

# VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS ELEKTRONIKOS FAKULTETAS AUTOMATIKOS KATEDRA

Mantas Balčaitis

# VENTILIACINĖS SISTEMOS BEŠEPETĖS PAVAROS TYRIMAS RESEARCH OF BRUSHLESS DRIVE FOR VENTILIATION SYSTEM

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001 Automatinių sistemų specializacija Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

# VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS ELEKTRONIKOS FAKULTETAS AUTOMATIKOS KATEDRA

**TVIRTINU** Katedros vedėjas Long (Parašas) Lite Sanduene (Vardas, pavardė) 2016-06-02 (Data)

Mantas Balčaitis

# VENTILIACINĖS SISTEMOS BEŠEPETĖS PAVAROS TYRIMAS RESEARCH OF BRUSHLESS DRIVE FOR VENTILIATION SYSTEM

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001

Automatinių sistemų specializacija

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

	Q	
Vadovas	doc. dr. Sigitas Juraitis (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardê) (Parašas)	20160530 (Data)
Konsultantas	doc. dr. Dainius Udris (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas)	<u>20 16 06 -</u> 07 (Data)
Lietuvių kalbos kons	ultantas dr. Vaida Buivydienė (Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė) (Parašas)	<u>106-05-15</u> (Data)

Vilnius, 2016

### VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS ELEKTRONIKOS FAKULTETAS AUTOMATIKOS KATEDRA

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 621H62001

Automatinių sistemų specializacija

**TVIRTINU** Katedros vedėja

This (Parašas) Zita Savickienė (Vardas, pavardė) 2016 - 02 (Data)

#### **BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO**

**UŽDUOTIS** 2016–02–05 Nr. .... *X* 

Vilnius

Studentui (ei)

Mantui Balčaičiui (Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

# VENTILIACINĖS SISTEMOS BEŠEPETĖS PAVAROS TYRIMAS RESEARCH OF BRUSHLESS DRIVE FOR VENTILIATION SYSTEM

patvirtinta 2014 m. lapkričio 21 d. dekano potvarkiu Nr. 235el Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2016 m. gegužės 31 d.

# BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

#### ĮVADAS.

- 1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ.
- 1.1. Bešepečių pavarų apžvalga.
- 1.2. Naujausių bešepečių variklių apžvalga.
- 2. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI.
- 3. TEORINĖ DALIS.
- 3.1. Bešepečių variklių veikimas ir valdymas.
- 3.2. Bešepečio variklio matematinis modelis.
- 3.3. Ventiliacinės sistemos bešepetės pavaros kompiuterinis modelis.
- 4. TIRIAMOJI DALIS.
- 4.1. Bešepetės pavaros kompiuterinio modelio tyrimas.
- 4.2. Bešepetės pavaros eksperimentinio modelio sudarymas.
- 4.3. Bešepetės pavaros eksperimentinis tyrimas.
- 5. TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS.
- 5.1. Išvados.

LITERATŪRA

00

Vadovas

(Parašas )

Užduotį gavau

Mantas Balčaitis (Vardas, pavardė) 2016–02–05 (Data)

(Parašas)

dr. doc. Sigitas Juraitis (Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė) Vilniaus Gedimino technikos universitetas Elektronikos fakultetas ISBN ISSN Egz. sk. .....

Data ....-....

Automatikos katedra

Auromatiko studijų programos baigiamasis magistro darbas Pavadinimas Ventiliacinės sistemos bešepetės pavaros tyrimas

Autorius Mantas Balčaitis

Vadovas doc. dr. Sigitas Juraitis

Kalba lietuvių

# Anotacija

Baigiamajame magistro darbe ištirtos ventiliacinės sistemos bešepetės pavaros charakteristikos. Atlikus literatūros analizę apie bešepečius nuolatinės srovės variklius buvo išskirti šių variklių privalumai prieš įprastinius nuolatinės srovės ir kintamosios srovės variklius. Apžvelgta elektroniškai komutuojamų variklių sandara, konstrukcijų tipai. Taip pat peržvelgti naujausi šių variklių tyrimai. Teorinėje dalyje aprašyti bešepečių variklių veikimas, valdymo metodai. Sudarytas variklio matematinis modelis. Apžvelgti kompiuteriniai imitaciniai modeliai.

Tiriamojoje dalyje atliktas bešepetės pavaros kompiuterinio modelio tyrimas, naudojant "Matlab Simulink" progaminį paketą. Tyrimui suprojektuotas ir pagamintas eksperimentinis ventiliatoriaus stendas su elektroniškai komutuojamu varikliu. Sudaryta tyrimų metodika, pagal kurią atlikti ventiliatoriaus tyrimai.

Darbą sudaro įvadas, literatūros apie bešepetes pavaras apžvalga ir analizė, tyrimo tikslas ir uždaviniai, teorinė dalis, tiriamoji dalis, tyrimų rezultatų apibendrinimas ir išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 86 p. teksto be priedų, 66 paveikslai, 8 lentelės, 45 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

**Prasminiai žodžiai:** bešepetė pavara, elektroniškai komutuojamas variklis, EK ventiliatoriaus tyrimas, imitacinis modelis, variklio konstrukcija, variklių privalumai, ventiliatorinė apkrova

Vilnius Gediminas Technical University

Elektronics faculty

Automation department

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

Automation study programme master thesis

# Title Research of brushless drive for ventiliation system

Author Mantas Balčaitis Academic supervisor Prof. Dr. Sigitas Juraitis



# Annotation

The master thesis presents research of the operation characteristics of brushless drive ventilation system. In literature analysis of brushless DC motors are identified advantages against conventional DC and AC motors. Also it is reviewed electronically commutated motor structure, types of construction and recent studies of these motors. In theoretical part are described EC motor operation and control methods. A mathematical model of motor with fan load was designed. It is overviewed simulations models of EC motors.

In research part are investigated brushless drive simulation models using "Matlab Simulink" software. It was designed and manufactured experimental stand for EC fan operation researches. For this purpose researches methodology is presented.

Structure: introduction, analysis and overview of brushless drives, aims and objectives of research, theoretical part, research conclusions and suggestions, references.

Thesis consist of: 86 p. text without appendixes, 66 pictures, 8 tables, 45 bibliographical entries.

Appendixes included.

**Keywords:** brushless drive, EC fan, electronically commutated motor, fan load, motor advantages, motor design, performance investigation, simulation model

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2 priedas

#### (Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

### VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Mantas Balčaitis, 20102292

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Automatika, AUSfm-14

(Studijų programa, akademinė grupė)

# BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės 25 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema "Ventiliacinės sistemos bešepetės pavaros tyrimas" patvirtintas 2014 m. lapkričio 21 d. dekano potvarkiu Nr. 235el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: doc. dr. Dainius Udris. Mano darbo vadovas dr. Sigitas Juraitis.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

(Parašas)

Mantas Balčaitis (Vardas ir pavardė)

# Turinys

ĮVADAS	12
1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ	14
1.1 Bešepečių pavarų apžvalga	14
1.2 Elektroniškai komutuojami nuolatinės srovės varikliai	16
1.2.1 EK variklių rotorių konstrukcija	18
1.2.2 EK varikliai su vidiniu rotoriumi	19
1.2.3 EK varikliai su išoriniu rotoriumi	21
1.3 Naujausių bešepečių variklių tyrimų apžvalga	22
2. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI	28
3. TEORINĖ DALIS	29
3.1. Bešepečių variklių veikimas ir valdymas	29
3.1.1 EK variklio rotoriaus erdvinės padėties nustatymas	29
3.1.1.1 EK variklio rotoriaus erdvinės padėties nustatymas naudojant Holo jutiklius	29
3.1.1.2. EK variklio rotoriaus erdvinės padėties nustatymas matuojant fazinę elektrovarą.	32
3.1.1.3. EK variklio rotoriaus erdvinės padėties nustatymas netiesioginis faziniu elekrovar integravimo metodu	os 33
3.1.2 EK variklio valdymas	35
3.1.3. EK variklio srovių komutavimo būdai	37
3.2 Bešepečio variklio matematinis modelis	39
4. TIRIAMOJI DALIS	46
4.1 Bešepetės pavaros kompiuterinio modelio tyrimas	46
4.2 Bešepetės pavaros eksperimentinio modelio sudarymas	59
4.2.1 Tyrimų stendas	59
4.2.2 Tyrimų atlikimo įranga	60
4.3 Tyrimo metodika	65
4.3.1 Virpesių matavimas	65
4.3.2 Ventiliatoriaus sūkių matavimas	66
4.3.3 Oro srauto slėgių matavimas	67

4.3.4 Garso lygio matavimas	
4.3.5 Variklio iš tinklo vartojamos srovės matavimas	
4.4 Tyrimo rezultatai	
4.3.3 Triukšmo lygio ir vibracijų tyrimai	75
5. TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS	
5.1. Išvados	
LITERATŪROS SĄRAŠAS	
PRIEDAI	

# Paveikslų sąrašas

1.1 pav. EK ir KS variklių galių nuostolių palyginimas	15
1.2 pav. EK variklis [40]	
1.3 pav. Bendras variklių vaizdas: a) su vidiniu rotoriumi; b) su išoriniu rotoriumi	18
1.4 pav. Vidinio rotoriaus konstrukciniai variantai	19
1.5 pav. Variklis su vidiniu rotoriumi [41]	
1.6 pav. Variklio su išoriniu rotoriumi konstrukcija [42]	21
1.7 pav. Magnetinio lauko tankis po 0,004 s	23
1.8 pav. Penkiafazė bešepetės pavaros valdymo struktūrinė schema	26
1.9 pav. Bešepečio variklio su išilgai ašies suprojektuotas statoriaus poliais eskizas	27
3.1 pav. Holo jutiklis [42]	30
3.2 pav. Holo jutiklių veikimas [43]	31
3.3 pav. Fazinių įtampų, srovių, Holo jutiklių signalų priklausomybė nuo rotoriaus el. kam	ipo [45] <u>3</u> 3
3.4 pav. Įtampos trečiosios harmonikos integravimo metodas [15]	34
3.5 pav. Trifazis tiltelis	35
3.6 pav. EK variklio statoriaus apvijomis tekančios srovės	36
3.7 pav. Sinusinė srovės komutacija	37
3.8 pav. Blokinė EK variklio schema	38
3.9 pav. Trifazio EK variklio ekvivalentinė schema	39
3.10 pav. Dinaminė EK pavaros schema	42
3.11 pav. EK variklio imitacinis modelis	

3.12 pav. Detalus EK variklio imitacinis modelis	
4.1 pav. Tiriamojo EK variklio modelis	47
4.2 pav. EK variklio modelio struktūra	47
4.3 pav. Srovės pereinamasis procesas	48
4.4 pav. Momento pereinamasis procesas	49
4.5 pav. Greičio pereinamasis procesas	49
4.6 pav. EK variklio imitacinis modelis	50
4.7 pav. EK variklio modelio strukūra	51
4.8 pav. Holo jutiklių modelio blokas	52
4.9 pav. Srovių formacimo blokas	52
4.10 pav. Elektrovaros modeliavimo blokas	53
4.11 pav. Greičio modeliavimo blokas	53
4.12 pav. Matavimų blokas	54
4.13 pav. Ventiliatorinės apkrovos imitacija	54
4.14 pav. Elektromagnetinio momento procesas	55
4.15 pav. Greičio pereinamieji procesai	55
4.16 pav. Statoriaus srovės	56
4.17 pav. Fazinės elekrovaros	57
4.18 pav. Holo jutiklių signalai	58
4.19 pav. Tyrimų stendas	59
4.20 Pav. Reguliavimo – matavimo sklendė	_60
4.21 pav. Mobili matavimo rezultatų kaupimo ir apdorojimo sistema	61
4.22 pav. Akselerometras	61
4.23 pav. fotoelektrinis tachometras	62
4.24 pav. Garso lygio matuoklis	62
4.25 pav. Srovės matavimo replės	_63
4.26 pav. Programos "C3" Įėjimų ir išėjimų langas	64
4.27 pav. Akselerometrų išdėstymo schema ant ventiliatoriaus pado 1: 2,3 – akselerometrai	65
4.28 pav. Prie laikiklio 1 pritvirtintas tachometras 2	66
4.30 pav. a) matuojamas oro srauto slėgis išorėje 1 b) Matuojamas oro srauto slėgis viduje 2	67
4.31 pav. Slėgio išorėje 1 ir slėgio viduje 2 matavimas	67
4.32 pav. Ventiliatoriaus srovės priklausomybė nuo sukimosi greičio, kai S=0 %	68

4.33 pav. Ventiliatoriaus srovės priklausomybė nuo sukimosi greičio, kai S=100%	68
4.34 pav. Ventiliatoriaus srovių priklausomybė keičiant sklendės diafragmos plotą	
4.35 pav. Srovės priklausomybė nuo valdymo signalo	70
4.36 pav. Ventiliatoriaus apsisukimų priklausomybės nuo valdymo signalo	70
4.37 pav. Apibendrinta ventiliatoriaus apsisukimų priklausomybė nuo valdymo signalo	71
4.38 pav. Slėgio piklausomybė nuo valdymo signalo	72
4.39 pav. Slėgio piklauomybė nuo sukimosi greičio	
4.40. Galių skaičiavimo rezultatų grafikas	73
4.41. Slėgio ir galios priklausomybės nuo valdymo signalo	74
4.42 pav. Ekvivalentinis garso lygis	75
4.43 pav. garso lygio kitimas nuo valdymo signalo	76
4.44 pav. x ašimi veikiančios vibracijos	
4.45 pav. y ašimi veikiančios vibracijos	77

# Lentelių sąrašas

1 lentelė. Variklio efektyvumo tyrimo rezultatai	14
2 lentelė. Skirtingų reguliatorių rezultatų palyginimas	23
3 lentelė. Srovių komutacija apvijomis	35
4 lentelė. Tiriamojo variklio parametrai	45
5 lentelė. Ventiliatoriaus duomenys	59
6 lentelė. Sklendės matmenys	59
7 lentelė. Galių skaičiavimo rezultatai	73
8 lentelė. Galių skaičiavimo, nuosekliai kintant valdymo įtampai, rezultatai	74

# ĮVADAS

Elektros varikliai plačiai naudojami visose žmogaus gyvenimo srityse. Varikliams tampant vis labiau neatsiejamiems nuo taikymo tiek buityje, tiek pramonėje, aktuali poblema tampa jų kaina, energijos sąnaudos bei gamybos metodai. Rinkoje yra įvairių variklių, kurie klasifikuojami į dvi pagrindines klases: kintamosios srovės (KS) (angl. *AC*) ir nuolatinės srovės (NS) (angl. *DC*) variklius. Kai buvo išrasti KS varikliai, jie labai paplito rinkoje. Nors šie varikliai turi keletą privalumų, pavyzdžiui, paprasta konstukcija ir lengva priežiūra, dėmesio taip pat yra verti nuolatinės srovės varikliai, dėl savo paprasto valdymo ir lengvesnio sukimo momento bei greičio valdymo.

NS varikliai tam tikrose sritys tapo labai plačiai naudojami, tačiau jų trūkumai (šepečių dėvėjimasis, elektringų dulkių atsiradimas) bei proveržis puslaidininkinių medžiagų, mikrovaldiklių ir nuolatinių magnetų gamyboje lėmė bešepečių elektroniškai komutuojamų (EK) variklių (angl. *brushles dc motor* (bldc), *electronically comutated* (EC)) tobulėjimą ir vis platesnį naudojimą.

Taip pat varikliai dėl savo suprastintos struktūros turi linijines greičio / momento charakteristikas, todėl jie yra lengvai valdomi. Šie varikliai yra didelio efektyvumo, pasižymintys nedidelio triukšmingumo veikimu bei nereikalaujantys nuolatinės techninės priežiūros.

EK varikliai plačiai naudojami šildymo, vėdinimo ir oro kondiocinavimo technikoje (ŠVOK). Dėl nesudėtingo valdymo, kompaktiško dydžio ir didelio patikimumo EK ventiliatoriai naudojami specialių reikalavimų turinčiose aplinkose (pvz., vėsinimo įrenginiuose serverinių aušinimui). Šių variklių naudojimo ventiliatoriuose pagrindinė priežastis yra ta, kad ventiliatoriaus darbo režimas reikalauja didelio sukimo momento / greičio charakteristikų efektyvumo. Variklio greitis turi būti minimaliai svyruojantis, keičiantis variklio momentui priklausomai nuo darbo sąlygų.

