VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

Andrius Rudinskas

TIESIAEIGIO ŽINGSNINIO VARIKLIO SROVIŲ TYRIMAS
RESEARCH OF LINEAR STEPPER MOTOR CURRENTS

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T104
Automatinių sistemų specializacija
Elektros inžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2009

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
AUTOMATIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
_____
(Parašas)
_____
(vardas, pavardė)
2009-_____

Andrius Rudinskas

TIESIAEIGIO ŽINGSNINIO VARIKLIO SROVIŲ TYRIMAS
RESEARCH OF LINEAR STEPPER MOTOR CURRENTS

Baigiamasis magistro darbas

Automatikos studijų programa, valstybinis kodas 62401T104
Automatinių sistemų specializacija
Elektros inžinerijos mokslo kryptis

Vadovas doc. dr. E. Matkevičius	_____	_____
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)
Konsultantas doc. dr. A. Kaulakienė	_____	_____
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)
Konsultantas doc. dr. L. Radzevičius	_____	_____
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)	(Parašas)	(Data)

Vilnius, 2009

XII-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“

ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Andrius Rudinskas

Elektros inžinerijos ir automatizavimo, robotikos, valdymo inžinerijos jungtinėje sekcijoje perskaitė pranešimą

Tiesiaeigio žingsninio variklio srovių tyrimas

Mokslo komiteto pirmininkas prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas doc. dr. Zita Savickienė

2009 m. kovo mėn. 20 d.
Vilnius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Elektronikos fakultetas

Automatikos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 3

Data 2009-06-01

Automatikos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Tiesiaeigio žingsninio variklio srovių tyrimas**

Autorius **Andrius Rudinskas** Vadovas doc. dr. **Edvardas Matkevičius**

Kalba

[X] lietuvių

[ ] užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe tiriamos tiesiaeigio žingsninio variklio srovės. Atkreiptas dėmesys į srovės pereinamuosius procesus, nusistovėjusias vertes ir srovės priklausomybę nuo judamo elemento padėties.

Analitinėje dalyje apžvelgta tiesiaeigių žingsninių variklių raida ir jų konstrukcijos, aprašyti skirtingų variklių tipų privalumai ir trūkumai. Aptartos žingsninių variklių valdymo elektros grandinės. Pateiktas *m* - fazio tiesiaeigio žingsninio variklio matematinis modelis srovėms skaičiuoti.

Eksperimentinėje dalyje išnagrinėtas tiriamas variklis. Sudaroma elektrinė principinė atstojamoji schema ir užrašoma analizinė srovės kitimo funkcija laiko atžvilgiu. Eksperimentiniu būdu ištirtas apvijų induktyvumas. Sudarytas variklio matematinis modelis įvertinus induktyvumo pokytį slenkamam elementui judant. Surasta srovės kitimo funkcija ir pagal ją nubraižytos srovės pereinamojo proceso charakteristikos. Panaudojus šuntą užfiksuotas apvijose tekančios srovės pereinamasis procesas, o gauti rezultatai palyginami su analiziniu būdu apskaičiuota srovės pereinamojo proceso charakteristika. Naudojant *MathCad 2001* programinį paketa, gautos tiriamojo tiesiaeigio žingsninio variklio matematinio modelio srovės pereinamojo proceso charakteristikos.

Išnagrinėjus srovės teorinius ir praktinius aspektus, pateikiamos baigiamojo darbo išvados ir siūlymai.

Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, teorinė ir tiriamoji dalys, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 72 p. teksto be priedų, 46 pav., 17 lent., 30 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: elektros srovė, tiesiaeigis žingsninis variklis, pereinamasis procesas, matematinis modelis.

Vilnius Gediminas Technical University
Electronic faculty
Automation department

ISBN ISSN
Copies No. 3
Date 2009-06-01

Automation study programme master thesis.

Title: **Research of Linear Stepper Motor Currents**

Author **Andrius Rudinskas** Academic supervisor doc. dr. **Edvardas Matkevičius**

Thesis language

[X] Lithuanian

[ ] Foreign (English)

Annotation

In this final master project is researched the currents of linear stepper motor. Give heed to a current transient process, a steady values and the current value according the position.

In the theoretical part of the work is discussed the stepper motor evolution and structure, constructional diversity of these motors and the fundamentals of operating modes. In this part was discussed feature of stepper motors as a part of control system.

The practical part includes the current experiment and mathematical model of linear stepper motor. In this part was explored the inductance. The mathematical model was made for the linear stepper motor where includes the variable inductance. When the second part is moving of the x axis direction, the inductance is varied by the cos. This model was resolved with MathCad 2001 software. The current transient process was found in the linear stepper motor electromagnetic coils with oscillograph. Theoretical and practical current transient process was equalized. In the conclusion summarized the result of analyze.

In the research of current theoretical and practical aspects was made the conclusions and suggestions.

Structure: introduction, analyze of literature, theoretical and practical parts, conclusions and suggestions, references.

The thesis consists of: 72 p. text without appendixes, 46 pictures, 17 tables, 30 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: current, the linear stepper motor, research, mathematical model, current transient process.

Turinys

1. Įvadas ... 11
2. Literatūros apžvalga ... 13
3. Teorinė dalis ... 18
   3.1. Tiesiaeigių žingsninių variklių konstrukcijų apžvalga ... 18
      3.1.1. Žingsninių variklių raida ... 19
      3.1.2. Žingsninių variklių struktūra ... 20
      3.1.3. Klasikinis hibridinis žingsninis variklis ... 21
      3.1.4. Žingsninis variklis su nuolatiniu magnetu ... 23
      3.1.5. Modulinis hibridinis tiesiaeigis žingsninis variklis ... 24
      3.1.6. Cilindrinis reaktyvusis tiesiaeigis žingsninis variklis ... 25
      3.1.7. Tiesiaeigis žingsninis variklis su nuolatiniu magnetu ... 27
      3.1.8. Tiriamasis tiesiaeigis žingsninis variklis ... 28
   3.2. Tiesiaeigio žingsninio variklio valdymo sistemų apžvalga ... 29
   3.3. Žingsninių variklių charakteristikos ... 33
   3.4. Matematinis modelis ... 36
   3.5. Srovės pereinamieji procesai ... 41
4. Tiriamoji dalis ... 51
   4.1. Tiriamojo tiesiaeigio žingsninio variklio struktūra ... 51
   4.2. Tiriamo tiesiaeigio žingsninio variklio techninės charakteristikos ... 52
   4.3. Ričių induktyvumo matavimas ... 54
   4.4. Srovės pereinamojo proceso tyrimas ... 58
5. Išvados ir siūlymai ... 70

Literatūros sąrašas ... 71

Priedai ... 73

Paveikslų sąrašas

1 pav. Žingsninių variklių statinės charakteristikos 14
2 pav. Elektromagnetinės pavaros inkaras 17
3 pav. Rotorinio variklio pjūvis – linijinis variklis 19
4 pav. Žingsninės pavaros struktūrinė schema 20
5 pav. Hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio struktūra 21
6 pav. Hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio magnetiniai srautai 22
7 pav. Tiesiaeigis žingsninis variklis su nuolatiniu magnetu 23
8 pav. Modulinio hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio modelis 24
9 pav. 4 fazių cilindrinio reaktyvaus tiesiaeigio žingsninio variklio pjūvis 26
10 pav. Dvifazio tiesiaeigio žingsninio variklio pjūvis 27
11 pav. Dvifazio tiesiaeigio žingsninio variklio magnetinio srauto linijos 27
12 pav. Tiriamasis tiesiaeigis žingsninis variklis 28
13 pav. Reaktyviojo variklio vienkryptė valdymo grandinė 30
14 pav. Šešių konaktų valdymo grandinė. Vienkryptis maitinimas 30
15 pav. Dvikrypčio maitinimo valdymo grandinė 31
16 pav. Dvifazio variklio mikrožingsnio režimas 32
17 pav. Žingsninių variklių statinės charakteristikos 33
18 pav. Žingsninio variklio sinchronizacija 34
19 pav. Apkrovos momento priklausomybė nuo komutavimo dažnio 35
20 pav. Žingsninio variklio valdymo elektrinė grandinė 36
21 pav. Tiesiaeigio žingsninio variklio principinė elektrinė schema 37
22 pav. Tiesiaeigio žingsninio variklio principinė elektrinė schema 43
23 pav. Vienos apvijos grandinės prijungimas prie nuolatinės įtampos šaltinio 43
24 pav. Laiko grafikai, kai prijungiama tiesiaeigio žingsninio variklio pirma apvija prie nuolatinės įtampos šaltinio 45
25 pav. Srovės ir įtampos pereinamieji procesai po ritės atjungimo nuo maitinimo šaltinio 46
26 pav. Variklio žadinimo ričių polių išdėstymas antrinio elemento atžvilgiu, esant *x* poslinkiui ... 47
27 pav. Ritės induktyvumo kitimo kreivė pagal kosinusą 48
28 pav. Tiriamasis tiesiaeigis žingsninis variklis 51
29 pav. Eksperimentinis tiesiaeigio žingsninio variklio fizinis modelis 52
30 pav. Eksperimentinė elektros grandinė ritėms tirti 54
31 pav. Fazinių apvijų srovės kitimas poliui slenkant nuo danties ant kito danties, kai *u = 14* V ... 56
32 pav. Fazinių apvijų srovės kitimas poliui slenkant nuo danties ant kito danties, kai *u = 48* V ... 56

33 pav. Induktyvumo pokytis poliui slenkant nuo danties per tarpą ant kito danties, esant skirtingoms įtampoms 57
34 pav. Visų apvijų induktyvumų kreivės poliui slenkant nuo danties per tarpą ant kito danties 57
35 pav. Pirmos ritės teorinis pereinamieji procesai prie skirtingų įtampų..... 59
36 pav. Oscilografo jungimo schema..... 61
37 pav. Tiesiaeigio žingsninio variklio pradinė pradėtis prieš pirmos apvijos komutaciją 61
38 pav. Pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 12,05\,\text{V}$ 62
39 pav. Pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 23,85\,\text{V}$ 63
40 pav. Pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 47,94\,\text{V}$ 63
41 pav. Trečios ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 47,94\,\text{V}$ 64
42 pav. Užfiksuoto variklio pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 47,94\,\text{V}$ 65
43 pav. Užfiksuoto variklio pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 12,05\,\text{V}$ 66
44 pav. Trečios ritės srovių pereinamųjų procesų palyginimas, kai $U = 12,05\,\text{V}$ 66
45 pav. Tiesiaeigio žingsninio variklio matematinio modelio pirmos apvijos srovės pereinamasis procesas, kai maitinimo įtampa $U = 12,05\,\text{V}$ 67
46 pav. Tiesiaeigio žingsninio variklio matematinio modelio pirmos apvijos srovės pereinamasis procesas kai maitinimo įtampa $U = 24\,\text{V}$ 68

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Krumpliastiebio fiziniai parametrai 52
2 lentelė. Fazinių apvijų fiziniai parametrai 53
3 lentelė. Valdymo grandinės elementų parametrai 53
4 lentelė. Fazinių apvijų srovių priklausomybių nuo laiko analizinės formos 59
5 lentelė. Laiko pastoviųjų vertės 60
6 lentelė. Pirmos ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 14V 73
7 lentelė. Antros ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 14V 74
8 lentelė. Trečios ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 14V 75
9 lentelė. Pirmos ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 48V 76
10 lentelė. Antros ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 48V 77
11 lentelė. Trečios ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 48V 78
12 lentelė. Pirmos ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 2V 79
13 lentelė. Antros ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 2V 80
14 lentelė. Trečios ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 2V 81
15 lentelė. Pirmos ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 24V 82
16 lentelė. Antros ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 24V 83
17 lentelė. Trečios ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 24V 84

1. Įvadas

Tiesiaeigis žingsninis variklis – tai variklis, kurio krumpliastiebis juda žingsniais tiesia trajektorija, t.y. variklio judamoji dalis tarsi žingsniuoja. Žingsniniai varikliai yra sinchroninės mikromašinos, kuriose diskretus judesys (tiesiaeigis poslinkis) arba tolydus slydimas gaunamas maitinant slenkamojo elemento apvijas nuolatinės įtampos impulsais. Šis variklio tipas turi paprastą struktūrą ir realizuoja daugelį teigiamų savybių.

Temos naujumas ir aktualumas. Šiuo metu vis plačiau taikomi žingsniniai varikliai. Lyginant su nuolatinės srovės varikliais, jų pagrindinis privalumas tas, kad jie atviroje sistemoje gali atlikti pozicionavimo užduotis. Išskiriant kitus privalumus galima paminėti: aukštą pradinį postūmį; srovės svyravimą, esant nedideliam pradiniam momentui; silpną antrinio elemento kaitimą; didelį jėgos ir svorio santykį.

Tiesiaeigiai žingsniniai varikliai priklauso bekontakčių nuolatinės srovės variklių klasei. Šių variklių priežiūra minimali lyginant su kitais, t.y. neturi kontaktinių šepetėlių, kurie varikliuose yra dažniausias gedimų šaltinis. Dėl šio privalumo jie yra taikomi ten, kur variklio gedimas yra nepageidaujamas. Be to, jie užtikrina aukštą traukos jėgą esant mažam greičiui (traukos jėga du kartus didesnė už paprasto nuolatinės srovės variklio su tiesiaeige pavara jėgą). Žingsniniai varikliai gali veikti įvairiose aplinkose ir net atviroje sistemoje. Jeigu naudojamas toks variklis atviroje sistemoje esant mažam greičiui, jis yra linkęs išsiderinti. Todėl svarbesnėse sistemose žingsninius variklius patariama naudoti su grįžtamuoju ryšiu.

Žingsniniai varikliai naudojami braižymo įrenginiuose, robotuose, atskiruose kompiuterių elementuose ir pramoninėse sistemose. Tokių variklių gaminimo sąnaudos didelės, todėl renkantis būtina atsižvelgti į variklio charakteristikas. Tiesiaeigiai žingsniniai varikliai dažniausiai yra tarpinė sistemos dalis, todėl jie gaminami specialiems įrenginiams. Mažinant gamybos sąnaudas būtina tiksliai žinoti, kokių parametrų reikia ir kaip galima ekonomiškiau pagaminti produktą. Visų variklių pagrindiniai parametrai yra maitinimo įtampa, srovė, greitis ir momentas. Žingsniniams varikliams keliami didesni reikalavimai: tikslumas, greitaeigiškumas, vibracijų nebuvimas, didžiausia apkrovos jėga.

Žingsninių variklių statoriuje yra ne mažiau kaip dvi apvijos, kurios maitinamos nuolatine srove iš elektroninio komutatoriaus. Rotoriaus konstrukcija ryškiapolė, todėl statoriaus fazei įjungus maitinimą jis pasisuka į mažiausios magnetinės varžos padėtį. Atsižvelgiant į perjungimų dažnį, žingsninis variklis veikia fiksuoto žingsnio režimu, kai dažnis mažas ir rotorius spėja užimti naują padėtį per periodą arba slysta sinchroniniu greičiu, kai nespėja užimti fiksuotos padėties. Perjungiant fazes vyksta pereinamieji procesai, kurie lemia žingsninio variklio darbą.

Problema. Kokie tiesiaeigio žingsninio variklio srovių pereinamieji procesai ir kaip srovių dydžiai įtakoja tiesiaeigio žingsninio variklio apvijas ir valdymo grandinę?

Tyrimo objektas – tiesiaeigio žingsninio variklio srovė.

Darbo tikslas – ištirti teoriniu ir praktiniu aspektu tiesiaeigio žingsninio variklio sroves, palyginti gautas charakteristikas.

Siekiant darbo tikslo buvo iškelti tokie **darbo uždaviniai**:

1. Išanalizuoti tiesiaeigių žingsninių variklių struktūrą ir rūšis.
2. Išnagrinėti elektros grandinių ir tiesiaeigio žingsninio variklio fizikinius dėsnius.
3. Sudaryti tiriamosios sistemos matematinį modelį ir jį apskaičiuoti kompiuterine programa.
4. Ištirti eksperimentinį modelį ir gautus rezultatus palyginti su matematinio modelio gautais rezultatais.

Darbo metodai: mokslinės literatūros analizė, fizikinių dėsnių analizė, eksperimentinė analizė, matematinių lygčių sprendimas naudojant MatCad 2001 programinį paketą.

Praktinė darbo vertė. Darbe ištirtas tiesiaeigis žingsninis variklis, kurio srovė komutavimo metu kinta eksponentiškai. Gauti eksperimentiniai duomenys palyginami su apskaičiuotais teoriniais rezultatais. Įvertinus eksperimento metu pastebėtus variklį veikiančius fizikinius dėsniu, sudaroma tiriamo TŽV diferencialinių lygčių sistema.

2. Literatūros apžvalga

Šiuo metu yra labai daug išleistų mokamųjų inžinerijos knygų, mokslinių straipsnių, iš kurių gausos sunku išsirinkti tinkamą. Kiekvienoje knygoje ar straipsnyje aprašoma ta pati teorija, kurią kiekvienas autorius pateikia savaip. Vieni autoriai temą išnagrinėja smulkiai, kiti – plačiai. Šiuo metu gausiame literatūros sąraše sunku rasti atskirų knygų apie žingsninius variklius. Žingsniniai varikliai yra pakankamai nauji įrenginiai, todėl daugiausia autorių savo knygose jiems skiria vieną ar kitą skyrių.

Lietuvių autorių parašytų knygų apie elektros mašinas labai mažai. Geriausia pripažinta Algirdo Smilgevičiaus knyga „Automatikos mikromašinos“. Autorius žingsniniams varikliams skiria atskirą skyrių. Šiame skyriuje paprastai ir aiškiai aprašomi žingsninių variklių tipai, veikimo principai ir valdymo būdai. Taip pat nagrinėjamos variklių charakteristikos.

Užsienio kalbos literatūroje apie žingsninius variklius pateikta daugiau informacijos. Literatūros nagrinėjimas pradedamas nuo žingsninių variklių pagrindų. W. J. Doulgo straipsnis „Žingsninių variklių pagrindai“ supažindina su varikliais ir jų veikimo principu. Kitame autoriaus straipsnyje „Žingsninių variklių tipai“ plačiai išnagrinėti ir aprašyti variklių tipai. Szabas Lorandas leidinyje „Hibridiniai tiesiaeigiai žingsniniai varikliai“ išnagrinėti tiesiaeigiai hibridiniai varikliai. Straipsnis pradedamas nuo klasikinio hibridinio variklio apžvalgos, kur vėliau pereinama prie modulinio hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio. Autorius išnagrinėja valdymo būdus ir pasinaudojęs programiniais paketais pateikia kompiuterinių eksperimentų rezultatus. Rusų mokslininkas A. Afoninas aprašė linijinių elektromagnetinių pavarų statinių ir dinaminių charakteristikų skaičiavimus. Šioje knygoje pateikta išnagrinėta labai įdomi linijinė elektromagnetinė pavara.

