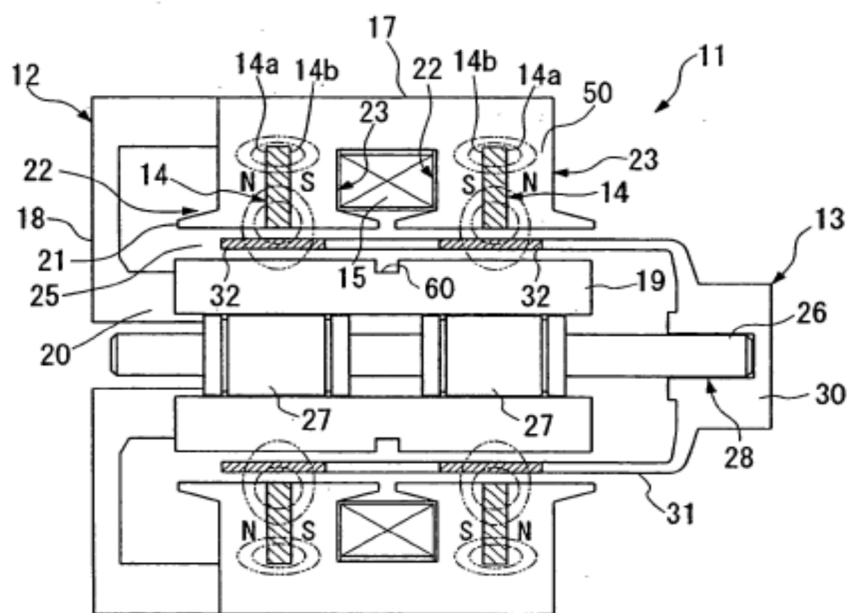
1.1 pav. Švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklio konstrukcijos eskizas (Nakagawa et al., 2012)

Variklio konstrukcijos privalumai. Šio tiesiaeigio švytuojamojo variklio vienas pagrindinių konstrukcinių privalumų yra tai, kad nuolatinis magnetas montuojamas prie statoriaus, o ne ant variklio judžiosios dalies, kas mažina judžiosios dalies svorį. Toks konstrukcinis sprendimas leidžia sumažinti variklio judžiosios dalies sudaromą inercinę reaktyviąją varžą. Taip pat galima išskirti tai, kad variklio judžioji dalis yra gaminama iš dviejų medžiagų, t.y. judžiosios dalies pagrindas (30) ir cilindrinė dalis (31) yra gaminama iš sintetinės dervos, o likusi dalis (32) – feromagnetinės medžiagos. Kadangi dervos tankis mažesnis nei geležies, tai irgi lengvina judžiąją variklio dalį. Šitokia judžiosios dalies konstrukcija lemia ir tai, kokį kelio ilgį (švytavimų amplitudę) ji gali nueiti, nes nueitas kelias tiesiogiai proporcingas cilindrinės dalies ilgiui, kuris pagamintas iš feromagnetinės medžiagos.

Kitas tų pačių autorių (išradėjų) švytuojamasis variklis, patentuotas 2012 metais kartu su prieš tai minėtu varikliu, yra priskiriamas švytuojamojo tiesiaeigio judesio žadinamųjų (su dviem nuolatiniais magnetais) simetrinių elektros variklių klasei, pavaizduotas 1.2 paveiksle (Nakagawa et al., 2012).

Kaip ir kiti švytuojamieji varikliai, šis (11) sudarytas iš nejudančiosios dalies- statoriaus (12) ir judžiosios dalies (13). Konstrukcija panaši į prieš tai aprašyto variklio (Nakagawa et al., 2012), bet yra esminių skirtumų. Šioje konstrukcijoje naudojami du nuolatiniai magnetai (14), kurie išdėstyti taip, kad jų polių kryptis skirtųsi (N-S-S-N). Kaip ir prieš tai nagrinėtoje konstrukcijoje, nuolatiniai magnetai yra žiedo formos. Šie magnetai sujungti su statoriaus (12) magnetolaidžiu (šoninės dalis (18), jungiamosios dalis (20) ir vidinės dalis (19)). Statoriaus magnetolaidžio vidinėje dalyje yra suformuotas žiedinis griovelis (60).

Šioje konstrukcijoje vienfazė variklio apvija patalpinta tarp nuolatinėjų magnetų polių konstrukcijų.



1.2. pav. Švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklio konstrukcijos eskizas (Nakagawa et al., 2012)

Judančiąją variklio dalį (13) sudaro pagrindas (30), cilindrinė dalis (31), kurios pagamintos iš sintetinės dervos ir cilindrinės dalies (32), kuri pagaminta iš feromagnetinės medžiagos. Kaip matyti 2.1. paveiksle, dalys pagamintos iš feromagnetinės medžiagos yra dvi, kadangi yra du nuolatiniai magnetai. Judančioji variklio dalis įvorės (28) pagalba sujungiama su vėliu (26). Vėlienas taip pat eina per įvoves (27), kurios yra taip pat dvi, ir jos pritvirtintos prie statoriaus magnetolaidžio vidinės dalies (19).

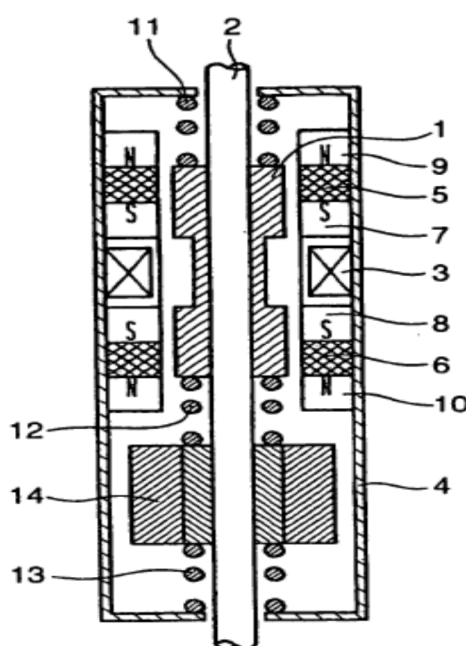
Variklio konstrukcijos privalumai. Pagrindinis šio švytuojamojo variklio privalumas tai, kad jame sumontuoti du nuolatiniai magnetai, kurie abiejų pusperiodžių metu sukuria vienodą jėgą, veikiančią variklio judžiąją dalį. Taip yra todėl, kad abiejų pusperiodžių metu sumuojasi kintamas apvijos magnetinės indukcijos srautas ir nuolatinio magneto (vieno ar kito) sukurtas magnetinės indukcijos srautas.

Dar viena 2006 m. Taniguchi S., Shimizu H., Naruse H. užpatentuoto švytuojamojo variklio konstrukcija pavaizduota 1.3 paveiksle. Variklis sudarytas iš judančios ir nejudančios dalies. Judančioji dalis sudaryta iš veleno (2), kuris sujungtas su stūmokliu (judžiosios dalies magnetolaidžiu) (1). Šis magnetolaidis pagamintas iš plieno ir, kaip matyti paveiksle, prie galų yra platesnio skersmens, o viduryje yra susiaurėjęs. Tokia konstrukcija leidžia sumažinti judančios dalies masę, o tai lemia geresnius variklio energetinius rodiklius.

Variklio žiedinė vienfazė apvija (3) tvirtinama prie vidinės nejudančios variklio dalies – statoriaus (4). Nuolatiniai magnetai (5, 6) yra žiedo formos ir išdėstyti abipus ritės. Šiauriniai nuolatinių magneto poliai (9, 10) ir pietiniai (7, 8).

Judžiosios dalies švytavimų amplitudei apriboti įtaisyta dalis (14), o kompensuoti inertiniam reaktansui, t.y. judžiosios dalies inertiškumui, yra įrengtos spyruoklės (11, 12, 13).

Variklio konstrukcijos privalumai. Šio variklio konstrukcija nėra sudėtinga, bet turi savo privalumų. Vienas iš pagrindinių- tai variklio magnetolaidžio forma, kas leidžia sumažinti judžiosios dalies masę. Taigi, mažesnė masė leidžia varikliui pasiekti didesnę našumą. Taip pat tokia variklio konstrukcija leidžia sumažinti gamybos kaštus.



1.3. pav. Švytuojamojo tiesiaeigio judesio elektros variklio konstrukcijos eskizas (Taniguchi et al., 2006)

1.2. Galios grandinių valdymas

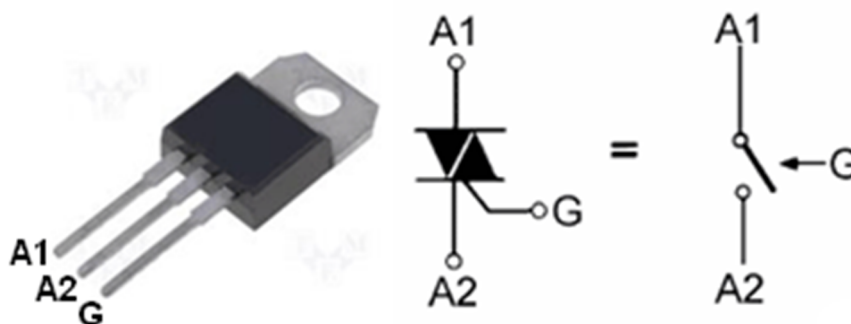
Švytuojamuosius variklius galima maitinti ir keisti jų parametrus keliais būdais:

1. Maitinant sinusine įtampa:
 - Keisti įtampos dažnį;
 - Keisti maitinimo įtampos amplitudę (Chun at al., 2008);
 - Keisti maitinimo įtampos atidarymo kampą (Heo et al., 2003).
2. Maitinant nuolatine įtampa, ją moduluojant (Urmonienė L ir kt., 2011):
 - Keičiant įtampos impulsų trukmę ;
 - Keičiant įtampos dydį (Jankūnas ir kt., 2009);
 - Keičiant įtampos impulsų dažnį.

Kai švytuojamasis variklis maitinamas sinusine įtampa, keičiant jos dažnį - naudojami įtampos keitikliai. Kai keičiamas įtampos atidarymo kampas, naudojami simistoriniai ar tiristoriniai keitikliai.

1.2.1. Simistorinis valdymas

Vienas dažniausiai naudojamų būdų kintamosios srovės galios valdymui - naudoti dviejų kryptių tiristorius, vadinamus simistoriais. Simistorius - puslaidininkinis elektronikos elementas, skirtas galios grandinėms komutuoti abiejų kintamos įtampos pusperiodžiuose. Šis elementas ir jo elektroninė schema pavaizduota 1.4 paveiksle.

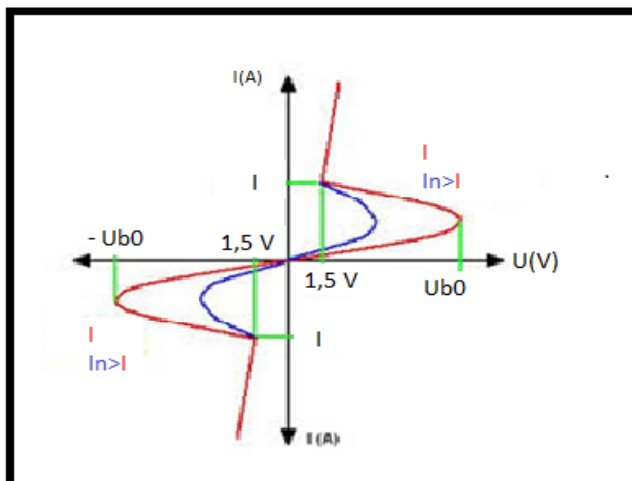


1.4 pav. Simistorius ir jo elektroninė konstrukcija
(Category Triacs, 2014)

Taigi simistorius - tai du priešpriešai sujungti tiristoriai su vienu valdymo elektrodu G . Simistorių galima valdyti tiek teigiamais tiek neigiamais valdymo impulsais, neatsižvelgiant į kintamosios įtampos šaltinio poliarumą duotu momentu. Anodo bei katodo terminai simistoriui netenka prasmės, todėl elektrodą iš valdymo gnybto pusės priimta vadinti pagrindiniu išvadu A1, o kitą – A2. Valdymo impulsai paduodami A1 išvado atžvilgiu. Schemose simistorių vaizduojame

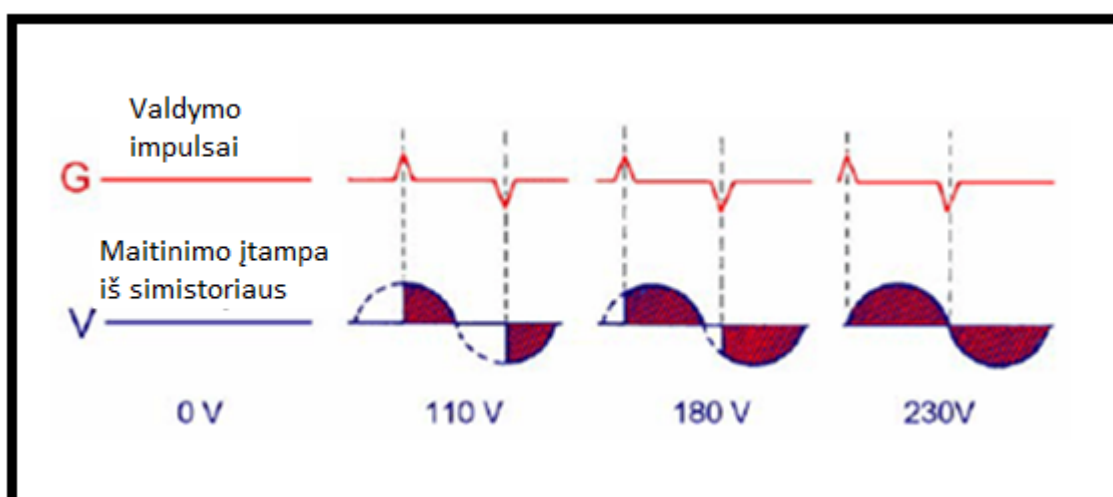
simboliu, pateiktu 1 paveikslo viduryje (Category Triacs, 2014).

Simistoriaus voltamperinė charakteristika yra simetrinė, ši charakteristika pavaizduota 1.5 paveiksle. Charakteristikoje I_G yra valdymo impulsai, o U_B - įtampos prie kurių atsidaro simistoriai (Category Triacs, 2014).



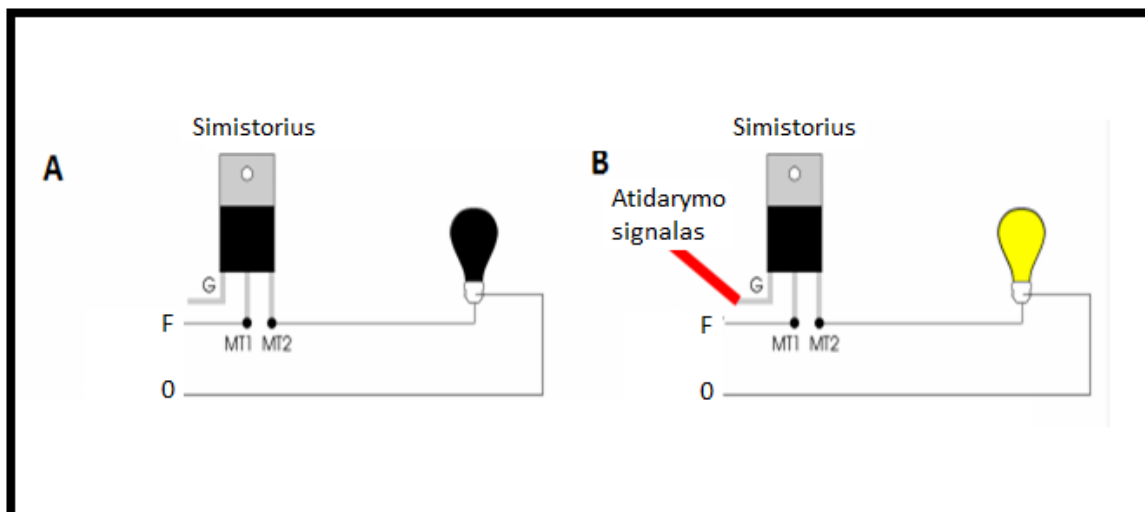
1.5 pav. Simistoriaus voltamperinė charakteristika (Category Triacs, 2014)

Simistoriaus darbas valdant kintamosios srovės grandinės gali, pavaizduotas 1.6 paveiksle. Kaip matyti iš paveikslo, kai simistoriaus atidarymo kampas α apie 45° , tada apkrova maitinama apie pusę maitinimo šaltinio įtampos (110 V). Mažėjant atidarymo kampui, maitinimo įtampa didėja, o kai esant atidarymo kampui 0° , simistorius yra pilnai atidarytas, ir apkrova maitinama ketiklio maitinimo įtampa (tinklo įtampa) (230 V).



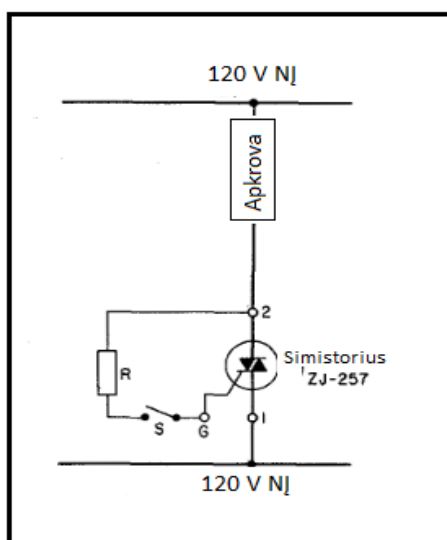
1.6 pav. Simistoriaus valdymas (Category Triacs, 2014)

Simistorius valdomas impulsais į valdymo elektroda G. Kaip matyti 1.7 paveiksle, kai signalo nėra valdymo elektrode – simistorius uždarytas, todėl apkrovos elementas yra be maitinimo. Kai valdymo signalas paduodamas į valdymo elektroda, simistorius atidaromas ir per jo valdomuosius elektrodus yra uždaroma elektros grandinė, todėl apkrova gauna maitinimą (Triac or solid state AC switch, 2014).



1.7 pav. Simistoriaus atidarymas
(Triac or solid state AC switch, 2014)

Pirmosios mokslinės publikacijos pagal mokslinių straipsnių bazę IEEE apie simistorinį valdymą paskelbtos dar 1965 m. Mokslininkas Storm, H.F. savo straipsnyje tyrinėjo tuo metu visai dar naujieną – silicio pagrindu pagamintą elektroninį raktą, pavadintą simistoriumi (ang. Triac). Tai elementas, turintis tris elektrodus, kurių pagalba galima valdyti kintamą elektros įtampą, tiek teigiamu pusperiodžiu, tiek neigiamu. Toks valdymas, autoriaus nuomone, galėjo būti pritaikomas šildytuvų, kaitinamųjų ar fluorescencinių lempų valdymui. Viena iš straipsnyje pateikiamų valdymo schemų pateikiama 1.8 paveiksle (Storm, 1965).



1.8 pav. Simistorinio valdymo schemos pavyzdys.

Apie tiesiaeigių švytuojamųjų variklių-kompresorių valdymą simistoriais buvo pranešimas vienoje mokslo konferencijoje Londone. Publikacijoje teigiama, kad tiesiaeigių variklių judžiosios dalies švytavimų centrą valdyti reikia keičiantis darbinei apkrova, keičiant maitinimo įtampą. Pateikta paties kompresoriaus konstrukcija, blokinė valdymo schema (programinė ir techninė dalis). Aprašomi būdai, kai galima nustatyti švytuojamosios dalies padėtį. Vienas iš jų- naudoti sensorius LVDT (tiesinį kintamą diferencinį transformatorių) ar pagreičio matuoklius, tačiau jie pakankamai brangūs. Kitas būdas nustatyti padėtį- tai matuoti variklio apvijų įtampą ir srovę ir apskaičiuoti padėtį pagal formulę (Heo et al. 2003):

$$x(t) = \int [V_m(t) - R \cdot i(t)] \cdot dt - L \cdot [i(t) - i(0)] \quad (1.1)$$

Kur $V_m(t)$ – momentinė (amplitudinė) variklio įtampa, $i(t)$ – momentinė (amplitudinė) srovė, tekanti variklio apvija, L - induktyvumas, R -aktyvioji varža.