Šiuolaikiniai ventiliatoriai yra paprastai gaminami su kompaktiškais EK varikliais. Šie varikliai yra daug ekonomiškesni, nei KS varikliai, kurie buvo labai plačiai naudojami anksčiau. Dabar ventiliatoriuose su tokio tipo varikliu greičio diapazonas nuo 1000 iki 6000 aps/min ir esant specialiams poreikiams gali siekti 60000 aps/min bei dar daugiau.

Viena iš sparčiausiai augančių rinkų, kur EK varikliai keičia įprastus vienfazius KS variklius yra buitinė technika. Tokio tipo elektros variklio naudojami daugumoje buitinių įrenginių: oro kondicionieriuose, šaldytuvuose, dulkių siurbliuose, plovimo mašinose, džiovyklėse. Tai vyksta dėl to, kad vartotojai nuolat reikalauja geresnio veikimo, mažesnio akustinio triukšmo ir didesnio prietaisų efektyvumo. EK variklių savybės vis geriau atitinka šiuos reikalavimus.

Šios temos pasirinkimą lėmė vis labiau populiarėjantis šių variklių naudojimas. Atliktų tyrimų Lietuvoje šia tema nėra daug.

Šio magistro baigiamojo darbo tikslas yra ištirti bešepetę ventiliacinės sistemos pavarą, jos darbo charakteristikas. Todėl didžiausias dėmesys skiriamas šiose pavarose naudojamiems bešepečiams elektroniškai komutuojamiems varikliams. Darbe išanalizuota literatūra apie pavaras su šiuo varikliu: konstrukcija, valdymo būdai, naujausi moksliniai tyrimai. Sudarytas variklio matematinis modelis, ištirtas imitacinis modelis, suprojektuotas ir sumontuotas eksperimentinis stendas bešepečio elektroniškai komutuojamo ventiliatoriaus pavaros tyrimui.

Darbą sudaro: įvadas, literatūros apie bešepetes pavaras analizė, tyrimo tikslas ir uždaviniai, teorinė dalis, tiriamoji dalis, rezultatų apibendrinimas ir išvados, literatūra, priedai.

# 1. LITERATŪROS APŽVALGA IR ANALIZĖ

### 1.1 Bešepečių pavarų apžvalga

Bešepetės pavaros apima naudojimo sritis, kuriose darbo režimas yra sunkus, pavara turi dirbti labai patikimai ir nepertraukiamai. Šios pavaros plačiai naudojamos pramonėje: vyniojimo technika, kabelių įtempikliai, kranai, konvejeriai, spausdinimo presai, vėdinimo sistemos ir kt. Nors šiuo metu plačiai naudojamos vektorinės kintamosios srovės pavaros, tačiau bešepetės pavaros turi išskirtinių privalumų, todėl tokios pavaros vis dažniau naudojamos. Kadangi pramonėje siekiama kuo tobulesnių gamybos mechnizmų, mašinų, kurios veiktų kuo tiksliau, našiau, nereikalautų dažnos priežiūros, bešepečių pavarų pasirinkimas yra geras sprendimas. Jų privalumus trumpai galima apibūdinti taip:

1. Našumas. Sistemos su bešepetėmis pavaromis suteikia aukščiausią dinaminį tikslumą bet kurioje iš trijų pagrindinių pavarų sistemų tipų. Dinaminio tikslumo rezultatai turi teigiamos įtakos gamybai: geresnė produktų kokybė, bei didesnės gamybos normos. Daugybė atliktų testų, atliktų gaminių iš plastiko formavimo srityje (angl. *blow–molding*), parodė aiškų pranašumą gamyboje lyginant su pavaromis su įprastais nuolatinės srovės varikliais.

2. Dydis. Bešepečiai varikliai yra mažiausio dydžio nustatytiems galios parametrams. Tai lemia visos mašinos mažesnį dydį, kurioje naudojamas toks variklis, paprastesnį ir platesnį jos panaudojimą, mažesnes jos transportavimo išlaidas.

3. Efektyvumas. Šiuolaikinėje pramonėje bešepečiai varikliai yra patys efektyviausi iš visų elektros variklių. Tai reiškia mažesnius galios nuostolius, mažesnį šilumos išsklaidymą į gamybos zoną, mažesnį energijos suvartojimą. Bešepetės pavarų sistemos yra 2–3 % efektyvesnės nei vektorinės kintamosios sistemos pavaros.

Oficialūs tyrimai buvo atlikti Onatario Hydro (Kanada), kur buvo palygintas gamybos mašinos efektyvumas perėjus nuo nuolatinės srovės pavaros su šepečiais prie nuolatinės srovės be šepečių pavaros. Efektyvumas padidėjo mažiausiai 13 %, o veikiant 25 % greičiu – net 78 %. Testo duomenys pateikti 1 lentelėje.

Nustytas greitis,	Sukimosi momentas, %			
%	100 %	75 %	50 %	25 %
100 %	13,0	14,0	15,5	_
75 %	15,4	16,6	22,1	17,1
50 %	21,1	22,8	29,7	42,6
25 %	34,7	34,1	43,0	78,1
10 %	108,0	117,0	142,0	206,7

1 lentelė. Variklio efektyvumo tyrimo rezultatai

4. Guoliai. Priešingai nei kintamosios srovės varikliai, labai dideli bešepečiai varikliai (daugiau nei 30 kW) su paviršiuje montuojamais (angl. *surface – mouned*) magnetais, turi labai didelius oro tarpus, todėl veikia labai mažos statoriaus – rotoriaus talpinės srovės. Didelė kintamosios srovės variklių problema – guoliams daroma rotoriaus srovės žala. Be to, tiek nuolatinės srovės su šepečiais, tiek kintamosios srovės variklių rotorius išspinduliuoja didelį šilumos kiekį. Didelis kiekis šios šilumos, kol yra pašalinamas, veikia veleną ir guolius. Bešepečių variklių rotorius gamina nedidelį kiekį šilumos, nes jame nėra elektros srovės (išskyrus nedideles sukūrines sroves) ir slydimo nuolatinio magneto rotoriuje [1].

Vienos iš elektros variklių, ventiliatorių gamintojas EBMpapst pateikia KS ir EK variklio palyginimą, atsižvelgus į galios nuostolius. Palyginimas pavaizduotas 1.1 pav.



1.1 pav. EK ir KS variklių galių nuostolių palyginimas

Kaip matyti iš pateikto palyginimo, EK variklis patiria netgi 2,2 karto mažiau galios nuostolių, negu KS variklis. Jo nuostoliai yra mažesni visose dalyse, o kadangi šis variklis yra sinchroninis, todėl jis neturi slydimo nuostolių [2].

### 1.2 Elektroniškai komutuojami nuolatinės srovės varikliai

1873 m. F. Von Hafneris pristatė nuolatinės srovės variklio rotoriaus koncepciją, naudojamą iki šiol.

Elektroniškai komutuojami (EK) varikliai pirmą kartą buvo paminėti 1962 m. T. G. Wilson'o ir P. H. Trickey'io patente "DC Machine with Solid State Commutation". Šie varikliai pasižymejo dideliu sukamuoju momentu. Jie buvo pritaikyti juostiniams ir diskiniams kompiuterio atminties kaupikliams, taip pat robotams ir kitoms sritims, kur įprastinių nuolatinės srovės variklių šepečių mazgo trūkumai nėra toleruotini.

Pirmosios nuolatinių magnetų žadinimo sistemos buvo pritaikytos elektros mašinoms ankstyvajame devynioliktame amžiuje. Šių sistemų pradininkai buvo J. Henris (1831 m.), H. Pixii's, (1832 m.), W. Ritchie'is (1833 m.), F. Watkins'as (1835 m.), T. Davenport'as (1837 m.), M. H. Jacobi's (1839 m.). Žinoma, šios sistemos naudojo prastas magnetines medžiagas, todėl greitai daugelis mokslininkų, išradėjų nusigręžė nuo šios sistemos ir perėjo prie elektromagnetinės žadinimo sistemos [3].

Tačiau išradus ALNiCO (Aliuminio, Nikelio, Kobalto), kietojo ferito, neodimio ir samario– kobalto magnetus nuolatinių magnetų žadinimo sistema vėl atsigavo. Kadangi varikliai su nuolatinias magnetais išvysto didesnę galią, efektyvumą, turi geresnes dinamines savybes bei yra kokybiškesni. Be to, atlikti dideli patobulinimai puslaidininkių srityje, sudarė galimybes lengviau valdyti elektroniškai komutuojamus variklius dideliame greičių diapazone palaikant gerą efektyvumą. Dėl šių priežasčių varikliai su nuolatinias magnetais šiomis dienomis yra vis plačiau taikomi įvairiose srityse (pramonėje, paslaugų sferoje, prekyboje, medicinoje, apsaugos sferoje, buityje). Pavyzdžiui, kietųjų diskų gamyboje naudojamų EK variklių paklausa kasmet vidutiniškai išauga 24 %.

EK varikliai gali buti skirstomi į du pagrindinius tipus, pagal fazinių elektrovarų formą:

- trapecines;
- sinusines.

Varikliuose su trapecinės formos elektrovara, nuolatiniai magnetai oro tarpe kuria trapecinės formos magnetiną srautą. Šie varikliai vadinami EK nuolatinės srovės varikliais (angl. *Brushless* 

*Direct Current Motors* arba BLDC). Variklių, kuriuose nuolatiniai magnetai kuria sinusinės formos magnetini srautą, fazinės elektrovaros yra sinusinės formos. Tokie varikliai vadinami sinchroniniais varikliais su nuolatiniais magnetais rotoriuje (angl. *Permanent Magnet Synchronous Motors* arba PMSM) [4].

Bešepetis nuolatinės srovės variklis yra sinchroninis variklis su integruota galios elektronika, kuri valdo variklį naudodoma nuolatinę srovę.

Nuolatinės srovės varikliai, kuriuose nėra šepečių ir kolektoriaus mazgo, o inkaro srovę komutuoja elektroninis įtaisas, vadinimi elektroniškai komutuojamais varikliais (EK varikliais). EK turi puikias technines charakteristikas – bekontaktė konstrukcija (nėra kolektoriaus, ilga naudojmo trukmė, kurią riboja tik guoliai, didelis sukimosi greitis esant mažai įtampai, aukštas naudingumo koeficientas, labai maža elektromagnetinė laiko pastovioji.) Dėl šių priežasčių šie varikliai plačiai naudojami šiuolaikinėje techmikoje. Tačiau jie yra gana brangūs, kadangi jiems reikalingas specialus elektroninis įtaisas inkaro srovei komutuoti, o variklio kontrukcijoje naudojami brangūs NdFeB bei SmCo magnetai [5]. 1.2 pav. pavaizduotas EK variklis.



1.2 pav. EK variklis [40]

Kadangi EK varikliuose nėra mechaninio kolektoriaus ir šepečių, tai nėra su šiomis dalimis susijusių trūkumų. Tokių variklių patikimumas iš dalies priklauso nuo juose įrengtos elektronikos, kurios patikimumas yra didelis. Todėl EK variklis yra patikimesnis už tradicinį kolektorinį nuolatinės srovės variklį [6].

EK variklių privalumai:

1. Didesnis efektyvumas, nes nereikia naudoti elektros energijos žadinimo laukui sukurti;

- Didesnis greitis, galia ir sukimo momentas, šie varikliai gali suktis virš 10 000 aps/min greičiu esant apkrovai ir be jos;
- Pasiekiamos geresnės dinaminės savybės, nes rotorius turi mažesnę inerciją, tankesnį magnetinį srautą oro tarpe ir greitis nepriklauso nuo srovės apribojimų;
- Didelis patikimumas, kadangi EK variklis neturi šepečių, kurie dyla, šie varikliai gali tarnauti iki 15 000 valandų be didesnių gedimų;
- 5. Mažesni galios nuostoliai, nes praktiškai visi galios nuostoliai susidaro statoriuje, o jų metu išskiriamą šilumą galima sumažinti naudojant briaunuotą variklių korpusą, o didesnės galios mašinose, panaudojus vandens aušinimą [7].

# 1.2.1 EK variklių rotorių konstrukcija

Siekiant išsiaiškinti EK variklių efektyvumo priežastis, svarbu žinoti jų veikimo prinicipą bei kokia yra jų konstrukcija. Paprastai EK variklis turi dvi pagrindines dalis: rotorių (sukioji variklio dalis), statorių (stacionari variklio dalis). Taip pat svarbios yra ir kitos dalys: statoriaus apvijos ir nuolatiniai magnetai, be kurių nebūtų sukuriamas sukamasis magnetinis laukas [8].

EK varikliai pagal rotoriaus konstrukciją gali būti suskirstyti į dvi grupes:

- Su vidiniu rotoriumi (angl. inner motor);
- Su išoriniu rotoriumi (angl. outer motor).

Tokios EK variklių konstrukcijos bendras vaizdas pavaizduotas 1.3 pav.



1.3 pav. Bendras variklių vaizdas: a) su vidiniu rotoriumi; b) su išoriniu rotoriumi

#### 1.2.2 EK varikliai su vidiniu rotoriumi

EK varikliai su vidiniu rotoriumi turi vidinį rotorių ir išorinį nejudantį statorių su apvijomis. Tokių variklių dažniausiai naudojamos konstrukcijos pateiktos 1.4 pav. Šiame paveiksle nuo a iki d naudojami nuolatiniai magnetai, kurie yra tiesiogiai pritvirtinti prie rotoriaus šerdies.

1.4 pav. a pateiktas įparastos konstrukcijos rotorius su lanko formos nuolatiniais magnetais. 1.4 b–c paveiksle pavaizduotas rotorius turi lygiagrečius stačiakampės formos nuolatinius magnetus, tik c atveju magnetų apačios yra plokščios. Dėl nesudėtingos tokios formo magnetų gamybos jie plačiai taikomi pramonėje. 1.4 pav. d variante nuolatinis magnetas yra žiedo formos. Tokių magnetų poliai yra įmagnetinami po to, kai yra pritvirtinami prie rotoriaus šerdies. e variante parodyta variklio konstrukcija didina magnetinio srauto tankio koncentraciją, kadangi magnetų paviršiaus plotas yra didesnis negu rotoriaus paviršiaus plotas. Tokios konstrukcijos rotorius yra naudojamas kartu su kietojo ferito magnetais, nes gali būti pasiektas didesnis variklio efektyvumas. 1.4 f paveiksle magnetai įmontuoti į plieninį cilindrą. Tokia konstrukcija leidžia pasiekti didelį sukimosi greitį. Tačiau naudojant stačiakampės formos magnetus padidėja oro tarpas ir magnetinis lauko srautas sumažėja. Be to, naudojant stačiakampės formos magnetus sukuriamas pasipriešinimas variklio sukimo momentui [9].



1.4 pav. Vidinio rotoriaus konstrukciniai variantai

EK variklių su vidiniu rotoriumi konstrukcija, turi keletą svarbių privalumų. Pirmiausia, tokių variklių konstrukcija lengvai leidžia išsklaidyti šilumą. Šilumos išsklaidymas tiesiogiai įtakoja variklio sukuriamą sukimo momentą. Antra, dėl rotoriaus turimo mažesnės inercijos, variklis gali

greitai įsisukti, pagreitėti, lėtėti bei reversuotis [6]. Tokio tipo variklio vidinis vaizdas parodytas 1.5 pav.



1.5 pav. Variklis su vidiniu rotoriumi [41]

Taip pat EK varikliai su vidiniais rotoriais dar gali būti suskirstyti į dvi grupes pagal tai, kokį statoriaus tipą jie naudoja. Paprastai yra dviejų tipų statoriai naudojami EK varikliuose su vidiniu rotoriumi:

- 1. Statorius su dantimis (angl. *slotted stator*);
- 2. Statorius be dantų (angl. *slotless stator*).

Statorius su dantimis privalumai:

- dėl mažo oro tarpą magnetinio laidumo koeficientas ir magnetinio srauto tankis yra dideli;
- rotoriaus apvijos yra suklotos statoriaus paviršiuje, todėl jas galima pakankamai lengvai aušinti.