Toliau plačiau aptartas kiekvieno autoriaus kūrinys.

Kaip jau minėta apie žingsninius variklius rašoma ir A. Smilgevičiaus „Automatikos mikromašinos“ knygoje. Knygos pradžioje apibrėžiamas žingsninis variklis, kaip ryškiapolė sinchroninė mikromašina, kurioje diskretus rotoriaus judesys arba tolydus sukimasis gaunamas maitinant statoriaus apvijas nuolatinės įtampos impulsais.

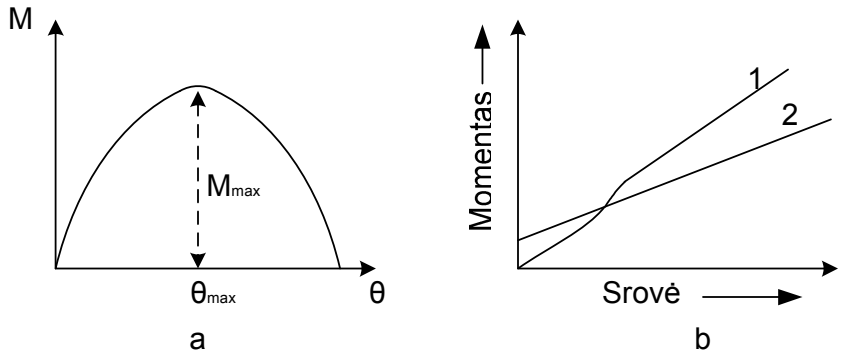
Poskyriuose aprašyti viso žingsnio, pusės žingsnio ir mikrožingsnio valdymo režimai. Viso žingsnio režimas – tai vienos apvijos maitinimas nuolatine srove.

Esant pusės žingsnio režimui statoriaus apvijos jungiamos taip, kad suminis laukas pasisuktų pusės žingsnio kampo. Tam reikia keisti sužadintų statoriaus apvijų skaičių ir srovių kryptis jose. Mikrožingsnio režimas sukuriamas keičiant srovės stiprį tam tikrose apvijose.

Toliau aprašytos vienpaketės konstrukcijos pateikiant posūkio kampo apskaičiavimus ir žingsnio mažinimo galimybes. Viena iš galimybių posūkio kampo mažinimo vienpaketei mašinai yra didinti statoriaus polių skaičių.

Daugiapaketės konstrukcijos privalumas yra labai mažas rotoriaus skersmuo, kurio pasisukimo kampas nepriklauso nuo rotoriaus skersmens, t.y. mažinant posūkio kampą, rotoriaus skersmuo nekinta. Taip pat autorius pabrėžia, kad variklio fazės yra magnetiškai ir elektriškai atskiros, todėl jų abipusis induktyvumas labai mažas.

Kituose skyriuose trumpai apžvelgti ir lenktapoliai, diskiniai, vienfaziai, tiesiaeigiai, reaktyvieji ir hibridiniai žingsniniai varikliai.



1 pav. Žingsninių variklių statinės charakteristikos

čia: a – kampinė charakteristika; b – sukimo momento priklausomybė nuo srovės; 1 – keturfazis reaktyvusis variklis; 2 – hibridinis variklis

Žingsninių variklių charakteristikų skyriuje apžvelgta sukimosi momento priklausomybė nuo rotoriaus posūkio kampo. Ši priklausomybė pateikta 1 pav., ji vadinama kampine charakteristika. Didžiausias statinis momentas M_{max} atitinka posūkio kampą $\theta = \theta_{max}$ ir vadinamas palaikymo momentu. Jeigu kampinis poslinkis bus didesnis nei θ_{max}, tai statinis momentas veiks kitos fiksuotos padėties kryptimi. Palaikymo momentas nustatomas matuojant didžiausiąjį statinį momentą, kuris gali veikti sužadinto variklio veleną, kai rotorius nejuda. Šios charakteristikos parodo tinkamus darbo režimus.

W. J. Douglas savo straipsnio „Žingsninių variklių tipai“ įvade apibrėžia žingsninį variklį kaip nuolatinės srovės variklį be komutatoriaus. Paprastai variklio visos apvijos valdomos atskirai variklio valdymo sistemos. Variklis ir valdymo sistema suprojektuojami taip, kad variklis galėtų atlaikyti bet kokią pasirinką poziciją ir sukti arba slinkti į bet kurią pusę.

W. J. Douglas aprašo kelių tipų žingsninius variklius: su nuolatiniais magnetais ir reaktyviuosius (šiai grupei priklauso ir hibridiniai varikliai, kurie valdymo požiūriu neatskiriami

nuo variklių su nuolatiniais magnetais). Kintamo magnetinio srauto varikliai paprastai turi tris (kartais keturias) apvijas su bendru grįžtamuoju ryšiu, o varikliai su nuolatiniais magnetas paprastai turi dvi nepriklausomas apvijas su šepetėliais ar be jų. Centrinė apvija naudojama vienpoliuose varikliuose su nuolatiniu magnetu.

Pirmame skyriuje trumpai aprašomi varikliu tipai. Pirmiausia apžvelgtas reaktyvusis trifazis žingsninis variklis, kurio apvijų vienos pusės galai sujungti į bendrą tašką, o likę galai prijungiami tam tikra tvarka viena po kitos atsižvelgiant į kurią pusią pageidaujamas judesys. Tokio tipo variklis per vieną žingsnį pasisuka 30° kampu. Žingsnio kampas priklauso nuo dantų skaičiaus ir pločio. Didinant datų skaičių mažėja pasisukimo kampas.

Toliau išanalizuotas vienkryptis maitinimo variklis, kuris turi nuolatinį magnetą rotoriuje su 6-iais poliais. Iš statoriaus kiekvienos apvijos centro išvedami valdymo galai. Tokio tipo variklio valdymui galima siųsti net kelius impulsus iš eilės. Per vieną žingsnį varikis pasisuka taip pat 30° laipsnių kampu kaip ir prieš tai nagrinėtas.

Žingsninis dvikrypčio maitinimo variklis su nuolatiniu magnetu yra konstruojamas tokiu pačiu principu, kaip ir anksčiau aptartas žingsninis vienkrypčio maitinimo variklis. Tarp jų yra tik vienas esminis skirtumas, jog valdymo išvadai yra prijungti prie apvijų galų, todėl inžineriniu požiūriu variklis yra paprastesnis, bet variklio valdymo schema turi turėti galimybę keisti valdymo įtampos poliarumą. Žingsninio dvikrypčio maitinimo variklio valdymo sistema yra sudėtingesnė.

Skyriaus pabaigoje aptariami dar keli tipai, t.y. skeltapolis (angl. bifilar) ir daugiafazis (angl. multiphase) varikliai. Autorius pateikia apvijų jungimo būdus ir trumpai aprašo kiekvieno savybes ir valdymo ypatumus.

Kitame W. J. Douglas straipsnyje „Žingsninių variklių pagrindai“ pateikti žingsninių variklių pagrindai. Aprašyti žingsninių variklių tipai, valdymo ypatumai. Sudarytos kiekvieno tipo žingsninio variklio principinės elektrinės schemos. Prie kiekvienos variklio apvijos lygiagrečiai prijungiami apsauginiai diodai. Visose induktyviosiose apkrovose perjungus apviją srovė jose stiprėja eksponentės dėsniu. Atjungtoje apvijoje nuo maitinimo šaltinio susikuria atgalinė liekamoji srovė, kuri gali sugadinti puslaidininkinį valdymo tranzistorių. Diodas apsaugo tranzistorių nuo galimo gedimo praleisdamas srovę per save. Tokia apsaugos priemonė naudojama visų tipų žingsniniuose varikliuose, kur apvijas valdo puslaidininkiniai tranzistoriai.

Straipsnyje pateiktas platus mikrožingsnio aprašymas. Ypač daug dėmesio skiriama dvipoliui varikliui, kuris dirba mikrožingsnio režimu ir sukuria didžiausią momentą. Kai vienoje apvijoje teka srovė, kitoje ji mažinama tol, kol perauga į neigiamos vertės maksimumą.

S. Lorando knygos „Hibridiniai tiesiaeigiai žingsniniai varikliai“ pirmame skyriuje aprašyti hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio (toliau – TŽV) privalumai ir panašumai, palyginti su kito tipo varikliu. Kaip didžiausius privalumus autorius pabrėžia mažą kainą ir tiesiaeigį judesį, kuriam

sukurti nereikalingi reduktoriai. Taip suprastinama tokios pavaros priežiūra, sumažinami gabaritai, pašalinamas elastingumas ir perdavimo pavaros tarpeliai, dėl kurių atsiranda pavaros netikslumas.

Kitame skyriuje apžvelgtas klasikinis hibridinis TŽV. Pateikiamas pagrindinis veikimo principas, kuris yra pagristas kintamąja magnetine varža. Pagrindinės dalys, kurios sudaro TŽV, yra judamasis elementas (inkaras) ir fiksuotas statorius. Statoriuje yra suformuota vienodu atstumu dantų juosta, kuri sudaryta iš didelio laidumo turinčio elektromagnetinio plieno lakštų. Judamasis elementas (inkaras) susideda iš dviejų elektromagnetinių ričių, kurias skiria retųjų žemės metalų nuolatinis magnetas. Jo paskirtis sukoncentruoti ir nukreipti magnetinį lauką reikiama kryptimi. Kiekvienas elektromagnetas turi du polius, ir visi poliai turi vienodą dantų skaičių magnetinio srauto tėkmei suteikti. Dantyta struktūra abiejuose inkaruose turi tą patį dantų žingsnį. Keturi poliai yra perskirti kvadratu, todėl vienu metu tik vienas polius gali rikiuoti dantis su statoriumi.

Trečiame skyriuje išnagrinėtas modulinis TŽV. Nuo hibridinio TŽV jis skiriasi tuo, kad kiekviena ritė turi dar po nuolatinį magnetą, sumontuotą virš ritės. Jei ritė nėra aktyvi, t.y. jos apvijomis neteka srovė, tai magnetinis nuolatinio magneto srautas užsidaro per vidurinę apvijos šerdį ir neveikia aktyvios apvijos. Nuolatinis magnetas sustiprina magnetinį aktyvios apvijos srautą, dėl kurio sukuriama didesnė jėga, didesnis tikslumas ir greitis esant didelei apkrovai.

Toliau autorius aprašo ekvivalentinę elektros grandinę, kuri sudaryta moduliniam TŽV. Ekvivalentine grandine siekiama išsiaiškinti, kokią reikšmę sudaro papildomi retųjų žemės metalų nuolatiniai magnetai. Pasinaudojus kompiuteriu sukuriamas trijų dimensijų magnetinio srauto charakteristikos.

Penktame ir šeštame skyriuje sumodeliuotas konkretus modulinis TŽV, pavaizduoti magnetiniai srautai, kurie susidaro aktyviai ir pasyviai ritei.

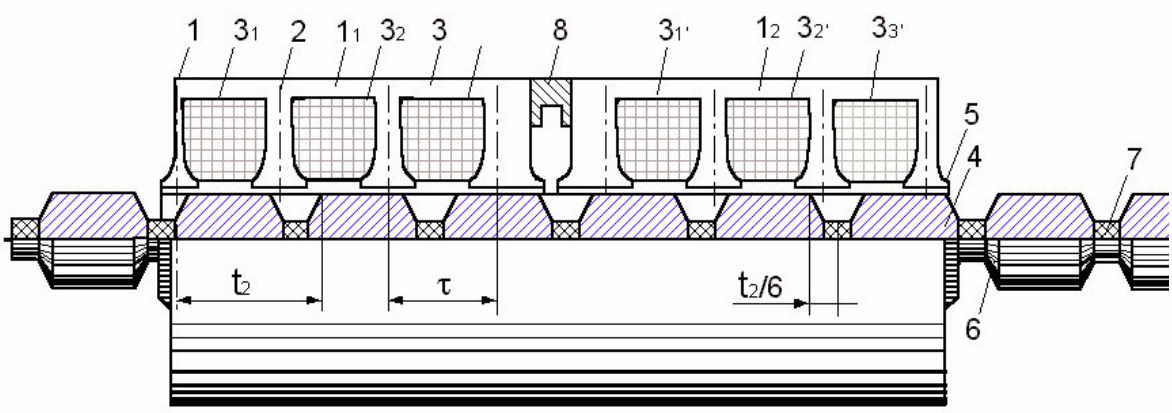
Septintame skyriuje aptartos kelios valdymo galimybės – nuo paprastos prijungimo valdymo grandinės iki rafinuočiausių, galingų, greitų valdymo sistemų. Variklio greitis gali būti keičiamas su skaitmenine valdymo sistema nuo nulio iki keliolikos metrų per sekundę. Greičio didžiausią ribą nustato konstrukcija ir statinis maitinimo šaltinio dažnis.

Didelio tikslumo valdymą turi jutiklinės sistemos, t.y. uždaros sistemos. Tokios sistemos atitinka aukštus tikslumo ir spartos reikalavimus. Toliau aptartos valdymo moduliacijos, t.y. visas žingsnis, puse žingsnio, impulsų pločio moduliacija. Pasitelkiama modeliavimo įranga skirtingose imitavimo platformose (SIMULINK, SIMPLORER ir MagNet), kiekviena iš jų yra plačiai naudojama magnetiniams laukams tirti.

A. Afonino knygoje („Linijinė elektromagnetinė pavara. Statinių ir dinaminių charakteristikų skaičiavimas“) aprašytos elektromagnetinių pavarų ypatybės; elektromagnetinės šerdies su dantimis bei cilindrinės formos inkaru, magnetinio laidumo, statinio sinchronizavimo jėgos ir dinaminių variklių skaičiavimai; elektromagnetinių variklių sandara [16].

Autorius knygoje sudarytos elektromagnetinių jėgų išraiškos. Jas pasitelkus galima analizuoti variklių konstrukciją, parinkti variklio gabaritus pradiniu projektavimo etapu.

Šios knygos autoriai aptaria prancūzų kompanijos linijinio variklio formą, kuri turi panašias charakteristikas kaip nuolatinės srovės variklis. Jo aukštas pradinis postūmis, didelis jėgos – svorio santykis, maža tikimybė antriniam elementui perkaisti, žemas pradinis (paleidimo) srovės bangavimas. Šių privalumų pasiekiama dėl indukcijos principo, varikliai yra panašūs į reaktyviąsias mašinas.



2 pav. Elektromagnetinės pavaros inkaras

Čia: 1 – statorius;

2 – polius;

3 – apvija;

4 – krumpliastiebis;

5 – oro tarpas tarp krumpliastiebio ir statoriaus;

6 – krumpliastiebio dantis;

7 – krumpliastiebio tarpas;

8 – dviejų modulių jungiama konstrukcija;

t_2 - krumpliastiebio danties žingsnis;

τ - statoriaus poliaus žingsnis;

Variklis susideda iš daugybės ričių, užvyniotų ant C šerdies ir dantyto krumpliastiebio iš magnetinės geležies (žr. 2 pav.). Žingsnis tarp krumpliastiebio dantų ir tarp ričių yra nevienodas. Tokios konstrukcijos varikliai išvengia nepageidaujamo stabdymo efekto. Maitinimo įtampa tiekiama į apvijas pagal valdymo algoritmą, kuris privalo suformuoti slenkamąjį magnetinį lauką, kurio suminės jėgos tarp apvijų ir krumpliastiebio sukuria postūmį.

Pagal įtampos tiekimą į apvijas galima suformuoti skirtingus darbo režimus. Pavyzdžiui, tokia mašina gali veikti sinchroniškai, arba jo sukimasis gali būti vibruojantis (osciliuojantis). Panaudojant grįžtamojo ryšio mechanizmą, jis gali judėti dideliu tikslumu [16].

3. Teorinė dalis

Sparčiai tobulėjant skaitmeninėms sistemoms kartu didelis dėmesys skiriamas ir įrenginiams, kurie geriausiai veikia su jomis. Žingsninis variklis – tai diskretusis automatikos elementas, jis sistemose vykdo įvairias funkcijas: impulsų skaičiaus keitiklio į veleno posūkio kampą, elektrinio diferencialo, elektrinio reduktoriaus, kampinių padėčių jutiklio, apdirbimo staklių skaitmeninės liniuotės ir t.t. [4]. Šiuo metu yra įvairių konstrukcijų žingsninių variklių.

Tiesiaeigių žingsninių variklių konstrukcijos plačiau apžvelgtos 3.1 skyriuje.

Žingsninės pavaros savybes nusako elektroninio komutatoriaus, mechanizmo ir paties žingsninio charakteristikos. Elektros komutatoriaus parametrai turi didelę įtaką srovių valdymo dydžiui apvijose, formai bei mechaninei variklio charakteristikai. Plačiau TŽV valdymo sistemų apžvalga pateikta 3.2 skyriuje.

3.1. Tiesiaeigių žingsninių variklių konstrukcijų apžvalga

Kaip jau buvo minėta, žingsniniai varikliai plačiai taikomi įvairiose pramonės, buitinės bei kompiuterinės technikos gamybos srityse, todėl yra svarbu išnagrinėti esamoje rinkoje jau išrastus variklių tipus, panaudotas konstrukcijas.

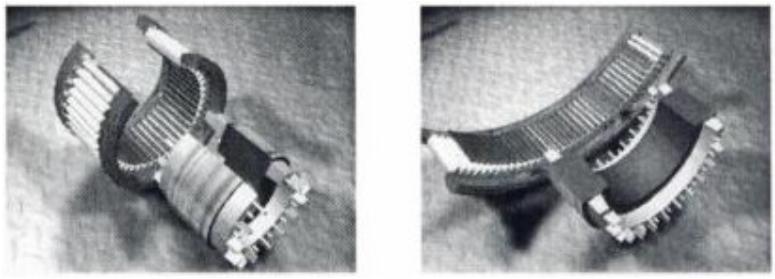
TŽV raida prasidėjo XX a. pradžioje. Šis amžius buvo labai pažangus mokslo ir technikos srityse. TŽV plėtrą skatino sparčiai didėjančios transporto pramonės. Automobiliai tapo svarbiausia transporto priemone, o jų gamybai palengvinti buvo taikomos linijinės elektros pavaros.