Eksperimento rezultatai parodė, kad tiek nustatinėjant judžiosios dalies padėtį, jutikliai, tiek, apskaičiavus iš įtampą ir srovę, yra labai panašūs.

Taip pat straipsnyje pateiktas palyginimas, kaip kinta kompresoriaus našumas valdant kompresorių simistoriumi, dažnio keitikliu (VVVF) ir per inverterį. Rezultatai parodė, kad didžiausias našumas gautas valdant su VVVF, toliau seka valdant per simistorių ir prasčiausias rezultatas su inverteriu. (Heo et al. 2003).

Naujausiose mokslinės publikacijose (nuo 2010 metų) simistoriai dažniausiai nagrinėjami tyrinėjami įvairių skalndių įtampos reguliatorių (angl. dimerių) įrangoje, skirtų valdyti apšvietimą (dažniausiai LED apšvietimui), varikliams (dirbantiems įvairiais režimais, ar specialiai pritaikytiems procesams) ir kitiems elektros prietaisams.

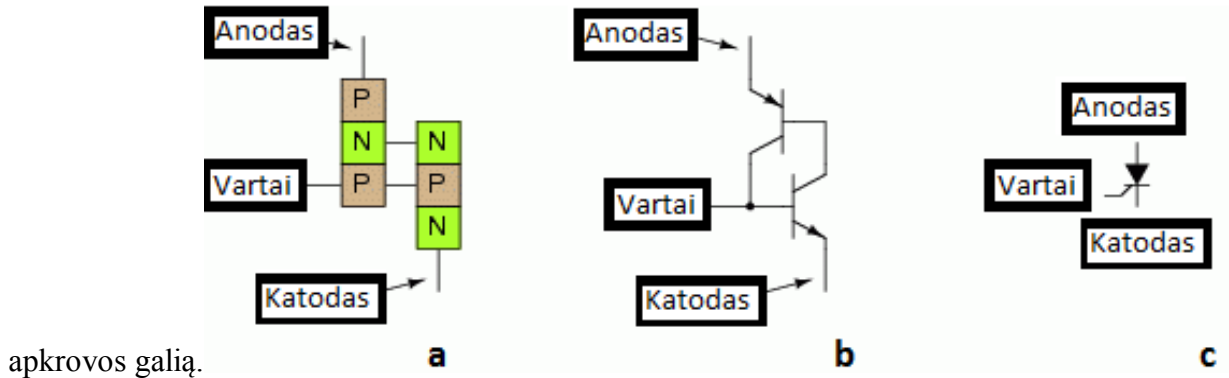


1.9 pav. Greičio reguliatorius
(Regulatorius, 2014)

Šiuo metu įvairių variklių greičių valdymui yra prieinama daug įvairiausių elektronikos sistemų ir tam skirtų įrenginių. Vieni tokių- siūlomi variklio greičio reguliatoriai, kurių valdymo elementas (simistorius). Vienfazio variklio greičio reguliatoriaus pavyzdys pateikiamas 1.9 paveiksle.

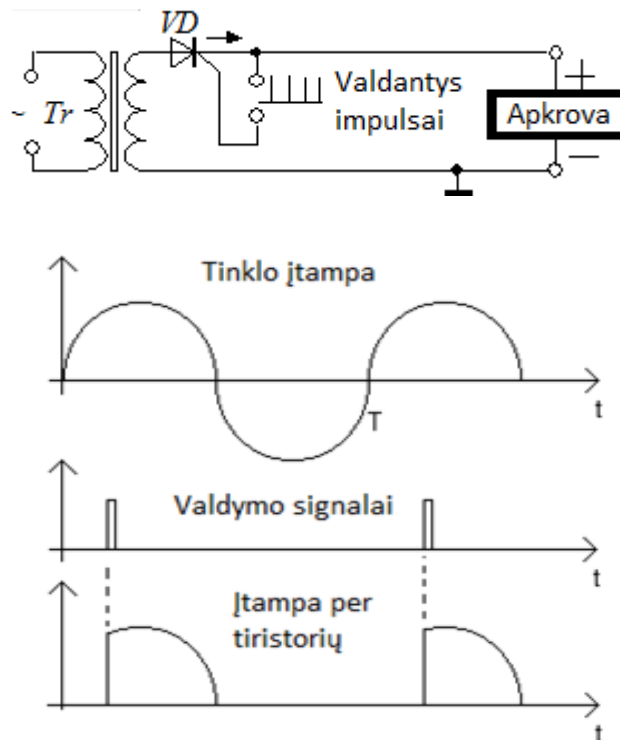
1.2.2 Tiristorinis valdymas

Tiristoriai – tai sudėtiniai, keturių ir daugiau puslaidininkio sluoksnių prietaisai. 1.10 paveiksle parodyta jų sandara ir atstojamoji schema bei schematinis vaizdavimas Tiristorių galima parodyti kaip dviejų p-n-p ir n-p-n tranzistorių darinį. Tai valdomas diodas, sugebantis valdyti



1.10 pav. Tiristorių vaizdavimas: a – fizinė schema; b – ekvivalentinė schema; c- schematinis vaizdavimas (Elektronika, 2012)

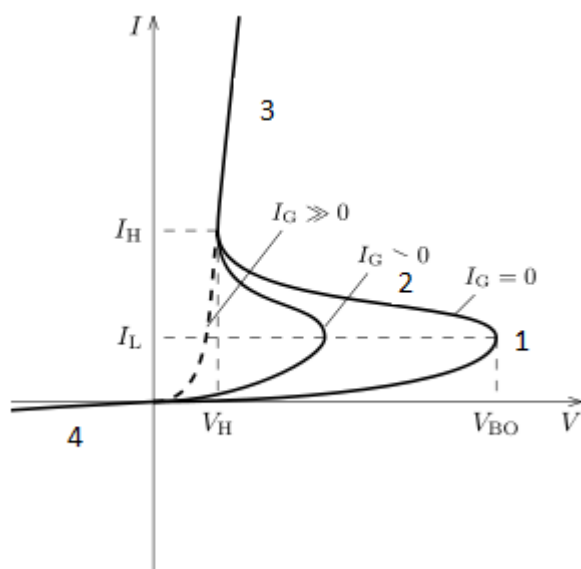
Tiristorius atidaromas paduodant į valdymo elektrodą trumpą srovės impulsą. Kai tiristorius atsidaro, tai prasideda regeneracinis procesas, palaikantis darbo srovę iki nesumažės maitinanti įtampa iki 0 V. Tada tiristorius užsidaro. Tiristorius neatsidaro tol, kol valdančio impulso srovė nepratekės nuo valdymo elektrodo į tiristoriaus katodą.



1.11 pav. Tiristorinio valdymo pavyzdys (Le thyristor , 2014)

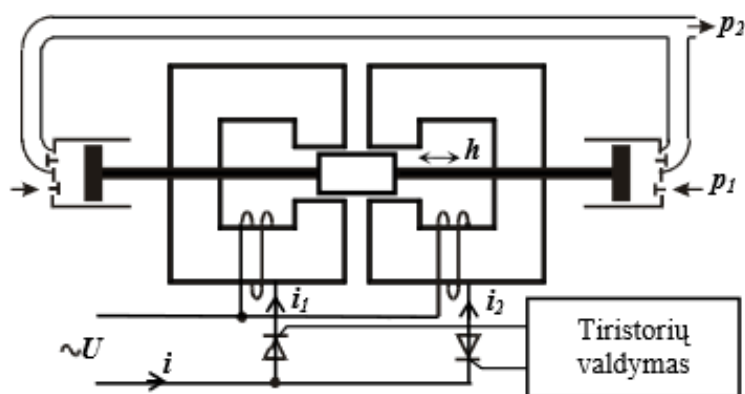
1.11 paveiksle, įjungus tiristorių į kintamosios įtampos grandinę (matinimo įtampa sinusinė) ir reguliuojant atidarančio impulso fazę (valdymo signalais) atžvilgiu maitinančios įtampos, galima reguliuoti atidaryto tiristoriaus darbo trukmę. Tiristorius užsidaro automatiškai kiekvieno teigiamo pusperiodžio pabaigoje, kai įtampa tampa lygi nuliui voltų. Tiristorių galima uždaryti ir valdymo elektrodu paleisti priešingos krypties srovės impulsą. Tačiau toks būdas neekonomiškas ir retai vartojamas.

Tiristorių voltamperinę charakteristiką galima sudalinti į keturias dalis. 1-3 dalys atitinka būseną, kai jis yra veikiamas tiesioginės, o 4 dalis – atbulinės įtampos (1.12 pav.). Tiristorius charakterizuojamas tiesiogine perjungimo įtampa U_{BO} , prie kurios tiristorius be paleidimo impulso pereina į laidžią būseną. Paleidimo impulso srovė I_G mažina perjungimo įtampos V_{Bn} dydį. Kuo ji didesnė, tuo perjungimo įtampa mažesnė (Voltamperinė charakteristika, 2013).



1.12 pav. Tiristorių voltamperinė charakteristika (Voltamperinė charakteristika, 2013)

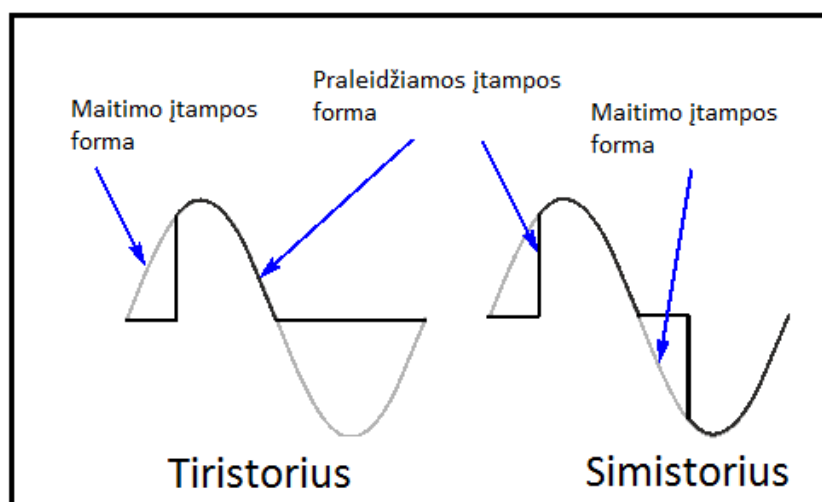
Švytuojamojo variklio-kompresoriaus švytavimų centro valdymo tyrimą, panaudojant tiristorius, atliko prof. S. Kudarauskas su bendraminčiais Klaipėdos universiteto mokslininkais A. Senuliu ir L. Symaniniene. Šiame moksliniame straipsnyje nagrinėjamos švytuojamojo variklio pavaros švytavimų centro valdymo (stabilizavimo) problemos, kurios ypač aktualios kompresoriaus pavaros atveju. Švytavimų centras dažniausiai stabilizuojamas mechaninėmis spyruoklėmis, kurios pabrangina pavarą, sumažina jos patikimumą. Švytuojamojo sinchroninio pulsuojamąsios srovės variklio matematinio modelio tyrimu parodyta, kad švytavimų centro dreifą galima riboti ir valdyti elektriškai (1.13 paveikslas), naudojant tiristorius (Kudarauskas et al., 2004).



1.13 pav. Švytuojamojo sinchroninio pulsuojamąsios srovės variklio ir dvipusio kompresoriaus konstrukcijos schema

Kitoje mokslinėje publikacijoje tiriamas švytuojamasis pulsuojamąsios srovės variklis, valdomas tiristoriniu galios keitikliu. Tiriami variklio energetiniai rodikliai priklausomai nuo tiristoriaus atidarymo kampų (parinkti 0° , 36° , 72°), pateikiamos įvairios charakteristikos (srovės, galios, naudingumo...) tiek dvimačiais, tiek trimačiais grafikais. Sąlygos paimtos tokios: kai variklio induktyvumo charakteristika nuo oro tarpo $L(h)$ tiesinė, sinusoidinė ir hiperbolinė. Konstatuojama, kad variklių energetinių rodiklių charakteristikos su įvairiomis $L(h)$ yra skirtingos. Taip pat nustatyta, kad nuo tiristoriaus atidarymo kampo priklauso srovės kitimo spektras ir variklio energetiniai rodikliai (Kudarauskas, 2002).

Užsienio mokslininkai gana plačiai tyrinėja tiristorinį valdymą, bet šio valdymo tiesioginį pritaikymą švytuojamosioms mašinoms tarp naujausių mokslinių darbų nerasta. Naujausi tyrimai, susiję su tiristorinių keitiklių galios faktoriaus gerinimu, panaudojant skirtingo (kintamo) dydžio kondensatorius (Saito et al., 2013), taip pat tiristorinio valdymo keitiklių panaudojimo didelės, galios grandinėms, vėjo energetikoje pritaikymo tyrimas (Zhang et al. 2013). Mokslinių darbų, susijusių su tiristoriais ir jų panaudojimui galios grandinėse, yra dar daug, tačiau susijusių su jų panaudojimu švytuojamojo judesio variklių valdymui nėra labai daug.



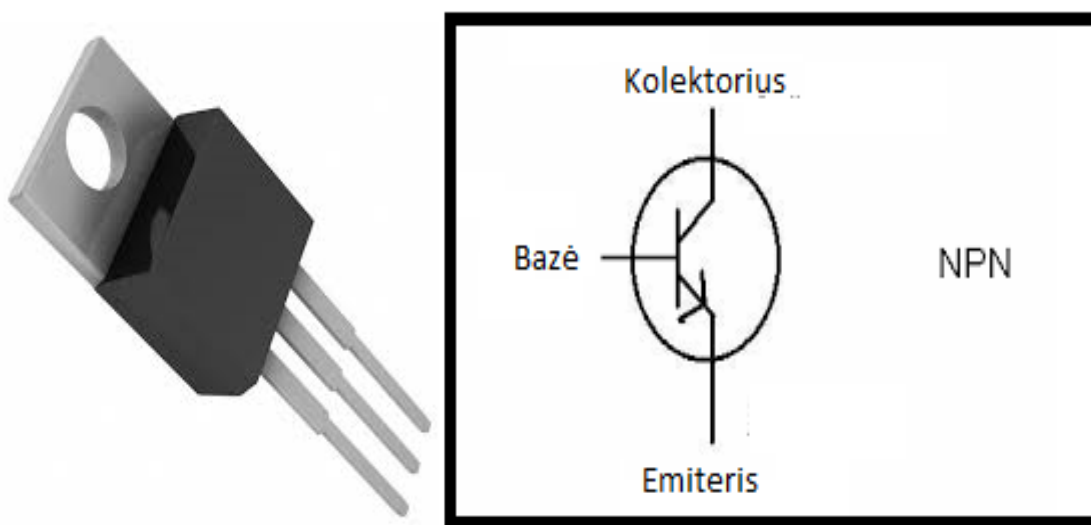
1.14 pav. Simistorinio ir tiristorinio valdymo palyginimas (Radio electronics, 2014)

Kadangi, tiek simistorinis, tiek tiristorinis valdymas nėra gana plačiai pritaikyti švytuojamojo judesio variklio valdymui, todėl kyla klausimas (gal netgi) tikslas patikrinti, kaip nuo valdymo būdų priklauso tokio tipo variklio energetiniams rodikliams. Patys valdymo skirtumai pateikiami 1.14 paveiksle. Iš šio paveikslo matyti, kad naudojant simistorius, įtampa valdoma tiek teigiamame, tiek neigiamame pusperiodžiuose, tuo metu naudojant tiristorius, įtampa valdoma tik viename iš pusperiodžių.

1.2.3. Tranzistorinis valdymas

Vienas iš įtampos reguliavimo būdų gali būti paremtas tranzistoriniu valdymu. Taigi, tranzistoriumi vadinamas puslaidininkinis įtaisas, paprastai naudojamas elektroniniams signalams sustiprinti ar nukreipti. Labiausiai paplitę tranzistoriai turi dvi pn sandūras. Dviejų sandūrų tranzistoriuose panaudojami dviejų rūšių krūvininkai (elektronai ir skylės), todėl jie ir vadinami dvipoliais.

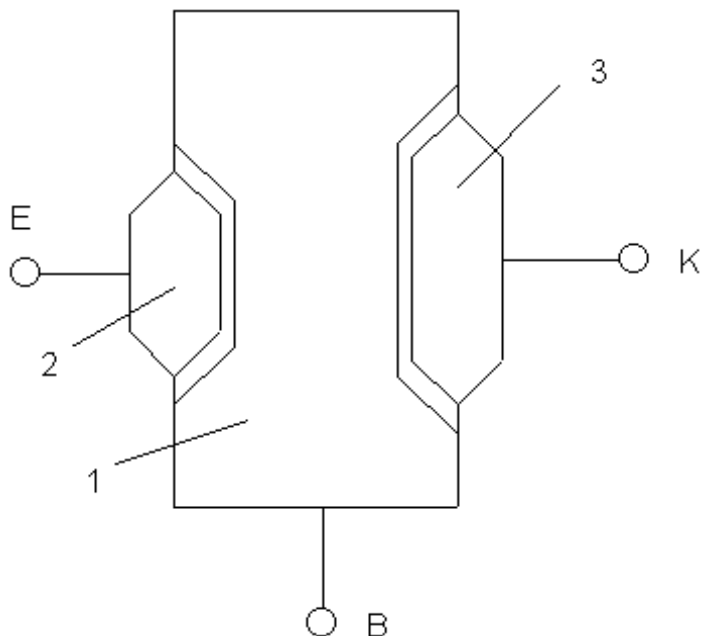
Vienas N-P-N tipo tranzistorius pateiktas 1.15 pav.



1.15pav. Tranzistoriaus ir jo vidinė veikimo schema
(Elektromanija, 2013)

Kalbant apie tranzistorinį valdymą, reiktų pirmiausia išsiaiškinti, iš ko sudaryti patys tranzistoriai, o tam tinkamiausia pasirinkti populiariausią dvipolį tranzistorių. Dvipolio tranzistoriaus sandara pavaizduota 1.16 pav. Pagrindinis tokio tranzistoriaus elementas yra puslaidininkinis kristalas, kuriame, panaudojant priemaišas, sudarytos trys skirtingo laidumo zonos. Jei vidurinė zona yra n (elektroninio) laidumo, o dvi kraštinės – p (skylinio) laidumo, tai prietaisas vadinamas pnp struktūros tranzistoriumi. Npn struktūros tranzistorių vidurinė zona yra skylinio, o kraštinės – elektroninio laidumo (Elektromanija, 2013).

Elektroninio ir skylinio laidumo sričių sandūra tarp emiterio ir bazės vadinama emiterine, o tarp bazės ir kolektoriaus – kolektorine sandūra. Tranzistoriaus bazės sritis daroma labai plona (iki 20 μm). Įvairios tranzistoriaus sritys yra legiruotos nevienodai. Paprastai emiterio srities legiravimo laipsnis yra 2 – 3 eilėmis aukštesnis negu bazės srities. Bazės ir kolektoriaus sričių legiravimo laipsnis priklauso nuo prietaiso tipo.