Trūkumai:

- dėl šios konstrukcijos statorius sukuria pulsuojantį sukimosi momentą;
- sudėtingesnė apvijų sudėjimo technologija.

Sukimosi momento pulsacijas galima sumažinti dviem būdais: tinkamai parinkti variklio konstrukciją – parenkant tinkamą statoriaus dantų skaičių bei jų formą, naudojant tuščiavidurias apvijas, įmagnetinant nuolatinius magnetus viena kryptimi bei naudojant specialią išgautą jų formą ir kt., arba antra – panaudojant tinkamą valdymo būdą parinkus tinkamą srovės ir elektrovaros moduliacijos valdymo būdą. Dažniausiai abu metodai yra taikomi kartu siekiant gauti didžiausią variklio efektyvumą [9].

EK variklių su statoriumi be dantų apvijos yra žiedo formos, kurios montuojamos statoriuje. Žiedines apvijas nuo rotoriaus skiria tik mažas oro tarpas. Tokios konstrukcijos EK varikliai negeneruoja sukimosi momento pulsacijų. Juose yra daugiau vietos apvijoms, tačiau montuojant daugiau žiedinių apvijų mažinamas jų terminis laidumas, kurio pasekoje sumažėja apvijų laidumas srovei. Šios konstrukcijos variklių magnetinis koeficientas ir srauto tankis yra mažas. Šiuos dydžius padidinti galima tik panaudojus aukštesnės kokybės magnetus arba padidinus jų kiekį. Tokios konstrukcijos variklių efektyvumas yra daug mažesnis negu variklių, kurie turi statorių su dantimis.

### 1.2.3 EK varikliai su išoriniu rotoriumi

Variklių su vidiniu rotoriumi populiarumą lemia keletas priežasčių. Pirma, lengvas variklių aušinimas, nes variklio apvijos yra išorėje. Antra, maža rotoriaus inercija, kuri leidžia varikliui sparčiai pagreitėti ar reversuotis.

Tačiau būna atvejų, kai tokios savybės nėra svarbios. Tuomet naudojami varikliai su išoriniu rotoriumi. Tokios konstrukcijos varikliuose nuolatiniai magnetai supa avijas, kurios yra sumontuotos variklio šerdyje. Tokio tipo variklis pavaizduotas 1.6 pav.



1.6 pav. Variklio su išoriniu rotoriumi konstrukcija [42]

Tokios konstrukcijos variklių didelis privalumas yra tai, kad jie generuoja mažesnes sukimo momento pulsacijas, negu varikliai su vidiniu rotoriumi. Taip pat šie varikliai gali pasiekti didesnį sukimo momentą nei varikliai su vidiniu rotoriumi, tačiau tai priklauso nuo statoriaus apvijų aušinimo. Kuo geresnis aušinimas, tuo didesnis sukimo momentas yra sukuriamas. Šie varikliai dažnai taikomi ventiliatoriuose, skirtuose kompiuterių procesorių aušinimui [9].

### 1.3 Naujausių bešepečių variklių tyrimų apžvalga

A. Pitrėnas straipsnyje "Imitacinis elektroniškai komutuojamos nuolatinės srovės pavaros modelis" [10] analizuoja elektroniškai komutuojamų nuolatinės srovės variklių veikimą ir valdymą, nagrinėja nuolatinės srovės pavaros matematinį modelį. Autorius aprašo "Matlab Simulink" sukurtą ir ištirtą elektroniškai komutuojamos pavaros imitacinį modelį. Pagal sudarytą imitacinį modelį gaunamos pereinamųjų vyksmų kreivės idealizuotos. Bet jų parametrų vertės artimos gamintojo pateiktiems duomenims. Straipnsyje aprašytas EK variklis su simetriškomis žvaigžde sujungtomis apvijomis. Šie varikliai dažniausiai jungiami prie trifazio tiltelio, kuris sudarytas iš šešių lauko tranzistorių ar IGBT modulių.

Bešepečių variklių taikymo sritis, privalumus ir trūkumus straipsnyje "Elektroniškai komutuojamo variklio charakteristikų tyrimas" nagrinėja **B. Karaliūnas** [11]. "Matlab Simulink" programiniu paketu sudarytas elektroniškai komutuojamo variklio charakteristikų tyrimo kompiuterinis modelis bei aprašyta jo sudarymo metodika. Atliktų tyrimų esant skirtingiems rotoriaus sukimosi greičiams rezultatai rodo, kad elektroniškai komutuojamo variklio efektyvumas priklauso nuo statoriaus apvijų komutavimo tikslumo. Autorius taip pat pastebi, kad svarbus kriterijus, optimizuojant EK variklio darbą, galėtų būti mažiausios srovės parinkimas atitinkamam rotoriaus sukimosi greičiui. Ši užduotis galėtų būti išspręsta panaudojus optimizavimo paieškos metodus.

Elektrovaros analizė yra svarbi ne tik skaičiuojant variklio sukimosi momentą, bet ir tiriant mašinos vibracijos šaltinį. Vibracijai pasireikšti leidžia oro tarpas. Ji atsiranda dėl varikliuose besisukančių nuolatinių magnetų sukuriamo kintamojo magnetinio lauko jėgų ir ričių srovių perjungimo. **M. Pakdel'is** straipsnyje "Analysis of the Magnetic Flux Density, the Magnetic Force and the Torque in a 3D Brushless DC Motor" [12] sukimosi momento charakteristikos ir magnetinės jėgos, veikiančios rotoriuje, yra analizuojamos jam sukantis. Elektrovara apskaičiuojama pagal magnetinio srauto tankį naudojant baigtinių elementų metodus ir Maksvelo elektromagnetinio lauko lygtį cilindrinėje koordinačių sistemoje. Straipsnyje autorius bešepečio variklio magnetinio srauto tankio, sukimosi momento ir magnetinės jėgos analizę atlieka naudodamas programinį paketą "Maxwell 3D V11.1", skirtą tyrimams moduliuoti 3D grafikos aplinkoje. Tyrimo grafinis vaizdas parodytas 1.7 pav.



1.7 pav. Magnetinio lauko tankis po 0,004 s

Autorių **D.Chowdhury'io**, **M. Chattopadhyay'io ir P. P.Roy'o** straipsnyje "Modelling and Simulation of Cost Effective Sensorless Drive for Brushless DC Motor" [13] nagrinėjama naujas komutavimo metodas, norint sukurti bejutiklinę nuolatinės srovės EK variklio pavarą vietoje įprastinės šešių jungiklių komutacinės grandinės. Autorius sukuria simuliacinį keturių jungiklių trifazės EK variklio pavaros modelį. Jame rotoriaus padėtis yra nustatoma naudojant elektrovaros (angl. *back EMF*) matavimo metodą. Elektroninė komutavimo grandinė yra labai svarbi variklio valdymui bejutiklinėje koncepcijoje. Šiame darbe puslaidininkiniai galios inverteriai kartu su logine grandine panaudoti siekiant ieškoti naujų techninių sprendimų bejutikliams EK varikliams. Tokie varikliai yra pranašesni už jutiklinius EK variklius tuo, kad jie yra mažesnių matmenų, nes nėra Holo padėties jutiklių rotoriaus pozicijos nustatymui. Taigi, konstrukcija tampa paprastesnė, todėl mažėja ir galios nuostoliai. Straipsnyje pateikti modeliavimo, kuris atliktas "Matlab Simulink" programiniu paketu, rezultatai įrodo šio projekto efektyvumą.

Pramoninėse elektros pavarose variklių greičių valdyme labai plačiai naudojami PI reguliatoriai. Jie yra paprasti ir nesudėtingai suderinami su valdoma sistema, taip pat turi plačią valdymo algoritmų bazę. Tačiau šie vadikliai naudingi ne prie visų veikimo sąlygų.

Straipnsyje "Mitigation of Torque for Brushless DC Motor: Modeling and Control" [14] autorius **R. Goutham'o** *ir kt.*, tiria ir aprašo dar vieną problemą, pasireiškiančią ir EK varikliuose – sukimosi momento pulsacijas. Priimama, kad klasikiniame nuolatinės srovės bešepečių variklių valdyme magnetinis srautas yra trapecijos formos, o norint gauti tam tikrą pastovų sukimosi momentą, maitinimo srovės kreivė yra stačiakampės formos. Tačiau realioje aplinkoje ši prielaida dėl magnetinių medžiagų nevienalytiškumo bei konstrukcijos savybių negali būti teisinga. Šie

veiksniai gali sukelti nepageidaujamas sukimosi momento pulsacijas. Dėl jų blogėja EK variklių parametrų tikslumas. Straipsnyje autorius siūlo tris skirtingus būdus, kaip sumažinti minėtas pulsacijas: sušvelninti sukimosi momentą naudojant Fuzzy (neraiškiosios logikos) reguliatorių, neuroninių tinklų reguliatorių (angl. *neural network controller*) ir hibridį reguliatorių. Tyrimo rezultai parodyti 2 lentelėje. Iš jų matyti, kad mažiausios momento pulsacijos gaunamos panadojus hibridinį (Fuzzy+PI) reguliatorių.

Eil. Nr.	Naudojamas	Apkrova	Momento	Greitis, rpm
	reguliatorius		pulsacijos, %	
1.	PI	Pilna apkrova	56,67 4000	
2.	Fuzzy	Pilna apkrova	25,90	_
3.	Hibridinis	Pilna apkrova	17,65	4000
	(Fuzzy+PI)			
4.	Neural	Pilna apkrova	33,33	4000

2 lentelė. Skirtingų reguliatorių rezultatų palyginimas

Dar vieną bešepečių variklių valdymo būdą tiria V. K. S. Patel'is ir A. K. Pandey'is. Jie straipsnyje "Modeling and Performance Analysis of PID Controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM Controlled BLDC Motor" [15] dėmesį skiria PID reguliatoriui. Jei pageidaujamas sistemos stabilumas, šie reguliatoriai gali būti labai naudingi. Tradicinio PID reguliatoriaus valdymo algoritmas yra paprastas, stabilus, lengvai reguliuojamas ir labai patikimas. Tačiau daugumoje pramoninių procesų yra skirtingų laipsnių netiesiškumų, kintamų parametrų ir matematiniais modeliais neapibrėžtų sistemų. Tobulinti PID reguliavimo parametrus yra labai sudėtinga, gaunamas prastas tikslumas, todėl sunku pasiekti valdomo įrenginio būseną. Geresnis valdymo metodas yra impulsų pločio moduliacija (IPM) – sudėtingo modelio sistemos jis suteikia paprastą ir efektyvų valdymą. Straipsnyje autoriai "Matlab Simulink" paketu sudaro PID reguliatoriaus EK varikliui modelį, atlieka jo analizę. Taip pat studijuojamos skirtingos IPM valdymo schemos EK varikliui.

Moksliname straipsnyje "Speed control of Brushless DC motor with DSP controller using Matlab" [16] autoriai **G. Prasad'as** *ir kt.*, analizuoja EK variklio charakteristikas naudodami skaitmeninio signalų procesorinę judesio valdymo plokštę (angl. *DSP MOTION CONTROL KIT*) MCK28335. Gauti modeliavimo rezultatai, palyginus su su realiais rodo, kad DSP judesio kontrolės

metodas yra vienas iš efektyviausių ir patikimiausių metodų, pritaikomų nuolatinės srovės bešepečių variklių parametrų valdymui.

Vienfazio bešepečio nuolatinės srovės variklio, valdomo IPM signalais straipsnyje "Single Phase Brushless DC Motor With PWM Control Strategy And Special Form Of PM Rotor" [17] atlieka **S. Khader'is**. Šiame straipsnyje aprašomas vienfazio bešepečio nuolatinės srovės variklio su specialios formos rotoriaus magnetais, statoriaus periferija ir statoriaus atskirų apvijų matematinis modelis, skirtas atlikti elektromagnetinei simuliacijai. Rotoriaus nuolatiniai magnetai yra montuojami taip, kad magnetinis srautas pasiskirstytų taip, kad būtų sumažintos sukimosi momento pulsacijos ir pasiektas optimalus momentas. Gauti rezultatai yra analizuojami ir suskaidomi į harmonikų spektrą panaudojant greitąją Furje transformaciją (angl. *Fast Fourier Transform*), siekiant nustatyti aukščiausios eilės harmonikas ir geriausius būdus jas pašalinti.

EK varikliai su didesniu fazių skaičiumi turi daugiau privalumų nei trifaziai varikliai. Daugiafazianiame variklyje gali būti sumažinta kiekvienos fazės statoriaus srovė nekeičiant įtampos, gaunamos mažesnės sukimosi momento pulsacijos, mažėjų šių pulsacijų amplitudė ir didėja jų dažnis. Tokio tipo varikliai mažiau genda lyginant su įprastiniais trifaziais varikliais. Variklis gali normaliai dirbti, net jei viena iš fazių dingo. Tačiau pagrindinis trūkumas – sudėtinga valdymo sistema ir didesnė kaina. Ši problema gali būti sprendžiama su DSP valdikliu. Tada daugiafazė variklio pavara gali būti geras pasirinkimas, kai reikalingas didelis patikimumas ir galia. C.P. Priyanka, S. Gopinathan'as ir A. Gopinath'is straipsnyje "Modeling and Simulation Analysis of Eleven Phase Brushless DC Motor" [18] analizuoja vienolikos fazių EK variklį. Variklio valdymo schema sudaryta iš 22 įtampos jungiklių. Straipsnyje pateikiama variklio imitacinio modelio sudarymo metodika Matlab Simulink aplinkoje bei gautos EK variklio greičio, srovės, įtampos, magnetinės jėgos charakteristikos.

Penkiafazius nuolatinės elektroniškai komutuojamus variklius straipsnyje "A Five–Phase Brushless DC–Machine Direct Drive System" [19] tiria autoriai **M. G. Simões'as ir P. J. Vieira.** Straipsnyje aprašomas penkiafazės didelio sukimo momento, mažo greičio nuolatinės srovės su nuolatiniais magnetais bešepečio variklio projektavimas, simualiacinis šio variklio valdymo modelis, bei realus modelis. Didžiausią dėmesį autoriai skiria aukšto lygio modelio sudarymui. EK varikliuose idealiu atveju srovės kreivė yra stačiakampė, tačiau praktikoje šito nėra. Egzistuojantys iškraipymai gali būti modeliuojami įtraukiant abipusį induktyvumą ir inkaro reakciją, siekiant išvengti valdymo netikslumų. Bandymai atlikti stengiantis sudaryti kuo labiau realiasnes sąlygas atsispindintį imitacinį modelį. Autoriai taip pat sprendžia didelę daugiafazių variklių kainos problemą. Sprendimas gali būti surastas modeliuojant daugiamašinines daugiakeitiklines sistemas (angl. *multi–machine multi–converter systems*, DDS). DDS formaliai naudojamos projektuoti sistemos modelį, kai galios struktūra gali turėti keletą jungčių (elektrinę, magnetinę, mechaninę). Taip pat yra keturios keitiklių strūktūros, vadinamos vienastruktūrėmis, daugiastruktūrėmis, tiekėjų ir vartotojų. Pavaros valdyme buvo panaudotas DSP valdymo metodas. Gauti teorinio modeliavimo rezultatai atitiko eksperimentinius rezultatus. Penkiafazė bešepetės pavaros valdymo struktūrinė schema pateikta 1.8 pav.



1.8 pav. Penkiafazė bešepetės pavaros valdymo struktūrinė schema

Pramonėms įrenginiams, kuriems reiklalingi vidutiniai ir dideli greičiai labai priimtini yra trifaziai EK varikliai. Dvi svarbios charakteristikos – maža inercija ir didelis sukimo momentas, yra dėl variklio sugebėjimo greitai įsibėgėti ir greitai sustoti. Straipsnyje "Ripple reduction using Butterworth LPF for Sensorless BLDC Motor Drive" [20] autoriai **P. Deepakumar'is ir Dr. P. Ran'is** apžvelgia du bejutiklinius rotoriaus padėties nustatymo metodus. Pirmuoju metodu rotoriaus pozicija stebima panaudojant variklio elektrovarą, o antrasis – pozicijos įvertinimas naudojant variklio parametrus.