TŽV buvo išrasti dviejų pagrindinių tipų, kaip ir rotoriniai žingsniniai varikliai. Atsižvelgiant į slenkamojo elemento tipą, daugiafaziai žingsniniai varikliai yra skirstomi į variklius su nuolatiniais magnetais ir reaktyviuosius žingsninius variklius. Pirmuoju atveju slenkamasis elementas žadinamas nuolatiniais magnetais, antruoju atveju – krumpliastiebis neturi nuolatinio magneto ar žadinančios apvijos. Panaudojus abiejų tipų savybės sukurtas reaktyvusis variklis. Reaktyviuosiuose žingsniniuose varikliuose panaudojama tangentinė elektromagnetinės jėgos dedamoji, atsirandanti tarp krumpliastiebio ir slenkamojo elemento dantų dėl iškraipyto magnetinio lauko linijų [29]. Ši dedamoji pastumia slenkamąjį elementą į mažiausios magnetinės varžos padėtį.

3.1.1. Žingsninių variklių raida

Linijinių elektros variklių istorija prasidėjo nuo 1840-ųjų, kai Karlas Vatsonas (Charles Wheatstone) Jungtinėje Karalystėje, Londone, sukūrė tiesiaeigio variklio teorinį modelį, bet šis modelis, jo manymu, buvo neefektyvus ir nenaudingas [1]. 1905 m. K. Vatsano mintimi toliau pasinaudojo amerikiečių mokslininkas – išradėjas Alfredas Zeidenas (Alfred Zehden), pasiūlęs linijinę pavarą panaudoti traukiniams ar keltuvas, bet jo žinios irgi buvo tik teorinės. Vokietijos inžinierius Hermanas Kemperas (Hermann Kemper) pristatė dirbtinį modelį 1935 m. [2], o 1940-ųjų m. pabaigoje Anglijos profesorius Erikas Laitvaitas (Eric Laithwaite) įgyvendino pirmąjį veikiantį tiesiaeigio variklio modelį. Jo projektas yra pagrįstas judančiu linijiniu magnetiniu lauku, kurį sukuria laidininkais tekanti srovė. Ritėse tekanti srovė indukuoja elektrovarą taip sukurdama elektromagnetinį srautą. Srautas užsidaręs per oro tarpą antriniame elemente sukuria sroves, kurių elektromagnetinis srautas yra priešingas statoriaus elektromagnetiniam laukui. Du esantys priešingi laukai vienas kitą stumia ir neša slenkamąjį elementą į priekį judančio magnetinio lauko kryptimi [3].

Dar apie 20 metų prireikė, kad atsirastų noras tobulinti, gaminti tiesiaeigius variklius ir išryškinti jų teigiamas savybes. Kuriant tiesiaeiges pavaras buvo įrodyta, kad tokios sistemos su tiesiaeigiais sinchroniniais varikliais dažnai veikia ekonomiškiau negu hidraulinės arba elektromechaninės.



3 pav. Rotorinio variklio pjūvis – linijinis variklis

TŽV yra ne kas kita, kaip perpjautas ir ištiestas žingsninis variklis (žr. 3 pav.). Jo statorius yra pagrindas, kuriuo keliauja slenkamasis elementas kartu pernešdamas objektą nuo taško A į tašką B. Slenkamajame elemente sumontuotos apvijos. Statorius yra laidininkas sudarytas iš *n* kiekio dantų. Nuo dantų skaičiaus priklauso, kokiu tikslumu variklio judamasis elementas judės.

Kiekvienas technologinis procesas kelia savitus reikalavimus tiesiaeigei elektromechaninei sistemai, kadangi tiesiaeigio variklio energetinės charakteristikos prastesnės negu sukiojo. Tiesiaeigės elektromechaninės sistemos pranašumai įžvelgiami, jeigu ji yra projektuojama konkrečiam įrenginiui ir tampa neatsiejama jo dalimi. Remiantis eksperimentais pabrėžiama, kad

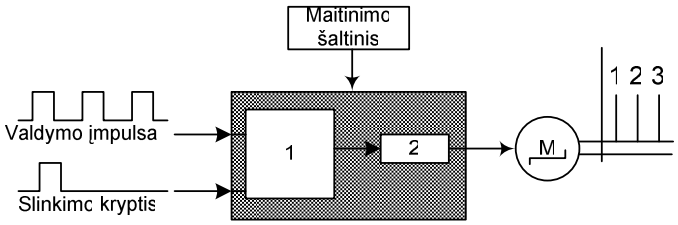
dinaminės tiesiaeigės pavaros savybės visada būna geresnės, negu rotorinės, nes tiesiaeigės pavaros judančių dalių inercija yra mažesnė už rotorinės pavaros besisukančių dalių inerciją. Be to, tiesiaeigės pavaros neturi reduktorių, todėl sistemoje išvengiamas nepageidaujamas laisvumas. Kadangi tiesiaeigė pavara turi mažiau mechaninių grandžių, todėl ji ne tokia tampri kaip sukioji. Dėl šių savybių tiesiaeigių pavarų dinaminiai rodikliai yra geresni [5].

Tiesiaeigiai varikliai plačiai naudojami gamybinėse staklėse, puslaidininkių elektronikos elementų gamyboje, spausdintuvuose, robotuose ir kituose prietaisuose, kur būtinas didelis greitis ir tikslumas. Taip pat galima paminėti jau sukurtus ir sparčiai tobulinamus transportavimo įrenginius, kurie pasiekia didelį greitį, yra ekonomiški ir ekologiški. Šie varikliai perspektyvūs.

Žingsninis variklis yra vienas iš sistemos dalių. Jo neužtenka prijungti prie maitinimo šaltinio, kad reikiamai funkcionuotų.

3.1.2. Žingsninių variklių struktūra

Nuolatinės srovės variklius valdyti paprasta, tereikia prijungti su valdymo raktu prie nuolatinės srovės šaltinio variklio apviją. Žingsninių variklių struktūra sudėtingesnė, tokie varikliai dažniausiai turi nemažiau trijų apvijų, kurias būtina nepriklausomai viena nuo kitos valdyti. Tiesiaeigės žingsninės pavaros struktūrinė schema pateikta 4 pav.



4 pav. Žingsninės pavaros struktūrinė schema

Pavaros struktūrą sudaro: maitinimo šaltinis, elektroninis valdymo įtaisas su logine (1) ir galios (2) pakopomis (žr. 4 pav.). Loginėje dalyje formuojami įėjimo impulsai (žingsninė programa), pageidaujama slydimo kryptis ir darbo režimas galios daliai valdyti. Galios pakopa maitina žingsninio variklio fazines apvijas ir paleidžia pageidaujamą darbo programą (įėjimo impulsų seką). Paminėtina, kad valdymo ir galios elektronika kartu su žingsniniu varikliu praktiškai sudaro vieną įtaisą, kurio dalys turi būti tarpusavyje elektriškai ir mechaniškai suderintos [4].

Visi žingsniniai varikliai pagal konstrukciją yra skirstomi [25]:

- žingsniniai varikliai su nuolatiniais magnetais;
- hibridiniai žingsniniai varikliai;
- reaktyvieji žingsniniai varikliai.

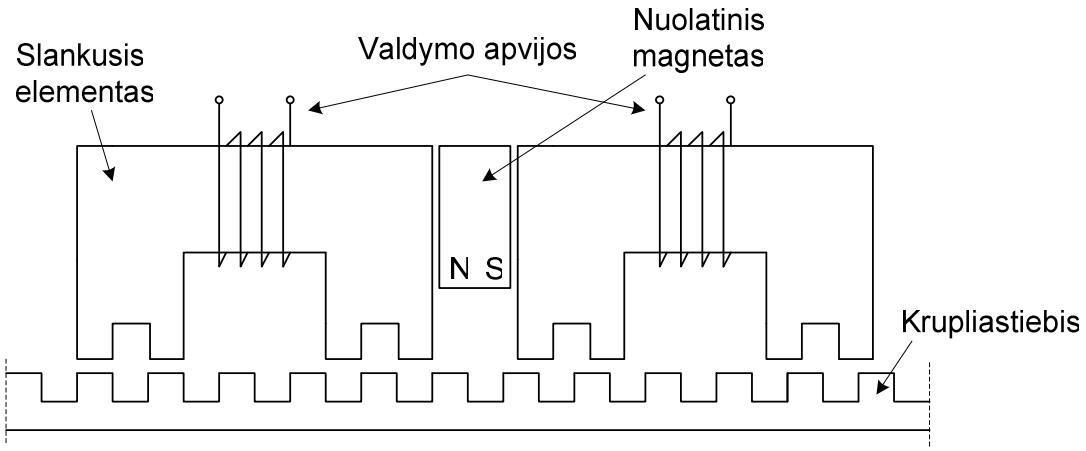
Reaktyvieji žingsniniai varikliai neturi nuolatinio magneto nei rotoriuje (judamajame elemente), nei statoriuje (krumpliastiebyje).

Varikliai su nuolatiniais magnetais turi krumpliastiebyje nuolatinius magnetus.

Hibridiniai varikliai apima abejus tipus. Nuolatinis magnetas skirtas sukimosi momentui pagerinti. Hibridinio variklio statorius nuo reaktyviojo statoriaus skiriasi tuo, kad dvi skirtingų fazių ritės suvyniotos ant vieno poliaus. Šis variklis turi būdingus privalumus tiek reaktyviųjų žingsninių variklių, tiek variklių su nuolatiniais magnetais.

3.1.3. Klasikinis hibridinis žingsninis variklis

Tiesiaeigiai hibridiniai žingsniniai varikliai dar kitaip gali būti vadinami varikliai su nuolatiniais magnetais. Jie turi visus privalumus, būdingus tiek reaktyviesiems žingsniniams varikliams, tiek varikliams su nuolatiniais magnetais [4]. Hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio struktūra pateikta 5 pav.



5 pav. Hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio struktūra

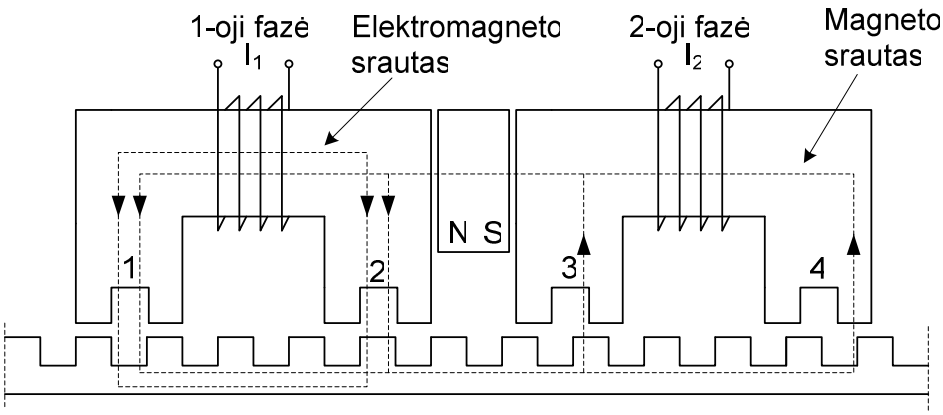
Hibridinis linijinis variklis yra sudarytas iš dviejų kintamosios magnetinės varžos fazių ir nuolatinio magneto judamajame elemente (žr. 5 pav.). Jo reikšmė yra labai svarbi kuriant magnetinį srautą. Atskiras judamasis elementas yra pakabintas virš nejudamo krumpliastiebio. Krumpliastiebis pagamintas iš laidžios medžiagos, kurios savitoji magnetinė varža yra maža. Jo paviršiuje yra vienodo žingsnio dantys. Tarpas tarp dantų apskaičiuojamas atsižvelgiant į judesio tikslumą ir statoriaus su slenkamuoju elementu sąveiką, kad susidarytų tinkamas slydimas. Dantys paprastai yra apie 0,3 – 1,5 mm pločio [6].

Judamąją dalį sudaro du elektromagnetai, kurie turi valdymo apvijas ir stiprų nuolatinį magnetą atskirianti fazes (šališkumo šaltinis). Kiekvieno elektromagneto polių galai yra dantyti ir

turi tą patį dantų žingsnį kaip ir krumpliastiebio, kad sukurtų tinkamą magnetinį srautą. Atstumas tarp abiejų polių dantų lygus pusei griovelio žingsnio $\tau_N / 2$, o tarp abiejų šerdžių - $\tau_N / 4$, kad tiktai vienas polius laiku galėtų sąveikauti su statoriumi [4].

Hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio veikimas pagrįstas kintamosios magnetinės varžos ir nuolatinio magneto sąryšio principu. Kai valdoma ritė yra prijungta prie nuolatinės srovės šaltinio, tai išplaukiantis magnetinis srautas yra linkęs sustiprinti srautą pastoviame vieno poliaus elektromagnete ir panaikinti jį kitame. Atrankos būdu taikant srovės impulsus dviem valdymo ritėms, galima sukoncentruoti srautą bet kuriame iš polių. Polis, gaunantis didžiausią srauto koncentraciją, pabandys išrikiuoti į eilę savo dantis su krumpliastiebio dantimis, kurdamas postūmį, kad sumažintų orinį tarpą magnetinei energijai, t. y. jėga atsiranda dėl magnetinės energijos oro tarpe kitimo, o dėl to susidaro skirtingas magnetinis laidumas. Sukurti vieno danties intervalo judesiui reikalini keturi žingsniai [5].

Hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio magnetinių srautų linijos, kai pirma fazinė apvija prijungta prie nuolatinės įtampos šaltinio, pavaizduotos 6 pav.



6 pav. Hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio magnetiniai srautai

Hibridinis tiesiaeigis žingsninis variklis turi ir minusų, kadangi elektromagnetai nėra visiškai nepriklausomi, magnetinis srautas, pagamintas valdančių ričių srovių, sukelia išmagnetinimo pavojų per nuolatinį magnetą. Bet kokioje padėtyje vienas iš polių kuria reikšmingą stabdymo jėgą, mažindamas visiško išmagnetinimo pasekmes [6]. Magnetinis srautas, einantis tarp judamojo elemento ir krumpliastiebio, sukuria labai stiprią slenkamojo postūmio trauką tarp judamo elemento ir krumpliastiebio. Ši traukos jėga, kuri galioja visiems poliams, yra daugiau kaip 10 kartų didesnė už variklio valdymo jėgą, kuri reikalinga, kad sistema palaikytų tikslų oro trapą tarp krumpliastiebio ir judamosios dalies. Didžiausias traukos postūmis yra sukuriamas to poliaus, kuris

pagamino postūmio jėgą (poslinkis vyksta į tą pusę, kurioje dantys išrikiuoti su krumpliastiebio dantimis prieš einamojo žingsnio pradžią) [6].

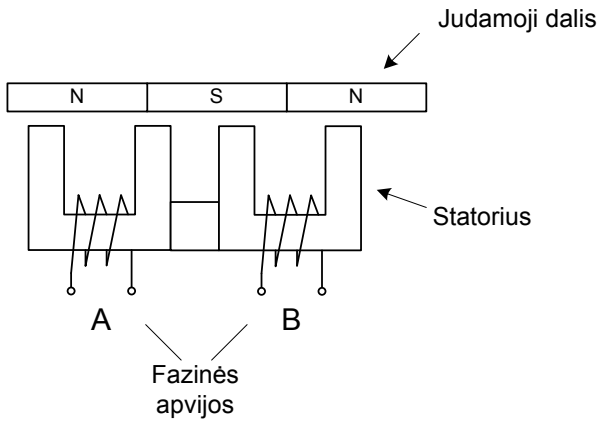
Magnetinių srautų linijos pavaizduotos 6 paveiksle. Jie TŽV egzistuoja dviejų tipų. Poslinkio jėgą sukuria pirmos fazės elektromagneto srautas, o nuolatinio magneto sukurtas magnetinis laukas neleidžia sistemai išsimagnetinti.

Magnetiniam srautui pagerinti per oro tarpus naudojamas iš nuolatinių magnetų sudarytas krumpliastiebis (judamoji dalis). Šio tipo varikis aprašytas kitame skyriuje.

3.1.4. Žingsninis variklis su nuolatiniu magnetu

TŽV su nuolatiniu magnetu judamoje dalyje yra naudojamas sistemose, kuriose nėra aktualus didelis atstumas. Šio tipo variklis turi didesnę traukos jėgą, negu prieš tai nagrinėtas hibridinis TŽV.

Tiesiaeigis žingsninis variklis su nuolatiniu magnetu pateiktas 7 pav.



7 pav. Tiesiaeigis žingsninis variklis su nuolatiniu magnetu

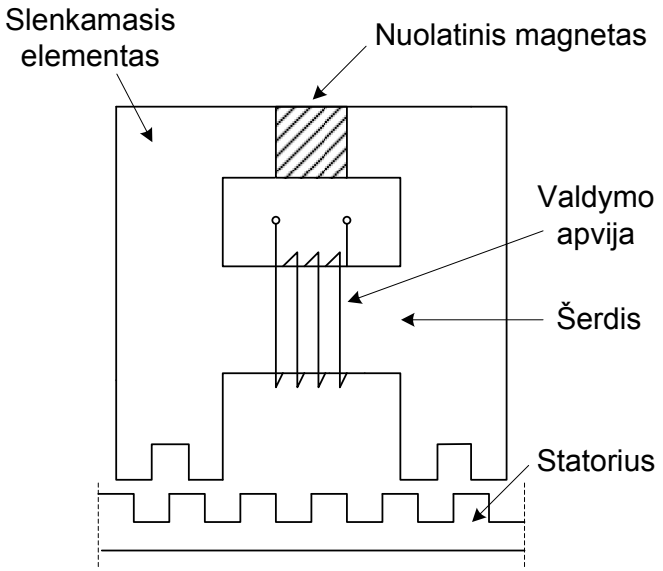
Dažniausiai žingsninį variklį su nuolatiniu magnetu sudaro nuolatinis magnetas, esantis judamajame elemente (žr. 7 pav.), kur vietoje įprastų dantų yra skirtingi nuolatinio magneto poliai.

Įjungus maitinimą B fazėje, apvijomis pradeda tekėti srovė. Srovės tekėjimo kryptis lemia slenkamojo elemento judėjimo kryptį. Judesys gaunamas statoriaus polių galuose sukuriant skirtingą poliškumą [11].

Tiesiaeigis žingsninis variklis su nuolatiniu magnetu valdomas dvikrypte valdymo grandine.

3.1.5. Modulinis hibridinis tiesiaeigis žingsninis variklis

Modulinis hibridinis linijinis žingsninis variklis turi iš esmės tą pačią konstrukcinę technologiją kaip ir klasikinė elektromagnetinė mašina, skirtumas tik tas, kad ji turi nuolatinius magnetus, įmontuotus į judamąjį elementą.