1.16 pav. Dvipolio tranzistoriaus sandara (1 - bazė, 2 – emiteris, 3 – kolektorius)

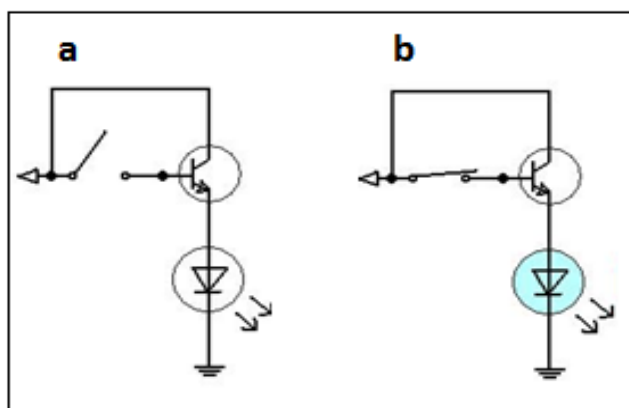
Pagal veikimo greitį (pagal veikimo dažnį) dvipoliai tranzistoriai skirstomi į keturias kategorijas:

1. Žemojo dažnio tranzistoriai. Suprantama, jie dažniausiai skirti žemojo dažnio stiprinimo schemoms. Darbo temperatūrų diapazonas yra nuo -60 iki $+75$ $^{\circ}\text{C}$.
2. Vidutinių dažnių tranzistoriai. Skirti iki 5 MHz dažnio virpesiams stiprinti ir generuoti. Šių tranzistorių darbo temperatūrų diapazonas yra nuo -60 iki $+125$ $^{\circ}\text{C}$.
3. Aukštojo dažnio tranzistoriai. Skirti virš 5 MHz dažnio darbui. Tokių tranzistorių darbo temperatūrų diapazonas yra nuo -55 iki $+60$ $^{\circ}\text{C}$.
4. Superaukštojo dažnio tranzistoriai. Jų darbo temperatūrų diapazonas -50 iki $+60$ $^{\circ}\text{C}$.

Veikimą galima paaiškinti taip: kai jungiklis išjungtas, pro jį neprateką elektros srovė (nėra signalo, atidarančio tranzistoriaus), tranzistorius uždarytas, likusi grandinė taip pat neuždaryta, todėl šviesos diodas nešviečia. Toks variantas pavaizduotas 1.17 paveikslo a dalyje, kada tranzistoriaus raktas uždaras ir kai šviesos diodas nešviečia.

Pakeitus jungiklio padėtį į „įjungta“, tranzistoriaus bazėje pradeda tekėti srovė (gaunamas signalas tranzistoriui atsidaryti), elektroninis raktas atidaromas ir per kolektorių į emiterį pradeda

tekėti srovė. Tuo metu sužimba šviesos diodas. Ši būseną pavaizduota 1.17 paveiksle **b** dalyje. Kaip matome, jungiklis įjungtas, tranzistorius atidarytas ir šviesos diodas suveikęs.



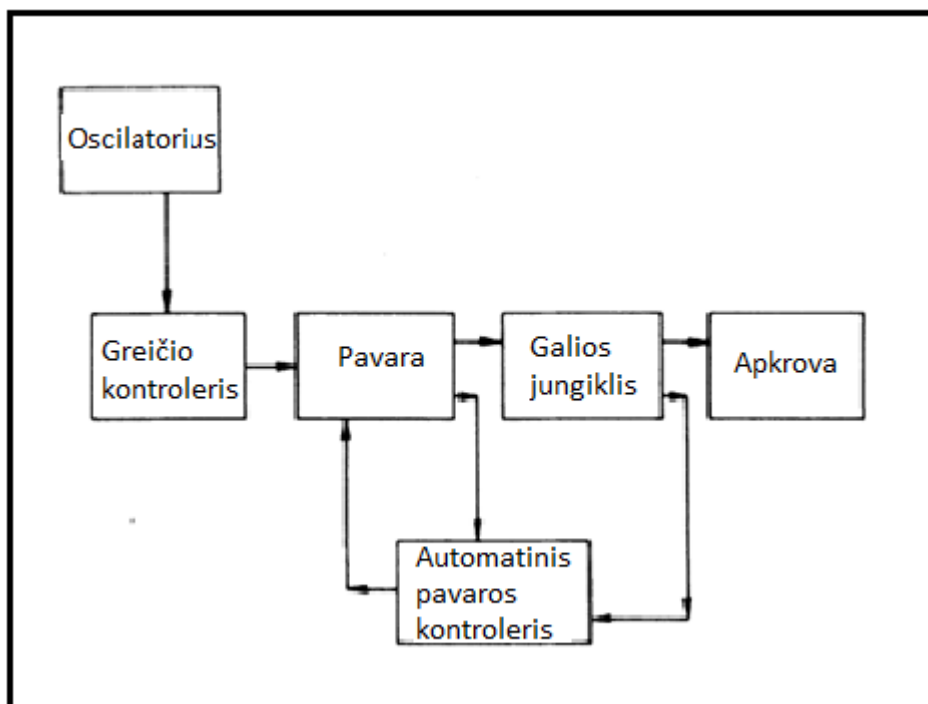
1.17 pav. Grandinės su skirtingomis tranzistoriaus būsenomis (a- kai uždarytas, b- atidarytas)

Šie elektronikos elementai išrasti Jungtinėse Amerikos valstijose 1948 m. Po aštuonerių metų, 1956 metais, išradėjai-fizikai Džonas Bardynas, Volteris Bratenas ir Viljamas Soklis už šį elektronikos stebuklą buvo apdovanoti Nobelio fizikos premija.

Analizuojant mokslinius šaltinius, galima pastebėti, kad pirmieji darbai, susiję su tranzistoriniu valdymu, pradėti dar praėjusio šimtmečio šešto dešimtmečio pabaigoje. Kaip ir suprantama, dauguma šių darbų buvo atliekami Jungtinėse Amerikos valstijose. Pirmieji darbai susiję su nuolatinės srovės variklių greičio valdymu.

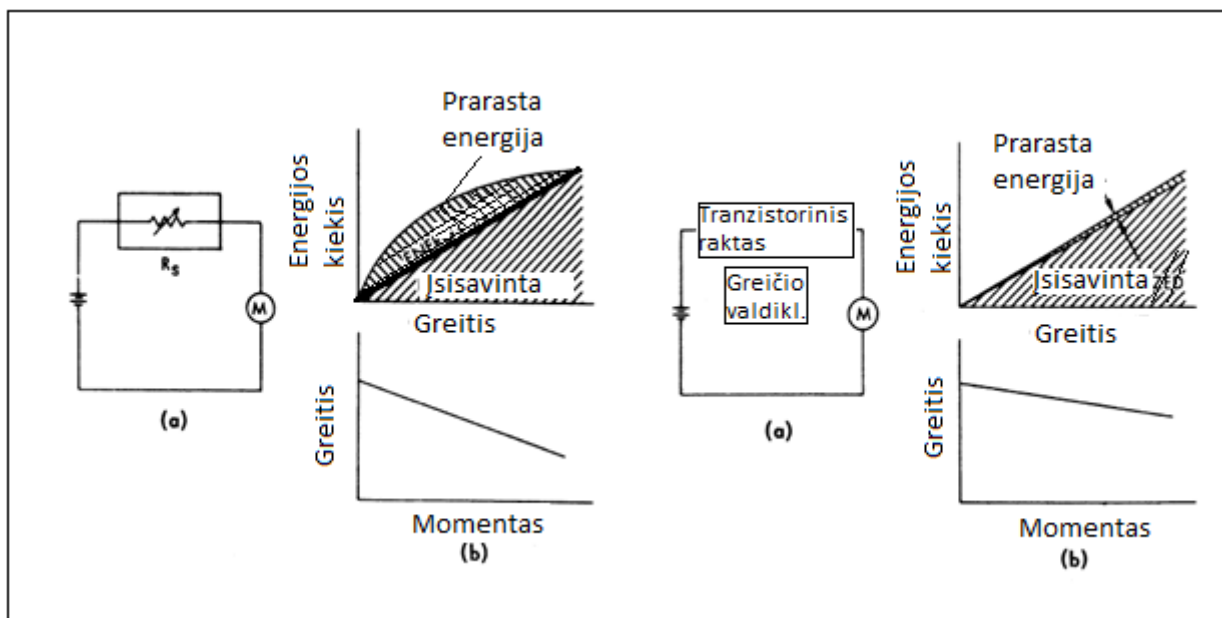
Dar 1960 metais buvo publikuotas JACK ALLISON, PAUL VERGEZ, MEMBER IRE straipsnis apie nuolatinės srovės variklio greičio reguliavimą pasitelkiant tranzistorinį valdymą (Allison, 1961). Šiame straipsnyje buvo lyginamas įprastinis tų laikų variklio valdymas pasitelkiant varžyną su to laikotarpio naujove greičio valdymu, pasitelkiant tranzistorius.

Tranzistorinio valdymo diagrama pateikiama 1.18 paveiksle. Kaip matyti, iš oscilatoriaus signalai užduodami į greičio valdymo bloką, o iš jo į pavarą-valdiklį (driver). Iš šio bloko signalai užduodami galios jungikliui (power-switch)- tranzistoriui, o iš jo jau pačiam valdomajam objektui (load)- varikliui. Užtikrinant greičio stabilizavimą, panaudotas grįžtamasis ryšys.



1.18 pav. Blokinė diagrama

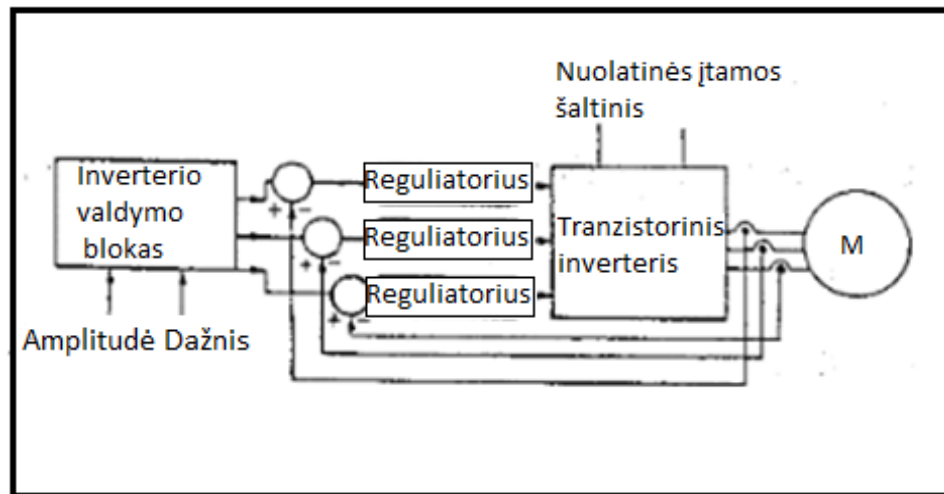
1.19 paveiksle gana aiškiai matyti ir tranzistorinio valdymo naudingumas. Paveikslo b viršutinėje dalyje pateikiamas grafikas, kuriame matyti, kad žymiai mažesni energijos nuostoliai valdant tranzistoriniu būdu, taip pat ir elektromechaninė charakteristika išlieka kietesnė.



1.19 pav. Palyginimas tarp valdymo reostatais (kairė dalis) ir tranzistorinio valdymo (dešinėje).

Bėgant laikui, tyrimų vis gausėjo, tobulėjo tiek patys tranzistoriai, tiek jų valdymas. Plačiai tyrinėjami stiprintuvai, inverteriai ir kiti įrenginiai su tranzistoriais, jų valdymas. Mokslininkai

Leung, W.S. ; Ng, C.W. tyrinėjo tranzistorinį inverterių ir jo valdymą (Leung et al., 1988). Tyrimo blokinė schema pateikiama 1.20 paveiksle.



1.20 pav. Blokinė schema

Lietuvos mokslininkai plačiau tyrinėja pačius tranzistorius, jų sandarą, savybes. Tiriama visokių priemonių įtaka tranzistorių veikimui, jo darbinėms savybėms (atidarymui, uždarymui, pralaidumui, darbinei temperatūrai ir kitoms.). Tokie tyrimai atliekami Vilniaus universiteto Kietojo kūno elektronikos katedroje.

Po 2000 metų mokslinių straipsnių apie tranzistorinį valdymą sumažėjo, mano manymu, tam turėjo įtakos tai kuriamos valdymo sistemos, kurios skirtos ne vien tranzistoriams, bet ir kitiems elektronikos elementams valdyti. Žinoma, yra publikacijų ir apie tranzistorinį valdymą, kuris naudojamas įtampos pakėlimo konverteriuose (Boost converter) (Sengupta et al., 2003).

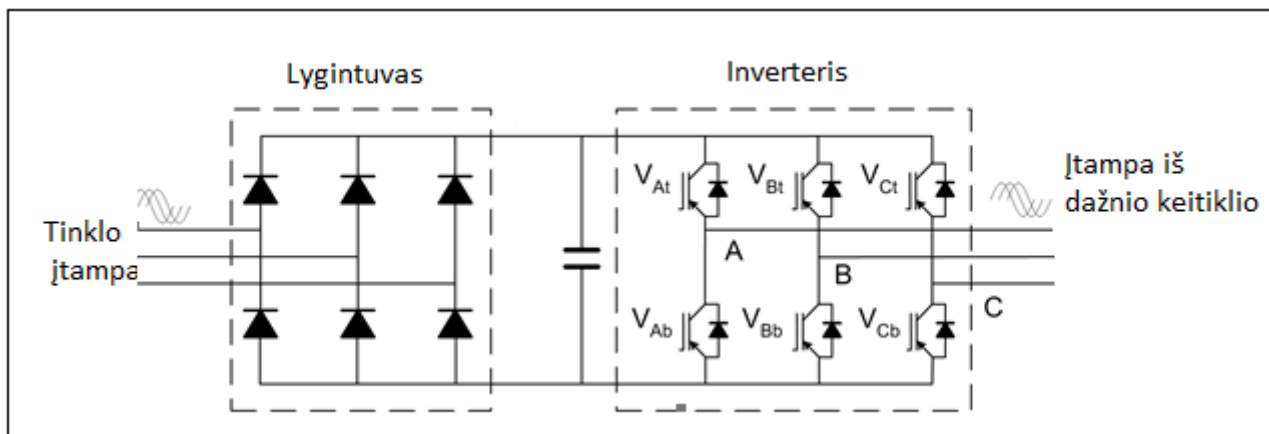
Naujausios mokslinės publikacijos yra apie pačių tranzistorių (didelio galingumo tranzistoriai, super aukšto dažnio tranzistoriai) tyrimus: darbinės savybių priklausomybės nuo temperatūros, tam tikrų priemonių poveikis tranzistorių darbui. Taip pat tranzistorių pritaikymas įvairiose elektronikos sistemose.

1.2.4. Dažninis valdymas

Pagrindinė dažnio keitiklio paskirtis yra valdyti pigiausias ir paprasčiausias pavaras (valdant maitinimo įtampos dydį ir dažnį). Dažnio keitiklis paprastai turi du valdymo įėjimus: pirmas – įtampos, antras – dažnio valdymas.

Dažnio keitiklio paskirtis -suformuoti keičiamo dažnio ir įtampos tinklą, prie kurio prijungus kintamos srovės elektros variklį, jo apvijomis tekėtų sinuso formos srovės ir jos būtų tokio dažnio,

fazės ir dydžio, kad variklio judžioji dalis judėtų norimu greičiu, reikiama kryptimi ir turėtų reikiamą momentą (Kriaučiūnas, 2009).



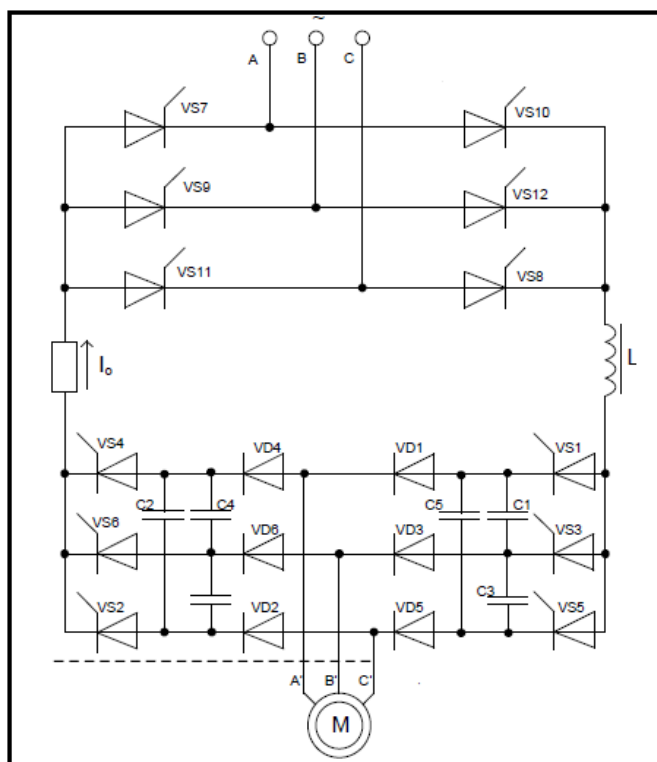
1.21 pav. Struktūrinė dažnio keitiklio schema
(Motorcontrols, 2013)

Dažnio keitiklį (struktūrinė schema pateikta 1.21 pav.) sudaro trys pagrindinės dalys : 1 – lygintuvas, 2 – nuolatinės įtampos filtras ir 3 – inverteris. Trifazio puslaidininkinis lygintuvas - išlygina tinklo įtampą; filtras – filtruoja išlygintos įtampos pulsacijas; trifazis įtampos inverteris - nuolatinę įtampą keičia į kintamąją. Žinoma didelę reikšmę keitikliui jo valdymo sistema. Taip pat reikia paminėti, kad keitikliai turi nemažai jutiklių:

- srovės jutikliai - jais matuojamos kiekvienos fazės variklio srovės, taip galima nustatyti variklio apkrovą bei variklio srauto vektoriaus padėtį (priklausomai nuo keitiklio tipo);
- maitinimo įtampos jutikliai;
- temperatūros jutikliai , kurie signalizuoja, jei per aukšta inverterio raktų temperatūra.

Dažnio keitiklio valdymo sistema sudaryta ne tik iš daugybės jutiklių, bet ir valdymo modulių. Impulso pločio modulatorius suformuoja signalus, kuriais valdomi inverterio raktai. Prie žemų ir vidutinių įtampų inverteriuose naudojami dvipoliai tranzistoriai suizoliuota užtūra IGBT (IGBT – angl. Insulated Gate Bipolar Transistors). Šiuo metu IGBT realizuoja srovės komutavimą iki 1800A esant iki 5 kV įtampai. Šių tranzistorių persijungimo trukmė yra apie 200 – 400 ns. Šie tranzistoriai pakeitė iki tol tokiuose inverteriuose naudotus uždaromuosius tranzistorius GTO.

Dažnio keitiklio su tiristoriniais raktais (statinis tiristorinis dažnio keitiklis) schema pateikiama 1.23 paveiksle. Tokį dažnio keitiklį sudaro valdomas arba nevaldomas lygintuvas, įtampos pulsacijų filtras ir autonominis įtampos arba srovės inverteris, nuolatinę įtampą arba srovę keičiantis trifaze kintamo dažnio įtampa arba srove (Geleževičius ir kt., 1990).



1.22 pav. Dažnio keitiklis su reguliuojamo dažnio srovės šaltiniu

Dažnio keitiklio pagrindiniai valdymo būdai:

- Dažninis valdymas naudojant impulsų pločio moduliaciją (IPM);
- Magnetinio srauto vektorinis valdymas su IPM;
- Tiesioginis momento valdymas (DTC) (Bačinskas, 2004).