Pozicijos nustatymo schema paprastai reikalauja sudėtingų skaičiavimų, o sistemos kaina yra santykinai aukšta. Taigi dažniausiai naudojamas metodas padėties nustatymui yra elektrovaros stebėjimo schemos pasirinkimas, apie kurį plačiai aprašyta šiame straipsnyje.

Straipsnyje analizuojamas ir projektuojam nebrangi bejutiklinis trijų fazių bešepečio variklio pavara. Kadangi nėra Holo jutiklių, komutacija nustatoma nulinio perėjimo detektoriumi. Straipsnyje nagrinėjama sistema naudoja Butervorto žemo dažnio filtrus apsaugoti išėjimo siganalų perėjimus nuo triukšmų ir įtampos svyravimų. Šio filtro rezultatai palyginami su Čebyševo žemųjų dažnių filtru gautais rezultatais.

Patobulintą bešepečio variklio koncepsiją siūlo **P. Minciunescu's, B. D.Varaticeanu's ir S. S. Marinescu's**. Straipsnyje "A New High–Tech Brushless Motor/Generator with Axially Aligned Stator Poles" [21] pateikiama aukštos technologijos bešepetė mašina su nuolatiniais magnetais, turinti dvigubo spindulio oro tarpą, dvigubą rotorių ir išilgai ašies suderintus statoriaus polius. Tokio variklio eskizas pavaizduotas 1.9 pav.



1.9 pav. Bešepečio variklio su išilgai ašies suprojektuotas statoriaus poliais eskizas

Statoriaus apvijos fiziškai atskirtos viena nuo kitos, kad oro srautas sklistų aplink visą laidininką ir būtų veiksmingesnis aušinimas. Skaitinė modeliavimo analizė naudojama nuspėti naujosios mašinos veikimą. Tokia nauja konstrukcija suteikia tam tikrų privalumų lyginant su standartine: didesnis efektyvumas, mažesnis nuolatinių magnetų svoris, efektyvi aušinimo sistema, mažesnė inercija. Šios mašinos modeliavimas ir analizė straipsnyje yra išsamiai aprašomi, pateikti 3D skaitinės analizės metodo rezultatai. Nors ji yra dar tik eksperimentinėje fazėje, tačiau, kaip pastebi autoriai, gauti modeliavimo rezultatai yra perspektyvūs.

# 2. TYRIMO TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Tyrimo tikslas yra ištirti ventiliacinės sistemos bešepetės pavaros charakteristikas. Tikslui pasiekti svarbu (uždaviniai):

1. Atlikti bešepečių pavarų apžvalgą, išanalizuoti šių pavarų veikimą bei valdymą, privalumus, trūkumus;

2. Išanalizuoti bešepečių pavarų matematinį modelį;

3. Sudaryti tiriamo bešepečio variklio su ventiliatorine apkrova tyrimui skirtą matematinį modelį;

4. Pagal sudarytą modelį atlikti sistemos su ventiliatorine apkrova charakteristikų tyrimą;

5. Sudaryti bešepetės pavaros eksperimentinį stendą ir atlikti tyrimus;

6. Apibendrinti tyrimo rezultatus, pateikti išvadas.

# **3. TEORINĖ DALIS**

#### 3.1. Bešepečių variklių veikimas ir valdymas

Elektroninė komutavimo grandinė yra naudojama valdyti variklio kiekvienos apvijos srovės įsijungimo momentą ir eiliškumą. Šią grandinę dažniausiai sudaro galios elektronikos komutavimo įrenginys ir padėties jutiklio signalo apdorojimo įrenginys. Galios elektronikos komutavimo įrenginys yra valdymo grandinės branduolys. Jo viena iš funkcijų – maitinimo tiekimas tam tikra logika EK variklio apvijoms. Apvijų įsijungimo laikas ir seka priklauso nuo rotoriaus pozicijos, kurią nustato pozicijos jutiklio signalas.

### 3.1.1 EK variklio rotoriaus erdvinės padėties nustatymas

Variklio sukamasis momentas išvystomas tuomet, kai statoriaus apvijomis teka tokios krypties srovė, kad kampas tarp statoriaus srauto  $\Phi_1$  ir rotoriaus srauto  $\Phi_2$  sudaro 90 elektrinių laipsnių. Kad sukantis rotoriui šis kampas visada būtų lygus 90 elektrinių laipsnių, srovės kryptį statoriaus apvijose būtina keisti atsižvelgiant į rotoriaus padėtį. Todėl reikia turėti informacijos apie rotoriaus kampinę padėtį [5]. Tokią informaciją galima pasiekti dviem būdais:

- 1. Naudojant įvairius jutiklius (Holo, enkoderius, resolverius);
- 2. Nenaudojant jutiklių (matuojant fazinę elektrovarą).

### 3.1.1.1 EK variklio rotoriaus erdvinės padėties nustatymas naudojant Holo jutiklius

Holo jutikliai (angl. *Hall sensor*) veikia Holo efekto principu: laidininku tekant srovei, kurį veikia magnetinis laukas, susidaro potencialų skirtumas tarp laidininko sienelių, lygiagrečių srovės tekėjimo krypčiai, kuris išreiškiamas taip:

$$U_{H} = h \cdot I \cdot \mathbf{B} \qquad (1)$$

čia: *h* – Holo elemento medžiagos jautrumo konstanta; *I*– srovė, tekanti per Holo elementą [A], *B* – magnetinio lauko indukcija [T]. Paprasčiausias Holo jutiklis, naudojamas EK varikliuose parodytas 3.1 pav.



3.1 pav. Holo jutiklis [43]

Jei magnetinio lauko kryptis reversuojama, įtampos poliškumas taip pat reversuosis. Holo jutikliai, naudojami EK varikliuose, kiekvieną kartą, kai rotoriaus magneto poliai (N arba S) atsiduria šalia Holo jutiklio, generuoja aukšto (angl. *high*) arba žemo (angl. *low*) lygio signalą. Pagal šį signalą apskaičiuojama rotoriaus padėtis.

Komutavimo sistemoje, kuri yra grįsta variklio pozicijos nustatymo remiantis grįžtamojo ryšio jutikliais, dvi iš trijų fazinių apvijų yra prijungiamos prie įtampos, kaip parodyta 3.2 pav.



3.2 pav. Holo jutiklių veikimas [44]

Čia srovių, tekančių fazinėmis apvijomis, kryptis parinkta tokia, kad variklis suktųsi pagal laikrodžio rodyklę. Statoriaus magnetas pažymėtas N (šiaurės) ir S (pietų) poliais, kad būtų matytoma srovės kuriamo magnetinio lauko kryptis. Kiekviena rotoriaus pozicija pažymėta trijų Holo jutiklių suformuotais signalais (100, 101, 001). Šie skaičiai rodo, kada Holo jutiklis yra ijungtas arba išjungtas. Pirmasis skaičius atitinka pirmojo Holo jutiklio būseną, o kiti du atitinkamai antro ir trečio Holo jutklių būsenas [22].

3.2 pav. (A) žalia apvija pažymėta "001" yra sužadinama kaip N polius, o mėlyna apvija, pažymėta "010" sužadinama kaip S polius. Dėl šio sužadinimo rotoriaus S polius susilygina su su žalia apvija, o N polius – su raudona apvija, pažymėta "100". Kad rotorius judėtų, raudona ir mėlyna apvijos yra prijungiamos prie įtampos kryptimi, pavaizuota B paveiksle. Šiuo atveju raudona apvija tampa N poliumi, o mėlyna – S poliumi. Toks magnetinio lauko pasisukimas statoriuje sukuria sukimo momentą, kadangi atsiranda stūmos (raudona apvija – N–N polių padėtis) ir traukos jėgos (mėlyna apvija N–S polių padėtis), kurios judina rotorių laikrodžio sukimosi kryptimi.

Sukimo momentas yra didžiausias, kai rotorius pradeda judėti, bet tada laukų padėtis nebėra suderinta. Taigi, siekiant išsaugoti momentą ar atstatyti sukimąsi, magnetinis laukas, sukurtas statoriaus, turi junginėtis. Rotorius turi nuolat suktis, kad pasivytų statoriaus kuriamą lauką. Kai variklio statoriaus ir rotoriaus magnetiniai laukai sukasi tuo pačiu dažniu, toks variklis priskiriamas sinchroniniams varikliams [22].

### 3.1.1.2. EK variklio rotoriaus erdvinės padėties nustatymas matuojant fazinę elektrovarą

Dėl padėties jutiklių sukeliamų trūkumų ir dėl jų kainos buvo ieškota kitų alternatyvių būdų, kaip nustatyti rotoriaus erdvinę padėtį. Ieškota įvairių būdų ir metodų. Tačiau vieni iš ekonomiškai naudingiausių metodų, kur nereikia naudoti padėties jutiklių, yra fazinės elektrovaros metodai. Fazinės elektrovaros metodai gali būti suskirstyti į dvi grupes: tiesioginius ir netiesioginius.

Naudojant tiesiogininį fazinės elektrovaros metodą fazė, kurioje tuo metu srovė neteka, yra lyginama su neutralės įtampa. Šio metodo pagrindiniai trūkumai: naudojant impulsų pločio moduliaciją susidaro aukšto dažnio triukšmai ir padidėja įtampa, todėl reikalingas žemo dažnio filtras ir įtampos dalikliai [23].

Naudojant įvairius filtrus esant dideliems greičiams susidaro komutacinės delsos, o esant mažiems greičiams susilpnėja signalo jautrumas. Todėl siekiant tiksliai nustatyti fazinės elektrovaros vertę yra sumažinamas greičio diapazonas.

Siekiant išvengti tiesioginių fazinės elektrovaros metodų trūkumų, naudojami netiesioginiai metodai: fazinės elektrovaros perėjimas per nulį, fazinės elektrovaros integravimas, įtampos trečiosios harmonikos integravimas, apvijos srovės matavimas.

Tačiau pats paprasčiausias būdas rotoriaus erdvinei padėčiai nustatyti yra netiesioginis metodas, matuojant fazinės elektrovaros perėjimą per nulį. Tokio metodo srovių ir elektrovarų komutacija pateikta 3.3 pav.

Nustačius fazinės elektrovaros tašką, kuriame ji kerta nulinę ašį ir pastūmus jos fazę 30 elektrinių laipsnių, randamas komutacijos taškas, kurio metu perjunginėjamos atitinkamos variklio statoriaus apvijos, kad būtų sukurtas sukimo momentas [24].



3.3 pav. Fazinių įtampų, srovių, Holo jutiklių signalų priklausomybė nuo rotoriaus el. kampo [45]

Nustačius fazinės elektrovaros tašką, kuriame ji kerta nulinę ašį ir pastūmus jos fazę 30 elektrinių laipsnių, randamas komutacijos taškas, kurio metu perjunginėjamos atitinkamos variklio statoriaus apvijos, kad būtų sukurtas sukimo momentas [24].

# 3.1.1.3. EK variklio rotoriaus erdvinės padėties nustatymas netiesioginis faziniu elekrovaros integravimo metodu

Fazinės elekrovaros integravimo metodu komutacijos momentas nustatomas integruojant atjungtos apvijos fazinę elektrovarą. Integravimo procesas prasideda, kai elektrovaros kreivė kerta nulinę ašį, ir baigiasi, kada pasiekia nustatytą ribinę vertę. Šio metodo pagrindinė savybė yra ta, kad integruojamos elektrovaros plotas išlieka apytiksliai toks pat nepriklausomai nuo variklio sukimosi greičio [25].

Kai integravimo procesas pasiekia ribinę įtampos vertę, kuri atitinka komutacijos tašką, fazės srovė yra komutuojama. Šis metodas yra mažiau jautrus elektriniams triukšmams bei automatiškai prisitaiko prie variklio sukimosi greičio. Tačiau varikliui sukantis mažais greičiais rotoriaus erdvinę padėtį nustatyti sunku, dėl integravimo procese susidarančių klaidų ir įtampos balanso [26].

Įtampos trečiosios harmonikos integravimo metodas naudoja trečiosios eilės harmoniką nustatyti momentinę EK variklio srovių komutaciją. Šis metodas taikomas EK varikliams, kurių statoriaus fazinės apvijos simetriškos ir sujungtos žvaigžde. Taip pat, šiame metode yra priimta laikyti, kad trijų fazių įtampos susumuojamos, o šios sumos rezultate yra neatsižvelgiama į aukštesnės nei trečios eilės harmonikas. Įtampos trečiosios harmonikos integravimo metodo grafikas pavaizduotas 3.4 pav. [27].



3.4 pav. Įtampos trečiosios harmonikos integravimo metodas [15]

Apvijos srovės matavimo metodas gali būti taikomas tik sinchroniniams varikliams su nuolatinias magnetais. Šio metodo esmė yra nustatyti variklio rotoriaus erdvinę padėtį naudojant laisvos eigos diodus (angl. *freewheeling diode*) sujungtus su valdymo tranzistoriais. Šis metodas taikomas sinchroniniams varikliams. Šio metodo vienas iš didžiausių trūkumų yra tai, jog jis naudoja komparatorių, kuriam reikalingi šeši nepriklausomi maitinimo šaltiniai tam, kad jis galėtų

nustatyti srovės tekėjimą pro kiekvieną laisvos eigos diodą. Šį metodą galima taikyti, kai variklis sukasi mažais greičiais [24].

### 3.1.2 EK variklio valdymas

Paprastam EK variklio valdymo principui paaiškinti bus panaudotas tipinis trifazis EK variklis, kurio statoriaus fazės sujungtos žvaigžde. Kai variklio apvijos yra pajungiamos prie maitinimo šaltinio, magnetinis laukas sukuriamas ir variklio rotorius pradeda suktis. Tinkamam maitinimui gauti yra naudojamas trifazis tiltelis, kurio supaprastinta schema pateikta 3.5 pav., kurį sudaro šeši puslaidininkiniai tranzistoriai, arba šeši lauko tranzistoriai [28].



3.5 pav. Trifazis tiltelis

EK variklio valdymo procese vienu metu maitinimas tiekiamas tik dviejomis apvijomis, o trečioji, tuo laiku, būna atjungta. Srovių kryptys, kurios teka fazinėmis apvijomis pavaizduotos 3.6 pav.



3.6 pav. EK variklio statoriaus apvijomis tekančios srovės

Kiekviena fazė sužymėta atitinkamai A, B, C. Kuri fazė yra prijungiama prie įtampos nustato mikrovaldiklis, kuris gauna informaciją iš jutiklių, kurie matuoja variklio rotoriaus erdvinę padėtį. Čia, kad būtų paprasčiau rotoriaus pozicijai nustatyti yra panaudoti Holo jutikliai, kurie išsidėstę statoriuje kas 120 elektrinių laipsnių. Su šiais jutikliais galimos šešios variklio rotoriaus padėtys. 3 lentelėje pateikta informacija apie srovių komutaciją [29].

Holo jutiklių signalas	Holo jutiklio būsena	Fazė	Perjungimo schema
101	4	A–B	Q1–Q4
001	3	A–C	Q1–Q6
011	2	В–С	Q3–Q6
010	1	B–A	Q3–Q2
110	6	C–A	Q5–Q2
100	5	C–B	Q5–Q4

3 lentelė. Srovių komutacija apvijomis

Srovių komutacija sukuria sukamąjį magnetinį lauką. Pavyzdžiui, fazė A yra prijungta prie teigiamo nuolatinės srovės šaltinio, fazė B sujungta su žeme, o fazė C tuo metu yra atjungta. Tuomet du magnetinio srauto vektoriai sukuriami, kurie generuojami fazės A ir fazės B. Šių dviejų vektorių suma duoda statoriaus magnetinio srauto vektorių, pagal kurį į sukasi rotorius. Kai tik rotorius pasiekia persijungimo pozicją Holo jutiklių būsena pasikeičia ir iš 010 į 011. Tuomet vykdoma sekanti apvijų komutacija. Kur fazė A yra atjungiama, o fazė C sujungiama su žeme [28].
EK variklių fazinės apvijos gali būti sujungtos žvaigžde arba trikampiu. Jungimas žvaigžde pasižymi silpnesne įtampa, bet aukštesne įtampa ir naudojamas kai reikia didelio sukimo momento. Jungimas trikampiu atvirkščiai – stipresne srove ir mažesne įtampa bei naudojamas, kai reikia didelio sukimosi greičio. Pastarasis jungimas dabar naudojojamas dažniausiai, dėl šiam prijungimui naudojamų mažesnių laidų skerspjūvių bei prijungimo gnybtų, kadangi iš šaltinio imama srovė yra mažesnė.