8 pav. Modulinio hibridinio tiesiaeigio žingsninio variklio modelis

Šio variklio judamąjį elementą sudaro keli nepriklausomi moduliai. Kaip pavaizduota 8 pav., yra galimybė panaudoti skirtingus modulių srautus. Kiekvienas judantis modulis turi po du polius: nuolatinio magneto sužadinimo šaltinį ir valdymo ritę. Valdymo ritė yra užvyniota ant pagrindinės šerdies lygiagrečiai nuolatiniam magnetui. Šie du modulio poliai yra atskirti oro tarpo. Slenkamojo elemento polių galų dantys nesutampa su krumpliastiebio dantimis. Pvz.: jeigu vieno poliaus dantys lygiuoja su statoriaus dantimi, tai kito polio dantys yra persislinkę iki pusės statoriaus danties.

Tokie inžineriniai projektavimo sprendimai yra pagrįsti keliais santykiais, siekiant iš supaprastinto analizinio variklio modelio, turint tam tikrą baigtinį kintamąjį skaičių, gauti geresnes variklio charakteristikas. Dviejų jautriausių modulio komponentų dydžiai (nuolatinis magnetas ir elektromagnetinės ritės šerdis) yra apskaičiuotos labai tiksliai. Būtina pabrėžti, kad nuolatinio magneto parinkimas yra labai svarbus. Jį parenkant būtina atkreipti dėmesį į didelius temperatūros pokyčius. Ankščiau minėta ritės šerdies paskirtis – uždaryti magnetinio srauto kelią. Jei valdymo ritėje neteka valdymo srovė, ji magnetinį srautą per oro tarpą sumažina iki minimumo [6]. Jeigu ši dalis yra tinkamai suprojektuota, tai nėra jokio pavojaus varikliui išsimagnetinti. Taip pat valdymo ritė gali būti panaudota apsaugant nuolatinį magnetą nuo išsimagnetinimo efekto.

3.1.6. Cilindrinis reaktyvusis tiesiaeigis žingsninis variklis

Cilindrinis reaktyvus TŽV nuo rotorinio variklio skiriasi tik savo konstrukcijos tipu, jis yra ištiesintas. Tokiuose varikliuose slinkimo jėgai sudaryti reikalingas skirtingas magnetinis laidis. Jis sukuriamas slenkamajame elemente (krumpliastiebyje) suformuojant dantis.

Kaip ir anksčiau buvo minėta, reaktyvieji varikliai nuo kitų tipų skiriasi tuo, kad neturi nuolatinių magnetų ir žadinimo apvijų.

Cilindrinį reaktyvųjį TŽV sudaro cilindras, kuriame sumontuotos fazinės apvijos, o viduryje slankioja dantytas strypas (krumpliastiebis). Dantukai yra ištekinti lyg žiedai.

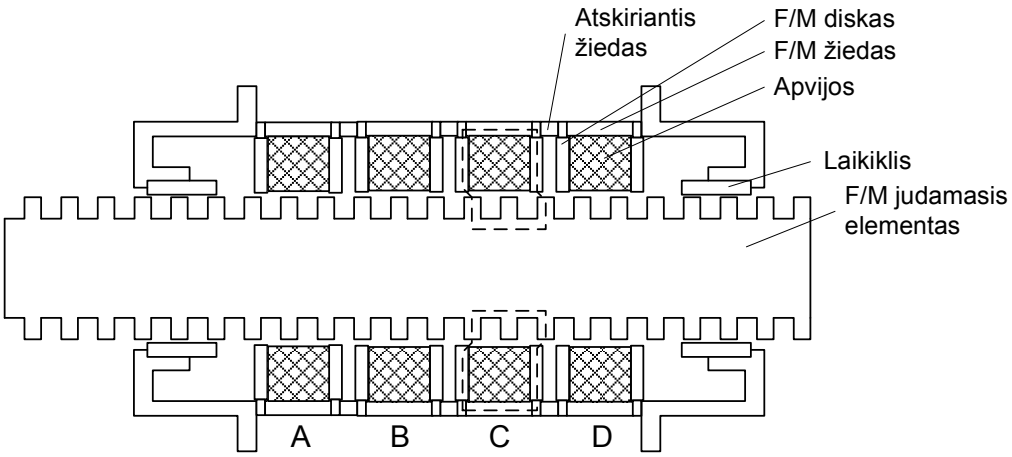
Cilindrinio reaktyviojo TŽV magnetinis kontūras gali būti išdėstytas kaip išilginis ir skersinis pagal projekcijos padėtį (Išilginis tipas yra pranašesnis savo mechaniniu tvirtumu). Judesio priežastis yra tiesiogiai nesusijusių jėgų sąveika. Statoriaus sužadinta apvija pritraukia krumpliastiebio dantį, taip sumažindama minimaliai magnetinę varžą. Skirtingai nuo rotorinių variklių, kurių pagrindinė traukos jėga tarp statoriaus ir rotoriaus polių yra orientuota į neutralią padėtį. Cilindrinio reaktyviojo TŽV jėgų vektoriai nukreipti tarp priešingų statoriaus ir rotoriaus polių porų. Tiesiaeigiame variklyje jėga suformuojama silpnesnė, nes dėl tarpų atsiranda didesnė magnetinė varža. Taip pat yra sudėtinga išlaikyti krumpliastiebį pastovioje padėtyje ir tai gali būti rimtų mechaninių gedimų priežastis. Tokie varikliai dažniausiai taikomi esant mažam greičiui. Krumpliastiebyje susidaro silpnos sūkurinės srovės, todėl jis negali būti gaminamas iš sluoksniuoto plieno lakštų.

Cilindriniai reaktyvieji TŽV yra daug pranašesni, palyginti su rotoriniais:

- nuslopina pašalines jėgas (t.y. sudaromas mažesnis oro trapas, todėl geriau panaudojama aktyvioji medžiaga);
- daug paprastesnė konstrukcija;
- autonominės ritės;
- nesudėtingas ir labai tikslus montavimas.

Tačiau cilindrinį reaktyvųjį TŽV lyginant su reaktyviuoju TŽV, jo konstrukcija yra sudėtingesnė, be to cilindriniame reaktyviajame TŽV neefektyviai panaudojamos jėgos dėl blogo magnetinio srauto [7].

Elektromechaninio, neįprastos konstrukcijos, cilindrinio reaktyviojo TŽV išilginis pjūvis pavaizduotas 9 pav.



9 pav. 4 fazių cilindrinio reaktyvaus tiesiaeigio žingsninio variklio pjūvis

Vidinė dalis paprastai yra judamasis komponentas, kuris pagamintas iš feromagnetinio cilindro su skersinėmis įpjovomis – dantimis (žr. 9 pav.). Išorinė dalis, paprastai statorius (nejudamasis komponentas) susideda iš:

1) identiškų atskirtų fazės komplektų be magnetinių žiedinių tarpų;
2) dviejų nemagnetinių galinių skydų su laikikliais.

Kiekvieną fazės komplektą sudaro branduolys ir solenoidinės ritės, t.y. cilindrinės formos fazinė apvija. Branduolys suformuotas iš dviejų diskų, atskirtų feromagnetinių žiedų.

Įjungus maitinimą C fazei (žr. 9 pav.). Fazės apvija pradeda tekėti srovė, kuri sukuria magnetovarą (žr. 9 pav., pavaizduota brūkšnine linija). Magnetinis srautas nepriklauso nuo šalia esančių fazinių apvijų, jis užsidaro per judamojo elemento dantis. Judamasis elementas (krumpliastiebis) pasislenka ir surikiuoja savo dantis su statoriaus dantimis toje pusėje, kurioje magnetinė varža yra mažiausia, t.y. jėgos kryptis priklauso nuo ženklo magnetinio srauto išvestinės pagal kelią dL/dx. Svarbu yra tai, kad krumpliastiebį magnetinis srautas veikia iš visų pusių. Tokia konstrukcija sukuria didesnę jėgą ir galimas didesnis valdymo lankstumas. Be to, dėl tokių nepriklausomų fazių statorius gali turėti modulinę konstrukciją (t.y. lengviau išplečiamas) [10].

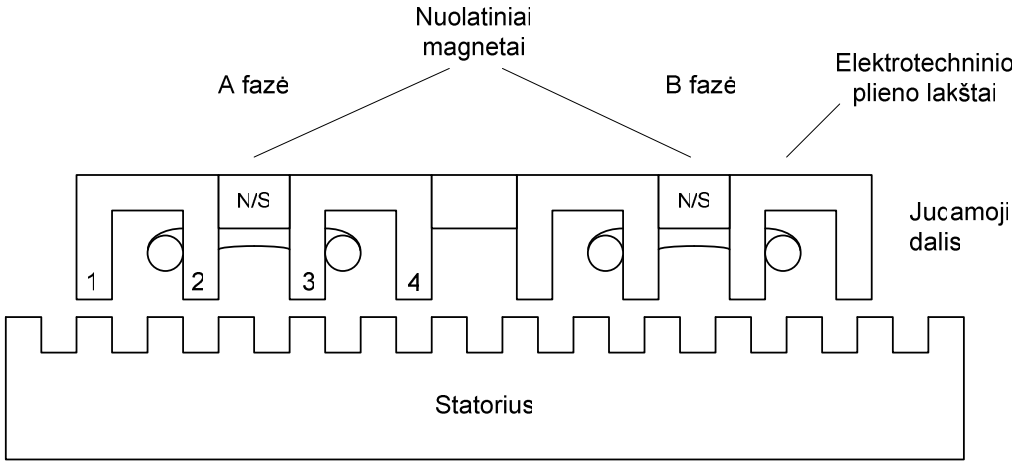
Jėga nėra priklausoma nuo elektros srovės tekėjimo krypties, todėl galima supaprastinti fazių kontūrų perjungimą.

Žingsniniai varikliai dėl didelio tikslumo ir savikontrolės, kai nėra grįžtamojo ryšio, yra panašesni už kito tipo variklius. Kiekvienai fazei atskirai ir nuosekliai suformuojamas nuolatinės įtampos impulsas. Nuo impulso dažnio priklauso tokio variklio judėjimo greitis, tolydumas.

3.1.7. Tiesiaeigis žingsninis variklis su nuolatiniu magnetu

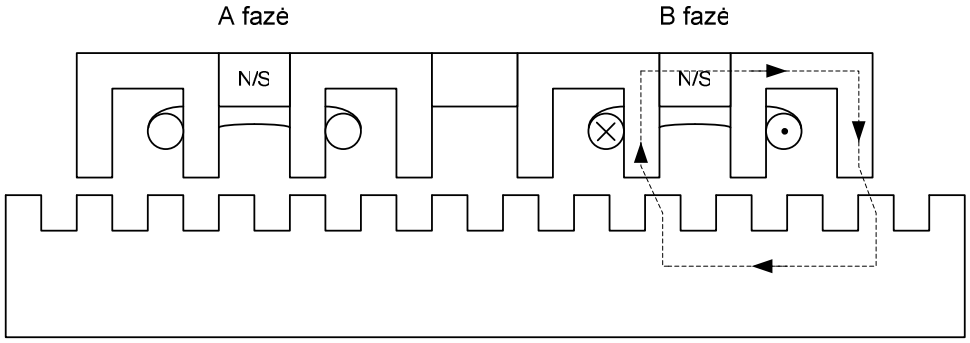
TŽV su nuolatiniais magnetais buvo sukurtas remiantis patirtimi projektuojant ir kuriant įvairius linijinius ir rotorinius žingsninius variklius. Panaudojus kompiuterinius programinius paketus buvo atrastas magnetinio lauko optimaliausias tankis [18]. Iš išvadų nuspręsta, kad tarp ritės elektromagnetinių plieno lakštų ir apvijos įterptas nuolatinis magnetas pagerina magnetinio lauko srautų linijų tankį. Kaip ir anksčiau minėtame moduliniame hibridiniame TŽV nuolatinis magnetas taip pat neleidžia varikliui visiškai išsimagnetinti.

Slenkamasis elementas sudarytas iš dviejų fazinių ričių, kurios elektriškai nesusijusios viena su kita. Vieną fazę sudaro du C tipo elektrotechninio plieno lakštų rinkiniai, tarp kurių įterptas nuolatinis magnetas ir ant vidinių C tipo dantų užvyniota valdymo apvija.



10 pav. Dvifazio tiesiaeigio žingsninio variklio pjūvis

Šios konstrukcijos TŽV pagrindą sudaro nuolatiniai magnetai sumontuoti judamoje dalyje (žr. 10 pav.). Viena fazė turi keturis dantis. Jeigu magnetinis srautas prasidėjo A fazės 1 dantyje, tai per statorių užsidaręs, jis grįš per 3 dantį. Atitinkamai, tekant priešingo poliškumo srovei, magnetinis laukas, prasidėjęs 4, užsidarys ir grįš per 2 dantį.



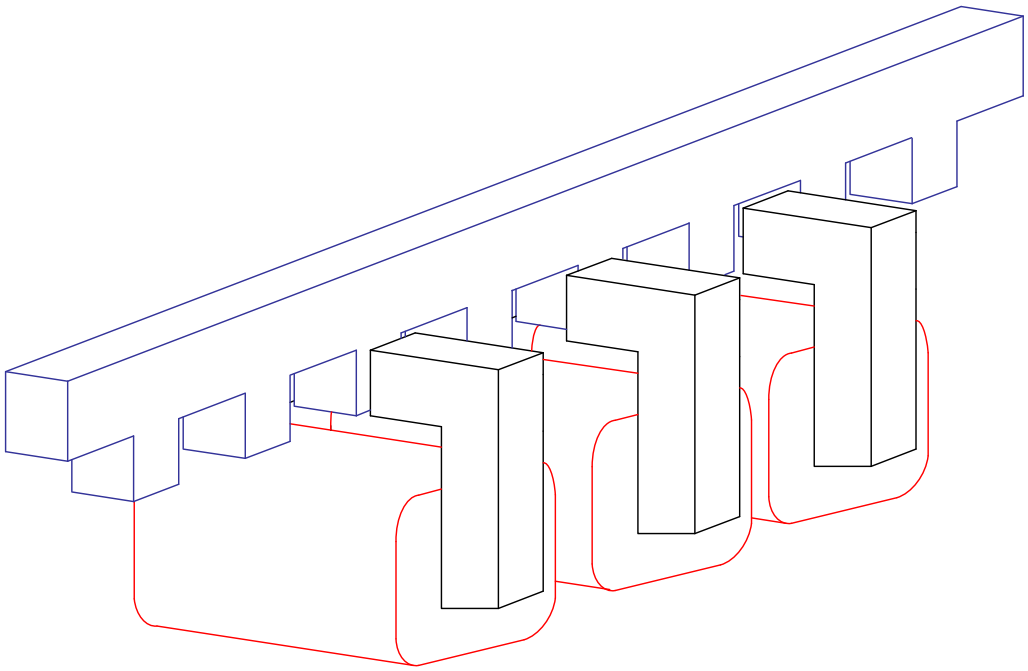
11 pav. Dvifazio tiesiaeigio žingsninio variklio magnetinio srauto linijos

Įjungus maitinimą B fazei, judamoji dalis pasislenka iš kairės į dešinę (žr. 11 pav.). Paveiksle pažymėtas pagrindinis srautas, kuris sukuria judesį.

3.1.8. Tiriamasis tiesiaeigis žingsninis variklis

Tiriamo variklio konstrukcija labai paprasta. Jį sudaro, kaip ir kitų TŽV, minėtos pagrindinės dalys: slenkamasis elementas ir krumpliastiebis. Slenkamasis elementas – tai trys C pavidalo magnetolaidžiai su oro tarpu, ant kurių užvyniotos fazinės apvijos. Ir visų žingsninių variklių, ir klasikinio variklio apvijos maitinamos iš nuolatinės srovės šaltinio.

Tiriamo tiesiaeigio žingsninio variklio modelis pavaizduotas 12 pav.



12 pav. Tiriamasis tiesiaeigis žingsninis variklis

Pirminė dalis – slenkamasis elementas, o antrinė dalis – krumpliastiebis (žr. 12 pav.). Krumpliastiebis pagamintas iš feromagnetinės medžiagos su dideliu skaičiumi, kurių vienodas žingsnis, dantų. Šie dantys slinkdami patenka į magnetolaidžių oro tarpus, taip užpildydami oro tarpą tarp elektromagnetinio lauko skirtingų polių. Dantų ir magnetolaidžių polių žingsnis yra nevienodas.

Pagrindiniai tiriamo tiesiaeigio žingsninio variklio turi daug privalumų:

- paprasta konstrukcija;

- maža gedimų tikimybė, dėl paprastos konstrukcijos ir koncentruotos žadinimo apvijos;
- nedideli galios nuostoliai antriniame elemente (neviršija plieno nuostolių);
- maža paleidimo srovė (neviršija dvigubos nominaliosios variklio srovės);
- gali dirbti sinchroniniu, asinchroniniu ir diskrečiuoju (žingsniniu) darbo režimu;
- pasižymi paprastu paleidimu, reversavimu ir stabdymu;
- naudinga traukos jėga, tenkanti poliaus ploto vienetui, apie dešimt kartų didesnė nei įprastų tiesiaeigių asinchroninių variklių.

Šiame skyriuje pateikiami įvairių tipų TŽV, bet pagrindiniai yra reaktyvieji, su nuolatiniais magnetais ir hibridiniai tiesiaeigiai žingsniniai varikliai. Šių variklių pagrindinės dalys yra statorius ir judama dalis. Judama dalis sudaryta iš elektromagnetų, kurie gali būti atskirti nuolatiniais magnetais. Elektromagnetų polių galai turi dantytą paviršių. Statoriaus paviršius taip pat sudarytas iš rinkinio dantų, kurių žingsnis nesutampa su judamos dalies polių žingsniu.

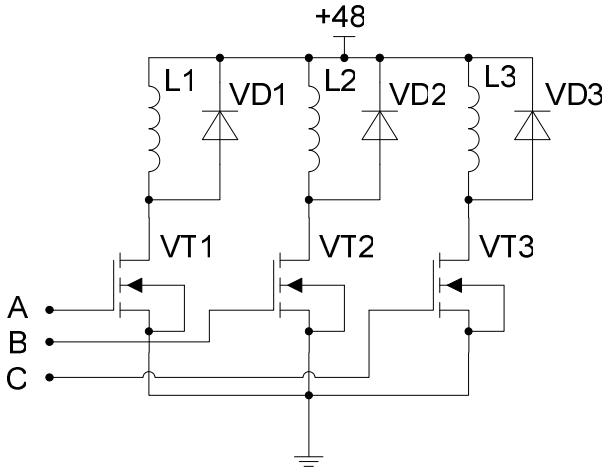
Tiriamas TŽV yra klasikinis reaktyvusis. Šiame variklyje nenaudojamas pagalbinis nuolatinis magnetas.