Kintamosios srovės pavarų dažninio valdymo technologijos naudoja parametrus, sugeneruotus variklio išorėje, įtampos ir dažnio valdymui. Įtampos ir dažnio santykis įvedamas į moduliatorių, kuris modeliuoja kintamosios srovės sinusoidę ir maitina variklio statoriaus apvijas. Tai pavadinta impulsų pločio moduliacija (IPM). Puslaidininkinis lygintuvas ir tarpinė filtro grandinė užtikrina pastovią įtampą. Keitiklis valdo variklį IPM formos impulsais, nusakančiais įtampą ir dažnį. Didžiausias išskirtinumas, kad, taikant šį metodą, nėra naudojami grįžtamieji ryšiai. Tokia sistema pavadinta atvirojo kontūro.

Apibendrinant šį valdymo būdą, galima teigti, kad dažnis ir įtampa – pagrindiniai valdymo kintamieji, kuriais maitinamos variklio statoriaus apvijos. Kadangi nenaudojami grįžtamieji ryšiai, reiškia, joks greitis ar padėties signalas nenuimamas. Todėl momentas valdomas be jokio tikslumo lygio.

Norint pasiekti aukšto lygio sukimo momento reakcijos reguliavime ir greičio didelį tikslumą, reikalingas grįžtamojo ryšio įrenginys. Dėl to įrenginys brangsta ir tradicinio variklio valdymas pasidaro sunkesnis. Be to naudojamas moduliatorius, kuris uždelsia ryšį tarp gaunamų įtampos ir dažnio signalų bei reikalingų variklio reagavimui signalų.

Tiesioginiam variklio sukimo momento nustatymui naudojant išskirtinę DTC technologiją, magnetinio lauko orientacijos valdymas realizuotas be grįžtamojo ryšio. Čia valdymo kintamieji – variklio veikimo momentas ir variklio įmagnetinimo srautas. DTC valdyme nereikalingi greičio grįžtamojo ryšio jutikliai: tachometrai arba koduojantys įrenginiai. DTC valdymas naudoja patį greičiausią skaitmeninį signalą, apdorojantį technines priemones ir daug tobulesnį matematinį variklio modelį. Reziümė - pavara su momento reakcija, kuri yra apie 10 kartų greitesnė už bet kokią kitą nuolatinės ar kintamosios srovės pavara. Greičio tikslumas bus geresnis negu atvirojo kontūro pavaroje, kuri sutapatinama su nuolatinės srovės pavara, su grįžtamoju ryšiu. DTC produkcijos sukurta pirma universali pavara su nuolatinės ar kintamosios srovės išpildymo galimybe (Geleževičius ir kt., 1990).

1.3. Valdymo būdai

Vektorinis valdymas. Vektorinio valdymo sistemos praėjo labai ilgą vystymosi kelią ir šiuo metu yra labiausiai paplitusios kintamosios srovės variklių valdyme. Šios sistemos leidžia paprastai ir efektyviai valdyti sudėtingus objektus, kaip kintamos srovės variklis su trumpai jungtu rotoriumi. Plečiasi šių sistemų pritaikymo sritys, vis daugiau atsisakoma automatizuotų valdymo pavarų su nuolatinės srovės varikliais. Pirmiausia tai susiję su galios elektronikos, leidžiančios kurti patikimus ir santykinai pigius keitiklius, tobulinimu.

Praėjusio amžiaus aštunto dešimtmečio pradžioje F. Blaschke pasiūlė asinchroninio variklio valdymo sistemos sudarymo metodą, kuriame buvo panaudotas asinchroninio variklio sistemos, orientuotos pagal rotoriaus srautą, modelis. Metodo, pavadinto vektoriniu, esmę sudaro naudojimas valdymo sistemoje perdavimo funkcijų, atvirkščių perdavimo funkcijoms, kurios naudojamos AV modelyje. Tai lėmė nepriklausomųjų sistemos kintamųjų, įeinančių į elektromagnetinio momento lygtį, gavimą. Todėl šis principas siejamas su tiesioginiu momento valdymu. Per praėjusius tris dešimtmečius buvo sukurta dešimtys vektorinio valdymo modelių variantų, realizuota šimtai įvairiausių įrenginių, paskelbta tūkstančiai straipsnių ir monografijų, bet principas ir pirmas F. Blaschke metodas iki šiol dominuoja techniniuose realizavimuose ().

Kaip žinia, elektros variklio valdymas užtikrinamas valdant elektromagnetinį momentą. Tam reikia nepriklausomai valdyti vektorių, įeinantį į pasirinktą elektromagnetinio momento lygtį, koordinates. Lygties pasirinkimas, sudarant valdymo sistemas, turi didelę įtaką, nes daugelis kintamųjų, ypač asinchroniniame variklyje, negali būti išmatuojamos. Nors ir lygties pasirinkimas turi įtakos perdavimo funkcijų sudėtingumui, bet kuriuo atveju elektromagnetinio momento lygties struktūra bus analogiška. Vektorinis valdymas naudoja erdvinio vektorias asinchroninio variklio modelį, kad tiksliai valdytų greitį statiniame ir dinamiame režimuose. Vektorinio valdymo

kintamosios srovės pavaros pagal savo charakteristikas prilyginamos nuolatinės srovės variklių charakteristikoms.

Kuriant vektorinio valdymo sistemas, bendro principo esmę sudaro koordinačių sistemos, orientuotos pasirinkto momentą nusakančio vektoriaus kryptimi, naudojimas. Šio vektoriaus projekcija į kitą koordinačių ašį ir šią projekciją atitinkanti dedamoji bus lygios nuliui. Elektromagnetinio momento išraiška formaliai gauna pavidalą, identišką nuolatinės srovė variklio momentui, kuris proporcingas inkaro srovei ir pagrindiniam magnetiniam srautui.

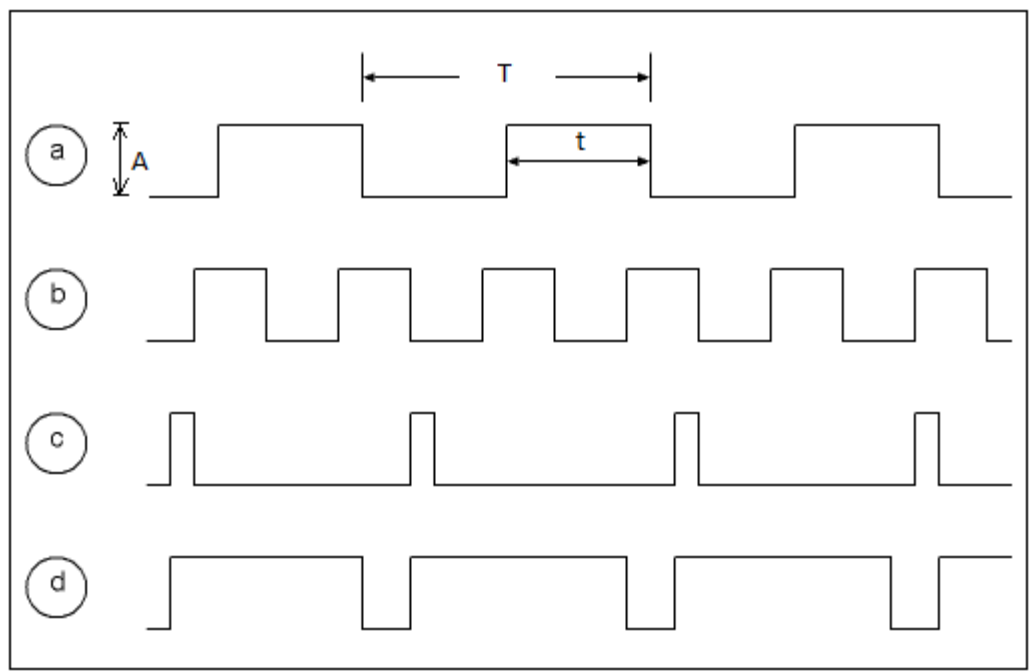
Tiesioginis vektoriaus valdymo metodas vertina magnetinio srauto vektorių kaip statoriaus įtampos, statoriaus srovės ir rotorius greičio funkciją. Netiesioginis vektoriaus valdymo metodas yra paprastesnis. Tiesioginis vektoriaus valdymas yra stabilesnis negu netiesioginis vektoriaus valdymas, bet jos charakteristikos priklauso nuo panaudoto srauto vertinimo būdo ():

1. Esamo greičio stebiklis - dirba gerai ties mažu greičiu, bet jis nėra tikslus dirbant dideliais greičiais, nes šiuo atveju greičio matavimo klaidos, turi didelę įtaką skaičiavimo rezultatams.
2. Esamos įtampos srauto - siūlo tikslius rezultatus esant dideliems greičiams, bet tikslumas mažame greityje yra žemas.
3. Esamos įtampos ir greičio - gauna gerus rotorius srauto apytikrius skaičiavimus ir esant žemiems greičiams ir dideliems greičiams.

Panaudojant impulsų pločio moduliaciją. Įvairių elektros įrenginių reguliavimui (variklių greičiui, apšvietimo intensyvumui) yra pritaikomas PWM (Pulse width modulation) valdymas. Impulso pločio moduliacija (angl. trumpinys PWM) - tai generavimas keičiamo pločio impulsų, esant pastoviam valdymo signalo periodui (Qiang et al, 2008).

Vienas iš pavyzdžių pateikiamas 1.24 paveiksle a. Jame matyti impulso pločio moduliacija: periodo T metu, yra formuojami stačiakampiai impulsai t. Jie kuriami siunčiant signalą, kurio aukštis lygus A (amplitudei) , signalo laikas negali viršyti T, vadinasi, galima užrašyti tokią išraišką:

$$t \leq T \tag{1.1}$$



1.23 pav. Impulso pločio moduliacijos pavyzdžiai

Taikant šį valdymo būdą, yra naudojamos dvi įtampos reikšmės, t.y. aukšta ir žema. Kai yra nustatomas pakankamai nedidelis valdymo signalo periodas, galimas tolygus galios grandinės valdymas (kaip antai, šviesos ryškumas ar variklio greitis). Kadangi periodas parenkamas gana nedidelis, tai dažnis gana aukštas, todėl sunku būtų pastebėti, kada yra aukštas signalas, o kada nulinis. Galima paanalizuoti tokį pavyzdį, kai šiuo būdu valdomas nuolatinės įtampos elektros variklis. Kuo impulso t plotis didesnis periode T , tuo ilgiau įjungta įtampa šiam varikliui. Pavyzdžiui, 1.23 paveiksle b) matyti, kad t laikas yra lygus $1/2 T$ laiko, vadinasi, variklis suksis pusė galimo nominalaus greičio, esant nustatytai valdymo įtampai. Aišku, negalima aukšto impulso laiko t sumažinti per mažai, kadangi gali būti atvejis, kad pritrūks galios variklio sukiajai (judžiajai) daliai išjudinti.

Priklausomai nuo šiam valdymui parinkto mikrokontrolerio tipo, jo platforma turi nuo kelių iki keliolikos įvadų/išvadų, galinčių atlikti PWM funkciją. Arduino platformoje realizuota funkcija `analogWrite (pin, value)`, leidžia pasinaudoti impulso pločio moduliacija, nurodžius jungties numerį ir sveikąjį skaičių intervale $[0;255]$. Kai reikšmė – 0, periode T negeneruojamas joks impulsas, kai reikšmė padidinamas iki 255, impulso plotis tampa lygus periodui T .

2. EKSPERIMENTO PLANAVIMAS ŠVYTUOJAMOJO VARIKLIO SU SIMISTORINIŲ KETIKLIŲ IR TYRIMO STENDO SUKŪRIMAS

2.1. Tiriamas objektas – švytuojamasis variklis kompresorius

Šio darbo tyrimasis objektas- Nitto Kohki švytuojamasis variklis-kompresorius. Šis variklis priskiriamas švytuojamųjų tiesiaeigių pulsuojamosios srovės asimetrinių variklių rūšiai. Kaip teigiama gamintojo internetiniame puslapyje, tokio tipo kompresoriai gali būti panaudojami kraujo spaudimo matavimo įrenginiuose, įrangoje kolonoskopijai (virškinamojo trakto tyrimui) atlikti, manau, kad būtų galima pritaikyti ir butyje (nedideliai šaldymo įrangai). Kompresorius nedidelis, jo nuotrauka pateikiama 2.1 paveiksle.



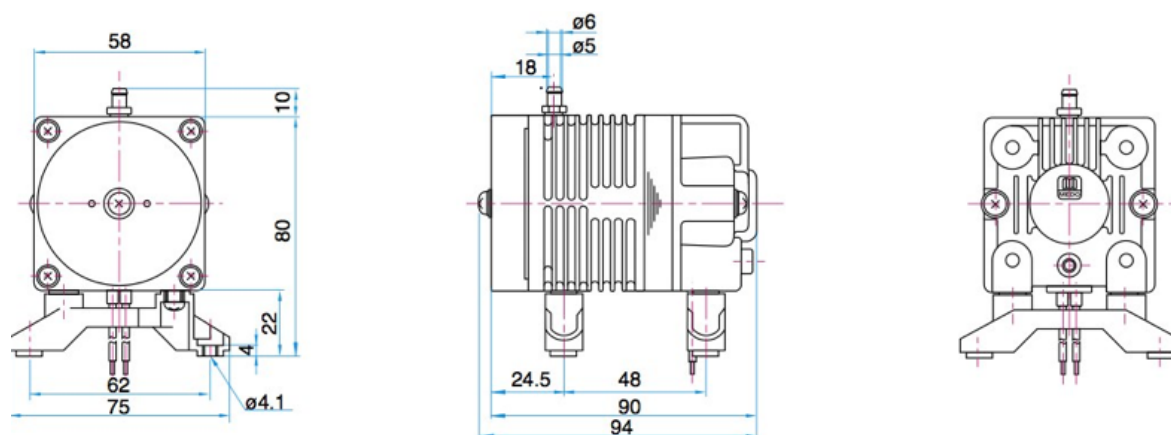
2.1 pav. Švytuojamasis variklis-kompresorius B0131414T

Šis kompresorius gali būti maitinamas tiek Europos standartų elektros įtampa (230 V ir 50 Hz), tiek JAV naudojama elektros įtampa (120 V ir 60 Hz). Kadangi šių regionų maitinimo įtampos parametrai skiriasi, tai skirtingi ir šio švytuojamojo variklio-kompresoriaus energetiniai rodikliai prie šių maitinimų.

Pagrindiniai šio variklio parametrai:

- Nominalus slėgis – 0,2 bar (20 kPa);
- Nominalus oro srautas – 5 l/min;
- Vardinė maitinimo įtampa – 230 V (120 V);
- Vardinis maitinimo įtampos dažnis – 50 Hz (60 Hz);
- Maksimalus (didžiausias) slėgis - 0,4 bar (40 kPa);

- Energijos sąnaudos (suvartojama galia) – 14 W;
- Tarnavimo laikas – ne mažiau 3000 val.;



2.2 Kompresoriaus vaizdas iš kelių pusių.

Kaip anksčiau minėta, variklis-kompresorius nedidelis, sveria apie 700 g., konstrukcijos ilgis 94 mm, aukštis su kojėlėmis ir išeinamuoju vamzdeli- 90 mm, o plotis- 58 mm. Kompresoriaus išorinis vaizdas iš trijų pusių pateikiamas 2.2 paveiksle.

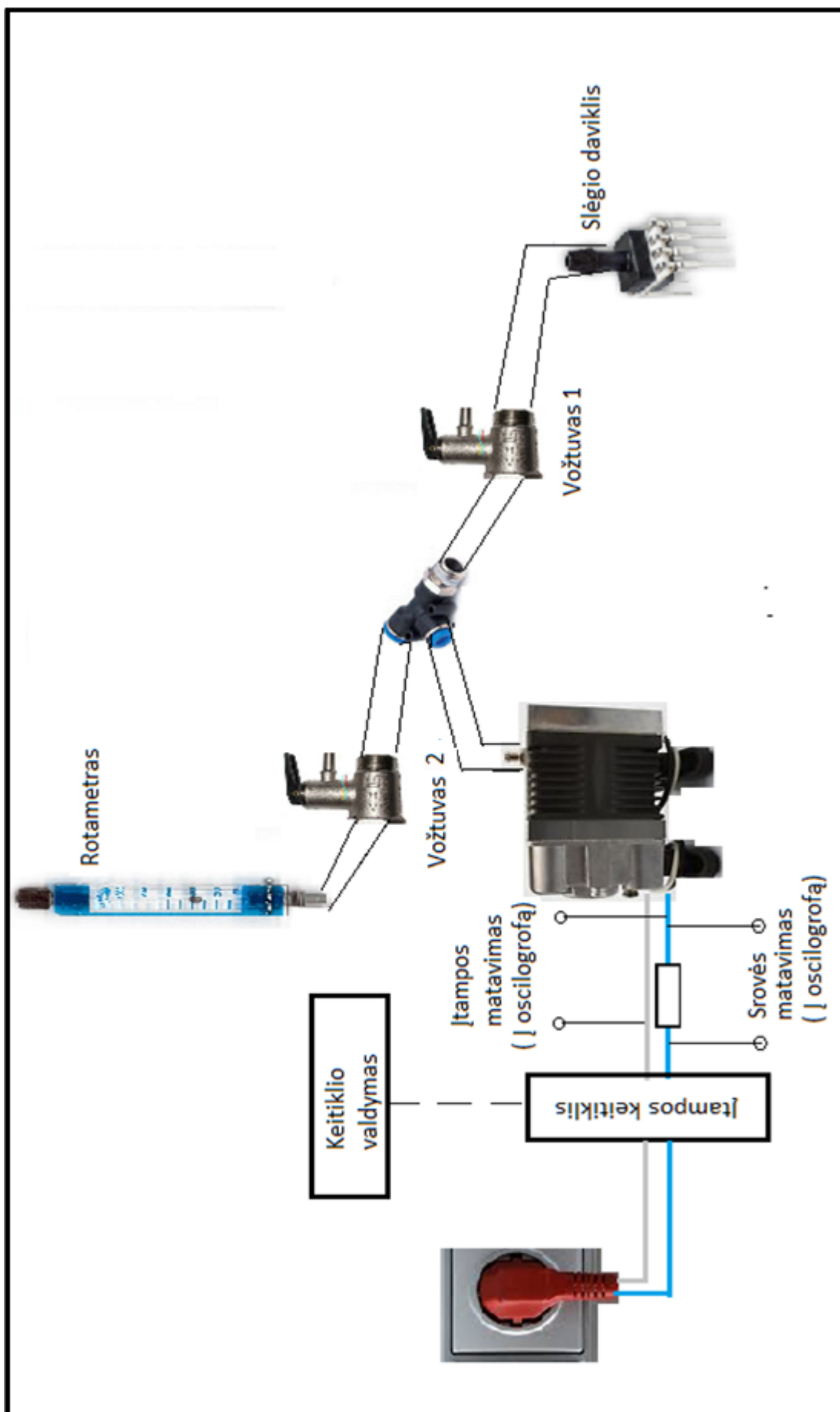
2.2. Eksperimentinė tiriamojo darbo schema

Kaip matyti 2.3 paveiksle, technologinę darbo schemą sudaro visa įranga, reikalinga tiriamajam darbui atlikti: pradedant maitinimo šaltiniu, tiriamuoju objektu ir baigiant matavimo prietaisais.

Tiriamasis objektas yra švytuojamasis variklis-kompresorius. Šis variklis priskiriamas švytuojamųjų tiesiaeigių pulsuojamosios srovės asimetrinių variklių rūšiai. Nors nedidelio galingumo, bet gana naši elektros mašina.