Fazinėms apvijoms maitinimą iš eilės perjungia elektroninis komutatorius. Galimos 6 skirtingos statoriaus apvijų ir rotoriaus magneto tarpusavio padėtys, t.y. vieną rotoriaus apsisukimą atitinka 6 sritys, kurių padėtis skiriasi 60 laipsnių kampu, kaip parodyta 3.2 pav.

Informaciją apie rotoriaus erdvinę padėtį teikia trys Holo jutikliai, kurių padėtis skiriasi 120 laipsių ir su jais susijęs dvipolis valdymo magnetas, kuris sukasi kartu su rotoriumi [29].

#### 3.1.3. EK variklio srovių komutavimo būdai

EK varikliuose galimi trys apvijų srovių komutavimo būdai: stačiakampė komutacija, sinusinė komutacija ir komutacija be jutiklių.

Kai naudojama sinusinė srovės komutacija (3.7 pav.) per tris fazines apvijas teka vienoda srovė. Rotoriaus kampinės padėties nustatymas čia turi būti labai tikslus, todėl sinusinėms srovėms gauti tam naudojami didelės skiriamosios gebos optinių elektroninių enkoderių signalaui.



3.7 pav. Sinusinė srovės komutacija

Rotoriaus padėtis gali būti kontroliuojama ir pagal fazinę elektrovarą. Elektroniškai yra kontroliuojamas elektrovaros perėjimas per nulį ir po pauzės, kuri priklauso nuo variklio sukimosi greičio, komutuoja variklio sroves (30 laipsnių po perėjimo per nulį). Indukuotos elektrovaros amplitudė priklauso nuo sukimosi greičio. Rotoriui stovint arba sukantis labai mažu greičiu, elektrovaros signalas yra silpnas ir negalimas tikslus perėjimo per nulį momentas. Tam naudojami specialūs algoritmai.

EK variklių maitinimui naudojami trifaziai tilteliai, tinkami abiem komutavimo būdams. Statoriaus apvijų srovių kryptys visada turi būti tokios, kad kampas tarp statoriaus srauto  $\phi_1$  ir rotoriaus srauto  $\phi_2$  sudarytų taip pat 90 el. laipsnių kampą. Kad šis kampas visada būtų palaikomas sukantis rotoriui, srovės kryptys statoriaus sekcijose turi būti keičiamos atsižvelgiant į rotoriaus padėtį. Šiam tikslui dažniausiai naudojami Holo jutikliai. Jų signalai valdo komutavimo tranzistorius [30]. Blokinė EK variklio schema pateikta 3.8 pav.



3.8 pav. Blokinė EK variklio schema

Perjungiant statoriaus sekcijas, būtinos sąlygos: teisinga sekcijų perjungimo seka; tinkamas sekcijų perjungimo momentas.

### 3.2 Bešepečio variklio matematinis modelis

Siekiant supaprastinti EK variklio matematinio modelio sudarymą bei elektromagnetinio momento ir kitas charakteristikas, daroma prielaida, kad:

- trifazės apvijos yra visiškai simetriškos, oro tarpo magnetinis lauko bangos yra stačiakampio formos, statotoriaus srovės ir rotoriaus magnetinio lauko pasiskirstymas yra simetriškas;
- nepaisoma komutacijos procesų ir inkaros reakcijos įtakos;
- magnetinė grandinė yra neįsisotinusi, išskyus sūkurinių srovių ir histerezės nuostolius.

EK variklis yra prijungtas prie keitiklio išėjimo, o keitiklio įėjimo išvadai prijungti prie nuolatinės įtampos šaltinio. Ekvivalentinis šios grandinės modelis parodytas 3.9 pav. Variklio apvijos sujungtos žvaigžde ir priima, kad nėra galios nuostolių keitiklyje.



3.9 pav. Trifazio EK variklio ekvivalentinė schema

Kadangi dauguma tipinių trifazių variklių, sudaromame modelyje variklis taip pat maitininamas trifaziu įtampos šaltiniu, kuris nebūtinai turi būti sinusinis. Bangos gali būti stačiakampės arba kitokios formos, tačiau tokia įtampa negali viršyti maksmimalios variklio ribinės įtampos. Variklio apvijos turi apvijų abipusį induktyvumą. Kadangi daroma prielaida, kad variklio apvijos simetrinės ir subalansuotos, apvijų savasis induktyvumas ir abipusiai apvijų induktyvumai bus vienodi ir lygūs:

$$L_A = L_B = L_C = L \tag{2}$$

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{cb} = L_{ats} = 0 \tag{3}$$

39

Dėl nereikšmingos įtakos charakteristikos šis induktyvumas modeliuojant induktyvumas gali būti priimamas lygus nuliui.

Čia:  $L_{ab}$ ,  $L_{ba}$ ,  $L_{cb}$  – apvijų abibusis induktyvumas [H],  $L_A$ ,  $L_B$ ,  $L_C$  – apvijų savasis induktyvumas [H].

Tada variklio apvijų įtampų matematinė išraiška:

$$U_{a} = Ri_{a} + L\frac{di_{a}}{dt} + e_{a}; \qquad (4)$$

$$U_{b} = Ri_{b} + L\frac{di_{b}}{dt} + e_{b}; \qquad (5)$$

$$U_{c} = Ri_{c} + L\frac{di_{c}}{dt} + e_{c}; \qquad (6)$$

Čia:

L – apvijų induktyvumas [H], R – apvijų varža [ $\Omega$ ],  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  – fazių įtampos [V],  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  – variklio įėjimo srovės [A],  $e_a$ ,  $e_b$ ,  $e_c$  – variklio elektrovaros.

Galima sudaryti tokią induktuvymų matricą:

$$L_{a} = \begin{bmatrix} L_{a} & 0 & 0\\ 0 & L_{a} & 0\\ 0 & 0 & L_{a} \end{bmatrix}$$
(7)

Fazinės varžos tokiu atveju bus vienodos:

$$R_a = R_A = R_B = R_C; \tag{8}$$

Tada gaunama varžų matrica:

$$R_{a} = \begin{bmatrix} R_{a} & 0 & 0 \\ 0 & R_{a} & 0 \\ 0 & 0 & R_{a} \end{bmatrix}$$
(9)

Kai statoriaus apvijos sujungtos trikampiu, srovių lygtis:

$$i_A + i_B + i_C = 0 \tag{10}$$

Galiausiai gaunama tokia variklio įtampų matrica:

$$\begin{bmatrix} U_{A} \\ U_{B} \\ U_{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{A} & 0 & 0 \\ 0 & R_{B} & 0 \\ 0 & 0 & R_{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A} \\ i_{B} \\ i_{C} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{a} & 0 & 0 \\ 0 & L_{b} & 0 \\ 0 & 0 & L_{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{A} \\ i_{B} \\ i_{C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{A} \\ e_{B} \\ e_{C} \end{bmatrix}$$
(11)

Trifaziniame EK variklyje elektrovara yra funkciškai susijusi su rotoriaus padėtimi: kiekviena elektrovaros fazė skiriasi 120 laipsnių, taigi gaunama lygčių sistema:

$$e_a = K_w f(\theta_r) \omega; \tag{12}$$

$$e_b = K_w f(\theta_r - 2\pi/3)\omega \tag{13}$$

$$e_c = K_w f(\theta_r + 2\pi/3)\omega \tag{14}$$

Čia:

 $K_w$  – vienos fazės elektrovaros konstanta [U/rad.s<sup>-1</sup>);  $\theta_r$  – elektrinis rotoriaus pasisukimo kampas [°el.];  $\omega$  – rotoriaus greitis [rad.s<sup>-1</sup>].

Vienos fazės elektrovaros matrica:

$$\begin{bmatrix} e_{a} \\ e_{b} \\ e_{c} \end{bmatrix} = E_{a} \begin{bmatrix} f_{a}(\theta_{r}) \\ f_{b}(\theta_{r}) \\ f_{c}(\theta_{r}) \end{bmatrix}, \quad (E_{a} = K_{w}\omega)$$
(15)

Rotoriaus elektrinis posūkio kampas lygus mechaniniui rotoriaus posūkio kampo ir polių polių sandaugai:

$$\theta_r = \frac{p}{2} \theta_m; \tag{16}$$

Čia  $\theta_m$  – mechaninis rotoriaus posūkio kampas [rad], p – polių porų skaičius.

Trapecinės formos funkcija  $f(\theta_r)$  atitinka rotoriaus pozicijos funkciją. Jai apibrėžiamos ribos nuo -1 iki +1. Sudaroma tokia trapecinių bangų formą apibrėžianti funkcija:

$$f(\theta_{r}) = \begin{cases} 1, & 0 \le \theta_{r} \le \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} (\theta_{r} - \frac{2\pi}{3}), & \frac{2\pi}{3} \le \theta_{r} \le \pi \\ -1, & \pi \le \theta_{r} \le \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi} (\theta_{r} - \frac{5\pi}{3}), & \frac{5\pi}{3} \le \theta_{r} \le 2\pi \end{cases}$$
(17)

Pagal galių balanso lygtį:

$$P_{in} = P_{out} \tag{18}$$

Gaunama keitiklio įėjimo srovės lygtis:

$$i_{sk} = \frac{1}{u_s} (i_A u_{sA} + i_B u_{sB} + i_c u_{sC})$$
(19)

Čia: *u<sub>sA</sub>, u<sub>sB</sub>, u<sub>sC</sub>* – fazinės įtampos, prijungtos prie variklio [U].

Variklio mechaninės dalies matematinė išraiška:

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega;$$
<sup>(20)</sup>

Čia:

 $T_{l}$  apkrovos momentas [Nm]; J – rotoriaus ir veleno inercijos momentas [kgm<sup>2</sup>]; B– trinties konstanta [Nms·rad<sup>-1</sup>]

EK pavaros sistemos dinaminis funkcinis modelis parodytas 3.10 pav.



3.10 pav. Dinaminė EK pavaros schema

Variklio išėjimo sukimo momentas atitinka suminį kiekvienos fazės kuriamą momentą, kuris priklauso nuo srovės (*i*), rotoriaus sukimosi greičio ( $\omega$ ) ir elektrovaros (*e*). Suminio momento lygtis:

$$T_e = \frac{e_{aa}^{i} + e_{bb}^{i} + e_{cc}^{i}}{\omega}; \qquad (21)$$

Čia:

Te-suminis išėjimo momentas [Nm].

Inercijos momentas:

$$J = J_m + J_l; \tag{22}$$

Čia:

J – suminis inercijos momentas [kgm<sup>2</sup>].

Sistemos dinaminė lygtis su inercija J, trinties koeficientu B ir apkova  $T_l$ :

$$J\frac{d\omega}{dt} + B\omega = T_e - T_l \tag{23}$$

Atsižvelgus į visas lygčių sistemas, sudaroma būsenos kintamųjų matrica [31]:

$$\begin{aligned} & \bullet \\ & x = Ax + Bu \\ & x = \begin{bmatrix} i_A & i_B & i_C & \omega_r & \theta_e \end{bmatrix}^{\frac{1}{2}} \\ & = \begin{bmatrix} -\frac{Rs}{Ls} & 0 & 0 & -\frac{K_w(f_a(\phi))}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{Ra}{L} & 0 & -\frac{K_w(f_b(\phi))}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{Ra}{L} & -\frac{K_w(f_c(\phi))}{L} & 0 \\ -\frac{K_w(f_a(\phi))}{J} & -\frac{K_w(f_b(\phi))}{J} & -\frac{K_w(f_c(\phi))}{J} & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \\ & B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} & u = [u_A & u_B & u_C & T_a]^t \end{aligned}$$

$$(24)$$

#### 3.3. Ventiliacinės sistemos bešepetės pavaros kompiuterinis modelis

Yra sukurta įvarių EK imitacinių modelių, priklausomai nuo variklių panaudojimo srities, valdymo metodų, reikalingo funkcionalumo ir t.t. Projektuojant EK variklio pavaros sistemą, yra būtina turėti variklio modelį, kuris leidžia gauti tikslią sukimo momento vertę, kuri yra susijusi su srove ir elektrovara. A. Tashakori's [31] pateikia imitacinį trifazio, sujungto žvaigžde, trapecinės elektrovaros formos, 4 polių EK variklio modelį, parodytą 3.11 pav.



3.11 pav. EK variklio imitacinis modelis

Neutralus taškas variklyje neprieinamas, tačiau jį galima imituoti kompiuteriniame modelyje su elektrovaros nulinio perėjimo tašku. Tada galutinė būsenos kintamųjų lygtis yra padalinta į dvi atskiras nesudėtingas dalis, atskiriant elektrines ir mechanines Laplaso lygtis. Šis modelis yra pakankamai nesudėtingas, bet funkcionalus. Su šiuo modeliu gali būti įgivendinami įvairūs valdymo metodai. Kiekvienoje fazėje kuriamas idealus variklio elektrovaros signalas, kuris yra kaip neigiamas grįžtamasis ryšys fazės įtampai.

Pakankamai detalų ir funkcionalų EK variklio imitacinį modelį tyriamams 2015 m. S. Dakoju, kurio struktūra parodyta 3.12 pav.



3.12 pav. Detalus EK variklio imitacinis modelis

Šis modelis yra skirtas varikliams su trapecinės formos elektrovara. Modelį sudaro trys pagrindiniai blokai: trifazio variklio statoriaus apvijų srovių imitacijai, elektrovarų ir greičio imitacijos blokai. Įėjime galima keisti apkrovos momentą bei maitinimo įtampą. Išėjime gaunami apvijų srovių, sukimosi greičio, rotoriaus kampinės padėties, elektromagnetinio momento, Holo jutiklių signalų elektrovarų imitaciniai procesai.

# 4. TIRIAMOJI DALIS

### 4.1 Bešepetės pavaros kompiuterinio modelio tyrimas

Tiriamojo variklio B86139, parinkto iš "Transmotec" parametrai pateikti 4 lentelėje [32]. Šis variklis tiriamas sudarant kompiuterinius modelius "Matlab Simulink" aplinkoje. Ventiliacinės apkrovos imitavimui naudojamas "Step" blokas. Jame galima nustatyti tam tikrą momento dydį Nm bei jos atsiradimo laiko momentą. Bandymai atliekami varikliui dirbant neapkovus ir apkrovus 100 % vardinio momento.

5	1			
Variklio parametras	Vertė	'ertė Matavimo vienetas		
Galia	657	W		
Vardinė įtampa	48	V		
Tuščiosios veikos srovė	1900	mA		
Tuščiosios veikos greitis	3600	aps/min		
Vardinis greitis	2990	aps/min		
Vardinis momentas	2098	mNm		
Vardinė srovė	ovė 16,5 A			
Paleidimo momentas	18,5	Nm		
Maksimalus naudingumas	as 84 %			
Paleidimo srovė	138	А		
Statoriaus apvijų varža	0,07	Ω		
Apvjų induktyvumas	0,103	mH		
Sukimosi momento	112	m · Nm		
pastovioji		A		
Greičio pastovioji	110	aps/min		
		V		
Elektromechaninė laiko	4,83	ms		
konstanta				
Rotoriaus inercija	2400	g·cm <sup>2</sup>		
Polių porų skaičius	4	vnt.		

4 lentelė. Tiriamojo variklio parametrai

Vienas iš paprasčiausių būdų sumodeliuoti EK variklį – sudaryti supaprastintą modelį, kuris atitinka nuolatinės srovės variklio modelį. Tokiu atveju nereikia modeliuoti trifazio keitiklio, kadangi srovę komutuoja mechaninis komutatorius. Nereikalingas ir Holo jutiklių imitavimas. Toks supaprastintas EK variklio pavaros modelis parodytas 4.1 pav.



4.1 pav. Tiriamojo EK variklio modelis

Kaip matyti 4.1 pav., tokio variklio pavaros modelyje įėjime veikia maitinimo įtampa ir imituojama ventiliatorinė apkrova su "STEP" bloku, o išėjime gaunama apkrovos srovė, elektromagnetis momentas, bei vaiklio sukimosi greitis. Detalus variklio modelis paodytas 4.2 pav.