3.2. Tiesiaeigio žingsninio variklio valdymo sistemų apžvalga

Žingsnis varikis valdomas prijungiant slenkamojo elemento apvijas tam tikra tvarka prie nuolatinės srovės maitinimo šaltinio. Prijungimo tvarka gali būti įvairi. Norit sukurti didesnę slenkamąją jėgą ar tikslumą, prie maitinimo šaltinio prijungiamos kelios apvijos, bet tada būtina valdyti apvijomis tekančių srovių stiprį. Pagal vienu laiko momentu įjungtų variklio fazių skaičių variklis yra vienfazio, dvifazio arba daugiafazio maitinimo [4]. TŽV apvijos fazinėje ritėje suklotos pagal variklio valdymo tipą. Dažniausiai pasitaikantis apvijų išdėstymas yra cilindro forma, t.y. vijos susukamos vienu laidu keliais sluoksniais. Esant dvigubam apvijų maitinimui, jos suklojamas dvigubos. Tokio tipo varikliui nereikia sudėtingų valdymo grandinių norit jį paleisti į priekį ar atgal, t.y. sudaromas skirtingas poliaus poliškumas [14].

Reaktyvieji varikliai turi nuo 3 iki 5 atskirų apvijų, kurios suklotos vienoje fazėje. Tokios apvijos vadinamos daugialypėmis. Jos prie nuolatinės srovės šaltinio prijungiamos po viena tam tikra seka. Fazinių apvijų maitinimas gali būti įvairus, panaudojus puslaidininkinius prietaisus gaunamas vienkryptis, dvikryptis arba visos variklio fazės vienu metu prijungiamos prie skirtingos įtampos. Esant vienkryptei srovei, kiekvieno poliaus ritė dažniausiai turi iš vidurio taško išvestą kontaktą, todėl tokia fazinė apvija iš viso turi 6 prijungimo kontaktus. Dvikrypčiai srovei ji tiekiama į abi puses, bet ne vienu metu [14].

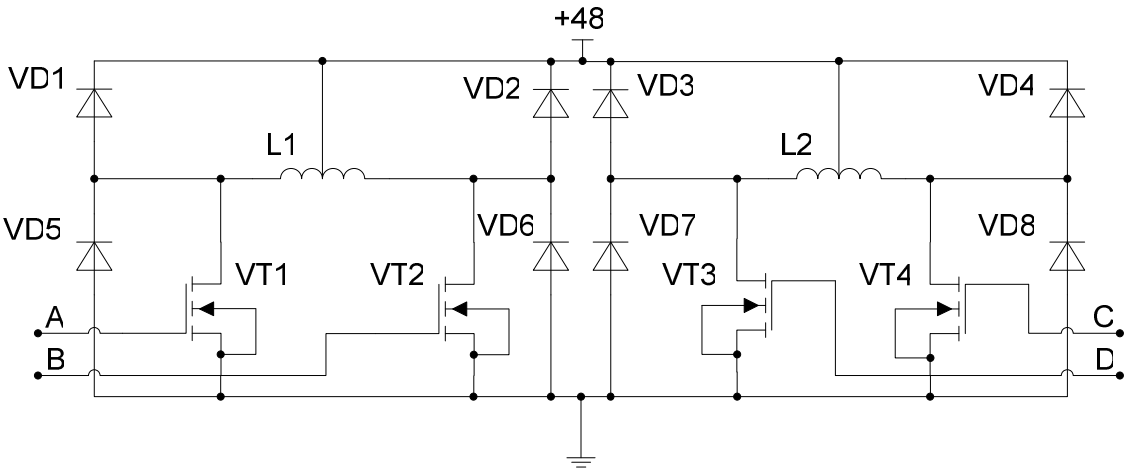
Reaktyviojo variklio vienkryptė valdymo grandinė pavaizduota 13 pav.



13 pav. Reaktyviojo variklio vienkryptė valdymo grandinė

Iš paveikslo (žr. 13 pav.) matyti, jog lygiagrečiai apvijai prijungtas apsauginis diodas. Įjungus fazinį maitinimą, srovė per apvijas įkrauna induktyviąją ritę, kuri kaupia energija. Uždarius valdymo tranzistorių, atjungimas fazinei apvijai maitinimas. Joje sukaupta energija gali sugadinti valdymo tranzistorių, jeigu valdymo grandinėje nėra prijungtas apsauginis diodas. Jo paskirtis – praleisti atgalinę srovę, kuri galėtų išsikrauta ritės aktyviojoje varžoje [13].

Vienpolio variklio valdymo grandinė pateikta 14 pav.

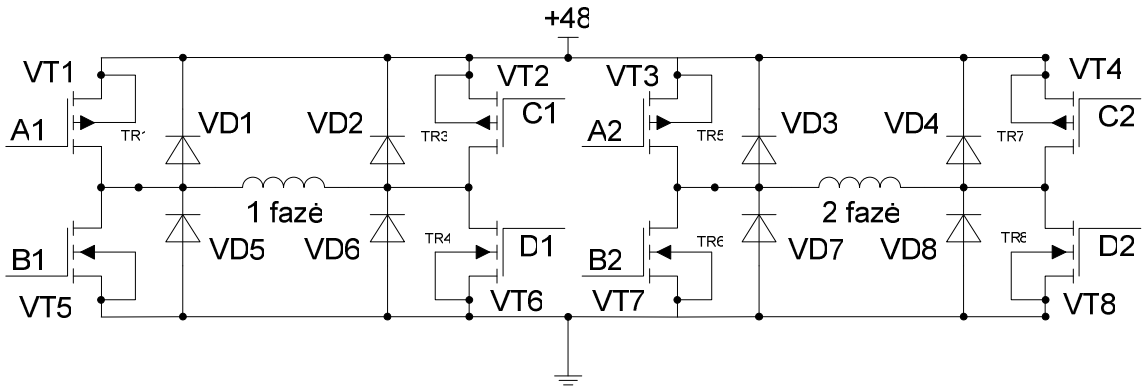


14 pav. Šešių konaktų valdymo grandinė. Vienkryptis maitinimas

Ji yra panaši į reaktyviojo variklio valdymo grandinę. Šešių kontaktų valdymo grandinėje papildomai pridėta po vieną diodą prie kiekvieno tranzistoriaus (žr. 14 pav.). Papildomi apsauginiai diodai reikalingi, nes prie vienpolio variklio fazinės apvijos centrinio išvesto kontakto yra

prijungtas maitinimo šaltinio neigiamas potencialas. Šis diodas neleidžia susidaryti aukštam įtampos kryčiui tranzistoriuje [13]. Naujuose puslaidininkiniuose tranzistoriuose šie diodai jau būna įdiegti viename korpuse kartu su tranzistoriumi. Toks sprendimas palengvina valdymo grandinių projektavimą.

Kistas valdymo grandinės tipas yra H tiltas, kuris pateiktas 15 pav.



15 pav. Dvikrypčio maitinimo valdymo grandinė

Dvikryptis valdymas yra pagrįstas H tilto principu (žr. 15 pav.). H tiltą sudaro keturi puslaidininkiai tranzistoriai su apsauginiais diodais. Didėjant polių skaičiui, keturgubai didėja ir tranzistorių skaičius. H tilto suformuotas taip, kad srovė fazine apvija galėtų tekėti visomis kryptimis. Tarkime, kad prie valdymo grandinės yra prijungtas dviejų fazių žingsninis variklis ir įjungti TR1 ir TR4 valdymo tranzistoriai, o TR2 ir TR3 išjungti. Tada srovė per fazine variklio apvija tekės iš kairės į dešinę. Priešingai sujungus tranzistorių poras (TR2 ir TR3 įjungti, o TR1 ir TR4 yra išjungti), srovė tekės iš dešinės į kairę [13].

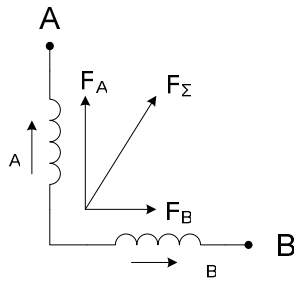
Dvikrypčio valdymo grandine sukuriamas stipresnis pilnutinis srautas, didesnis sukimo momentas ir didesnė laiko pastovioji. Jeigu vienkryptės ir dvikryptės valdymo grandinių apvijų tūris ir didžiausia leidžiamoji apvijų įšilimo temperatūra yra tokia pati, tai dvikrypčio valdymo grandinė sukuria didesnį momentą arba traukos jėgą tiesiaeigio žingsninio variklio. Varikliui dirbant dideliais greičiais, kuris turi didelį žingsnių skaičių, dvikryptės valdymo grandinės sukimo momentas susivienodina su vienkrypčio valdymo grandinės sukurtu momentu [14].

Variklio judėjimo kryptis priklausys nuo fazinių apvijų įjungimų sekos. Trifaziam TŽV galima suteikti judesį, jo fazines apvijas prijungiant prie maitinimo šaltinio tokia seka: 1→2→3→1→2→... ir t.t.

Pasinaudojus šiuolaikiniais elektros prietaisais yra galimybė žingsninius variklius valdyti trimis būdais:

1. Viso žingsnio režimas. Kad judamojo elemento lauko erdvinė padėtis kiekvieną žingsnį keistųsi vienodu poslinkiu *s*, būtinas vienodas judamojo elemento fazių, kuriomis teka srovė, skaičius. Maitinant atskirai kiekvieną statoriaus fazę, galima gauti *2·m·s* statoriaus lauko erdvinių padėčių. Paprasčiausiai viso žingsnio režimas gaunamas komutuojant vieną fazinę apviją.

2. Pusės žingsnio režimas. Pusės žingsnio režimas sukuriamas naudojant tokį judamojo elemento apvijų jungimą, kad suminis laukas pasislinktų puse žingsnio. Tam reikia keisti sužadintų judamojo elemento apvijų skaičių ir srovių kryptis jose: įjungus *n* apvijų iš *m·s*, pusės žingsnio režimui reikia ciklišKai perjungti *n-1* apvijų iš *m·s*.



16 pav. Dvifazio variklio mikrožingsnio režimas

Čia: A ir B – fazinių apvijų kontaktai;

i_A ir i_B - fazinėmis apvijomis tekančios srovės;

F_A ir F_B - fazinių apvijų kuriamos jėgos;

F_Σ - suminė jėga, kurios dedamosios yra F_A ir F_B jėgos.

3. Mikrožingsnio režimas. Esant viso ir pusės žingsnio režimams, fazinių srovių vertės buvo $+I_s$, $-I_s$ arba nulis. Tačiau šiuolaikinė elektronika leidžia sukurti bet kokias maitinimo įtampas, sroves ir magnetovaras. Jeigu fazinės srovės bus keičiamos taip, kad $i_A = I_s \cos\alpha_z ; i_B = I_s \cos\alpha_z$, tai suminės magnetovaros amplitudė bus pastovaus dydžio (žr. 16 pav.) Atsižvelgiant į norimą žingsnio poslinkį, reikia keisti ir srovių vertes. Tolydžiai keičiant sroves nustatytu dėsniu, judamojo elemento laukas bus grynai slenkamasis, o minimalus žingsnio poslinkis artės prie nulio.

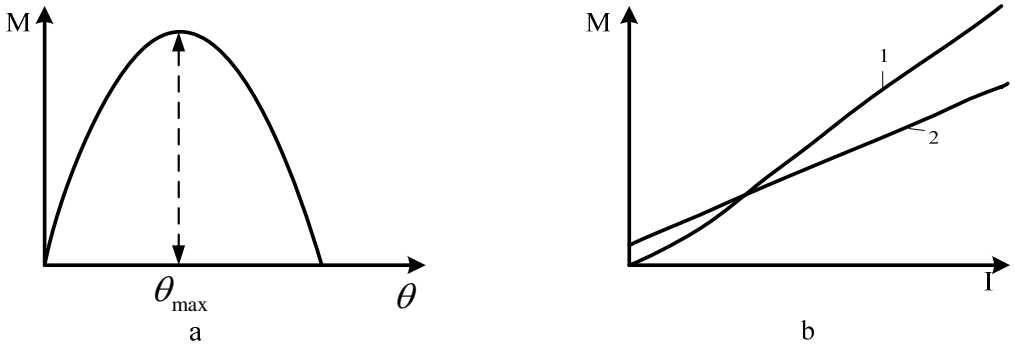
$$F_\Sigma = \sqrt{F_A^2 + F_B^2} \ . \qquad (1)$$

Pagal variklių tipus yra sukurtos ir valdymo elektros grandinės. Šiuo metu egzistuoja vienkrypčio ir dvikrypčio maitinimo elektros grandinės. Pagal vienu metu įjungtų variklio fazių skaičių variklis yra vienfazio, dvifazio arba daugiafazio maitinimo. Valdymo elektros grandinėje pagrindiniai elementai yra puslaidininkiniai tranzistoriai. Nuo atbulinių srovių tranzistorius saugo

apsauginiai diodai. Pagrindiniai variklio valdymo būdai yra trys: viso žingsnio, pusės žingsnio ir mikrožingsnio režimai.

3.3. Žingsninių variklių charakteristikos

Charakteristikų būna įvairių, jos apibūdina variklių galimybes įvairiais darbo režimais. Dažniausiai kataloguose pateikiamos statinės ir dinaminės charakteristikos. Žingsninių variklių statinė būsena sudaroma įjungus žadinimo srovę, kai rotorius užima fiksuotą padėtį statoriaus polių atžvilgiu. Šiai variklio būsenai apibūdinti vartojamos dvi statinės charakteristikos: $M = f(\theta)$ ir $M = f(I)$ [4]. Jos pateiktos 17 pav.



17 pav. Žingsninių variklių statinės charakteristikos

Čia: a – kampinė charakteristika;

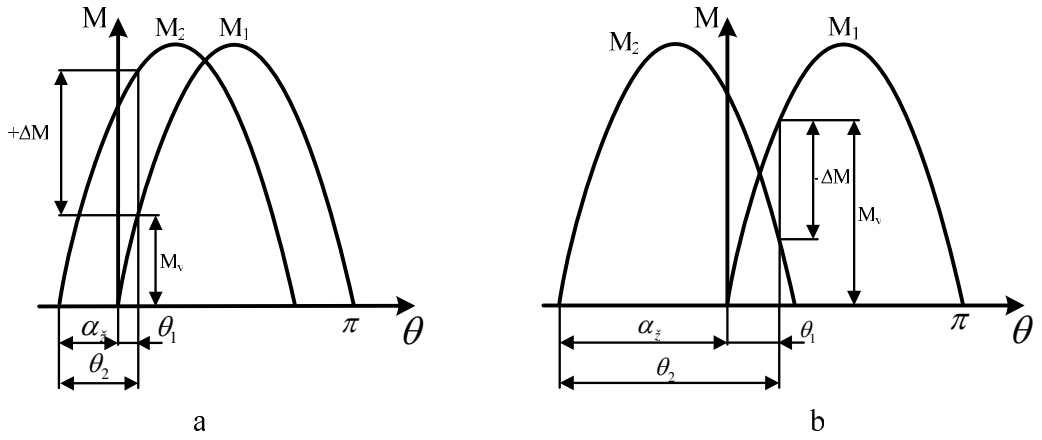
b – sukimo momento priklausomybė nuo srovės;

1 – keturfazis reaktyvusis variklis;

2 – hibridinis variklis.

Pirmoji $M = f(\theta)$ charakteristika vadinama kampine. Tai elektromagnetinio momento priklausomybė nuo posūkio kampo. Rotoriaus veleną veikianti išorinė apkrova (apkrovos momentas) sudaro jo kampinį poslinkį. Sukimo momento priklausomybė nuo rotoriaus posūkio kampo pateikta 17 pav. Didžiausias statinis momentas M_{max} atitinka posūkio kampą $\theta = \theta_{max}$ ir vadinamas palaikymo momentu. Jeigu kampinis poslinkis bus didesnis nei θ_{max}, tai statinis momentas veiks kitos fiksuotos padėties kryptimi. Palaikymo momentas nustatomas matuojant didžiausiąjį statinį momentą, kuris gali veikti sužadinto variklio veleną, kai rotorius nejuda [4].

Sukimo momento priklausomybė nuo žadinimo srovės pateikta 17 pav. b. Matyti, kad palaikymo momentas didėja stiprėjant srovei. 1-oji charakteristika atitinka keturfazį reaktyvųjį žingsninį variklį, kurio žingsnio kampas yra 1,8°, o 2-oji charakteristika – tokio paties kampo hibridinį variklį [4].



18 pav. Žingsninio variklio sinchronizacija

Čia: a – stabilus;

b – nestabilus darbas.

Žingsninio variklio veleną apkrovus tam tikro dydžio apkrovos momentu M_v (kurį atitinka apkrovos kampas θ_1) (žr. 18 pav. a dalis), perjungus maitinimą kitam poliui, statoriaus magnetovaros vektorius pasisuka žingsnio kampu $\alpha_ž$. Dėl to magnetovaros kreivės erdvinė padėtis pasikeičia žingsnio kampu $\alpha_ž$ ir pasidaro lygi $\theta_2 = \theta_1 + \alpha_ž$. Sinchronizavimo momento kreivės prieš perjungimą $M_1 = f(\theta)$ ir po perjungimo $M_2 = f(\theta)$ parodytos 18 pav. a. Sinchronizavimo momentas padidėja dydžiu $+\Delta M$.

Jeigu žingsnio kampas bus didelis (žr. 18 pav., b), tai darbo taškas atsidurs nestabilioje charakteristikos dalyje, variklis praras sinchroniškumą ir žingsnį. Toks darbas neleistinas diskrečiojo valdymo sistemose, nes yra susijęs su informacijos netektimi [4].

Kad variklis neprarastų žingsnių, tarp veleno momento ir didžiausiojo sinchronizavimo momento turi būti tokia priklausomybė:

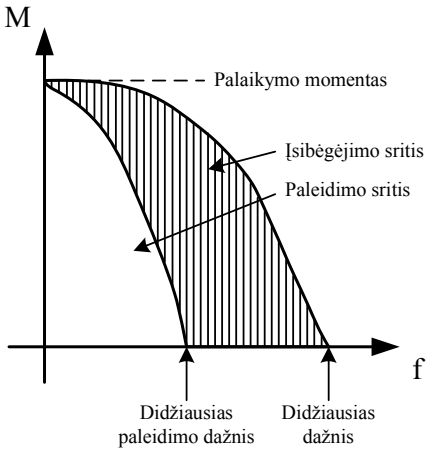
$$M_v < M_{\max} \cdot \cos(\pi/n); \qquad (2)$$

Čia: *n* – stabilių rotoriaus padėčių skaičius.

Kuo didesnis *n* arba kuo mažesnis žingsnio kampas $\alpha_ž$, tuo didesnis bus leidžiamasis apkrovos momentas, nes

$$\alpha_{ž} = \frac{2\pi}{n}. \qquad (3)$$

Apkrovos momento priklausomybė nuo komutavimo dažnio pateikta 19 pav.