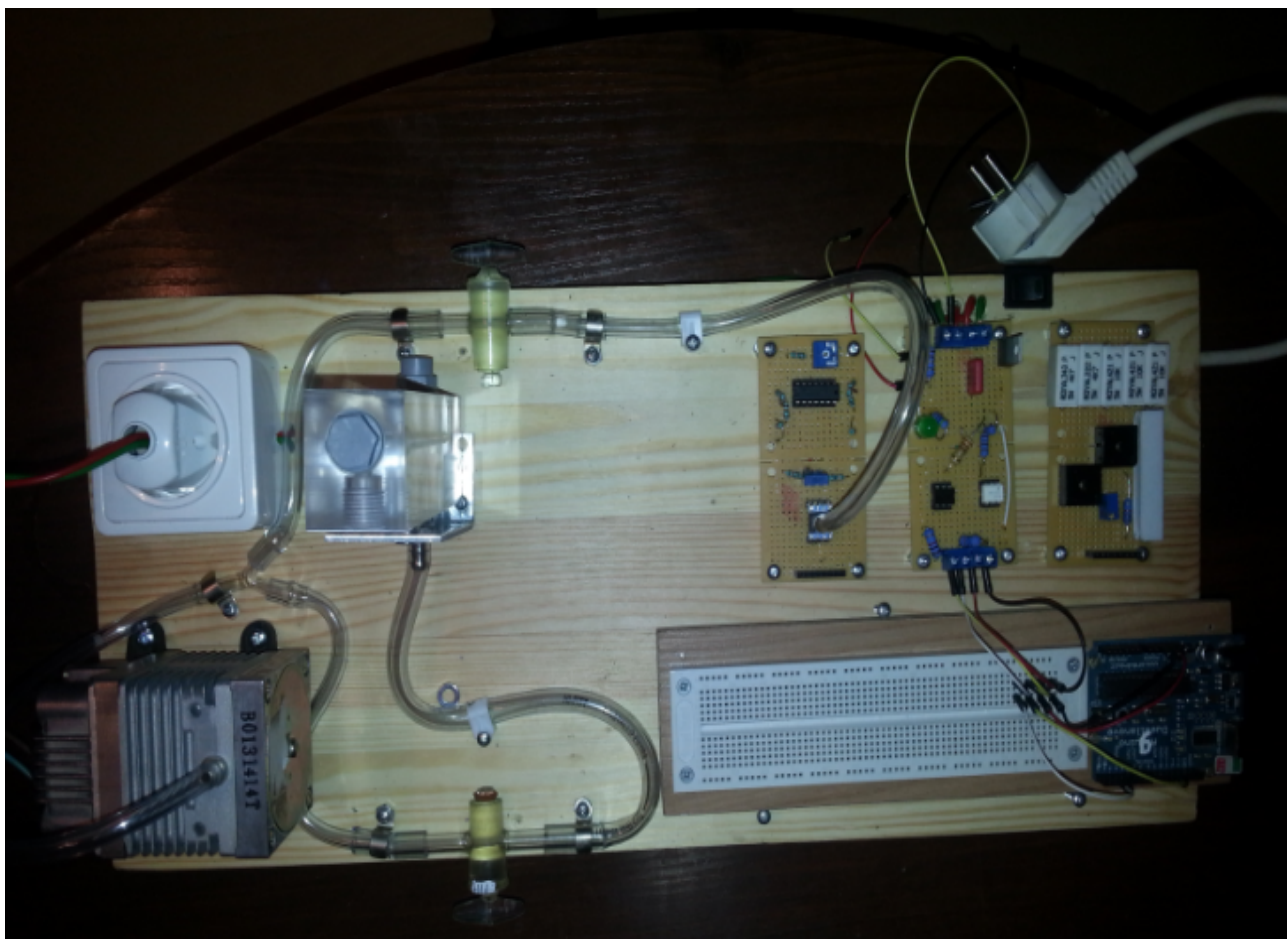
Šis variklis-kompresorius yra maitinamas iš vienfazio elektros maitinimo tinklo (elektros lizdo) per simistorinį įtampos keitiklį. Keitiklis valdomas ARDUINO Duaminalove mikrovaldiklio platformos pagalba. Tyrimo metu yra keičiamas simistoriaus atidarymo kampas, taip valdomas įtampos dydis, skirtas švytuojamajam varikliui valdyti.

Elektriniai dydžiai (srovė ir įtampa) matuojami oscilografo pagalba. Tiksliau, matuojami du įtampos dydžiai, tiesiog antras perskaičiuojamas į srovės dydį. Tam skirta nuosekliai įjungta (įlituota) 1,5 Ω dydžio varža. Šioje varžoje krentančios įtampos dydžio santykis su varža ir duoda srovės dydį. Kadangi iš oscilografo įrašomi momentinių dydžių duomenys, jie perskaičiuojami į efektines srovės ir įtampos išraiškas. Tada iš šių dydžių galima suskaičiuoti pilnąją galią S , aktyviąją galią P , reaktyviąją galią Q ir galios faktorių $\cos\phi$.



2.3 pav. Techninė tiriamojo darbo schema

Be elektrinių dydžių, kai matyti iš schemos, bus matuojami ir kompresoriaus darbo našumą apibūdinantys parametrai: slėgis ir oro srautas (debitas). Ant kompresoriaus išeinamo vamzdelio yra sumontuota žarnelė, kuri atsišakoja ir per vožtuvėlius sujungiama su slėgio davikliu ir rotametru.



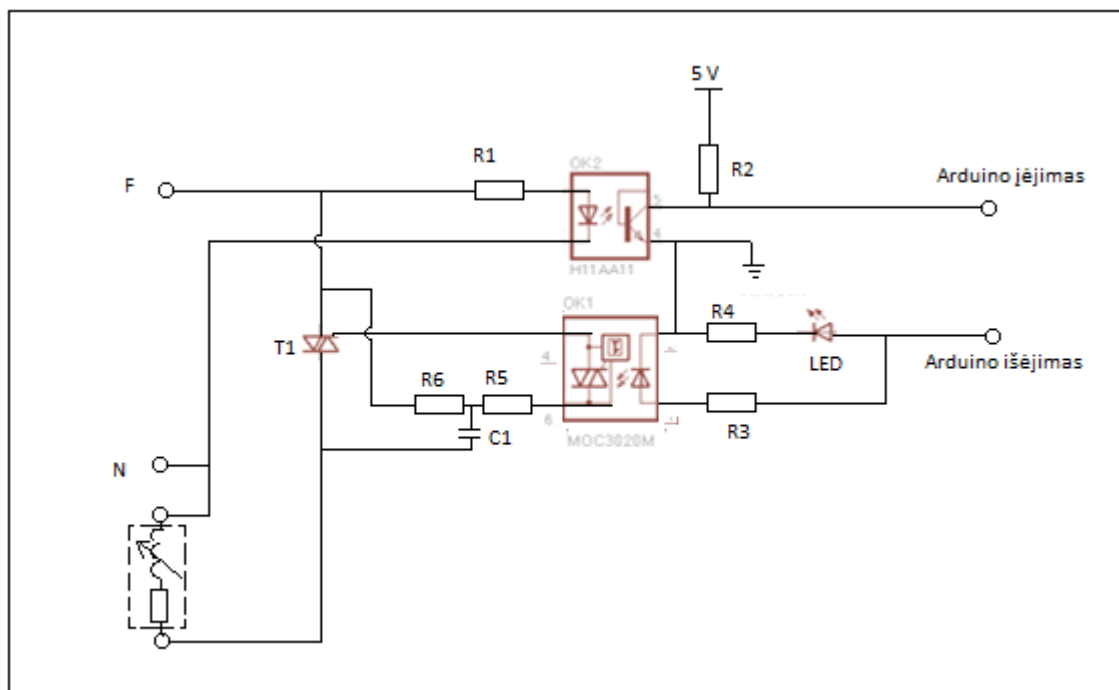
2.4 pav. Baigiamojo darbo metu padarytas stendas tyrimams atlikti

2.3. Galios regulatoriaus elektrinė schema

Vienas iš kintamos srovės grandinių valdymo metodų paremtas simistorinio keitiklio panaudojimu. Tokiu atveju, tiristoriai (šiame darbe naudojamas dvipusis tiristorius – simistorius) vienodais laiko intervalais yra įjungiami ir „išjungiami“ tiek teigiamame, tiek neigiamame kintamos srovės pusperiodžiuose. Šis valdymas kitaip dar vadinamas – kintamos srovės faziniu valdymu. Tokie įtampos regulatoriai panaudojami šviestuvams, šildytuvams ir kitiems elektriniams įrenginiams valdyti.

Tiriamajam darbui atlikti, parinkta kintamos įtampos valdymo elektrinė grandinė su simistoriumi, kuri pateikiama 2.5 paveiksle. Kaip matyti iš schemos, ji sudaryta iš dviejų pagrindinių dalių:

- Nulinio taško kirtimo aptikimo grandinė;
- Kintamos įtampos valdymo grandinė.



2.5 pav. Įtampos valdymo grandinės elektrinė schema

Nulinio taško kirtimo aptikimo grandinė (angl. zero-crossing detection circuit), kaip išduoda pats pavadinimas, skirta aptikti laiko momentus, kada įtampa kerta nulį. Tuo metu yra išsiunčiami analoginiai 5 V impulsai į Arduino mikrovaldiklio platformą. Tada, priklausomai nuo parašyto valdymo kodo, galime gana tiksliai valdyti puslaidininkinį reguliatoriaus raktą.

Kintamos įtampos reguliavimo grandinė skirta norimai valdymo įtampai gauti, kad būtų galima valdyti apkrovos maitinimą. Šioje grandinės dalyje panaudota optopora (MOC3020) skirta atskirti galios ir valdymo dalis, taip pat simistorius (BTA12-600) skirtas kintamos įtampos „karpymui“.

Įtampos reguliatoriaus (valdymo) grandinei surinkti panaudoti elektronikos elementai pateikiami priede Nr.3.

3. ŠVYTUOJAMOJO VARIKLIO SU SIMISTORINIU KETIKLIU EKSPERIMENTO IR JO REZULTATŲ ANALIZĖ

Eksperimento metu bus atlikti Atlikti Nitta-Kohki švytuojamojo variklio-kompresoriaus tyrimai, keičiant, simistoriaus atidarymo kampą (kas 14°) ir kompresoriaus apkrovą (vožtuvo pagalba 5 padėtys).

Darbo metu bus matuojama įtampos ir srovės vertės skaitmeninio oscilografo pagalba. Iš šių dydžių bus apskaičiuojama pilnutinė galia S , aktyvioji galia P ir reaktyvioji galia Q , taip pat galios faktorius $\cos\phi$.

Bus atlikti ir energetinių parametrų matavimai – našumo (oro srauto) ir slėgio. Oro srautas matuojamas rotamero pagalba (rotametas tai - plūdinis matuoklis, skirtas oro tekėjimo greičiui matuoti.). Slėgis matuojamas pjezoelektriniu slėgio davikliu.

3.1. Elektrinių dydžių matavimo rezultatai

Kai vožtuvas 2 atidaras, variklis dirba be apkrovos. Įtampa kinta 0 iki 185,86 V ribose, o srovė 0 iki 0,118 A. Pilnoji galia nuo 0 iki 21,9 VA.

3.1 lentelė. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, kai vožtuvas 2 atidarytas.

α	U	I	S	P	Q	$\cos\phi$
$^\circ$	V	A	VA	W	VAR	-
Matavimo rezultatai			Skaičiavimo rezultatai			
Esant atviram vožtuvui						
0	185,86	0,118	21,90	14,58	16,34	0,67
14	184,09	0,119	21,91	15,13	15,85	0,69
28	182,56	0,112	20,39	13,99	14,83	0,69
42	177,70	0,105	18,61	12,75	13,56	0,69
56	167,95	0,095	15,98	10,67	11,90	0,67
70	156,24	0,082	12,80	7,98	10,01	0,62
84	134,58	0,074	9,92	6,08	7,84	0,61
96	114,03	0,065	7,42	3,68	6,44	0,50
110	92,87	0,054	4,98	2,13	4,50	0,43
124	67,13	0,038	2,54	0,84	2,40	0,33
180	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00

Kai vožtuvas 2 pirmoje tarpinėje padėtyje, variklis truputi apkrautas. Įtampa kinta 0 iki 190 V ribose, o srovė 0 iki 0,126 A. Pilnoji galia nuo 0 iki 23,98, 9 VA.

3.2 lentelė. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, kai vožtuvas 2 pirmoje tarpinėje padėtyje.

α	U	I	S	P	Q	$\cos\phi$
$^{\circ}$	V	A	VA	W	VAR	-
Matavimo rezultatai			Skaičiavimo rezultatai			
Esant vožtuvui pirmoje tarpinėje padėtyje						
0	190,05	0,126	23,98	16,35	17,54	0,68
14	188,16	0,128	24,09	16,65	17,41	0,69
28	189,04	0,124	23,42	16,01	17,10	0,68
42	181,09	0,116	20,93	14,33	15,26	0,68
56	171,31	0,108	18,46	12,26	13,80	0,66
70	156,47	0,095	14,93	9,26	11,72	0,62
84	136,63	0,085	11,55	6,95	9,23	0,60
96	116,99	0,077	8,95	4,91	7,49	0,55
110	95,05	0,064	6,10	2,51	5,55	0,41
124	70,56	0,049	3,45	0,96	3,32	0,28
180	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00

Kai vožtuvas 2 antroje tarpinėje padėtyje, variklis daugiau apkrautas. Įtampa kinta 0 iki 191,97 V ribose, o srovė 0 iki 0,130 A. Pilnoji galia nuo 0 iki 24,89 VA.

3.3 lentelė. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, kai vožtuvas 2 antroje tarpinėje padėtyje.

α	U	I	S	P	Q	$\cos\phi$
$^{\circ}$	V	A	VA	W	VAR	-
Matavimo rezultatai			Skaičiavimo rezultatai			
Esant vožtuvui antroje tarpinėje padėtyje						
0	191,97	0,130	24,89	16,27	18,83	0,65
14	190,61	0,125	23,88	15,44	18,22	0,65
28	190,96	0,121	23,03	15,00	17,48	0,65
42	183,99	0,111	20,37	12,93	15,74	0,63
56	174,82	0,101	17,73	11,10	13,83	0,63
70	161,94	0,088	14,32	8,42	11,59	0,59
84	138,71	0,077	10,66	6,11	8,74	0,57
96	115,75	0,068	7,90	3,76	6,95	0,48
110	96,57	0,057	5,49	2,03	5,10	0,37
124	70,92	0,041	2,93	0,92	2,78	0,31
180	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00

Kai vožtuvas 2 trečioje tarpinėje padėtyje. Įtampa kinta 0 iki 191,88 V ribose, o srovė 0 iki 0,129 A. Pilnoji galia nuo 0 iki 24,75 VA.

3.4 lentelė. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, kai vožtuvas 2 trečioje tarpinėje padėtyje.

α	U	I	S	P	Q	$\cos\phi$
$^{\circ}$	V	A	VA	W	VAR	-
Matavimo rezultatai			Skaičiavimo rezultatai			
Esant vožtuvui trečioje tarpinėje padėtyje						
0	191,88	0,129	24,75	15,48	19,31	0,63
14	190,61	0,125	23,88	15,44	18,22	0,65
28	190,96	0,126	23,99	15,62	18,21	0,65
42	183,28	0,115	21,09	13,57	16,15	0,64
56	174,34	0,100	17,45	11,24	13,35	0,64
70	158,06	0,083	13,15	7,87	10,53	0,60
84	142,23	0,078	11,05	6,18	9,17	0,56
96	119,56	0,070	8,31	4,13	7,21	0,50
110	96,64	0,062	5,96	1,68	5,50	0,38
124	66,98	0,052	3,45	0,72	3,28	0,31
180	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00

Kai vožtuvas 2 uždaras. Įtampa kinta 0 iki 193,35 V ribose, o srovė 0 iki 0,135A. Pilnoji galia nuo 0 iki 26,04 VA.

3.5 lentelė. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai, kai vožtuvas 2 uždaras.

α	U	I	S	P	Q	$\cos\phi$
$^{\circ}$	V	A	VA	W	VAR	-
Matavimo rezultatai			Skaičiavimo rezultatai			
Esant uždaram vožtuvui						
0	193,35	0,135	26,04	13,52	22,25	0,52
14	190,62	0,132	25,21	13,42	21,34	0,53
28	190,14	0,129	24,45	13,69	20,54	0,54
42	187,87	0,125	23,41	12,76	19,62	0,55
56	177,07	0,110	18,36	9,78	15,54	0,53
70	163,98	0,097	13,23	6,41	11,58	0,48
84	145,61	0,086	9,67	4,19	8,71	0,43
96	121,63	0,076	7,29	2,34	6,90	0,32
110	94,23	0,067	6,27	2,26	6,05	0,26
124	71,56	0,052	3,71	1,27	3,60	0,24
180	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00

Matuojamų dydžių perskaičiavimas.

Įtampos keitiklis valdomas per Arduino mikrovaldiklio plokštę. Valdymui pritaikytas internete rastas kodas, kuriame nurodoma, kad kiekviename įtampos pusperiodyje simistorių galima

atidarinti 128 skirtingose padėtyse. Dėl paprastumo buvo keičiamas valdymo kodas kas 10 (bitų). Žinodami, kad pusperiodį sudaro 180° , galime apskaičiuoti kiekvieną atidarymo kampą α :

$$\alpha = \frac{180^\circ}{n} \cdot 10 \quad (3.1)$$

$$\alpha = \frac{180^\circ}{128} \cdot 10 = 14^\circ$$

Visi matavimai atlikti oscilografo pagalba. Įtampa matuota prijungiant oscilografo elektrodus prie variklio gnybtų, o tekančios srovės dydžiui pamatuoti buvo nuosekliai į grandinę įjungta $1,5 \Omega$ varža, ir matuotas įtampos kritimas toje varžoje. Pratekančios srovės dydis perskaičiuojamas pagal formulę (3.2), kadangi varžos dydis $1,5 \Omega$, tai srovė:

$$i = \frac{u}{R} \quad (3.2)$$

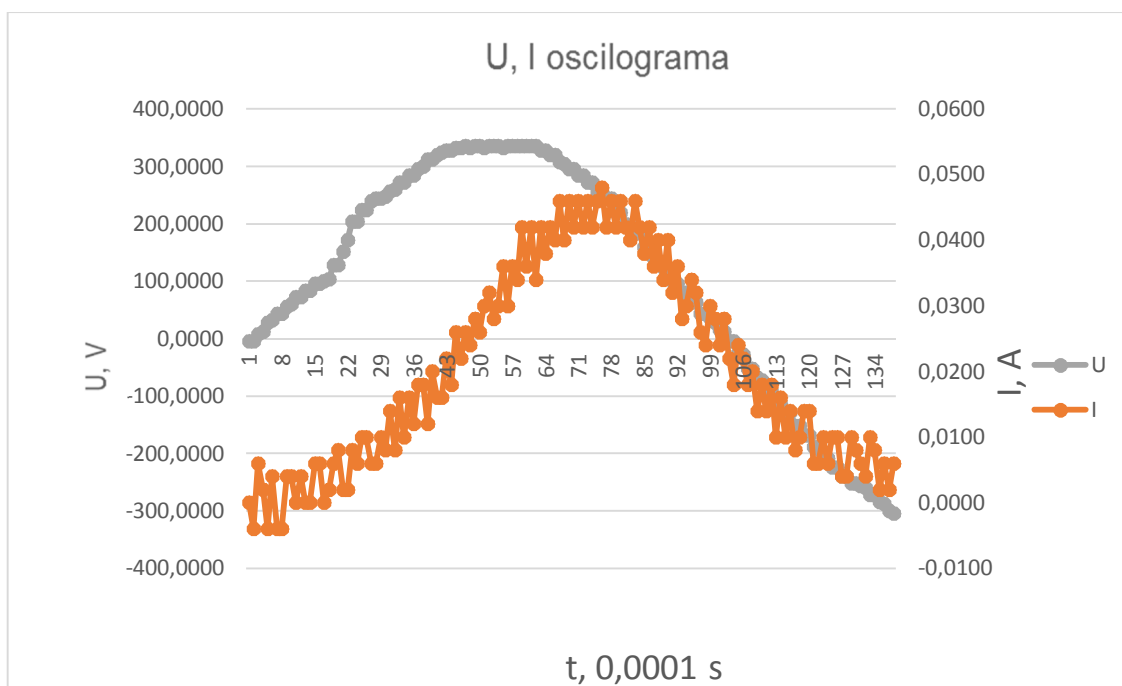
$$i = \frac{0,06}{1,5} = 0,04$$

Kadangi iš oscilografo gaunamos amplitudinės matuojamų dydžių vertės kas $0,0001$ s, taigi jos perskaičiuojamos į efektyves reikšmes. Pirmo matavimo, kai pilnai atidarytas simistorius:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2 \cdot dt} \quad (3.3)$$

$$U = \sqrt{\frac{1}{0,02} \cdot \sum_0^{0,0138} (0^2 \cdot 0,0001) + \dots + (4^2 \cdot 0,0001)} = 185,86 \text{ V}$$

Čia T- periodas ($0,02$ s). Žinant, kad šio variklio konstrukcijoje yra diodas, taigi jis maitinamas impulsine įtampa. Imama tiek įtampos amplitudinių verčių, kol nutrūksta grandinėje srovė. Šiuo atveju 138. Jų skaičius nustatomas iš oscilografu gautos oscilogramos duomenų masyvo (3.1 pav).