4.2 pav. EK variklio modelio struktūra

Į modelio blokus įrašomi šie parametrai: modeliui reikalingi šie variklio parametrai: maitinimo įtampa (48 V);

- vienos fazės induktyvumas, 0,103 mH;
- vienos fazės varža (0,07 Ω);
- momento pastovioji (0,112 Nm/A);
- sukimosi greičio pastovioji  $(110 \frac{aps/min}{v} = 110 \frac{\pi}{30} = 11,5 \frac{rad/s}{v};$
- rotoriaus inercijos momentas (0,00024·kgm<sup>2</sup>);

rotoriaus klampiosios trinties koeficientas (priimame, kad β=0 N·m·s/rad, kadangi šis parametras nepateikiamas gamintojo aprašyme).

Atlikta variklio veikimo procesų imitacija varikliui dirbant neapkrautam, o laiko momentu t = 0,03 s įjungiama maksimali momento apkrova ( $M_a=2,1$  Nm). Srovės pereinamasis procesas parodytas 4.3 pav.



4.3 pav. Srovės pereinamasis procesas

Iš 4.3 pav. Srovės grafiko matyti, kad paleidimo metu srovės pasiekiama maksimali vertė yra 255 A. Pereinamasis procesas trunka apie 0,017 s, ir tada srovė nusistovi ties 0 A. Apkrovus variklį vardiniu momentu, pereinamasis procesas trunka 0,01 s, o srovė nusistovi ties 18,5 A.

Elektromagnetinio momento imitacijos tyrimo rezultatuose (4.4 pav.) matyti, kad paleidimo metu jo didžiausia pasiekiama vertė yra 28 N·m. Pereinamajam procesui, kuris trunka 0,017 s pasibaigus, kai variklis neapkrautas momento vertė sumažėja iki 0 N·m. Įjungus apkrovą, pereinamsis procesas trunka 0,01 s ir nusistovi ties 2,1 N·m.



Variklio greičio pereinamojo proceso grafike atsispindi jo pasiekiamas tuščiosios veikos greitis, kuris sieka apie 3000 aps/min. Variklį apkrovus maksimaliu momentu greitis sumažėja iki 2500 aps/min.



4.5 pav. Greičio pereinamasis procesas

Palyginus gautus rezultatus su gamintojo pateiktais parametrais 4.5 pav. matyti, kad variklio greičio imitacija gana tiksliai atitinka nurodytą vertę – tyrimo metu neapkrauto variklio siekia 3550 aps/min, kai deklaruojama vertė 3600 aps/min. Apkrovus variklį vardiniu momentu greitis sumažėja iki 3400 aps/min, nors pagal gamintojas deklaruoja, kad šiuo atveju greitis turėtų būti 2990 aps/min. Srovės rezultatai taip pat nevisiškai teisingi – rezultatai rodo, kad po pereinamųjų procesų paleidimo metu srovė siekia 255 A. Gamintojas nurodo, kad ši srovė siekia 138 A.

Iš 4.3 pav. rezultatų matyti, kad esant maksimaliam apkrovos momentui, variklio srovė yra maždaug 18,5 A. Tai atitinka beveik gamintojo aprašymą (gamintojas nurodo 16,5 A).

Variklio greičio imitacijos rezultatuose (4.5 pav.) matyti, kad esant maksimaliam apkrovos momentui greitis siekia 3400 aps/min, tai 13 % skiriasi nuo gamintojo nurodyto dydžio. Apkrovą atjungus, greitis didėja iki vardinio greičio, kuris praktiškai atitinka gamintojo nurodytą vertę. Galima teigti, kad variklio modelis yra iš dalies tinkamas tirti pereinamuosius procesus.

Norint detaliau ištirti EK variklio veikimą ir vyksmus su ventiliatorine apkrova reikalingas sudėtingesnis imitacinis modelis. Tyrimui sudaryto modelio struktūra parodyta 4.6 pav.



4.6 pav. EK variklio imitacinis modelis

Variklio modelio įėjime įjungtos sinusinės įtampos, besiskiriančios faze  $2\pi/3$ . Su "Step" blokais įėjime modeliuojamas ventiliatorinės apkrovos momentas. Darbo procesų imitacijai atlikti į modelį reikia įvesti šiuos parametrus:

- Apvijų varžą [Ω];
- Apvijų induktyvumą [H];
- Magnetinį srautą [Wb];
- Rotoriaus inercjią [kgm<sup>2</sup>];
- Momento klampiosios trinities koeficientą;
- Polių porų skaičių.

Šis imitacinis variklio modelis sudarytas iš trijų pagrindinių blokų: srovės modeliavimo, greičio modeliavimo ir elektrovaros modeliavimo. Taip pat sukurtas atskiras blokas procesų matavimui ir atvaizdavimui. Šis modelis leidžia gauti statoriaus srovių, elektrovaros, momento, sukimosi greičios, Holo jutiklių procesų grafikus. Jo struktūra parodyta 4.7 pav.



4.7 pav. EK variklio modelio strukūra



4.8 pav. Holo jutiklių modelio blokas



4.9 pav. Srovių formacimo blokas



4.10 pav. Elektrovaros modeliavimo blokas



4.11 pav. Greičio modeliavimo blokas



4.12 pav. Matavimų blokas

Variklio imitacijos tyrimai atliekami imituojant ventiliatorinę apkrovą ir ją iškart sujungiant su varikliu. Apkrovimo metu varikliui sukuriamas stabdymo momentas  $M_a$ , kuris yra proporcingas greičio kvadratui:

$$M_a = k \cdot \omega^2 \tag{25}$$

Pagal variklio vardinius duomenis apskaičiuojamas koeficientas k:

$$k = \frac{M_n}{\omega^2} = 0,00002$$
 (26)

Ventiliatorinės aprkovos imitacija "Simulink" aplinkoje parodyta 4.13 pav.



4.13 pav. Ventiliatorinės apkrovos imitacija

Atliekama procesų simuliacija.



4.14 pav. Elektromagnetinio momento procesas

Kaip matyti 4.14 pav., variklio su ventiliatorine apkrova, elektromagnetinis momentas pasiekia 1,8 Nm. Pereinamųjų procesų pulsacijos gaunamos, kadangi momentas skaičiuojamas dauginant momentinę srovės vertę iš momento pastoviosios.

Variklio sukimosi imitacijos rezultatai parodyti 4.15 pav.



4.15 pav. Greičio pereinamieji procesai

Variklio su ventiliatorine apkrova sukimosi greitis siekia 3000 aps/min.



Kaip matyti 4.16 pav., paleidimo metu srovė padidėja iki 22,5, bet pasibaigus pereinamajam procesui, statoriaus apvijos srovės nusistovi ties 17,5 A ir viršija nominialią nurodytą srovę 1 A.



4.17 pav. Fazinės elekrovaros

Iš 4.17 paveikslo matyti, kad fazinių elektrovarų forma yra beveik ideali trapecinė. Tokiai formai įtakos turi variklio sukimosi greitis ir fazinės elektrovaros konstanta, kuri yra atvirkščiai proporcinga variklio sukimosi greičio pastoviajai. Fazinės elektrovaros vertė, varikliui greitėjant didėja ir pasiekus maksimalų greitį nusistovi ties 220 V riba.



Holo jutiklų signalai pavaizduoti 4.18 paveiksle. Šie signalai yra stačiakampiai impulsai, kurių maksimali vertė yra vienetas, o minimali – nulis. Holo jutiklių signalai atvaizduojami korektiškai.

### 4.2 Bešepetės pavaros eksperimentinio modelio sudarymas

### 4.2.1 Tyrimų stendas

Suprojektuotas ir sukonstruotas tyrimų stendas, skirtas bandymams su išcentriniu trifaziu EK ventiliatoriumi atlikti. Tyrimų stendą sudaro iš aliuminio profilių sukonstruota kubo formos dėžė 1 (matmenys 0,68 x 0,68 x 0,68 m) su permatomomis sienelėmis iš organinio stiklo, ant amortizatorių dėžės viduje pritvirtintas ventiliatorius 2, diafragminė reguliavimo sklendė 3 oro srautui reguliuoti. Ventiliatorius jungiamas prie trifazio maitinimo šaltinio. Stendas pavaizduotas 4.19 pav.



4.19 pav. Tyrimų stendas

Stende pavaizduota:

1 – dėžė; 2 – ventiliatorius; 3 – reguliavimo sklendė; 4 – valdymo plokštė; 5– tachometras; 6 – akselerometrai.

Tyrimams atlikti buvo panaudotas " EBMpapst" firmos ventiliatorius R3G280–AU11–C1, turintis aukšto efektyvumo 1 kW M3G084–GF elektros variklį. Šis variklis yra elektroniškai komutuojamas su integruotu keitikliu, leidžiančiu reguliuoti apsukas 0–100 %. Ventiliatoriaus kataloginiai duomenys pateikti 5 lentelėje.

1.	Galia (W)	1000	
2.	Maitinimo įtampa (V)	380-480	
3.	Srovė (A)	1,6	
4.	Apsisukimai (aps/min)	3100	
5.	Svoris (kg)	7,1	
6.	Oro srautas m <sup>3</sup> /h	2675	

5 lentelė. Ventiliatoriaus duomenys

Oro srautui reguliuoti sumontuota "IRIS 135" diafragminė sklendė (4.20 pav), kuri taip pat reguliuoja oro srautą vėdinimo kanale [33]. Diafragminiu mechanizmu išvengiama sūkūrių ir papildomo triukšmo.



4.20 Pav. Reguliavimo - matavimo sklendė "IRIS315"

6 lentelė. Sklendės matmenys

Matmenys, mm				Svoris, kg	
d	D	L	А	В	_
314	410	135	40	47	3,2

### 4.2.2 Tyrimų atlikimo įranga

Pateikiama tyrimų metodika ir aprašoma įranga, kuri buvo naudojama tyrimų metu. Kadangi konkrečios matavimų metodikos ventiliatorių tyrimams nėra, taikant bendrus reikalavimus pateiktus standartuose, higienos normose, statybos reglamentuose ir tam tikruose vadovėliuose, parenkama konkreti tyrimų metodika. Taip pat parenkama matavimo įranga ir jos išdėstymas darbo vietoje.

Atliktiems bandymams ir tyrimams panaudota Danijos firmos "Brüel & Kjær" vibracijų bei kitų dinaminių charakteristikų matavimo ir analizės aparatūra su programinės įrangos paketu 7910 [34], kuri pavaizuota 4.21 pav.

1. matavimo rezultatų kaupimo ir apdorojimo sistema su kompiuteriu DELL;



4.21 pav. Mobili matavimo rezultatų kaupimo ir apdorojimo sistema

2. pjezoelektrinis akselerometras, modelis – 8341 [35];

Akselerometras – pagreičio matuoklis (4.22 pav).



4.22 pav. Akselerometras

Savaime generuojantis prietaisas charakterizuojamas išplėsta pastovaus dažnio juosta, didele tiesine amplitude, puikiu patvarumu bei pasižymintis dideliu tikslumu.

3. fotoelektrinis tachometras, modelis – MM–0024 [36];

Tachometras – sukimosi greičio matuoklis (4.23 pav).



4.23 pav. Fotoelektrinis tachometras

Fotoelektrinis tachometras yra kartu su infraraudonųjų spindulių siųstuvu ir imtuvu. Jo darbinis diapazonas iki 800 mm ir 20000 aps/min. Matavimai atliekami be jokio kontakto su matuojamuoju objektu.

5. Garso lygio matuoklis, modelis 2550 [37];

Garso lygio matuoklis – prietaisas garso lygiui matuoti (4.24 pav).



4.24 pav. Garso lygio matuoklis

Šio pirmos klasės modelio prietaisas pasižymi dideliu universalumu: jame yra "debesų" funkcija, dažnių analizės modulis, FFT garso ir vibracijų analizė, pažangaus klasifikavimo ir garso įrašymo funkcijos.

Pagrindinės techninės savybės:

• 4,2 Hz – 22,4 kHz, dažnio intervalas (su mikrofono modeliu 4189);

- 16,6 140 dB A dinaminis diapazonas (su mikrofono modeliu 4189);
- Įėjimai: kintamosios srovės arba CCLD, išorinis trikdis
- Išėjimai: Generatorius ir ausinės;
- Komunikacija per USB, LAN arba GPRS / 3G modemus;
- Prijungimas prie spausdintuvo, GPS, oro stotelės, modemo per USB 2.0 sąsają.
- 6. Srovės matavimo replės "Fluke 322" [38];

Srovės matavimo replės – elektrinių parametrų matuoklis (4.25 pav).



4.25 pav. Srovės matavimo replės

Šiuo prietaisu matuojama variklio iš tinklo imama kintamoji srovė. Šis modelis gali matuoti srovę iki 400 A (galima paklaida 1,8 %), įtampą iki 600 V (galima paklaida 1,8 %), varžą.

6. Valdiklis "C3" ir progaminė įranga "C3 Program"

Tyrime naudojamos kompanijos "Amalva" sukurtas valdiklis C3. Šis valdiklis turi 8 analoginius įėjimus, 5 analoginius išėjimus, 8 skaitmeninius įėjimus ir išėjimus. Jo struktūrinė schema pateikta 4.26 pav.

🔀 C3 Ventilation v2,07	
Connection	Stop   Settings   Heating   Cooling   Cascade In/Out   Timers   Ventilation   Calibration   Parameters
	Inputs Outputs
😿 Serial 🔲 Ethernet	Analog SIM
IP Address	
0.0.0.0	A1 0,0 °C 1 ⊂ A1 0,0 ∨ 1 ⊂ 0 sec
	A2 0,0 °C 🗭 □ A2 0,0 V 🗭 □ 🛛 PWM
	A3 0,0 °C 🖉 □    A3 0,0 ∨ 🗭 □    😿 ON/OFF
СОM2 - А 254	A4 0,0 °C 1 A4 0,0 ∨ 1 □
	A5 0,0 V 🗭 🗆    A5 0,0 V 🗭 🗆 <u>T2</u>
Connect	A6 0,0 V 🗹 🗆 A6 0,0 % 🗹 🗌 0 sec
Data & Time	A7 0,0 V 🗹 🗆 A7 0,0 % 🗹 🗖 pwm
2004-01-01 00:00:00	A8 0,0 V 🕅 🗆 A8 0,0 % 🕅 🕅 🕅 🕅
Sunday Set	A9 0,0 % 🕅 🗆
	A10 0,0 % 🐼 🗖 Digital T3
Fan speed Start/Stop	
Start	
Values	
Mode D	
Season Oliveet	
Svent. %	
Event. %	
Hearthmin	
Chart	
	Series: Board No.: Version:

4.26 pav. Programos "C3" Įėjimų ir išėjimų langas

Įrenginių, kurie prijungti prie valdiklio, valdymui ir stebėjimui kompiuteryje yra skirta programa "PC\_C3\_V1\_20". Joje stebimi visi valdiklio įėjimų ir išėjimų parametrai [39]:

- 8 skaitmeninius įėjimus šildymo šaldymo pavarų indikacijai, filtrų indikacijai, ventiliatorių klaidų indikacijai, gaisro signalo indikacijai;
- 8 skaitmeninius ir išėjimus pavarų valdymui (oro sklendžių, surblių, šildymo, šaldymo vožtuvų), greičių lygių kontrolei;
- 1–4 analoginiai įėjimai skirti temperatūriniams jutikliams;
- 5–8 analoginiai įėjimai skirti 0–10 V analoginiams signalams užduoti;
- 9–10 analoginiai įėjimo signalai skirti slėgio jutikliams;
- 1–3 semistoriniai įėjimai šildymo pavaroms.

Šiame darbe naudojamas 0–10 V analoginis signalas ventiliatoriaus greičiui valdyti, bei įėjimai slėgio jutikliams – ventiliatoriaus slėgiui, bei slėgiui pries sklendę. Slėgio skaitinė vertė pateikiama paskaliais.

Valdiklis duomenų perdavimui su kompiuteriu sujungtas panadotojant RS-232 į USB adapterį.

# 4.3 Tyrimo metodika

# 4.3.1 Virpesių matavimas

Virpesių matavimai buvo atlikti pritvirtinus akselerometrus ant ventiliatoriaus pado. Ventiliatoriaus padas pritvirtintas prie konstrukcijos per guminius amortizatorius.