19 pav. Apkrovos momento priklausomybė nuo komutavimo dažnio

Apkrovos momento priklausomybė nuo komutavimo dažnio (žr. 19 pav.) parodo, kokio dydžio veleno momentu galima apkrauti žingsninį variklį, kad esant tam tikram komutavimo dažniui jis galėtų dirbti neprarasdamas žingsnio [4].

Žingsninio variklio paleidimo sritis atitinka komutavimo dažnio diapazoną 0 – $f_{\max}$ (žr. 19 pav.). Šioje srityje, esant tam tikram apkrovos inercijos momentui ir pastoviam komutavimo dažniui, galima paleisti ir stabdyti variklį neprarandant žingsnio. Įsibėgėjęs variklis gali veikti greitėdamas ir neprarasdamas žingsnio, bet negali būti paleistas arba sustabdytas. Svarbiausia informacija yra charakteristika, parodanti, kad paleidimo momentas mažėja didėjant apkrovos inercijos momentui. Kita vertus, kuo didesnis komutavimo dažnis, tuo apkrovos inercijos momentas turi būti mažesnis [4].

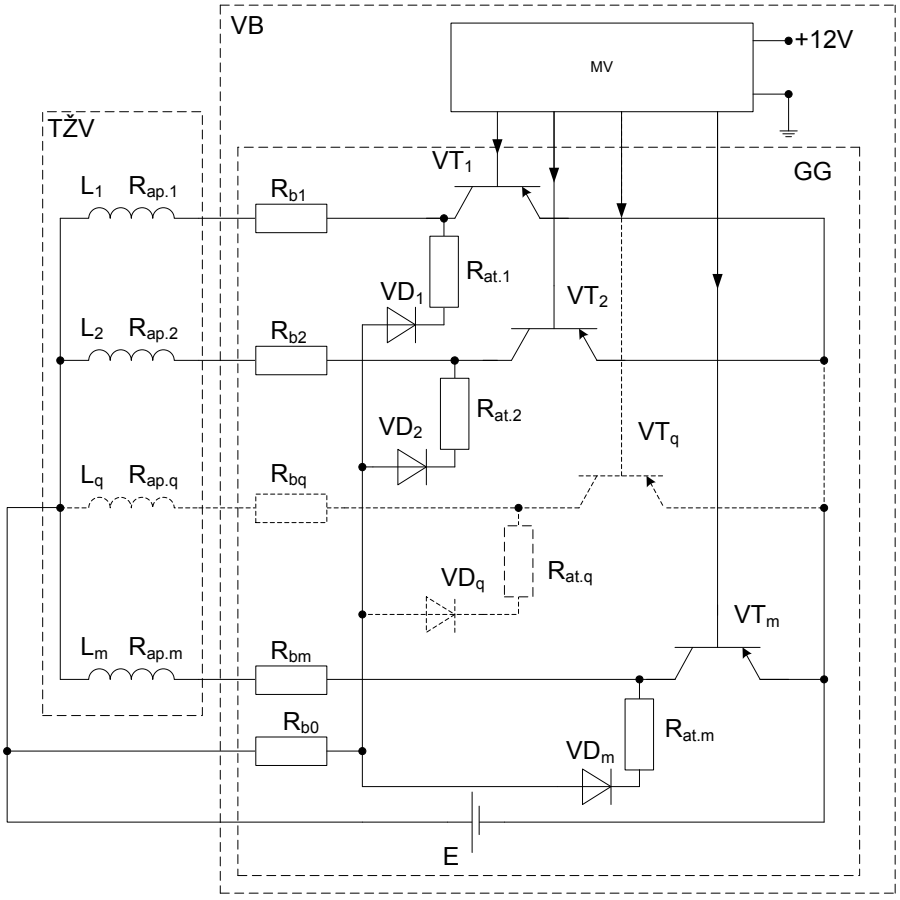
Žingsninio variklio sukimosi momentas priklauso nuo srovės, o palaikymo momentas didėja stiprėjant srovei. Jeigu darbo taškas atsiduria nestabilioje charakteristikos dalyje, variklis praras sinchroniškumą ir žingsnių seką. Nuo stabilių rotoriaus padėčių skaičiaus priklauso žingsnio kampas ir leidžiamas apkrovos momentas. Taigi, svarbiausia informaciją apie žingsninį variklį pateikia jo apkrovos momento charakteristika.

3.4. Matematinis modelis

Dinamines charakteristikas lemia elektromagnetiniai procesai. Šių procesų analizė suteikia galimybę įvertinti momento priklausomybę nuo apvijų prijungimo dažnio. Ištyrus elektromagnetinius procesus, galima nustatyti tokį fazinių apvijų komutavimo dažnį, kuriam esant variklio rotoriaus judesys priartėtų prie tolygaus judesio.

Toliau aptartos srovės ir elektromagnetinio momento priklausomybės nuo komutavimo dažnio.

Tyrimui naudojama principinė atstojamoji *m* - fazio žingsninio variklio valdymo grandinė, kuri pateikta 20 pav.



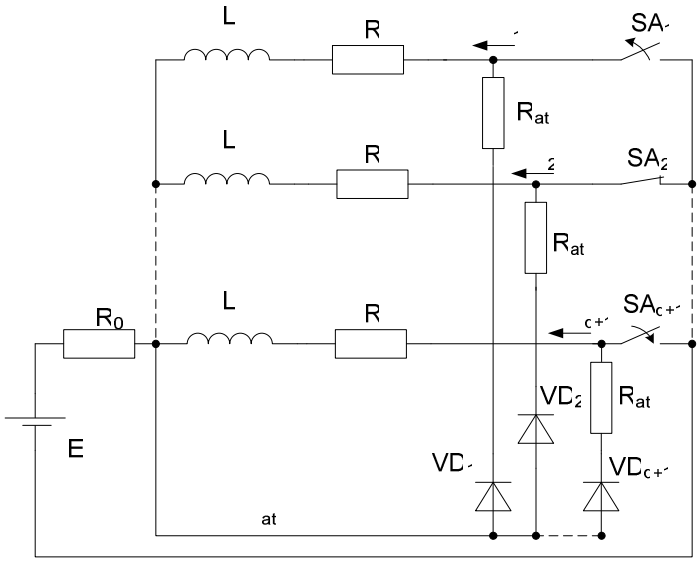
20 pav. Žingsninio variklio valdymo elektrinė grandinė

Fazinės apvijų srovės. Reaktyviojo žingsninio variklio (toliau – ŽV) valdymo schemą sudaro mikroprocesorinis valdiklis (toliau – MV), kuris valdo *m* – fazes reaktyviojo žingsninio variklio apvijas galios elementais - puslaidininkiniais tranzistoriais. Tranzistorių skaičius priklauso nuo ŽV apvijų skaičiaus. Kiekvienai apvijai yra prijungiamas atskiras puslaidininkinis stiprintuvas. MV siunčia valdymo impulsą tranzistoriui. Atsidaręs tranzistorius sujungia apviją su nuolatinės

srovės šaltiniu *U*. Mikroprocesorinis valdiklis užtikrina, kad bet kokiu laiko momentu prie maitinimo šaltinio būtų prijungta *q*-toji ŽV fazė apvija. Bendru atveju $1 \le q \le m$. Srovės impulsu priekinio ir atgalinio frontų pagerinimui, naudojamos forsuojančios balastinės aktyviosios varžos: $R_{b1} - R_{bm}$. Jos valdymo grandinėje jungiamos nuosekliai prie kiekvienos fazinės apvijos, o R_{b0} - prie neigiamo potencialo turinčio laido. Įtampos šuoliams sumažinti, kurie atsiranda puslaidininkiniame tranzistoriuje apvijos atjungimo momentu, lygiagrečiai apvijoms prijungiami apsauginiai diodai $VD_1 - VD_m$ su aktyviomis varžomis $R_{at1} - R_{atm}$. Šios aktyviosios varžos turi didelę įtaką pereinamiesiems ir nusistovėjusiems procesams. Taip pat šie procesai priklauso nuo variklio induktyvinių apvijų tipo ir sužadintų, vienu metu fazinių apvijų skaičiaus [7].

Toliau nagrinėjamas vykstančių elektromagnetinių procesų žingsniniuose varikliuose skaičiavimo metodas. Atliekant pereinamųjų procesų tyrimus, priimamos pagrindinės prielaidos, kurios leidžia supaprastinti atstojamą TŽV elektrinę principine schemą ir ją užrašyti analizinėje formoje:

1) induktyvinės fazinės apvijos koeficientas nepriklauso nuo kampo Θ ar poslinkio ir laiko, t.y. variklio judėjimo dėsnis neįtakoja elektromagnetinių procesų vykstant fazinės apvijos prijungimui prie maitinimo šaltinio;
2) neegzistuoja induktyvinis ryšys tarp fazinių apvijų;
3) apvijų prijungimai įvyksta akimirksniu;
4) nuolatinės srovės maitinimo šaltinio elektrovara pastovi $E = const$;
5) valdymo ir variklio elektros grandinė simetriška fazių atžvilgiu, t.y. $R_{ap.1} = R_{ap.m}$; $R_{b1} = R_{bm}$; $L_1 = L_m$.



21 pav. Tiesiaeigio žingsninio variklio principinė elektrinė schema

Atsižvelgiant į priimtas prielaidas galima supaprastinti schemą (žr. 21 pav.), kurioje $R_0 = R_{b0}$; $R = R_{ap.m} + R_{bm}$; $L = L_m$. Apvijos komutuojamos raktais $SA_1 - SA_m$. Tuo pačiu momentu prie maitinimo šaltinio prijungiama *q* fazė per laiką t_i tarp dviejų prijungimų. Laiko momentu $t = 0$ raktas SA_1 atjungia pirmąją apvijos fazę nuo maitinimo šaltinio, induktyvumas L_1 buvęs iki to momento prijungtas prie įtampos šaltinio laiko tarpu qt_i, išsikrauna į aktyviąją varžą R_{at}. Bet kuri n-toji fazinė apvija buvo aktyvi, pradedant nuo antrosios iki *q*-tos imtinai. Apvija buvo įjungta $(q-n+1)t_i$ laiko, o $t = 0$ momentu – atjungta. Tuo tarpu $(q+1)$ fazinė apvija prijungiama prie maitinimo šaltinio su SA_{q+1} valdymo raktu [7].

Įvertinus visas prielaidas, užrašoma diferencialinė įtampos lygtis apvijoms, kurios maitinamos iš nuolatinės įtampos šaltinio *U*:

$$i = i_2 + i_3 + ... + i_q + i_{q+1}; \tag{4}$$

$$U - iR = L\frac{di_2}{dt} + i_2R = L\frac{di_3}{dt} + i_3R = L\frac{di_{q+1}}{dt} + i_{q+1}R. \tag{5}$$

Įvedamas žymėjimas:

$$T = \frac{L}{qR_0 + R} \text{ ir } T_{apv} = \frac{L}{R}; \tag{6}$$

Sutvarkius (5 lygtį) ir išdiferencijavus srovę pagal laiką, gaunama tokia išraiška:

$$\frac{di}{dt} + \frac{1}{T}i = \frac{U_q}{U_{apv}}; \tag{7}$$

$$\frac{di_n}{dt} + \frac{1}{T_{apv}}i_n = \frac{U}{L} - i\frac{R}{L}, \tag{8}$$

čia *n* – skaičius, tenkinantis nelygybę $2 \le n \le |q+1|$.

Bendras diferencialinės lygties (7) sprendimas turi tokį pavidalą:

$$i = C_1e^{-\frac{t}{T}} + A_1; \tag{9}$$

$$i = C_ne^{-\frac{t}{T_{apv}}} + A_2e^{-\frac{t}{T}} + A_3. \tag{10}$$

Po lygties (9) pertvarkymu, į ją įstačius (7) ir įrašius integruojamąsias A_1, A_2, A_3 gaunamas srovės kitimo dėsnis:

$$i = C_1e^{-\frac{t}{T}} + \frac{qU}{qR_0 + R_{apv}}; \tag{11}$$

$$i_n = \frac{C_1}{q}e^{-\frac{t}{T}} + C_ne^{-\frac{t}{T_{apv}}} + \frac{U}{qR_0 + R_{apv}}. \tag{12}$$

Akimirksniu po atjungimo fazinėje apvijoje tekančios srovės kitimo dėsnis:

$$i_1 = i_{n,mom} e^{-\frac{t}{T_{gr}}}, \tag{13}$$

Čia: $i_{n,mom}$ - n-toji fazinės momentinė srovė, atjungimo momentu.

$$T_{gr} = \frac{L}{R + R_{at}} \tag{14}$$

Čia: T_{gr} - grandinės laiko pastovioji.

Gautas bendrasis lygties sprendinys (12) ir (13) leidžia apskaičiuoti srovę tekančia visoms fazėms žingsninio variklio apvijomis, nepriklausomai nuo jo darbo režimo.

Toliau apžvelgiama m-fazio žingsninio variklio nusistovėjusios srovės kitimai periodiniuose procesuose. Procesai charakterizuoja kitokias sąlygas:

1) įjungus kitą apviją prie maitinimo šaltinio, po laiko tarpo t_i, apvija tekanti srovė bus lygi prieš tai buvusios apvijos srovės:

$$i_{n-1}\,|_{t=0} = i_n\,|_{t=t_u} \tag{15}$$

Turi tenkinti sąlygą: $2 \le n \le q+1$

2) atjungtoje apvijoje, srovės nėra:

$$i_n\,|_{t=0} = 0 \tag{16}$$

Įvertinus įvestas perjungimų sąlygas (12) gaunama analizinė išraiška, iš kurios išskaičiuojamos integravimo pastoviosios.

$$\begin{cases} qC_3 e^{-\frac{t_i}{T_{apv}}} - C_1(1 - e^{-\frac{t_i}{T}}) - qC_2 = 0; \\ qC_4 e^{-\frac{t_i}{T_{apv}}} - C_1(1 - e^{-\frac{t_i}{T}}) - qC_3 = 0; \\ qC_n e^{-\frac{t_i}{T_{apv}}} - C_1(1 - e^{-\frac{t_i}{T}}) - qC_{n-1} = 0; \\ C_1 + qC_n = \dfrac{-Uq}{qR_0 + R}; \\ C_1\left[1 - \left(\dfrac{q-1}{q}\right)e^{-\frac{t_i}{T}}\right] - (C_3 + C_4 + ... + C_n)\cdot e^{-\frac{t}{T_{apv}}} = \dfrac{-U}{qR_0 + R}. \end{cases} \tag{17}$$

Išsprendus lygčių sistema (17), gaunami sprendiniai:

$$C_1 = \frac{D_1}{D};\ C_1 = \frac{D_2}{D};\ ...;\ \frac{D_n}{D} = C_n, \tag{18}$$

Kur:

$$D=\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_1 & 0 & a_2 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & a_2 & a_3 \\ a_4 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -a_2 \\ a_4 & 0 & \frac{a_3}{a_2} & \frac{a_3}{a_2} & \dots & \frac{a_3}{a_2} & \frac{a_3}{a_2} \end{pmatrix}; \quad (19)$$

Čia nustatant $(q+1)$-tą eilę; D_n - determinantas gaunamas *D* pakeičiant į C_n nežinomųjų stulpelį. C_n stulpelį sudaro laisvieji lygties sistemos nežinomieji $a_1=-\left(1-e^{\frac{t_i}{T}}\right)$; $a_2=-q$; $a_3=qe^{-\frac{t_i}{T_{apv}}}$; $a_4=1-\left(\frac{q-1}{q}\right)\cdot e^{-\frac{t_i}{T}}$.

Šiuo atveju, kai $t_i >> T_{apv}$, (17) sistemos sprendinys tampa žymiai paprastesnis.

Tikrovėje,

$$D=\begin{pmatrix} -1 & -q & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -q & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1 & 0 & 0 & 0 & \dots & -q & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & q \\ +1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (20)$$

Įvertinus lygtį (7), gautos integravimo pastoviosios:

$$C_1=\frac{U}{qR+R_{apv}}; \quad (21)$$

$$C_2=C_3=\dots=\frac{1}{q}\cdot\frac{U}{qR+R_{apv}}. \quad (22)$$

$$C_n=-\left(\frac{q-1}{q}\right)\cdot\frac{U}{qR+R_{apv}}. \quad (23)$$

Gauta integravimo pastovioji nepriklauso nuo fazinės apvijos įjungimo dažnio. Variklio srovės, lyginant su išraiška (12) turi tokį pavidalą:

$$i=\frac{U}{qR+R_{apv}}\left(q-e^{\frac{t}{T}}\right); \quad (24)$$

$$i_2=i_3=\dots=i_{n-1}=\frac{U}{qR+R_{apv}}\left(1-\frac{1}{q}e^{-\frac{t}{T}}+\frac{1}{q}e^{-\frac{t}{T_{apv}}}\right); \quad (25)$$

$$i_n = \frac{U}{qR + R_{apv}}\left[1 - \frac{1}{q}e^{-\frac{t}{T}} - \left(\frac{q-1}{q}\right)e^{-\frac{t}{T_{apv}}}\right]. \quad (26)$$

Žingsniniame variklyje komutacijos metu srovės analizinę išraišką sudaro dvi suminės eksponentės funkcijos, kurių koeficientai priklauso nuo tuo pačiu momentu prijungtų prie nuolatinio maitinimo šaltinio fazių skaičiaus. Visais kitais atvejais koeficientai prie eksponenčių (integravimo pastoviosios), priklauso nuo prijungimo dažnio prie maitinimo šaltinio [7].

3.5. Srovės pereinamieji procesai

Nestacionarūs procesai, vykstantys grandinėje po komutacijos, jai pereinant iš vieno stacionariojo režimo į kitą, vadinami pereinamaisiais procesais. Pakitus grandinės schemai arba jos elementų parametrams, jos stacionarusis režimas sutrinka. Bet koks šuoliškas grandinės pasikeitimas, sutrikdantis jos stacionaruųjį režimą, vadinamas komutacija. Įvykus komutacijai, grandinė pereina iš ankstesniojo stacionariojo režimo į naująjį. Grandinių teorijoje laikoma, kad komutacijos trukmė $\Delta t_K = 0$. Skaičiuojant pereinamuosius procesus patogu laikyti, kad komutacija įvyksta momentu $t = 0$. Paskutinis laiko momentas prieš komutaciją žymimas $t = -0$, srovių ir įtampų reikšmės šiuo metu - $i(-0)$ ir $u(-0)$. Pirmasis laiko momentas po komutacijos žymimas $t = +0$, srovių ir įtampų reikšmės – atitinkamai $i(+0)$, $u(+0)$ [15].