3.1 pav. U ir I oscilograma.

Analogiškai perskaičiuojamas efektinės srovės dydis:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i^2 \cdot dt} \quad (3.4)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{0,02} \cdot \sum_0^{0,0138} (0,04^2 \cdot 0,0001) + \dots + (0,06^2 \cdot 0,0001)} = 0,118 \text{ A}$$

Apskaičiuota pilnoji galia S:

$$S = U \cdot I \quad (3.5)$$

$$S = 186,86 \cdot 0,118 = 21,90 \text{ VA}$$

Apskaičiuota aktyvioji galia P:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_i \cdot i_i \cdot dt \quad (3.6)$$

$$P = \frac{1}{0,02} \cdot \sum_0^{0,0138} (0 \cdot 0,04 \cdot 0,0001) + \dots + (8 \cdot 0,06 \cdot 0,0001) = 14,58 \text{ W}$$

Apskaičiuotas galios faktorius $\cos\varphi$ (sąlyginis):

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (3.7)$$

$$\cos\varphi = \frac{14,58}{21,90} = 0,67$$

Apskaičiuota reaktyvioji galia Q:

$$Q = S \cdot \sin\varphi \quad (3.8)$$

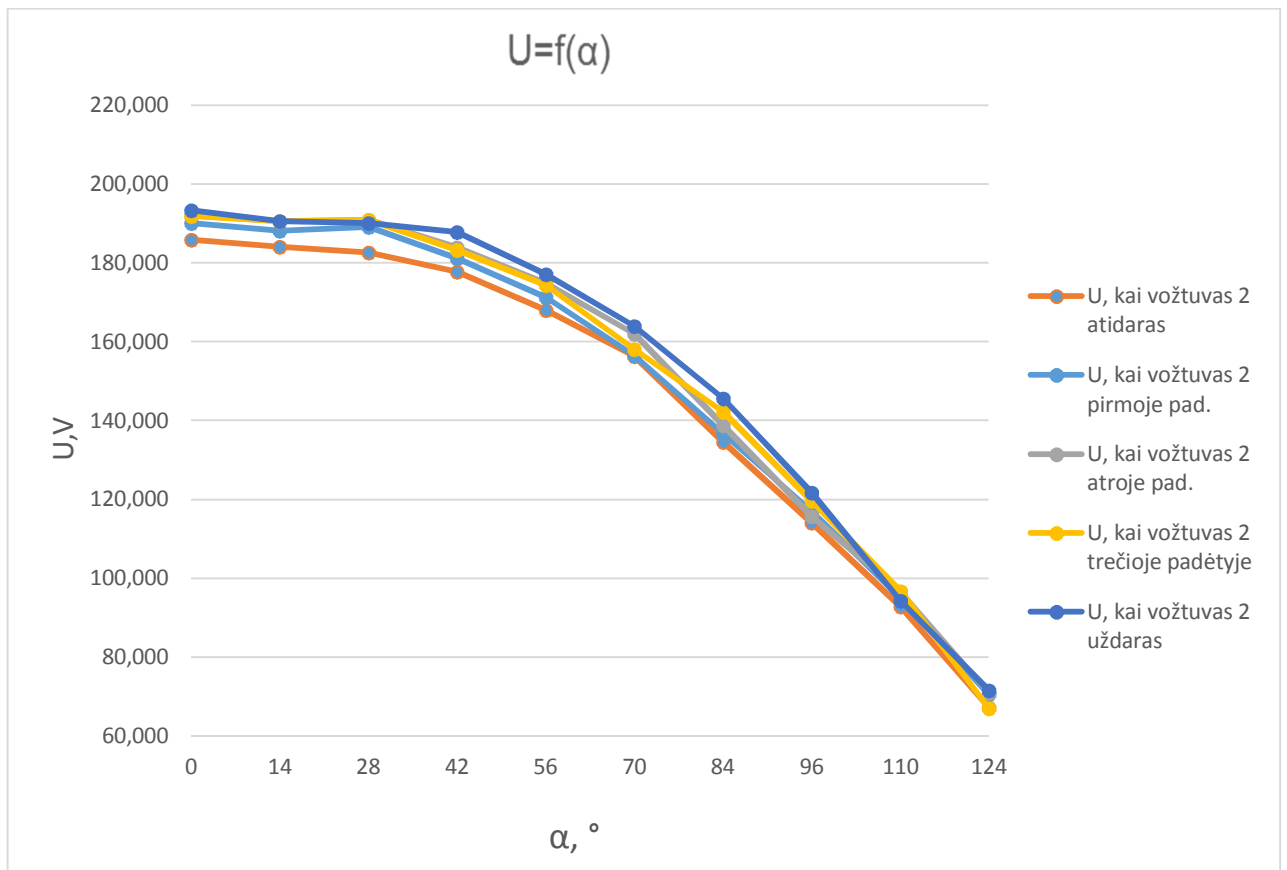
$$Q = 21,90 \cdot 0,74 = 16,21 \text{ VAR}$$

Čia $\sin\varphi$ apskaičiuojamas:

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi} \quad (3.9)$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - 0,67^2} = 0,75$$

Eksperimento metu buvo keičiamas įtampos keitiklio kampas nuo 0° iki 124° . Ties 124° sustota todėl, kad esant šiam kampui, įtampos dydis nebepakankamas išjudinti švytuojamojo variklio judžiąją dalį. Nors buvo galima matuoti elektrinių dydžių pokyčius ir prie didesnių α , bet kompresoriaus energetiniai rodikliai (oro srautas ir slėgis) jau nekistų.

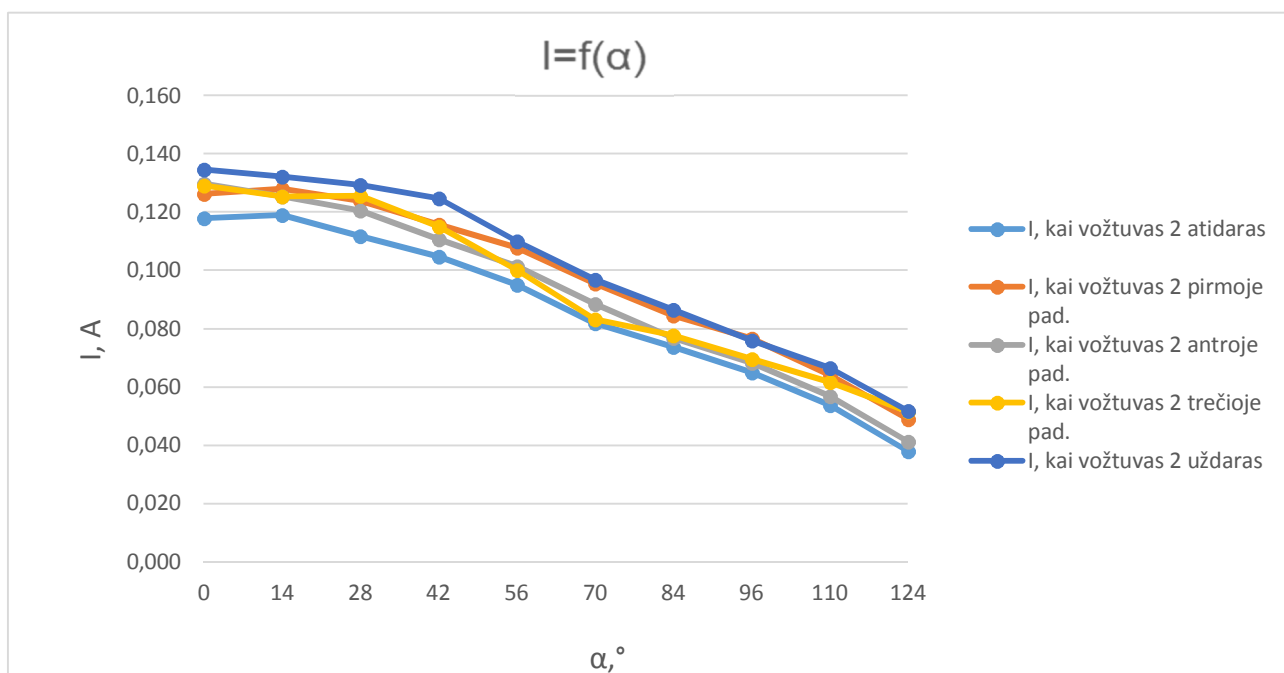


3.2 pav. Įtampos priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo, $U=f(\alpha)$

Iš 3.2 paveiksle pateikto grafiko ir 3.1 lentelės duomenų matyti, kad įtampos priklausomybė nuo švytuojamąjo variklio-kompresoriaus apkrovimo kinta 8 V intervale prie tam tikro įtampos keitiklio atidarymo kampo (iki 84 laipsnių).

Kai atidarymo kampas viršija 84° , t.y. simistorinis raktas atidaromas po pusės pusperiodžio, įtampos dydžiui didelės įtakos nebeturi apkrovos lygis. Tai galima paaiškinti tuo, kad kompresoriaus sukurtas oro srautas ir spaudimas nebesudaro didelio pasipriešinimo variklio judžiajai daliai, kai vožtuvai prisukti ar visiškai uždaryti. Todėl įtampa susivienodina prie skirtingų apkrovos lygių.

Taip pat reikia pastebėti, kad įtampa iki 40° atidarymo kampo kinta gana mažai, tik vėliau didinant α pradeda kristi eksponentiškai.

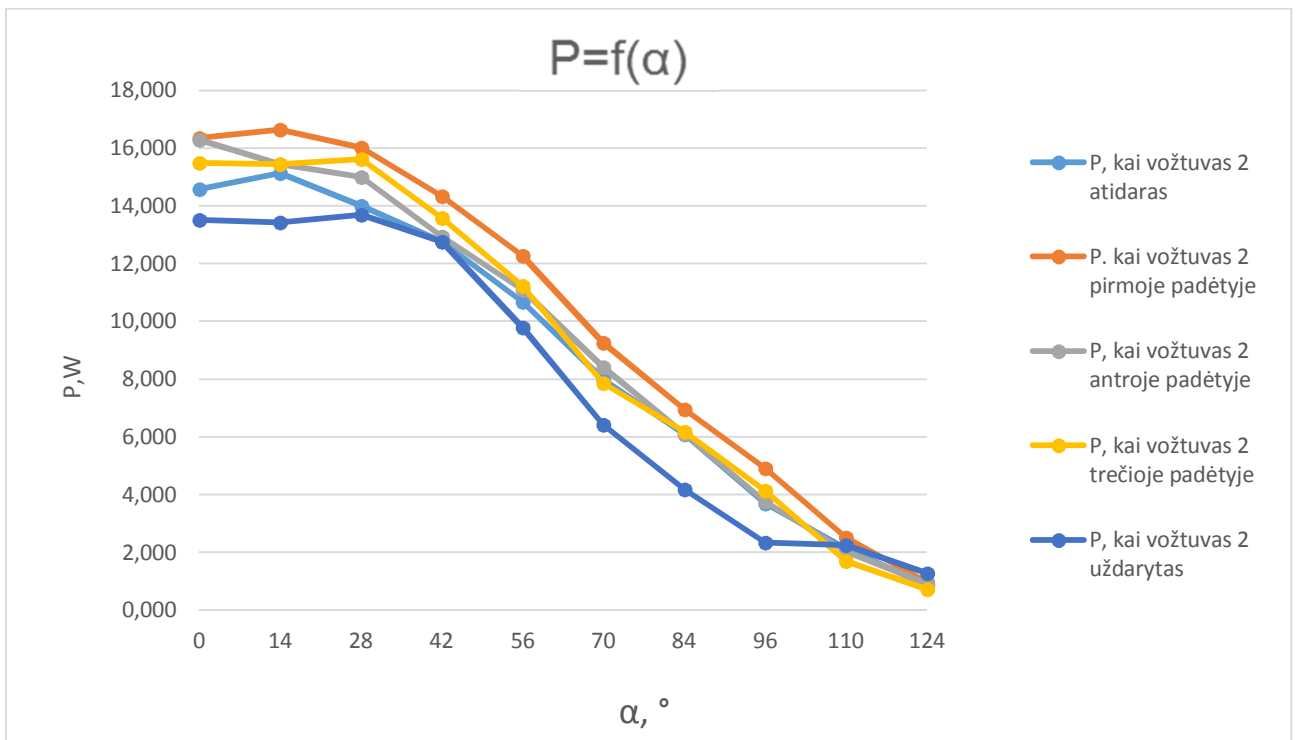


3.3 pav. Srovės priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo, $I=f(\alpha)$

Iš paveiksle pateikto srovės grafiko matyti, kad srovė turi tiesinę (tiksliau artimą jai) priklausomybę nuo atidarymo kampo α . Priklausomai nuo apkrovos, srovė kinta 0,2 A ribose. Skirtingai nuo įtampos priklausomybės, tai, kad didėjant α kampui, srovės priklausomybės nesuvienodėja, o kinta tose pačiose ribose. Esant didžiausiai apkrovai (vožtuvas uždarytas), srovė didžiausia.

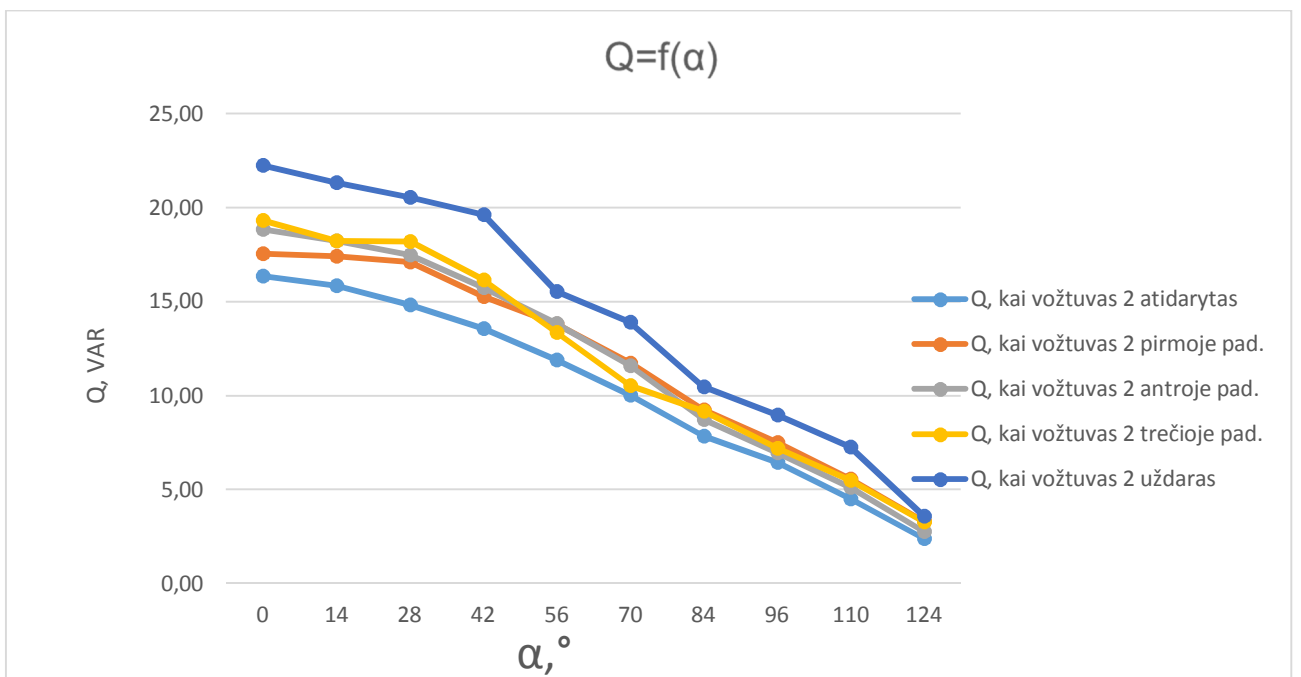
Kitas pateiktas grafikas 3.4 paveiksle tai aktyvios galios P priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo. Aktyvioji galia nuo apkrovos kinta 3 W ribose. Reikia pastebėti, tai, kad aktyvioji galia mažiausia esant didžiausiai apkrovai, tai galima paaiškinti tuo, kad, slėgis tuo metu didžiausias, išstumiamo oro kiekis artėja prie nulio, todėl variklio induktyvioji galios dedamoji didėja, kadangi spyruoklės pasipriešinimo jėga sumuojasi su išstumiamo oro pasipriešinimo jėga.

Taip pat reikia pastebėti, kad galia eksponentiškai mažėja didėjant α .