Siekiant nustatyti ventiliatoriaus virpesių parametrus buvo tirtas vibracinio pagreičio lygis, keičiant tokius parametrus:

- variklio apsisukimo greitį nuo 410 iki 3100 aps/min;
- sklendės diafragmos skersmenį: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %.

Pagrindiniai tyrimo tikslai:

- ištirti, kaip virpesiai veikia ventiliatoriaus padą x ir z ašių kryptimis;
- nustatyti, kurios ašies kryptimi virpesių parametrai yra didžiausi;
- išanalizuoti, kaip kinta virpesiai keičiant variklio apsisukimus ir sklendės diafragmos skersmenį.

Išcentrinio ventiliatoriaus virpesių aktyvumo matavimo įrangos išdėstymas pateiktas 4.27 pav.



4.27 pav. Akselerometrų išdėstymo schema ant ventiliatoriaus pado 1: 2, 3 – akselerometrai Eksperimentų metu buvo nustatyta:

- vibracijų perdavimo charakteristikos;
- vibracijų charakteristikų statistiniai parametrai;
- gauti laikinių vibracinių pagreičio signalų grafikai;

• signalų spektrų grafikai.

### 4.3.2 Ventiliatoriaus sūkių matavimas

Ventiliatoriaus sūkiams išmatuoti prie specialiai tam paruošto stovo su laikikliu pritvirtinamas tachometras, kaip parodyta 4.28 pav.

Siekiant nustatyti ventiliatoriaus sūkių skaičių buvo išmatuotas ventiliatoriaus apsisukimų skaičius per minutę, keičiant tokius parametrus:

- variklio apsisukimo greitį nuo 410 iki 3100 aps/min;
- sklendės diafragmos skersmenį: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %.



4.28 pav. Prie laikiklio 1 pritvirtintas tachometras 2

Eksperimentų metu buvo nustatyta:

- ventiliatoriaus apsisukimų skaičius per minutę;
- gauti apsisukimų signalų grafikai;
- signalų spektrų grafikai.

# 4.3.3 Oro srauto slėgių matavimas

Siekiant nustatyti ventiliatoriaus sukuriamą slėgį buvo išmatuotas oro srauto slėgis išorėje ir viduje, keičiant tokius parametrus:

- variklio apsisukimo greitį nuo 410 iki 3100 aps/min;
- sklendės 3 diafragmos skersmenį: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %.

Slėgis matuojamis slėgio jutikliais, kurių padėtys parodytos 4.30 pav.





4.30 pav. a) matuojamas oro srauto slėgis išorėje 1 b) Matuojamas oro srauto slėgis viduje 2



4.31 pav. Slėgio išorėje 1 ir slėgio viduje 2 matavimas

#### 4.3.4 Garso lygio matavimas

Siekiant nustatyti trifazio ventiliatoriaus sukeliamą garsumo lygį, šis parametras matuojamas su garso matavimo prietaisu, keičiant šiuos ventiliatoriaus parametrus:

- valdymo signalą nuo 0 iki 10 V (matavimai atliekami prie 0, 5, 10 V verčių);
- sklendės diafragmos skersmenį: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %.

### 4.3.5 Variklio iš tinklo vartojamos srovės matavimas

Siekiant nustatyti trifazio ventiliatoriaus naudojamą srovę bei išvystomą galią, srovės matavimo replėmis matuojama iš tinklo naudojama srovė, naudojant vieną iš trijų fazinių laidų. Srovės matuojamos keičiant šiuos parametrus:

- valdymo signalą nuo 0 iki 10 V;
- sklendės diafragmos skersmenį: 0 %, 25 %, 50 %, 75 %, 100 %.

### 4.4 Tyrimo rezultatai

Keičiant ventiliatoriaus sukimosi greitį, matuojama iš tinklo variklio naudojama srovė. Srovės priklausomybių nuo ventiliatoriaus sukimosi greičio, pateiktos 4.32 pav., (kai sklendės skersmuo S=0 %) ir 4.33 pav., (kai sklendės skersmuo S=100 %)



4.32 pav. Ventiliatoriaus srovės priklausomybė nuo sukimosi greičio, kai S=0 %



4.33 pav. Ventiliatoriaus srovės priklausomybė nuo sukimosi greičio, kai S=100%

Iš pateiktų grafikų matyti, kad ventiliatoriaus srovė, kai sklendės diafragmos padėtis pakeičiama nuo 0 % iki 100 %, o ventiliatorius sukasi maksimaliu greičiu (n=3184 aps/min), padidėja 13 %.



4.34 pav. Ventiliatoriaus srovių priklausomybė keičiant sklendės diafragmos plotą

Iš 4.34 pav. pateikto grafiko matyti, kad ventiliatoriaus iš tinklo naudojama srovė didėjant sklendės diafragmos plotui nuo 0 iki 100 %:

- esat mažiausios vertės valdymo signalui U=1 V, srovės dydis išlieka tokios pačios vertės nepriklausomai nuo sklendės diafragmos ploto pokyčio (I=0,13 A).
- padidinus valdymo signalą U iki 5 V, srovės dydis išauga nuo 0,35 A iki 0,39 A, padidėjus sklendės diafragmos plotui nuo 0 % iki 100 %.
- padidinus valdymo signalą U iki didžiausios vertės 10 V, srovės suvartojimas padidėja nuo 1,15 iki 1,3 A, padidėjus sklendės diafragmos plotui nuo 0 % iki 100 %

Siekiant nustatyti valdymo signalo U poveikį ventiliatoriaus iš tinklo naudojamos srovės I dydžiui pamatuotos srovės keičiant valdymo signalą nuo 0 iki 10 V. Gautų rezultatų grafikas pavaizduotas 4.35 pav.



4.35 pav. Srovės priklausomybė nuo valdymo signalo

Iš 4.35 pav. matyti, kad kai valdymo signalas U=1 V, srovė I=0,13 A nepriklausomai nuo sklendės padėties. Didėjant valdymo įtampai, srovė didėja ir pasiekia paksimalias vertes, kai U=9 V (I=1,15 A, kai S=0, I=1,3 A, kai S=100 %).

Iš gautų matavimų rezultatų taip pat sudaromas ventiliatoriaus apsisukimų priklausomybių diagrama nuo valdymo signalo, parodyta 4.36 pav.



4.36 pav. Ventiliatoriaus apsisukimų priklausomybės nuo valdymo signalo

Kaip matyti 4.36 pav., didėjant valdymo signalui, greitis didėja tiesiškai nuo 411 aps/min, kai U=1 V, iki 3183 aps/min, kai U=10 V ir toliau nebekinta. Taip pat pastebėta, kad greitis praktiškai nepriklauso nuo sklendės padėties.

Taigi atsižvelgus į gautą diagramą, 4.37 pav. pavaizduojamas apibendrinta ventiliatoriaus sukimosi greičio priklausomybė nuo valdymo signalo.



4.37 pav. Apibendrinta ventiliatoriaus apsisukimų priklausomybė nuo valdymo signalo

Keičiant ventiliatoriaus valdymo signalą bei sklendės diafragmos padėtį registruojami ventiliatoriaus sukuriamo slėgio rezultatai. Gautos priklausomybės parodytos 4.38 pav.



72
Iš grafiko matyti, kad didžiausias slėgis (1633 Pa) pasiekiamas, kai sklendė yra uždaryta 25 %, o valdymo signalas nustatytas 10 V.

4.39 pav. parodyta ventiliatoriaus sukuriamo slėgio priklausomybė nuo jo sukimosi greičio, prie nurodytų sklendžių padėčių. Iš grafiko matyti, kad sukuriamas slėgis priklauso nuo sklendės padėties. Didžiausias slėgio pokytis įvyksta, kai ventiliatoiaus apsisukimai pasiekia 3000 aps/ min, sklendę uždarius slėgis sumažėja 20 %.



4.39 pav. Slėgio piklauomybė nuo sukimosi greičio

Turint srovių matavimo rezultatus apskaičiuojamos ventiliatoriaus pasiekiamos galios pagal (27) formulę:

$$P_1 = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi \tag{27}$$

Skaičiavimo rezultatai, esant trims skitingoms valdymo signalo reikšmėms (1, 3, 5 V) pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Galių skaičiavimo rezultatai

<i>U</i> , V	1	5	10					
<i>S</i> , %	$P_{I}, W$							
0	76,5	212	677					
25	76,5	212	677					
50	76,5	212	683					
75	76,5	218	730					
100	76,6	230	766					

Galių skaičiavimo rezultatai grafiškai pavaizduoti 4.40 pav. Iš šio grafiko matyti, kad kintant sklendės diafragmos plotui ir esant pastoviam valdymo signalui U=10 V, ventiliatoriaus vatojama galia didėja apie 12 % sklendės diafragmos plotą didinant nuo 50 iki 100 %. Esant mažesnės vertės valdymo signalui sklendės padėtis vartojamai galiai praktiškai neturi.



4.40. Galių skaičiavimo rezultatų grafikas

Siekiant nustatyti, kaip keičiasi ventiliatoriaus vartojama galia, nuosekliai kintant valdymo signalui nuo 1 iki 10 V, kai sklendė visai uždaryta ir visai atidaryta (S=0 % ir S=100 %), apskaičiuojamos galios. Skaičiavimo rezultatai pateikti 8 lentelėje.

$U_V$ , V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<i>S</i> , %	$P_1, W$										
0	76,5	88,2	106	147	212	300	435	588	676	676	
100	76,5	100	124	171	230	330	477	677	766	766	

8 lentelė. Galių skaičiavimo, nuosekliai kintant valdymo įtampai, rezultatai

Pagal 8 lentelės rezultatus sudaroma ventiliatoriaus sukuriamo slėgio ir galios priklausomybės nuo valdymo signalo charakteristika, kai sklendės diafragmos padėtis 0 ir 100 %, kuri parodyta 4.41 pav.



4.41. Slėgio ir galios priklausomybės nuo valdymo signalo

Kai sklendė visai atidaryta, o valdymo signalą didinant nuo 1 V iki 10 V, ventiliatoriaus vartojama galia padidėjo 8,84 karto, o sukuriamas slėgis padidėjo 73,8 karto. Sklendę visai uždarius ir analogiškai keičiant valdymo signalą, ventiliatoriaus vartojama galia padėjo 10 kartų (13,3 % daugiau, nei esant sklendei atidarytai), o slėgis padidėja 75,9 karto, tačiau maksimali slėgio vertė, lyginant su verte, kai sklendė atidaryta, sumažėjo 16 %, kadangi uždarinėjant sklendę mažėja ventiliatoriaus įtraukiamo oro kiekis, todėl sukuriamas mažesnis slėgis.

#### 4.3.3 Triukšmo lygio ir vibracijų tyrimai

Siekiant nustatyti ventiliatoriaus skleidžiamo triukšmo lygį, buvo atliekami jo keliamo garso lygio matavimai. Triukšmo lygis matuotas žmogaus ausimi girdimų garsų dažnio intervale: 16 Hz– 20000 Hz. 4.42 pav. pateikiamas ekvivalentinis garso lygis.



4.42 pav. Ekvivalentinis garso lygis

Tyrimas rodo, kad kai sklendė visai atidaryta, o ventiliatoriaus valdymo signalui didėjant nuo 0 iki 10 V, ekvivalentinis garso lygis padidėja nuo 51,1 iki 88,1 dB. Garsiausiai ventiliatoriaus veikia, kai sklendės padėtis nustatyta 50 %. Tada garso lygis siekia 92,6 dB. Mažiausias garso lygis pasiekiamas, kai sklendės padėtis nustatyta 25 %. 4.43 pav. grafike parodyta, kaip šiuo atveju gaso lygis kinta nuo valdymo signalo.



4.43 pav. garso lygio kitimas nuo valdymo signalo

Iš grafiko matyti, kad valdymo signalui padidėjus nuo 0 iki 10 V, garso lygis padidėja nuo 48,3 iki 87,6 dB.

Ventiliatoriaus kuriamos vibracijos buvo tiriamos x ir z kriptimis. x ašimi veikiančių vibracijų rezultatai pateikti 4.44 pav.



Iš 4.44 pav matyti, kad didėjant valdymo signalui, didėja ir vibracijų lygis. Kol valdymo signalas neviršyja 3 V, vibracijų lygis nekinta didžiausia vertė yra 0,55 m/s<sup>2</sup>. Toliau didinant valdymo signalą, vibracijos priklausomai didėja ir nuo sklendės padėties. Didžiausias skirtumas yra, kai U=9 V, tada vibracijų lygis, tarp atidarytos ir uždarytos sklendės, skiriasi 67 %. z ašimi veikiančių vibracijų rezultatai pateikti 4.45 pav.



Iš 4.45 pav. matyti, kad didėjant valdymo signalo, didėja ir vibracijų lygis. Kol valdymo signalas neviršyja 3 V, vibracijų lygis nekinta didžiausia vertė yra 0,78 m/s<sup>2</sup>. Toliau didinant valdymo signalą, vibracijos priklausomai didėja ir nuo sklendės padėties. Didžiausias skirtumas yra, kai U=9 V, tada vibracijų lygis, tarp atidarytos ir uždarytos sklendės, skiriasi 53 %.

#### 5. TYRIMO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

Atlikus literatūros analizę apie bešepečius nuolatinės srovės variklius buvo išskirti šių variklių privalumai lyginant su įprastiniais NS ir KS varikliais. Jie pasižymi didesniu efektyvumu, yra paprastesnės konstrukcijos, nes nėra šepetėlių mazgo srovės komutacijai, todėl sumažėja variklio matmenys, jis yra kompaktiškesnis. Ventiliatoriai su tokiais varikliais yra mažiau triukšmingi, todėl tai vienas iš faktorių, lemiančių jų naudojimo pasirinkimą tiek buityje, tiek industrinėje pramonėje. Kai kuriuose literatūros šaltiniuose teigiama, kad EK variklis patiria netgi 2,2 karto mažiau galios nuostolių, negu KS variklis. Apžvelgta EK variklių sandara, konstrukcijų tipai. Taip pat peržvelgti naujausi šių variklių tyrimai. Šių variklių tyrėjai ieško vis naujesnių sprendimų, kaip būtų galima tobulinti EK variklius: keičiant nuolatinių magnetų formą, statoriaus apvijų klojimo būdą, ieškant tobulesnių valdymo metodų, keičiant fazių skaičių ir kt.

Ventiliacinės sistemos bešepetės pavaros tyrimą sudarė dvi dalys – imitacinio modelio ir eksperimentinio modelio tyrimas.

Imitacinio modelio pagrindinis tikslas buvo gauti vidines EK variklio charakteristikas (statoriaus sroves, elektrovaras, Holo jutiklių signalus). Sudarius matematinį modelį buvo sudaromas imitacinis modelis "Matlab Simulink" programiniu paketu.

Eksperimentiniams bešepetės ventiliacinės pavaros tyrimams buvo suprojektuotas ir pagamintas eksperimentinis stendas, sudarytas iš ventiliatoriaus su EK varikliu, reguliavimo ir matavimo sklende, valdikliu. Atlikti signalo poveikio ir sklendės kuriamo pasipriešinimo tyrimai sukimosi greičiui, naudojamai srovei, ventiliatoriaus kuriamam slėgiui, vibracijos, keliamam triukšmui, siekiant išsiaiškinti, kaip valdomas jis pasiekia geriausias charakteristikas.