Kaip žinoma iš elektrotechnikos kurso, pereinamąjį procesą sąlygoja energijos kitimas, vykstantis induktyvumo *L* magnetiniuose laukuose ir talpos *C* elektriniuose laukuose. Induktyvumo magnetinio lauko energiją W_m galima išreikšti taip [17]:

$$W_m = \frac{Li^2}{2}. \quad (27)$$

Čia: W_m - magnetinio lauko energija;

L - ritės induktyvumas;

i - per ritę tekanti srovė.

Iš šios (27) formulės matyti, kad energija W_m priklauso nuo srovės i_L tekančios induktyvinėje ritėje. Kadangi realiose fizinėse sistemose šaltiniai yra baigtinės galios, o galia yra energijos išvestinė, reiškianti jos kitimo spartą, tai iš to daroma išvada, kad energija W_m turi būti tolydinė laiko funkcija, t.y. negali turėti šuolių. Dėl to šuoliu negali kisti ir induktyvumo srovė i_L.

Elektros grandinei komutacijos momentu galioja I ir II komutacijos dėsnis. Elektros grandinės reaktyviuosius elementus *L* ir *C* laikomi pastoviais.

I komutacijos dėsnis rodo, kad srovė induktyviame ir srovės sukurtas magnetinis srautas tuoj pat po komutacijos išlieka tokie pat, kokie buvo prieš komutaciją: $i_L(+0)=i_L(-0)$, $\Psi(+0)=\Psi(-0)$ [15].

II komutacijos dėsnis aprašo, kaip įtampa talpoje ir sukauptas elektros krūvis talpoje tuoj po komutacijos išlieka tokie pat, kokie buvo prieš komutaciją: $u_C(+0)=u_C(-0)$, $q(+0)=q(-0)$ [15].

Srovės induktyviame i_L ir įtampos talpoje u_C reikšmės komutacijos momentu $t=0$ vadinamos nepriklausomomis pradinėmis sąlygomis [15].

Jei nepriklausomos pradinės sąlygos lygios nuliui, tai tuoj pat po komutacijos ($t=+0$), srovė induktyviame L ir įtampa C talpoje išlieka lygios nuliui, t.y. šiuo mementu ($t=+0$) induktyvumas ekvivalentiškas nutrauktai grandiniai, o talpa – trumpajam jungimui [15].

Jei nepriklausomos pradinės sąlygos nelygios nuliui, tai tuoj pat po komutacijos ($t=+0$) srovė induktyvume L ir įtampa talpoje C išlieka nepakitusios ir laiko momentu $t=+0$ induktyvumas ekvivalentiškas srovės šaltiniui, kurio srovė $i_L(-0)$, o talpa ekvivalentiška įtampos šaltiniui, kurio įtampa $u_C(-0)$ [15].

Kitų srovių ir įtampų išvestinių reikšmės po komutacijos vadinamos priklausomomis pradinėmis sąlygomis, t.y. $i_R(+0)$, $u_R(+0)$, $i_C(+0)$, $du_L/dt|_{t=0}$ ir pan. Priklausomas pradinės sąlygos suskaičiuojamos iš Kirchhofo lygčių, sudarytų grandinės režimui po komutacijos ($t=+0$), atsižvelgiant į žinomas nepriklausomas pradines sąlygas $i_L(+0)$, $u_C(+0)$.

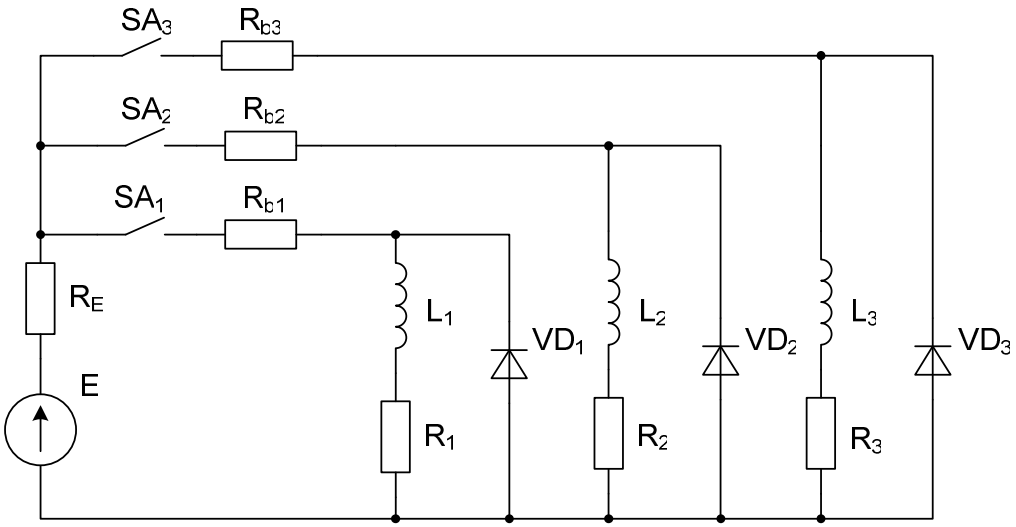
Pereinamojo proceso baigties sąlygomis paprastai vadinamos elektrinių dydžių nusistovėjusios vertės, kurios pasiekiamos pasibaigus pereinamajam procesui. Praktiškai laikoma, kad pereinamasis procesas baigiasi, kai baigties sąlygos pasiekiamos su pakankamu tikslumu [15].

Remiantis apžvelgtais fizikiniais dėsniais, sudaryta tiriamojo variklio atstojamoji elektros grandinė, pagal kuria bus išvesta srovės kitimo funkcija.

Priimamos pagrindinės prielaidos, kurios leistų supaprastinti žingsninio variklio elektrinę principinę schemą:

- induktyvinės apvijos koeficientas nepriklauso nuo poslinkio ir laiko;
- neegzistuoja savitarpio induktyvumas tarp apvijų;
- apvijų komutacija įvyksta akimirksniu, $\Delta t_K = 0$;
- maitinimo šaltinio įtampa pastovi $E = const$;
- valdymo raktas yra idealus, t.y. valdymo rakto vidinė aktyvioji varža $R_{SA} = 0\Omega$;
- valdymo ir variklio schema simetriška apvijų atžvilgiu.

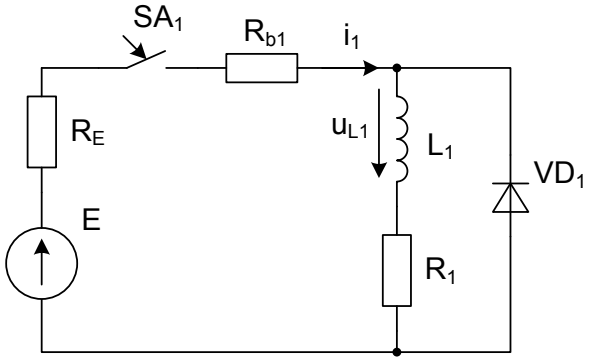
Tiriamo tiesiaeigio žingsninio variklio principinė elektrinė grandinė pateikta 22 pav.



22 pav. Tiesiaeigio žingsninio variklio principinė elektrinė schema

TŽV schemoje (žr. 22 pav.) pavaizduotos $L_1 = L_2 = L_3$ apvijos, kurių vidinė varža iškelta kaip $R_1 = R_2 = R_3$. Apsauginiai diodai VD_1, VD_2, VD_3 per save praleidžią atgalinę srovę, valdymo rakto atjungimo momentu. Induktyvinė ritė sukauptą energiją atiduoda aktyviajai varžai, kuri ją verčia šiluma. Raktai SA_1, SA_2, SA_3 pavaizduoti vietoje puslaidininkinių tranzistorių, kad būtų lengviau suvokiama elektros grandinės būsena. Elektrovaros (*E*) šaltinis pavaizduotas kaip idealus, o jo vidinė varža iškelta R_E.

Surandama srovė vienos apvijos grandinėje.



23 pav. Vienos apvijos grandinės prijungimas prie nuolatinės įtampos šaltinio

Iš bendros elektros grandinės išskiriama viena variklio apvija su valdymo elementais (žr. 23 pav.). Pagal šią elektros grandinę sudaroma lygčių sistema:

$$\begin{cases} i_1\left(R_{b1}+R_1+R_E\right)+u_{L1}=E \\ u_{L1}=L_1\dfrac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \end{cases}; \tag{28}$$

Sprendinį sudaro laisvoji ir nusistovėjusi dedamosios:

$$i_1=i_1'+i_1'';u_{L1}=u_{L1}'+u_{L1}''. \tag{29}$$

Nusistovėjusi dedamoji apskaičiuota laiko momentu $t\to\infty$, pasinaudojant (28) lygčių sistema. Pereinamajam procesui pasibaigus, srovės ir įtampos nusistovi (nekinta), tada $L\dfrac{\mathrm{d}i_1'}{\mathrm{d}t}=0$, $u_{L1}'=0$. Tuomet surandama pirmojo dedamoji:

$$i_1'=\frac{E}{R_{b1}+R_1+R_E}. \tag{30}$$

Elektros grandinei po komutacijos užrašoma kompleksinė įėjimo varža: $Z\left(j\omega\right)=j\omega L+R$. Būdingoji lygtis randama pakeitus $j\omega=\alpha$ ir lygtį prilyginus nuliui.

$$\alpha L_1+\left(R_{b1}+R_1+R_E\right)=0; \tag{31}$$

$$\alpha_1=-\frac{R_{b1}+R_1+R_E}{L_1}; \tag{32}$$

Laisvos dedamosios turi eksponentės formą:

$$i_1''=A_ie^{\alpha_1t}=A_ie^{-\frac{R_{b1}+R_1+R_E}{L_1}t};u_{L1}''=A_ue^{\alpha_1t}=A_ue^{-\frac{R_{b1}+R_1+R_E}{L_1}t}; \tag{33}$$

Akimirksniu prieš komutaciją ir po jos srovė netekėjo, todėl:

$$i(+0)=i(-0)=0; \tag{34}$$

Į (29) formulę įstačius srovės priverstinę ir laisvąją dedamąsias laiko momentu $t=+0$, gaunama išraiška:

$$i_1'+A_i=i(+0)=0; \tag{35}$$

$$A_i=-i_1'=-\frac{E}{R_{b1}+R_1+R_E}. \tag{36}$$

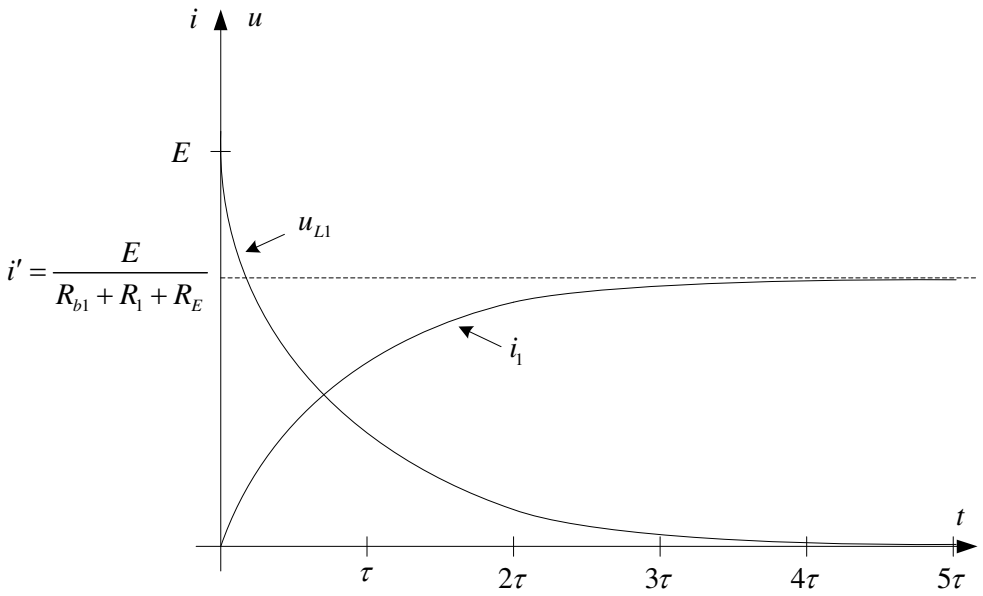
Srovės kitimo priklausomybė nuo laiko:

$$i_1(t)=\frac{E}{R_{b1}+R_1+R_E}\left(1-e^{-\frac{R_{b1}+R_1+R_E}{L}t}\right). \tag{37}$$

Žinant srovės priklausomybę nuo laiko, taip pat galima apskaičiuoti induktyvumo įtampą panaudojant (28) lygčių sistemą:

$$u_{L1}=L_1\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}=Ee^{-\frac{R_{b1}+R_1+R_E}{L_1}t}. \tag{38}$$

Iš gautų (37) ir (38) formulių, nubraižomos srovės ir įtampos kitimo kreivės (žr. 24 pav.). Jos parodo srovės ir įtampos būsenų pasikeitimą tik po komutacijos iki kito nusistovėjusio darbo režimo.



24 pav. Laiko grafikai, kai prijungiama tiesiaeigio žingsninio variklio pirma apvija prie nuolatinės įtampos šaltinio

Čia: $\tau = \frac{L}{R}$ - laiko pastovioji.

Iš grafiko (žr. 24 pav.) matyti, kad pereinamojo proceso nusistovėjimo laikas priklauso nuo ritės induktyvumo ir aktyvios grandinės varžos santykio. Pavyzdžiui, padidinus induktyvumą ir aktyviąją varžą kelis kartus, laiko konstanta nepakinta, bet pakinta ir nusistovėjusi srovės vertė, kuri sumažėja kelis kartus. Padidinus tik induktyvumą, laiko konstanta padidėja, ir pereinamasis procesas trunka ilgiau, nors jo baigies sąlygos nepakinta. Padidinus tik aktyviąją varžą, pakinta ir laiko konstanta, ir baigties sąlygos.

Ritės atjungimas nuo nuolatinės srovės šaltinio yra pavojingas, jeigu nėra imtasi tam apsauginių priemonių. Kaip matoma iš aukščiau išnagrinėtų dėsnių, induktyvioji ritė kaupia energiją, todėl atjungimo metu (pagal omo dėsnį) ritės srovė yra lygi:

$$i_{L1}(0) = \frac{E}{R_{b1} + R_1}; \qquad (39)$$

Po atjungimo srovė staiga neišnyksta, nes ritėje indukuojama saviindukcijos EVJ, kuri priešinasi srovės mažėjimui. Jos magnetinio lauko energija aktyvioje varžoje virsta šiluma ir išsklaidoma į aplinką. Pereinamasis procesas laikomas pasibaigusiu, kai $i_1(\infty) = 0$ [28].

Pagal II Kirchhofo dėsnį:

$$(R_{b1} + R_1) i_{L1} = -e_{l1}. \tag{40}$$

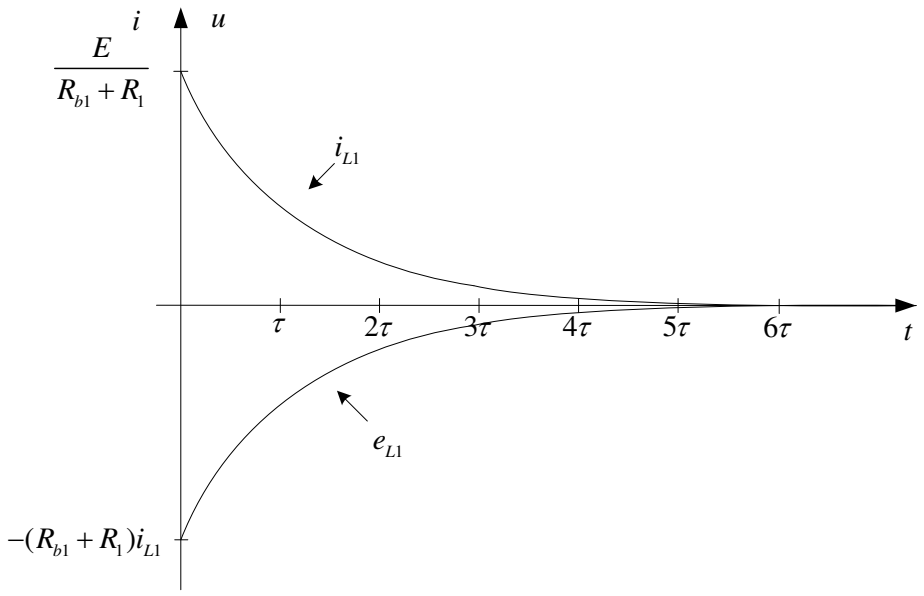
Fazinės ritės elektrovara:

$$e_{L1} = L \frac{di_{L1}}{dt}, \tag{41}$$

Taigi į (40) formulė įstatoma (41) formulė ir gaunama tokia forma:

$$\frac{L_1}{R_{b1} + R_1} \cdot \frac{di_{L1}}{dt} + i_{L1} = 0 \text{ arba } \frac{di_{L1}}{dt} = -i_{L1} \frac{R_{b1} + R_1}{L_1}; \tag{42}$$

Iš gautų (41) ir (42) formulių nubraižomi srovės ir įtampos pereinamieji procesai fazinėje ritėje (žr. 25 pav.).



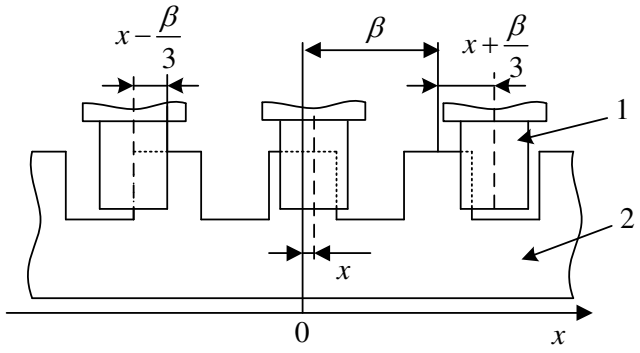
25 pav. Srovės ir įtampos pereinamieji procesai po ritės atjungimo nuo maitinimo šaltinio

Po atjungimo diferencijuojant laike gauta, gaunama ritės srovės kitimo kreivė (žr. 25 pav.). Taigi, jei atjungiama grandinė nuo maitinimo šaltinio nėra trumpai sujungti ritės kontaktai, tai srovė ritėje turėtų išnykti praktiškai staiga. Kuo sparčiau kinta srovė, tuo didesnė atsiranda ritėje saviindukcinė elektrovara (žr. 41 formulę). Dėl šio reiškinio, tik atsiradus oro tarpui tarp jungiklio kontaktų, srovė pradeda tekėti oru. Tokiu būdu, tarp jungiklio kontaktų susidaro lankinis išlydis –

kontaktas kibirkščiuoja [28]. Šiam pašaliniam efektui išvengti naudojami lygiagrečiai ritei prijungti apsauginiai diodai, kurie apsaugo komutacinius aparatus, šiuo atveju – tranzistorius.