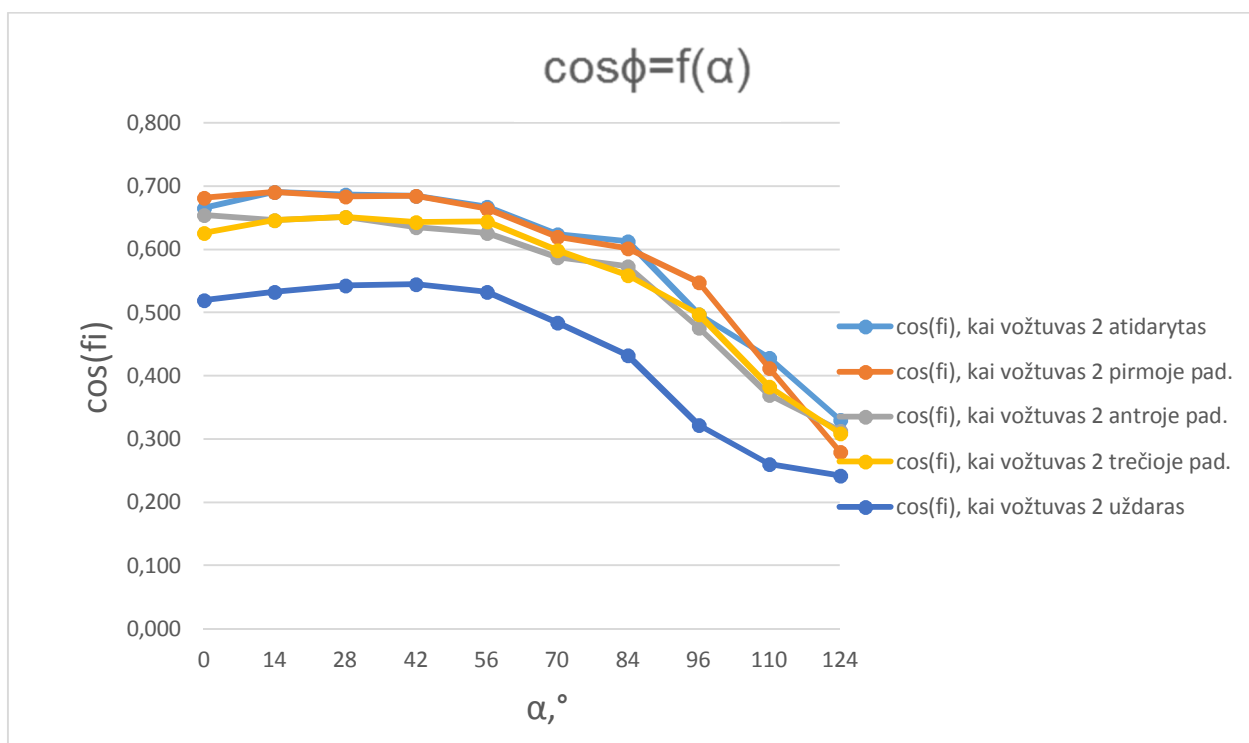


3.4 pav. Aktyviosios galios priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo, $P=f(\alpha)$

Visiškai priešingą vaizdą gauname 3.5 paveiksle, kur pavaizduota reaktyvios galios priklausomybės nuo α . Didžiausia reaktyvioji galia gaunama, kai vožtuvas uždarytas (buferinis kompresoriaus režimas) ir $\alpha=0^\circ$, tada $Q=22,25$ VAR. Taip pat reikia paminėti, kad šios galios priklausomybė yra arti tiesinės.



3.5 pav. Reaktyviosios galios priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo, $Q=f(\alpha)$



3.6 pav. Sąlyginio galios faktoriaus priklausomybė nuo valdomo įtampos keitiklio atidarymo kampo, $Q=f(\alpha)$

Sąlyginis galios faktorius todėl, kad variklis maitinamas tik teigiamas įtampos impulsais, kadangi jo konstrukcijoje yra diodas, nukarpantis neigiamas įtampos pusperiodžius. Todėl tokio variklio galios faktorius gana aukštas, siekia net 0,69.

3.2. Kompresoriaus oro srauto matavimas

Šio eksperimento metu buvo matuojamas švytuojamojo variklio-kompresoriaus našumas (kitaip oro debitas ar tiesiog oro srautas). Našumo sisteminiai matavimo vienetai m^3/s . Kadangi kompresorius mažas ir jo našumas nėra didelis, tai palikti matavimo vienetai l/min .

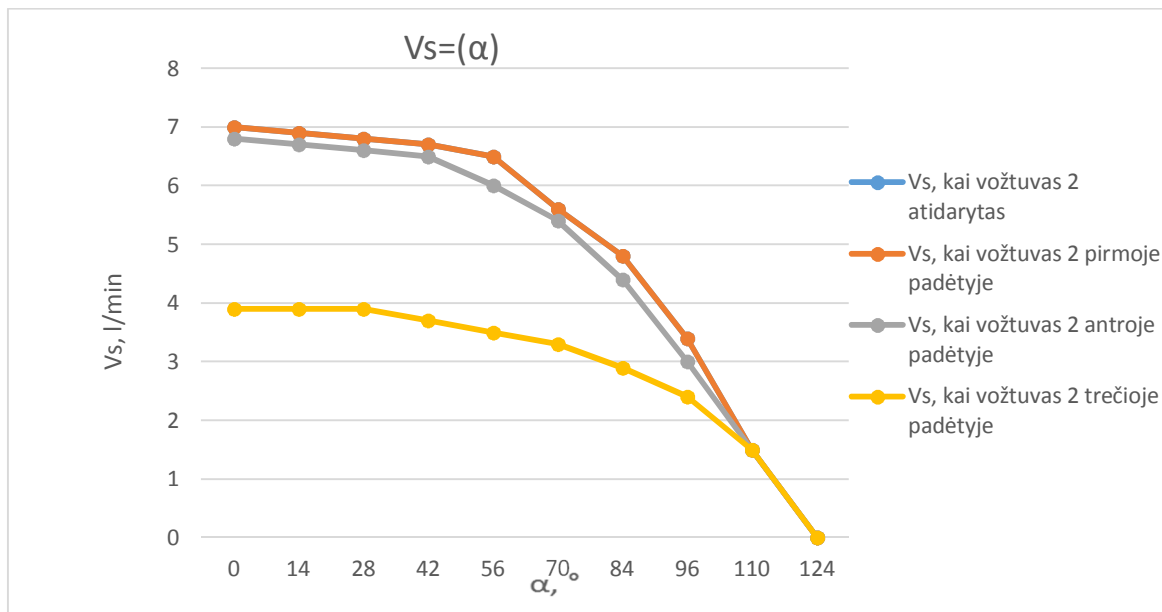
Matavimai atlikti KYTOLA INSTRUMENTS firmos rotametru. Šio prietaiso galimybės išmatuoti oro (dujų) srautą iki $7 l/min$, kai jis sukalibruotas prie atmosferinio slėgio. Kadangi tiriamojo kompresoriaus našumas truputį didesnis, teko padidinti slėgį rotametre, kad būtų telpama į matavimo skalę. Rotametro aprašymas pateikiamas Priede Nr.1

3.6 lentelė. Oro srauto matavimų rezultatai

Matavimai										
α	Vs									
$^{\circ}$	l/min									
0	Kai vožtuvas 2 atidarytas	7	Kai vožtuvas 2 pirmoje padėtyje	7	Kai vožtuvas 2 antroje padėtyje	6,8	Kai vožtuvas 2 trečioje padėtyje	3,9	Kai vožtuvas 2 uždarytas	0
14		6,9		6,9		6,7		3,9		0
28		6,8		6,8		6,6		3,9		0
42		6,7		6,7		6,5		3,7		0
56		6,5		6,5		6		3,5		0
70		5,6		5,6		5,4		3,3		0
84		4,8		4,8		4,4		2,9		0
96		3,4		3,4		3		2,4		0
110		1,5		1,5		1,5		1,5		0
124		0		0		0		0		0
180		0		0		0		0		0

Iš gautų matavimo rezultatų ir pateiktų charakteristikų (3.7 paveikslas) matyti, kad kompresoriaus našumas visiškai sutampa, kai vožtuvas 2 pilnai atidarytas ir kai vožtuvas yra pirmoje tarpinėje padėtyje. Beje šių matavimų metu gauti ir didžiausi kompresoriaus našumo rezultatai. Kol simistoriaus atidarymo kampas α yra iki 50-60°, kompresoriaus našumas išlieka gana pastovus (kinta 0,5 l/min ribose). Tačiau padidėjus atidarymo kampui α , kompresoriaus našumas staigiai krenta. Tokį staigų kritimą galima paaiškinti, kad tuo metu variklio apvija tekanti srovė nepakankamai didelė sukurti tokią magnetovarą, kurios pilnai užtektų nugalėta spyruoklės pasipriešinimo jėgą. Kadangi nebeįveikiama spyruoklės pasipriešinimo jėga, sumažėja kompresoriaus darbinis tūris – tuo pačiu kompresoriaus našumas.

Kadangi visų charakteristikų kitimų pobūdis panašus, tai ir paaiškinimas tinkamas tas pats. O jų išsidėstymą lemia vožtuvo 2 padėtis, kada vožtuvas trečioje tarpinėje padėtyje, kompresoriui padidėja slėgis ir jo našumas krenta.



3.7 Oro srauto priklausomybės nuo simistoriaus atidarymo kampo

3.3. Kompresoriaus slėgio matavimai

Slėgio matavimas atliktas Honeywell SCC100DN slėgio davikliu. Kadangi daviklis veikia pjezoelektrinio efekto principu, tai jo išduodamas signalas yra įtampos vertė (įtampa turi tiesioginę priklausomybę su slėgiu). Kad būtų atlikti tikslūs (arba bent artimi tiksliams) matavimai, reikalinga apskaičiuoti, koks yra įtampos pokyčio priklausomybės su slėgiu koeficientas. Tam buvo pirmiausia atlikti matavimai su atskiru kompresoriumi ir manometru. Gauti tokie rezultatai:

$$p_0 = 0 \text{ kPa}, U_0 = 0,911 \text{ V};$$

$$p_1 = 10 \text{ kPa}, U_1 = 1,107 \text{ V};$$

$$p_2 = 15 \text{ kPa}, U_2 = 1,206 \text{ V};$$

$$p_3 = 20 \text{ kPa}, U_3 = 1,302 \text{ V}.$$

Skaičiuotas pirmas tarpinis įtampos ir slėgio priklausomybės koeficientas:

$$k_{1pu} = \frac{U_1 - U_0}{p_1 - p_0} \quad (3.9)$$

$$k_{1pu} = \frac{1,107 - 0,911}{10 - 0} = 0,0196$$

Skaičiuotas antras tarpinis įtampos ir slėgio priklausomybės koeficientas:

$$k_{2pu} = \frac{U_2 - U_1}{p_2 - p_1} \quad (3.10)$$

$$k_{2pu} = \frac{1,206 - 1,107}{15 - 10} = 0,0198$$

Skaičiuotas trečias tarpinis įtampos ir slėgio priklausomybės koeficientas:

$$k_{3pu} = \frac{U_3 - U_2}{p_3 - p_2} \quad (3.11)$$

$$k_{1pu} = \frac{1,303 - 1,206}{20 - 15} = 0,0194$$

Apskaičiuotas vidutinis įtampos ir slėgio priklausomybės koeficientas:

$$k_{pu} = \frac{k_{1pu} + k_{2pu} + k_{3pu}}{3} \quad (3.12)$$

$$k_{pu} = \frac{0,0196 + 0,0198 + 0,0194}{3} = 0,0196$$

Toliau atlikti matavimai su tiriamuoju švytuojamuoju elektros varikliu-kompresoriumi. Visi matavimų rezultatai pateikiami 3.7 lentelėje.

3.7 lentelė. Slėgio matavimų rezultatai

α	Matavimų rezultatai									
	Ud									
°	V									
0	Kai vožtuvas 2 atidarytas	1,254	Kai vožtuvas 2 pirmoje padėtyje	1,257	Kai vožtuvas 2 antroje padėtyje	1,277	Kai vožtuvas 2 trečioje padėtyje	1,362	Kai vožtuvas 2 uždarytas	1,71
14		1,252		1,253		1,265		1,352		1,705
28		1,251		1,250		1,263		1,348		1,700
42		1,241		1,245		1,259		1,333		1,673
56		1,195		1,200		1,221		1,302		1,65
70		1,148		1,152		1,160		1,270		1,624
84		1,084		1,092		1,111		1,182		1,508
96		1,010		1,012		1,028		1,095		1,342
110		0,946		0,948		0,972		1,045		1,160

Kadangi nebuvo techninių galimybių visiškai sukalibruoti daviklio (nulinio spaudimo sukalibravimas), tai iš kiekvieno matavimo rezultato reikia atimti įtampos reikšmę $U_0 = 0,911$ V, kai daviklis nebuvo veikiamas jokių spaudimu. Taigi perskaičiuojama:

$$U_{dtm} = U_{dnm} - U_0 \quad (3.13)$$

$$U_{dt11} = 1,254 - 0,911 = 0,343 \text{ V}$$

Čia n - vožtuvo padėtis matavimo metu (1- kai vožtuvas 2 atidarytas; 2- kai vožtuvas 2 pirmoje padėtyje ir t.t.), m - tai simistoriaus atidarymo kampas matavimo metu (1-0°, 2-10, ir t.t.). Taip perskaičiuotų matavimų rezultatai pateikiami sekančioje lentelėje.

3.8 lentelė. Perskaičiuoti slėgio matavimų rezultatai

α	Matavimų rezultatai									
	Udt									
\circ	V									
0	Kai vožtuvas 2 atidarytas	0,343	Kai vožtuvas 2 pirmoje padėtyje	0,346	Kai vožtuvas 2 antroje padėtyje	0,366	Kai vožtuvas 2 trečioje padėtyje	0,451	Kai vožtuvas 2 uždarytas	0,799
14		0,341		0,342		0,354		0,441		0,794
28		0,340		0,339		0,352		0,437		0,789
42		0,330		0,334		0,348		0,422		0,762
56		0,284		0,289		0,310		0,391		0,739
70		0,237		0,241		0,249		0,359		0,713
84		0,173		0,181		0,200		0,271		0,597
96		0,099		0,101		0,117		0,184		0,431
110		0,035		0,037		0,061		0,134		0,249

Šiuo perskaičiuotus matavimų rezultatus jau galima išreikšti slėgio dydžiais, tiesiog kiekvieną rezultatą reikia padauginti iš ir vidutinio įtampos ir slėgio priklausomybės koeficiento k_{pu} :

$$p_{tnm} = U_{dtnm} \cdot k_{pu} \quad (3.15)$$

$$p_{t11} = U_{dt11} \cdot k_{pu} = 0,343 \cdot 0,0196 = 17,500 \text{ kPa}$$

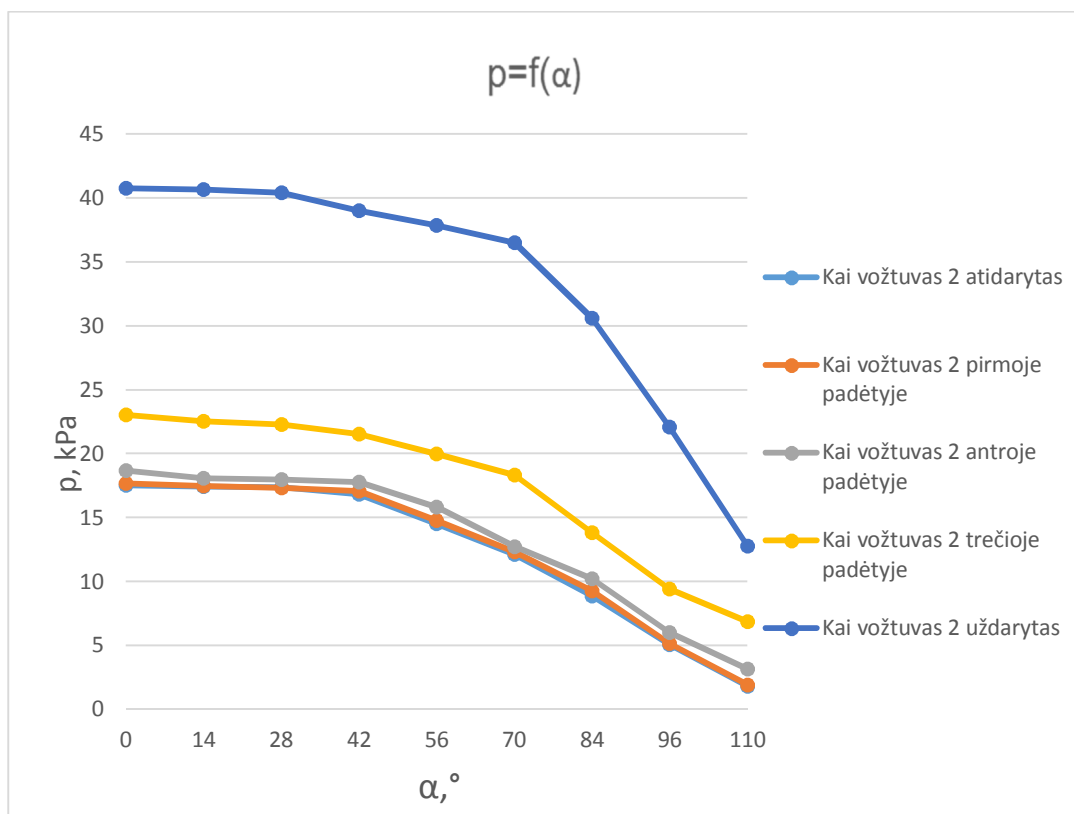
Taigi galutinė slėgio matavimų rezultatai pateikiami 3.9 lentelėje.

3.9 lentelė. Slėgio matavimo galutiniai rezultatai

α	Skaičiuoti matavimų rezultatai									
	pdt									
\circ	kPa									
0	Kai vožtuvas 2 atidarytas	17,50	Kai vožtuvas 2 pirmoje padėtyje	17,65	Kai vožtuvas 2 antroje padėtyje	18,67	Kai vožtuvas 2 trečioje padėtyje	23,01	Kai vožtuvas 2 uždarytas	40,77
14		17,40		17,45		18,06		22,50		40,66
28		17,35		17,30		17,96		22,30		40,40
42		16,84		17,04		17,76		21,53		39,02
56		14,49		14,74		15,82		19,95		37,84
70		12,09		12,30		12,70		18,32		36,51
84		8,83		9,23		10,20		13,83		30,57
96		5,05		5,15		5,97		9,39		22,07
110		1,79		1,89		3,11		6,84		12,75

Norint paprastai ir tinkamai interpretuoti gautus matavimų rezultatus, juos reikia iliustruoti grafiku, kuris pateikiamas 3.8 paveiksle. Kaip matyti iš šio grafiko, slėgis tiesiogiai priklausomas nuo simistoriaus atidarymo kampo.

Kai vožtuvas 2 pilnai atidarytas, slėgis kinta nuo 0 iki 17,5 kPa. Panašaus dydžio slėgis išsilaiko iki tol, kol simistoriaus atidarymo kampas neviršijamas 50°, toliau, didinant atidarymo kampą, slėgis pradeda ženkliai kristi.



3.8 pav. Slėgio priklausomybės nuo simistoriaus atidarymo kampo

Nuo vožtuvo 2 padėties (pirmos ir antros) slėgio charakteristikos mažai skiriasi nuo charakteristikos, kai vožtuvas pilnai atidarytas. Tai galima paaiškinti tuo, kad, esant vožtuvui tiek pirmoje, tiek antroje padėtyse, oro pralaidumas yra pakankamas, pagal kompresoriaus išstumiamą oro kiekį. Ryškus pokytis matyti pasukus vožtuvą į trečią padėtį. Tada slėgis kinta nuo 0 iki 23 kPa. Tokį padidėjimą lemia mažas oro srauto pralaidumas pro vožtuvą į rotometrą, o didesnė dalis srauto tenka slėgio davikliui, tai ir lemia slėgio padidėjimą.

Suprantama, kad didžiausias slėgis gaunamas, kai vožtuvas 2 pilnai uždarytas, tuo metu visas kompresoriaus išstumiamo oro srautas keliauja tiesiai į daviklį. Pagal matavimų rezultatus matyti, kad yra pasiekiamas apie 40,8 kPa slėgis, kai simistorius pilnai atidarytas. Pagal gamintojo pateikiamus techninius variklio-kompresoriaus duomenis matyti, kad didžiausias (maksimalus) kompresoriaus sukuriamas slėgis 0,4 baro, kas atitinka 40 kPa. Taigi, galima teigti, kad matavimų rezultatai paklaidų ribose sutampa su gamintojo pateikiamais duomenimis.

Palyginimui, kaip kintant simistoriaus atidarymo kampui, kinta kompresoriaus sukurtas oro srautas ir slėgis, pateikiama 3.10 lentelė. Lentelėje pateikiamos visų matavimų rezultatai prie skirtingų vožtuvo atidarymo kampo. Esant pirmai vožtuvo padėčiai rezultatai beveik nesiskiria nuo to atvejo, kai vožtuvas atidarytas pilnai, o kai vožtuvas uždarytas, tai oro srautas lygus nuliui.