#### 5.1. Išvados

- 1. Imitacinio modelio tyrimui buvo naudojamas "Transmotec" firmos variklis. Sudaryti ir ištirti du modeliai:
  - Supaprastinis EK variklio modelis, nemodeliuojant kai kurių įprasto EK variklio funkcinių blokų, ventilatorinę apkovą imituojant apkraunant variklį vardiniu pasipriešinimo momentu;

- Sudėtingas EK variklio modelis, pagal sudarytą matematinį modelį, turintis įprastinius EK variklio funkcinius blokus, modeliuojant ventiliatorinę apkovą pagal jos priklausomybę nuo greičio.
- 2. Palyginus abiejų modelių greičio charakteristikas, matyti, kad apkrovus variklį, procesas tiksliau imituojamas antro modelio. Modelių gautose charakteristikose nusistovėję greičiai skiriasi 13 %. Srovės imitacijos rezultatai esant apkrovai abiejuose modeliuose atvaizduoti gana korektiškai, tarpusavyje skiriasi 5 %, tačiau srovė paleidimo metu tiek pirmame, tiek antrame modelyje nėra atvaizduojama teisingai. Antrajame modelyje gauti Holo jutiklių signalai ir beveik idealios trapecinės formos elektrovaros.
- 3. Eksperimentinio modelio tyrimui naudotas firmos ventiliatorius "EBMpapst" su EK varikliu. Keičiant analoginį valdymo signalą 0–10 V bei sklendės kuriamą pasipriešinimą, gautos ventiliatoriaus sukimosi greičio, kuriamo slėgio, naudojamos iš tinklo srovės, triukšmingumo, kuriamų vibracijų dviem kryptimis chaakteristikos.
- 4. Ventiliatoriaus srovė, kai sklendės diafragmos padėtis pakeičiama nuo 0 % iki 100 %, o ventiliatorius sukasi maksimaliu greičiu (n=3184 aps/min), padidėja 13 %. Ventiliatoriaus iš tinklo naudojama srovė didėjant sklendės diafragmos plotui nuo 0 iki 100 %:
  - esat mažiausios vertės valdymo signalui U=1 V, srovės dydis išlieka tokios pačios vertės nepriklausomai nuo sklendės diafragmos ploto pokyčio.
  - padidinus valdymo signalą U iki 5 V, srovės dydis išauga 11,5 % padidėjus sklendės diafragmos plotui 100 %.
  - padidinus valdymo signalą *U* iki didžiausios vertės 10 V, srovės suvartojimas padidėja 13 %, padidėjus sklendės diafragmos plotui 100 %
- Didėjant valdymo įtampai, srovė didėja ir pasiekia maksimalias vertes, kai U=9 V. Greitis didėja tiesiškai nuo 411 aps/min iki 3183 aps/min. Taip pat pastebėta, kad greitis praktiškai nepriklauso nuo sklendės padėties.
- 6. Kai sklendė visai atidaryta, o valdymo signalas didinamas nuo 1 V iki 10 V, ventiliatoriaus vartojama galia padidėjo 8,84 karto, o sukuriamas slėgis padidėjo 73,8 karto. Sklendę visai uždarius ir analogiškai pakeitus valdymo signalą, ventiliatoriaus vartojama galia padėjo 10 kartų (13,3 % daugiau, nei esant sklendei atidarytai), o slėgis padidėja 75,9 karto, tačiau maksimali slėgio vertė, lyginant su verte, kai sklendė atidaryta, sumažėjo 16 %, kadangi uždarant sklendę mažėja ventiliatoriaus įtraukiamo oro kiekis, todėl sukuriamas mažesnis slėgis.

- 7. Garso lygio tyrimo rezultatai rodo, kad kai sklendė visai atidaryta, o ventiliatoriaus valdymo signalas padidėjęs nuo 0 iki 10 V, ekvivalentinis garso lygis padidėja 37 dB. Garsiausiai ventiliatoriaus veikia, kai sklendės padėtis nustatyta 50 %. Tada garso lygis siekia 92,6 dB. Mažiausias garso lygis pasiekiamas, kai sklendės padėtis nustatyta 25 %.
- Vibracijų lygis x ir z kryptimis tiesiškai didėja didėjant valdymo signalui bei sklendės kuriamam pasipriešinimui, kuris didžiausią įtaką turi valdymo signalą nustačius 9 V – esant uždarytai sklendei x kryptimi veikiančių vibracijų lygis padidėja 67 %, nei esant atidarytai. z kryptimi veikiančių vibracijų lygis padidėja 53 %.

## LITERATŪROS SĄRAŠAS

- 1. Large Brushless Drive Systems. [žiūrėta 2014 lapkričio 4 d.]. Prieiga per internetą: http://www.powertecmotors.com/wp-content/uploads/Large-Brushless-Drive-Systems.pdf
- EK ir KS variklių galios nuostoliai. [žiūrėta 2014 lapkričio 4 d.]. Prieiga per internetą: <u>https://www.airah.org.au/imis15\_prod/Content\_Files/Divisionmeetingpresentations/ACTNS</u> <u>W/PPNSW\_06-09-2011-TH.pdf</u>
- 3. The invention of the electric motor 1800–1854. [žiūrėta 2014 lapkričio 5 d.]. Prieiga per internetą: <u>https://www.eti.kit.edu/english/1390.php</u>
- 4. EK variklių magnetinio lauko forma. [žiūrėta 2014 lapkričio 6 d.]. Prieiga per internetą: http://www.atmel.com/Images/doc8030.pdf
- 5. Smilgevičius A. Automatikos mikromašinos. Vilnius: Technika, 2005. 343 p.
- Gečys S., Smolskas P., Kalvaitis A. Elektros mašinos. Sinchroninės mašinos. Nuolatinės srovės mašinos. II dalis. Kaunas: Technologija, 2012. 121 p.
- EK variklių privalumai. [žiūrėta 2014 lapkričio 10 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.ohioelectricmotors.com/2015/07/brushless-dc-motors-low-inertia-fast-</u> <u>response/</u>
- EK variklių sandara. [žiūrėta 2014 lapkričio 15 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.electrical4u.com/brushless-dc-motors/</u>
- Hanselman D. Brushless Permanent Magnet Motor Design. [interaktyvus]. 2006, [žiūrėta 2014 gruodžio 17 d.]. p. 117–125. Prieiga per internetą: <u>http://www.avislab.com/blog/wpcontent/uploads/2014/05/BrushlessPermanentMagnetMotor</u> <u>DesignVersion2.pdf</u>
- Pitrėnas A. Imitacinis elektroniškai komutuojamos nuolatinės srovės pavaros modelis. Mokslas-Lietuvos ateitis [interaktyvus]. 2013, [nr.] 5(2) [žiūrėta 2014 lapkričio 2 d.]. p. 164–168. Prieiga per internetą:

#### http://www.mla.vgtu.lt/index.php/mla/article/viewFile/mla.2013.31/pdf. ISSN 2029-2341.

11. Karaliūnas B. Elektroniškai komutuojamo variklio charakteristikų tyrimas. *Elektronika ir elektrotechnika* [interaktyvus]. 2011, [nr.] 3(109) [žiūrėta 2014 lapkričio 2 d.]. p. 31–34. Prieiga per internetą:

http://internet.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/elektr/z109/07\_\_ISSN\_1392-1215\_Study%20on%20the%20Characteristics%20of%20Electronically%20Commutated%2 0Motor.pdf. ISSN 1392 - 1215.

- 12. Pakdel M. Analysis of the Magnetic Flux Density, the Magnetic Force and the Torque in a 3D Brushless DC Motor. *J. Electromagnetic Analysis & Applications* [interaktyvus]. 2009, [nr.] 1 [žiūrėta 2014 lapkričio 3 d.]. p. 1–5. Prieiga per internetą: http://file.scirp.org/pdf/JEMAA20090100001\_80590621.pdf
- 13. Chowdhury D., Chattopadhyay M., ir Roy P. Modelling and Simulation of Cost Effective Sensorless Drive for Brushless DC Motor. [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2015 sausio 10 d.]. Prieiga per internetą <u>http://ac.els-cdn.com/S2212017313005240/1-s2.0-S2212017313005240-</u> <u>main.pdf?\_tid=4ff5d77a-219b-11e6-9e03-</u> <u>00000aacb35e&acdnat=1464086342\_8e8a5bbc2eb3afc7f5ab7beb341890a4</u> ISSN: 2212– 0173
- 14. Goutham G. R., et al. Mitigation of Torque for Brushless DC Motor: Modeling and Control. [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2015 sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.302.3071&rep=rep1&type=pdf</u> ISSN 2229–5518
- 15. Patel V.K. S., Pandey A.K. Modeling and Performance Analysis of PID Controlled BLDC Motor and Different Schemes of PWM Controlled BLDC Motor. [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2015 sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: http://www.ijsrp.org/research-paper-0413/ijsrp-p1622.pdf ISSN 2250-3153
- Prasad G., et al. Speed control of Brushless DC motor with DSP controller using Matlab. [interaktyvus]. 2012. [žiūrėta 2015 sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.416.4476&rep=rep1&type=pdf</u> ISSN: 2248–9622
- 17. Khader S. Single Phase Brushless DC Motor With PWM Control Strategy And Special Form Of PM Rotor. [interaktyvus]. 2007. [žiūrėta 2015 sausio 12 d.]. Prieiga per internetą: <u>https://www.researchgate.net/publication/229005205\_Single\_Phase\_Brushless\_DC\_Motor\_with\_PWM\_Control\_Strategy\_and\_Special\_Form\_of\_PM\_Rotor</u>

 C. P. Priyanka, Gopinathan S., ir Gopinath A. Modeling and Simulation Analysis of Eleven Phase Brushless DC Motor. [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2015 sausio 14 d.]. Prieiga per internetą:

http://www.ijareeie.com/upload/2013/dec13-special/50\_priyanka-1.pdf ISSN: 2278 - 8875

- Simões M. G. ir Vieira P. Jr. A Five–Phase Brushless DC–Machine Direct Drive System. [interaktyvus]. 2004. [žiūrėta 2015 sausio 14 d.]. Prieiga per internetą: http://inside.mines.edu/~msimoes/documents/pap20.pdf
- 20. Deepakumari P. ir Rani Dr. P. Ripple reduction using Butterworth LPF for Sensorless BLDC Motor Drive. [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2015 sausio 15 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.ijareeie.com/upload/2014/april/35\_Ripple.pdf</u> ISSN: 2278 – 8875
- 21. Minciunescu P., Varaticeanu B. D., Marinescu S. A New High–Tech Brushless Motor/Generator with Axially Aligned Stator Poles. [interaktyvus]. 2013. [žiūrėta 2015 sausio 15 d.]. Prieiga per internetą:

http://www.eea-journal.ro/ro/d/5/p/EEA61\_2\_4

- Hall Efect Sensors. [žiūrėta 2015 sausio 14 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.parkermotion.com/manuals/OEM770T/5\_Hall\_Effects\_770T.pdf</u>.
- 23. Kim T. S., Byo, Park B. G., Lee D. M., Ryu J. S., Hyun D.S. A new approach to sensorless control method for brushless DC motors. [interaktyvus]. 2008. [žiūrėta 2014 lapkričio 6 d.]. Prieiga per internetą: http://www.avialab.com/blog/www.approach.com/blog/wwww.approach.com/blog/wwww.approach.com/blog/wwwww.com/blog/wwww.ap

http://www.avislab.com/blog/wpcontent/uploads/2014/05/ANewApproachToSensorlessCont rolMethodForBrushlessDCMotors.pdf

24. Gamazo J. C., Sanchez E. V., Gomez J. Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends. [interaktyvus]. 2010. [žiūrėta 2014 lapkričio 6 d.]. Prieiga per internetą:

http://www.mdpi.com/1424-8220/10/7/6901/htm. ISSN 1424-8220

- 25. BLDC sensorless algorithm tuning. [žiūrėta 2015 sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app\_note/AN4597.pdf.
- 26. Lin Ch. T., Hung Ch. W., Liu Ch. W. Position Sensorless Control for Four–Switch Three– Phase Brushless DC Motor Drives. [interaktyvus]. 2008. [žiūrėta 2014 lapkričio 10 d.]. Prieiga per internetą:

https://www.academia.edu/3323199/Position\_sensorless\_control\_for\_four-switch\_threephase\_brushless\_dc\_motor\_drives?auto=download 27. Narwal P., Gupta U. Indirect Back–Emf Detection Methods for Sensorless Speed and Position Control of BLDC Motors. [interaktyvus] 2014. [žiūrėta 2014 lapkričio 11 d.]. Prieiga per internetą: http://www.erpublications.com/uploaded\_files/download/download\_26\_06\_2014\_10\_59\_51.

<u>pdf</u>. ISSN: 2319–7463

- 28. Brushless DC motor control using Atmega32M1. [žiūrėta 2014 lapkričio 12 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.atmel.com/images/doc8138.pdf</u>
- 29. Six-step commutation. [žiūrėta 2015 kovo 10 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.atmel.com/Images/Atmel-8311-AVR1607-Brushless-DC-Motor-Control-in-Sensor-Mode-using-ATxmega128A1-and-ATAVRMC323\_Application-Note.pdf</u>
- 30. EK variklio pavara, srovių komutcija. [žiūrėta 2015 kovo 4 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/brushless-dc-motor-guide.php#sthash.QmHnLkrq.dpbs</u>
- 31. Tashakori A. Modeling of BLDC Motor with Ideal BackEMF for Automotive Applications. [interaktyvus] 2011. [žiūrėta 2015 kovo 20 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.iaeng.org/publication/WCE2011/WCE2011\_pp1504-1508.pdf</u> ISSN: 2078–0966
- 32. EK variklio kataloginiai duomenys. [žiūrėta 2016 sausio 4 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://download.transmotec.com/eng/brushless-dc-motors/no-gear/Transmotec-DC-Motors-Brushless-eng.pdf</u>
- 33. IRIS315 sklendė. [žiūrėta 2016 sausio 5 d.]. Prieiga per internetą: <u>https://www.airtradecentre.com/UK/UK/documentation/B03.010-IRIS-Iris-dampers</u>
- 34. "Briuel and Kjaer 9727" įranga. [žiūrėta 2016 sausio 5 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.bksv.com/doc/bg1605.pdf</u>
- 35. Akeselerometras 8341. [žiūrėta 2016 sausio 5 d.]. Prieiga per internetą: http://www.bksv.com/products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/8341
- 36. Tachometras MM0024. [žiūrėta 2016 sausio 5 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/tachometer-probes/MM0024</u>
- 37. Garso lygio matuoklis 2550. [žiūrėta 2016 sausio 5 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://www.bksv.com/Products/handheld-instruments/sound-level-meters/sound-level-meters/sound-level-meters/type-2250</u>
- 38. Srovės matavimo replės Fluke 322. [žiūrėta 2016 sausio 6 d.]. Prieiga per internetą:

http://www.fluke.com/Fluke/inen/Electrical-Test-Tools/Clamp-Meters/Fluke-320.htm?PID=56068

- 39. C3 valdiklio ir programinės įrangos aprašymas.
- 40. EK variklis. [žiūrėta 2014 gruodžio 6 d.]. Prieiga per internetą: http://www.nxp.com/files/graphic/other/BLDCMOTORPICT.gif
- 41. Variklis su vidiniu rotoriumi. [žiūrėta 2014 gruodžio 6 d.]. Prieiga per internetą: https://www.canadianwoodworking.com/sites/default/files/assets/images/brushless7\_0.jpg
- 42. Variklis su išoriniu rotoriumi. [žiūrėta 2014 gruodžio 6 d.]. Prieiga per internetą: https://static.wixstatic.com/media/51dfdf\_7b2ec712bf984f29a476f6d85d96948e.jpg/v1/fill/ w\_550,h\_457,al\_c,q\_90,usm\_0.66\_1.00\_0.01/51dfdf\_7b2ec712bf984f29a476f6d85d96948e. jpg
- 43. Holo jutiklis. [žiūrėta 2014 gruodžio 6 d.]. Prieiga per internetą: http://www.goldmine-elec-products.com/images/G1994B.jpg
- 44. Holo jutiklių veikimas. [žiūrėta 2014 gruodžio 6 d.]. Prieiga per internetą: http://m.eet.com/media/1178413/bldcfig4.jpg
- 45. Signalų diagrama. [žiūrėta 2014 gruodžio 6 d.]. Prieiga per internetą: <u>http://e2e.ti.com/cfs-file/\_\_key/communityserver-blogs-components-weblogfiles/00-00-00-</u> <u>07-88/7711.rajne-2.png</u>

## PRIEDAI



# XIX-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija "MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS"

ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

# PAŽYMA *Mantas Balčaitis*

Elektros inžinerijos (T190) ir Automatizavimo, robotikos, valdymo inžinerijos (T125) jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą

VENTILIACINĖS SISTEMOS BEŠEPETĖS PAVAROS TYRIMAS

Mokslo komiteto pirmininkas

Kollus · prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas

doc. dr. Sonata Tolvaišienė

2016 m. kovo 18 d. Vilnius