3.10 lentelė. Kompresoriaus sukuriamo oro srauto ir slėgio matavimų duomenys

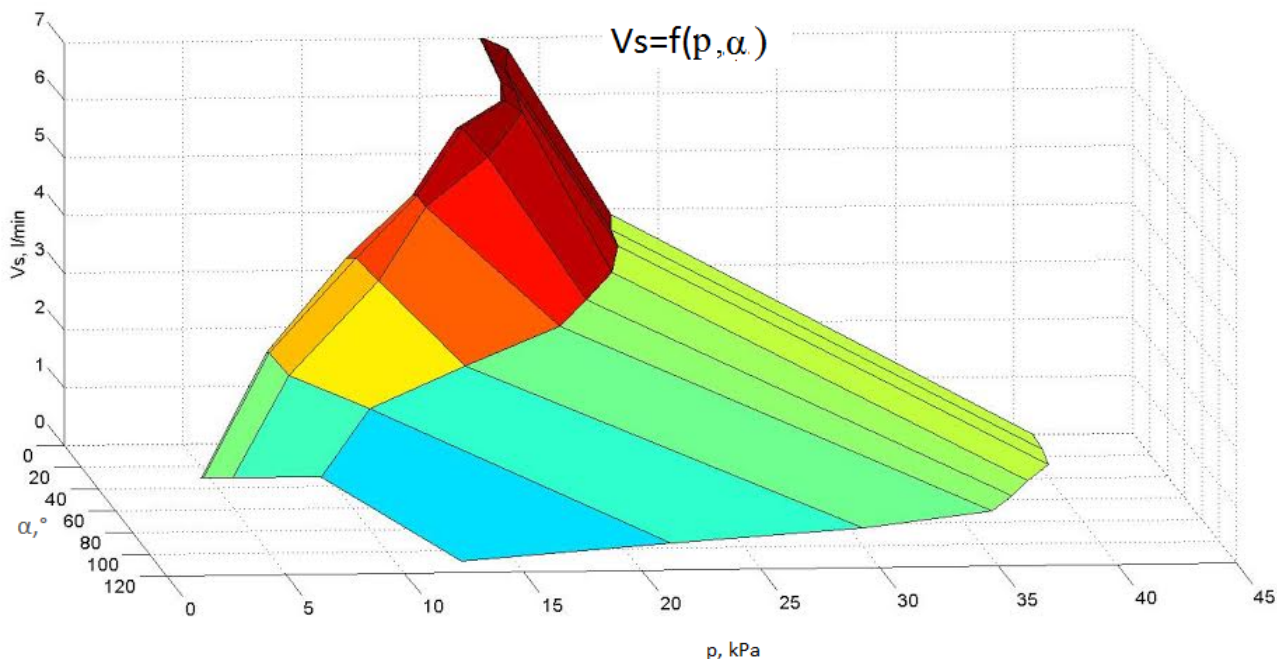
Matavimai									
α		Vs	p		Vs	p		Vs	p
°		l/min	kPa		l/min	kPa		l/min	kPa
0	Kai vožtuvas 2 atidarytas	7	17,50	Kai vožtuvas 2 pirmoje padėtyje	7	17,65	Kai vožtuvas 2 antroje padėtyje	6,8	18,67
14		6,9	17,40		6,9	17,45		6,7	18,06
28		6,8	17,35		6,8	17,30		6,6	17,96
42		6,7	16,84		6,7	17,04		6,5	17,76
56		6,5	14,49		6,5	14,74		6	15,82
70		5,6	12,09		5,6	12,30		5,4	12,70
84		4,8	8,83		4,8	9,23		4,4	10,20
96		3,4	5,05		3,4	5,15		3	5,97
110		1,5	1,79		1,5	1,89		1,5	3,11

3.10 lentelės tęsinys. Kompresoriaus sukuriamo oro srauto ir slėgio matavimų duomenys

Matavimai					
	Vs	p		Vs	p
	l/min	kPa		l/min	kPa
Kai vožtuvas 2 trečioje padėtyje	3,9	23,01	Kai vožtuvas 2 uždarytas	0	40,77
	3,9	22,50		0	40,66
	3,9	22,30		0	40,40
	3,7	21,53		0	39,02
	3,5	19,95		0	37,84
	3,3	18,32		0	36,51
	2,9	13,83		0	30,57
	2,4	9,39		0	22,07
	1,5	6,84		0	12,75

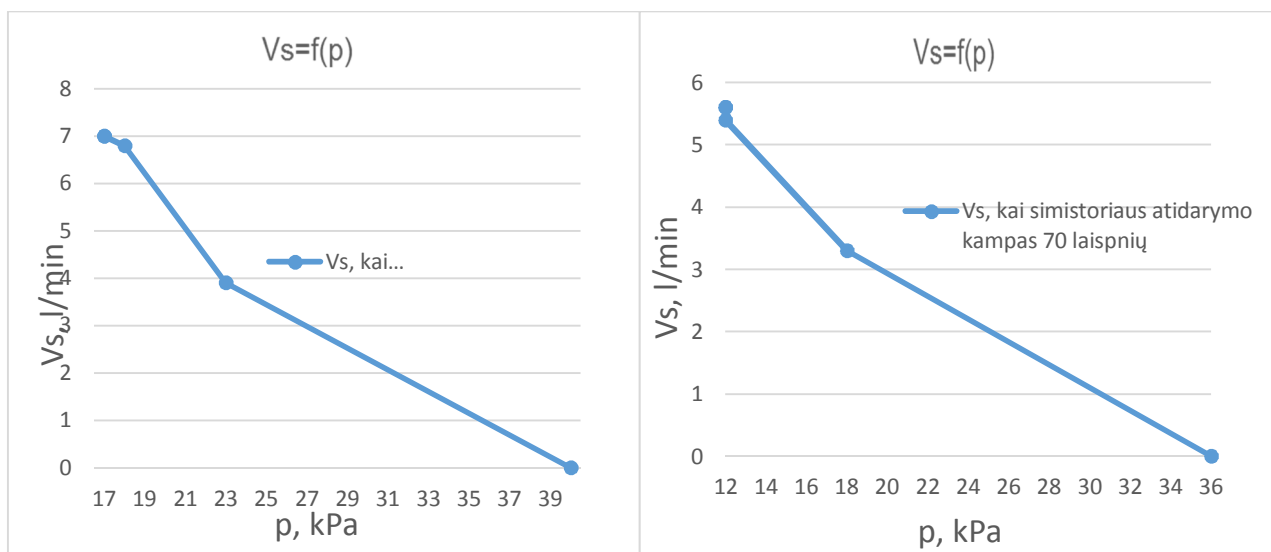
Kompresoriaus darbą charakterizuoja $V_s=f(p, \alpha)$ grafikas (3.9 pav.). Iš šio trimačio grafiko matyti, kaip, keičiant vožtuvo 2 padėtis bei simistoriaus atidarymo kampą, keičiasi kompresoriaus našumas ir sukuriamas oro slėgis. Kai vožtuvas 2 atidarytas ir kai jis pirmoje tarpinėje padėtyje, kompresoriaus matuojami parametrai labai panašūs ir priklausomi tik nuo simistoriaus atidarymo kampo. Kitos vožtuvo padėties, kompresoriui daro didesnę įtaką. Jo parametrai nuo vožtuvo padėties

kinta taip: kuo vožtuvas labiau uždarytas, tuo slėgis didėja, o našumas - mažėja. Didinant simistoriaus atidarymo kampą α abu kompresoriaus darbą atspindintys parametrai mažėja.



3.9 pav. $V_s = f(p, \alpha)$

Pagrindinės kompresoriaus charakteristika- tai oro srauto priklausomybė nuo slėgio. Taigi, 3.10 paveiksle pateikiama oro srauto priklausomybė nuo slėgio, kai simistorius pilnai atidarytas (kairėje), oro srauto priklausomybė nuo slėgio, kai simistoriaus atidarymo kampas 70° (dešinėje). Kadangi buvo gauta tik po penkis matavimo rezultatus prie skirtingų simistoriaus atidarymo kampų, (keičiant 2 vožtuvo padėtį), tai charakteristikos nėra pilnai išraiškingos.



3.10 pav. Oro srauto priklausomybė nuo slėgio, kai simistorius pilnai atidarytas (kairėje), oro srauto priklausomybė nuo slėgio, kai simistorius atidarymo kampas 70°

Esant mažam kiekiui našumą charakterizuojančių taškų nebuvo gauta kreivė, kuri sutaptų su teorine, tokiais varikliais varomų kompresorių, charakteristika. Teoriškai prie tam tikro slėgio našumas turėjo išaugti ir kreivė turi augti, o vėliau didėjant slėgiui jau mažėti.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Švytuojamojo judesio variklius valdyti galima maitinant juos tiek kintamąja sinusine, tiek nuolatine įtampa. Pirmu atveju, keičiant maitinimo įtampos dažnį, amplitudę arba jos atidarymo kampą, kitu atveju, keičiant maitinimo įtampos impulsų trukmę, jų dydį arba impulsų dažnį.
2. Pagamintas ir išbandytas švytuojamojo variklio-kompresoriaus universalaus bandymų stendo prototipas, tinkamas simistorinio įrenginio valdymo atvejų tyrimui. Sukurtame bandymų stende panaudoti kai kurie elementai (simistorinio keitiklio valdymo įranga, elektrinių dydžių matavimas ir registravimas skaitmeniniu oscilografu, pjezoelektrinis slėgio daviklis), tinkantys galimam bandymų stendo automatizavimui.
3. Atlikti Nitta-Kohki medicininės paskirties švytuojamojo variklio-kompresoriaus tyrimai, keičiant simistorius atidarymo kampą ir kompresoriaus apkrovą. Konkretaus švytuojamojo variklio-kompresoriaus tyrimų rezultatai iš esmės sutampa su ankstyvesniais tokių įrenginių tyrimų Elektrotechnikos katedroje rezultatais.
4. Panaudojant bandymų stendo prototipo kūrimo patirtimi, tikslinga toliau vystyti bandymų stendą, kad jis tiktų galimai automatizuotiems švytuojamųjų variklių-kompresorių tyrimams. Tuo tikslu reikėtų:
 - numatyti stende automatizuotą kompresoriaus apkrovos vožtuvo valdymą;
 - panaudoti elektrinį debito matuoklį.
5. Išsamesniam švytuojamojo variklio-kompresoriaus tyrimui bandymų stendą tikslinga papildyti mechaninių dydžių (judžiosios dalies koordinatės, greičio) matavimo ir registravimo įrenginiais. Mechaninių dydžių matuokliai kartu su slėgio davikliu leistų gauti tiriamojo kompresoriaus indikatorinę diagramą (slėgio priklausomybę nuo stūmoklio padėties), suteikiančią išsamią informaciją apie kompresoriaus darbo savybes.
6. Kadangi tiriamasis variklis priklauso tiesiaiegių pulsuojamąsios srovės asimetrinių (spyruolinių) variklių tipui, tai jo valdymui būtų tinkamesnis galios keitiklis su vienu tiristoriumi. Simistorinis galios keitiklis tinkamesnis švytuojamojo žadinamojo simetrinio variklio valdymui.

LITERATŪRA

1. Allison J. , Vergez P., Ire M. Transistorized Switching Control of a Variable-Speed DC Motor. Industrial Electronics, IRE Transactions on (Volume:IE-8 , Issue: 1), ISSN :0197-5706, May 1961. p. 19 – 24.
2. Bačinskas T., Uždarų dažninių tiesiaeigių elektromechaninių sistemų tyrimas, Baigiamasis magistro darbas. Vilnius, 2004.
3. Brazaitis A., Guseinovicė E. 2011. Influence of Supply Current to the Characteristics of Reactive Oscillating Motors. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 5(111), p. 115–118.
4. Brazaitis A., Guseinovicė E., Jankūnas V. 2010. Control of Oscillation Amplitude of Oscillating Motors. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 3(99), p. 77–82
5. Category Triacs [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. lapkričio 20 d.]. Prieiga per internetą <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triac_UI.png >.
6. Elektromanija, 2013 [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. gruodžio 9 d.] Prieiga per internetą <<http://elektromanija.blogspot.com/> >.
7. elektronika, 2012 [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. lapkričio 22 d.]. Prieiga per internetą <<http://forum.elektronika.lt/viewtopic.php?p=874135>>.
8. Finocchiaro T. 2008. New Linear Motor Concepts for Artificial Hearts. IEEE Transactions on Magnetics. ISSN 0018-9464. 44(6), p. 678–681.
9. Fukui Y., Funakubo A., Fukunaga K. 2004. Development of the Assisted Artificial Heart with Linear Motor Actuator. In: SICE. Annual Conference. Sapporo, Japan 4-6 August, p. 306–310.
10. Gečys S., Kalvaitis A., Smolskas P. 2011. Elektros mašinos I dalis. Kaunas: Technologija.
11. Geleževičius V., Kriščiūnas K., Kubilius V. Elektros pavarų valdymo sistemos. Vilnius: Mokslas, 1990. 357p.
12. Guseinovicė E. 2002. Švytuojamojo sinchroninio pulsuojančiosios srovės variklio charakteristikos. Elektronika ir Elektrotechnika. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, Nr. 5(40), p. 55-58.
13. Guseinovicė E., Simanynienė L., Kudarauskas S. 2002. Oscillating Synchronous Pulsating Current Motor in the Piston Compressor's Drive. Elektronika ir Elektrotechnika. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, Nr. 3(38), p. 36-40.
14. Heo K-B., Lee H-K., Lee C-W, Hwang M-G., Yoo J-Y. Control of a linear compresor. In: IMechE Conference Transprecessions and their Systems, London 7-10September 2003, p. 493-499.

15. Jankūnas V., 2013. Švytuojamojo judesio sinchroninių pavarų su impulsiniais maitinimo šaltiniais tyrimas: daktaro disertacija. Kaunas.
16. Jankūnas V., Eidukas D., Guseinovicė E., Cirtautas V. 2009. Investigation of Supply Possibilities of Mechatronic Actuator. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 5(93), p. 25–28.
17. Kriaučiūnas J. DAŽNINĖS ELEKTROS PAVAROS TYRIMAS. Baigiamasis magistro darbas. Vilnius, 2009.
18. Kudarauskas S. Characteristics of oscillating synchronous thyristor-controlled pulsating current motor. 15 th International Conference in Electrical Machines. ICEM. 25-28 August 2002: Briège, Belgium. p.
19. Kudarauskas S. 2004. Introduction to oscillating electrical machines., Klaipėda: KU leidykla.
20. Kudarauskas, S. Švytuojamosios elektros mašinos: monografija. 2008. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla
21. Kudarauskas S., Senulis A., Simanygienė L., Švytuojamojo variklio-kompresoriaus švytavimų centro valdymas. // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija. 2004 Nr. 7(56), p. 66-70.
22. Le thyristor , 2014 [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. gruodžio 4 d.]. Prieiga per internetą < <http://www.ile-reunion.org/louispayen/cours/thyristors.htm> .>
23. Leung, W.S. ; Ng, C.W. Adaptive Decoupling Control of Induction Motor Drives. Industrial Electronics Society, 1988. IECON '88. Proceedings., 14 Annual Conference of (Volume:3) 24-28 Oct 1988, . Singapore, p. 755 – 760.
24. Lin Z., Wang J., Howe D. A. 2011. Learning Feed-Forward Current Controller for Linear Reciprocating Vapor Compressors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. ISSN 0278-0046, 58(8), p. 3383-3390.
25. Lorenz, R. D.; Lawson, D. B.; Simplified, A. 1990. Approach to continuous on-line tuning of field-oriented induction machine drive, IEEE Trans. On Industry application 26(3): 425–429
26. Motorcontrols, 2013 [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. gruodžio 15 d.] Prieiga per internetą < <http://www.mpoweruk.com/motorcontrols.htm> >.
27. Nakagawa H., Kato K., Miki T. ir kiti. Linear actuator. Patento Nr.: EP 1 463 186 B1, 2012.
28. Paulides J. J. H. 2006. Active Roll Compensation for Automotive Applications using a Brushless Direct-Drive Linear Permanent Magnet Actuator. 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. PESC. June 18-22, Jeju, South Korea. ISBN 0-7803-9716-9, p. 1-6.
29. Qiang Li, Hai Huang, Binchuan Yin The Study of PWM Methods in Permanent Magnet Brushless DC Motor Speed Control System, 2008, IEEE Trans. On Industry application 26(3): 315-317

30. Radio Electronics, 2014 [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. gruodžio 6 d.]. Prieiga per internetą < <http://www.radio-electronics.com/info/data/semicond/triac/what-is-a-triac-basics-tutorial.php> >.
31. Reguliatorius [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. lapkričio 22 d.]. Prieiga per internetą < <http://www.ventmatika.lt/lt/> >.
32. Saito, D. Nomura, S. Unity power factor control and harmonic current reduction of thyristor converters using variable series capacitors. Power Electronics and Applications 15th European Conference on (EPE), 2013, Lille, p. 1 – 10.
33. Sengupta, S. ; Patra, A., Indirect current control of a single-phase voltage-sourced boost-type bridge converter operated in the rectifier mode. Power Electronics, IEEE Transactions on (Volume:18 , Issue: 5), ISSN : 0885-8993, Sept. 2003, p.1130 – 1137.
34. Senulis A., 2013. Dvimasio tiesiaieigio švytuojamąjio judesio mechatroninio įtaiso tyrimas spektriniu aspektu: daktaro disertacija. Kaunas.
35. Simanygienė L. 2002. Švytuojamąjio variklio ir kompresoriaus pavaros darbo charakteristikų analizė. Elektronika ir Elektrotechnika. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, Nr. 5(40), p. 51-54.
36. Storm, H.F.. 1965. Silicon gate-controlled AC switch and its applications. Magnetics, IEEE Transactions on (Volume:1 , Issue: 1), USA. ISSN :0018-9464, p. 36-42.
37. Taniguchi S., Shimizu H., Naruse H. Oscillatory actuator. Patent Nr.: EP 1 737 110 B1, 2006.
38. Chun W; Jung-Ryol A.; Hong-Hee L., Heung-Gun K., Eui-Cheol N. A Novel Strategy of Efficiency Control for a Linear Compressor System Driven by a PWM Inverter," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.55, no.1, pp.296-301, Jan. 2008. ISSN : 0278-0046
39. Uchida M. 2008. Sliding Mode Servo Control with Feedforward Compensation for Electromagnetic Engine Valve. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Xi'an, China 2-5 July, p. 589–594
40. Understanding the Triac or 'solid state AC switch'. [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. lapkričio 19 d.]. Prieiga per internetą < http://www.signindustry.com/electric/articles/2000-11_ALDORtriacexplained.php3 >.
41. Urmonienė L., Gecys, S.; Guseinoviene, E.; Cirtautas, V.2011. Investigation of Energetic Parameters of Oscillating Synchronous Pulsating Current Motors. Electronics and Electrical Engineering. ISSN 1392-1215. Kaunas: Technologija, No. 4(110), p. 17–20.
42. Voltamperinė charakteristika, 2013 [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. gruodžio 4 d.] Prieiga per internetą < http://en.wikibooks.org/wiki/Electronics_Handbook/Components/Thyristors .>
43. Zhang Damin ; Lin Huipin ; Lu Zhengyu ; Wang Shitao, Predictive current control based multi-pulse flexible-topology thyristor AC/DC converter and its application in wind energy conversion system. IEEE ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), 2013 Melbourne, VIC, p 1202 – 1207.

44. Zhengyu L., Wang J; Howe, D. A Resonant Frequency Tracking Technique for Linear Vapor Compressors // Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC '07. IEEE International , vol.1, no., pp.370-375, 3-5 May 2007. ISBN: 1-4244-0742-7
45. Žodynas, 2013. [interaktyvus]. [žiūrėta 2014 m. lapkričio 20 d.]. Prieiga per internetą <<http://www.lietuviuzodynas.lt/terminai/Rotametas> >.