Skyriaus pradžioje buvo priimtos prielaidos skaičiuojant grandinės pereinamuosius procesus. Toliau vystant matematinį modelį įvertintas apvijos induktyvumas, kuris priklauso nuo poslinkio ir laiko.

Variklio žadinimo ričių polių išdėstymas antrinio elemento atžvilgiu pateiktas 26 pav.



26 pav. Variklio žadinimo ričių polių išdėstymas antrinio elemento atžvilgiu, esant x poslinkiui

čia: 1 – žadinimo ritės polius;

2 – antrinis elementas.

$\beta = 2 \cdot b$ - dantyto antrinio elemento poliaus žingsnis;

b – antrinio elemento vienodas danties ir tarpo tarp dantų plotis.

Ritės induktyvumas priklauso nuo jos padėties su antriniu elementu. Kuo didesnis oro plotas tarp ritės polių, tuo induktyvumas mažesnis. Galima teigti, kad judant pirminiam elementui ritės induktyvumas kinta kosinuso dėsniu. Tai galioja jeigu atskaitos taškas yra variklio antra ritė, kurios poliai sulygiuoti su antrinio elemento dantimi (žr. 26 pav.), t.y. turi mažiausią magnetinę varžą. Eksperimentiniu būdu gauti rezultatai pateikti pirmame, antrame ir trečiame prieduose. Pagal eksperimento gautus duomenis, priimta, kad induktyvumas, ritei judant, kinta tokiu dėsniu:

$$L(x) = L_n + L_k \cos\frac{2\pi}{\tau}x; \text{ kai } -b \le x \le b; \tag{43}$$

$$L_n = \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2}; \tag{44}$$

$$L_k = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2}; \tag{45}$$

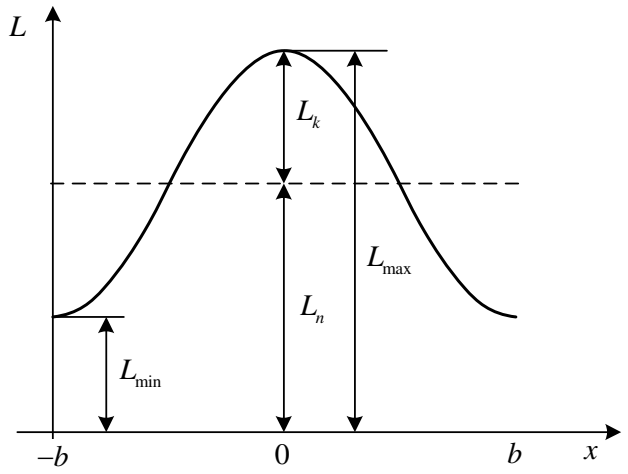
Čia: L_n - žadinimo ritės induktyvumo nuolatinė dedamoji, kurios lygyje vyksta kosinuso dėsnio kitimas;

L_k - žadinimo ritės induktyvumo kintamosios dedamosios amplitudė;

$L_{\max}$ - ritės induktyvumo vertė, kai polius susirikiuoja su antrinio elemento dantimi;

$L_{\min}$ - ritės induktyvumo vertė, kai polius nutolęs nuo antrinio elemento danties.

Ritės induktyvumo kitimo kreivė pagal (43) formulę pavaizduota 27 pav.



27 pav. Ritės induktyvumo kitimo kreivė pagal kosinusą

Induktyvumo kitimo grafiką sudaro nuolatinė ir kintamoji dedamosios.

Srovės kitimo funkcija, (37) formulė, išdiferencijuojama pagal laiką:

$$i_1(t) = \frac{E}{R_{b1} + R_1 + R_E} - \frac{L(x)}{R_{b1} + R_1 + R_E} \cdot \frac{di}{dt}; \tag{46}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L(x)} \left[E - \left(R_{b1} + R_1 + R_E \right) \cdot i_1(t) \right]; \tag{47}$$

Į (45) formulę įstatoma (41) formulė:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_n + L_k \cos \frac{2\pi}{\tau} x} \left[E - \left(R_{b1} + R_1 + R_E \right) \cdot i_1(t) \right]; \tag{48}$$

Pagal II Kirchhofo dėsnį įtampos krytis ant ritės gnybtų $u_{L1} = e_{L1} = E - U_{RE} - U_{b1} - U_{R1}$. Per kiekvienos grandinės, kuria teka elektros srovė, ribojamą plotą pereina savasis magnetinis srautas. Kintant tekančiai elektros srovei, kinta ir magnetinis srautas, dėl šio reiškinio grandinėje indukuojasi elektrovara, kuri sukuria elektros srovę. Šis reiškinys vadinamas saviindukcija [30].

Įvertinus saviindukcijos reiškinį (48) formulės užrašoma tokiame pavidale [20]:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_n + L_k \cos\frac{2\pi}{\tau}x}\left[E - \left(R_{b1} + R_1 + R_E\right)\cdot i_1(t) - \frac{dL(x)}{dx}\cdot\frac{dx}{dt}\cdot i_1(t)\right]; \quad (49)$$

Surandama ritės induktyvumo funkcijos (43) formulės išvestinė pagal *x*.

$$\frac{dL(x)}{dx} = -\frac{2\pi}{\tau}\cdot L_{\min}\sin\left(2\pi\frac{x}{\tau}\right); \quad (50)$$

Iš fizikos kurso žinoma, jog greičio išvestinė yra kelias, tai:

$$\frac{dx}{dt} = v; \quad (51)$$

Sustačius narius, srovės kitimo funkcija gaunama:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_n + L_k \cos\frac{2\pi}{\tau}x}\left[E - \left(R_{b1} + R_1 + R_E\right)\cdot i_1(t) + \frac{2\pi}{\tau}\cdot L_k\sin\left(2\pi\frac{x}{\tau}\right)\cdot v\cdot i_1(t)\right]; \quad (52)$$

Siekiant surasti srovės kitimo kreivę, reikia žinoti naudingosios variklio traukos jėgos, išilgai x koordinatės, funkciją.

Iš fizikos kurso yra gerai žinomas II Niutono dėsnis:

$$F = m\frac{dv}{dt}; \quad (53)$$

Dėl ritės induktyvumo energetiniai magnetiniai virsmai kaupia ritėje energiją, ir jos prieaugį *dW*, padidėjus grandinės srovei *di*. Energijos pokytis gaunamas: $dW = Lidi$. Padidėjus srovei nuo *0* iki *I*, induktyvinėje ritėje sukaupta energija:

$$W = \int_0^I Lidi = \frac{LI^2}{2}; \quad (54)$$

Pertvarkius (53) lygtį gaunama jėgos funkcija:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m}\cdot\frac{\frac{dL(x)}{dx}\cdot i_1^2(t)}{2}; \quad (55)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m}\left(-\frac{\frac{2\pi}{\tau}\cdot L_k\sin\left(2\pi\frac{x}{\tau}\right)\cdot i_1^2(t)}{2}\right); \quad (56)$$

Gautos visos reikalingos analizinės išraiškos TŽV matematiniam modeliui sudaryti: srovės (52), greičio (56) ir kelio (51) pokyčiai priklausantys nuo laiko. Visas išraiškas sujungus į bendrą sistemą, gaunama diferencialinių lygčių sistema apibūdinanti tiriamą TŽV.

$$\begin{cases} \dfrac{di}{dt} = \dfrac{1}{L_n + L_k \cos\dfrac{2\pi}{\tau}x}\left[E - \left(R_{b1} + R_1 + R_E\right)\cdot i_1(t) + \dfrac{2\pi}{\tau}\cdot L_k \sin\left(2\pi\dfrac{x}{\tau}\right)\cdot v \cdot i_1(t)\right] \\ \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{1}{m}\left(-\dfrac{\dfrac{2\pi}{\tau}\cdot L_k \sin\left(2\pi\dfrac{x}{\tau}\right)\cdot i_1^2(t)}{2}\right) \\ \dfrac{dx}{dt} = v \end{cases} \quad (57)$$

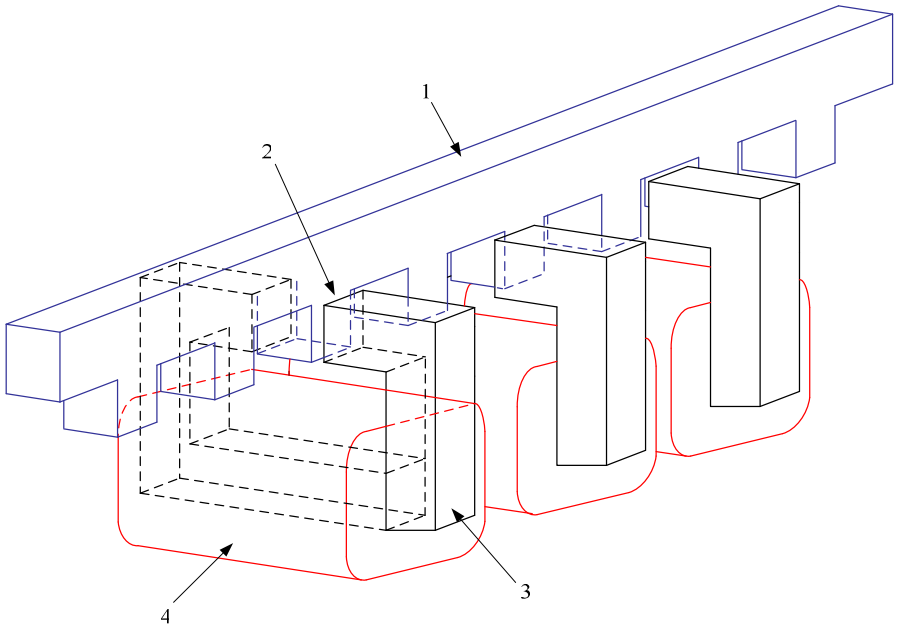
Matematinis modelis buvo sudarytas remiantis „Mathematical Model of the Linear Motor“ pranešimu[29].

Taigi, pereinamasis procesas vyksta tuomet, kai elektros grandinės elementai iš vienos nusistovėjusios būsenos pereina prie kitos. Čia buvo sudaryta TŽV supaprastinta elektrinė principinė schema. Pagal schemą, išvesta per apviją tekančios srovės kitimo funkcija. Įvertinus padėties induktyvumo pokytį, sudarytas TŽV matematinis modelis. Jis susideda iš trijų diferencialinių lygčių sistemos: srovės, greičio ir padėties kitimo priklausomai nuo laiko. Sudarant lygčių sistemą neįvertinami apvijų savitarpio induktyvumai, neatsižvelgta į valdymo ir variklio elektros grandinių nesimetriškumą. Priimta, jog maitinimo šaltinio įtampa yra pastovi, valdymo raktas idealus.

4. Tiriamoji dalis

4.1. Tiriamojo tiesiaeigio žingsninio variklio struktūra

Magistro baigiamojo darbo tiriamojoje dalyje ištirtas elektromagnetinis žingsninis variklis, kuris susideda iš trijų viena po kitos sumontuotų ričių. Jos užvyniotos ant C pavidalo šerdies. TŽV turi dantytą krumpliastiebį, kuris pagamintas iš magnetinės geležies. Tarpai tarp krumpliastiebio dantų ir tarpai tarp ričių yra nevienodi, kad suformuotų tangento formos magnetinį lauką, kuris sukurtų postūmį tarp apvijų ir krumpliastiebio. Tiriamo tiesiaeigio žingsninio variklio bendras vaizdas pateiktas 28 pav.



28 pav. Tiriamasis tiesiaeigis žingsninis variklis

Čia: 1 - Įmagnetinamas dantų rinkinys (krumpliastiebis);

2 - Oro tarpas;

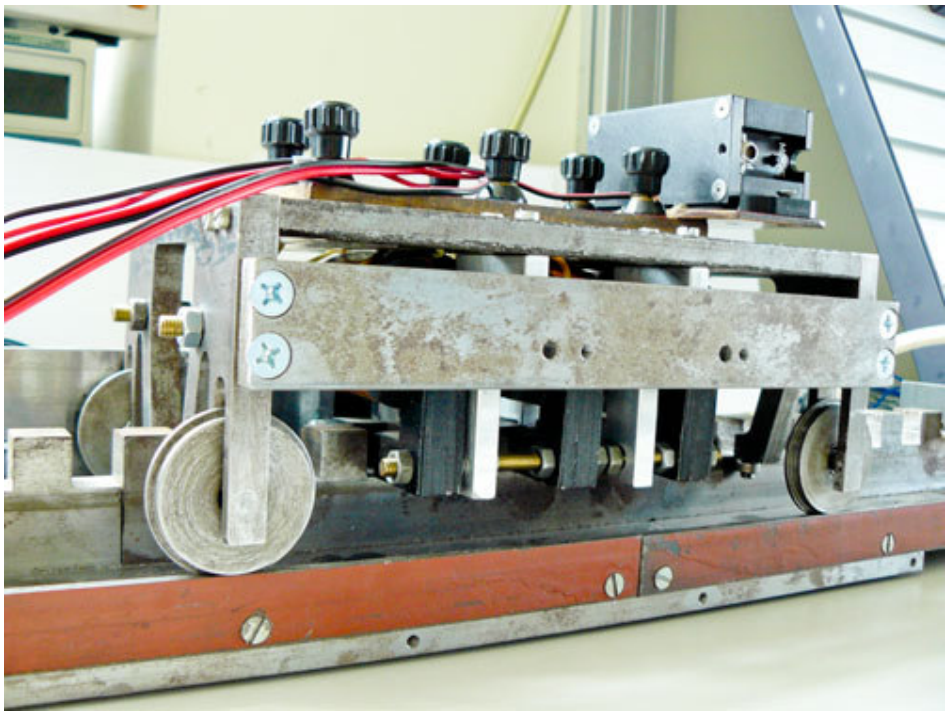
3 - Ritės šerdis;

4 - Įmagnetinimo ritė, kurianti magnetinį srautą magnetinės grandinės oro tarpe.

Iš paveikslo (žr. 28 pav.) aiškiai matyti, kad krumpliastiebio ir slenkamojo elemento dantų žingsniai nesutampa. Jeigu pirmosios fazinės apvijos poliai užsidaro per krumpliastiebio dantį, tai antros ritės poliai prasilenkia su dantimi $\beta/2$ (čia β - danties plotis) atstumu, o paskutinės apvijos poliai užsidaro per oro tarpa ir turi didžiausią magnetinė varžą.

4.2. Tiriamo tiesiaeigio žingsninio variklio techninės charakteristikos

Tiriamasis TŽV juda *x* ašies kryptimi. Jis neturi prilaikančių papildomų nuolatinių magnetų, kurie jo poziciją erdvėje palaikytų be mechaninių elementų. TŽV judamoji dalis pritvirtina ant krumpliastiebio mechaniniu būdu (ratais). Prie krumpliastiebio prisukti bėgiai turi sujungimus. Varikliui judant per šiuos sujungimus atsiranda papildomi trikdžiai.



29 pav. Eksperimentinis tiesiaeigio žingsninio variklio fizinis modelis

Tiriamojo TŽV fizinio modelio nuotrauka pateikta 29 pav. Variklio konstrukcija turi daug nukrypimų, todėl visus matavimus būtina atlikti ir juos įvertinti lyginant teorinio modelio gautus rezultatus su eksperimentiniais duomenimis.

TŽV svarbiausi parametrai pateikti 1, 2 ir 3 lentelėse.

1 lentelė. Krumpliastiebio fiziniai parametrai

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Žymėjimas	Vertė	Matavimo vnt.
1.	Danties aukštis	h_z	14	mm
2.	Danties plotis	a_z	16	mm
3.	Danties storis	2Δ	16,5	mm
4.	Tarpas tarp dviejų dantų	b_t	15	mm

1 lentelėje pateikiami krumpliastiebio fiziniai parametrai. Kaip matoma iš gautų rezultatų, danties plotis ir tarpas tarp dviejų dantų yra nevienodi. Apvijų skaičius buvo pateiktas ant kiekvienos ritės. Visi galimi parametrai išmatuoti panaudojus matavimo prietaisus. Fazinių apvijų matavimai atlikti slankmačiu, kurio tikslumas ±0,1 mm.

2 lentelėje pateikti fazinių apvijų fizikiniai parametrai.

2 lentelė. Fazinių apvijų fiziniai parametrai

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Žymėjimas	I apvija	II apvija	III apvija	Matavimo vnt.
1.	Poliaus aukštis	h_c	15	15	15	mm
2.	Poliaus plotis	a_c	14,5	14,5	14,5	mm
3.	Oro tarpas	δ	1,1	1,1	1,1	mm
4.	Vijų skaičius	w	2200	2200	2200	-
5.	Laido storis	d	0,04	0,04	0,04	mm
6.	Ritės varža	R	33,84	33,67	33,48	Ω
7.	Induktyvumo matematinis vidurkis (kai u =~ 48 V)	L	1,567	1,584	1,532	H
8.	Variklio judančios dalies masė	m	5,3			kg
9.	Atstumas tarp polių	l	24,75			mm

Iš gautų duomenų matoma, kad poliaus plotis ir krumpliastiebio danties plotis nesutampa. Polius yra siauresnis už dantį 1,5 mm.

Eksperimento metu naudotų TŽV valdymo grandinės elementų parametrai pateikti 3 lentelėje. Tyrimams buvo pagamintas puslaidininkinė valdymo schema su lauko tranzistoriais (STD12N05L) kiekvienai apvijai. Lauko tranzistoriai parinkti dėl didelio srovės pralaidumo ir paprasto valdymo. Jį įjungti užtenka potencialų skirtumo tarp užtūros ir ištakos kontaktų. Taip pat jie turi viename korpuse įdiegtą apsauginį diodą.

3 lentelė. Valdymo grandinės elementų parametrai

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Žymėjimas	Vertė	Matavimo vnt.
1.	STD12N05L tranzistoriaus srovė	I_{max}	12	A
2.	STD12N05L tranzistoriaus kanalo varža	R_b	0,15	Ω

3 lentelės tęsinys kitame puslapyje.

3 lentelės tęsinys.

Eil. Nr.	Parametro pavadinimas	Žymėjimas	Vertė	Matavimo vnt.
3.	STD12N05L tranzistoriaus didžiausia įtampa	U_{max}	50	V
4.	Maitinimo šaltinio vidaus varža	R_E	0,29	Ω

Aktyvioji varža buvo matuota HIOKI 3522-50 LCR matavimo prietaisu. Šio prietaiso tikslumas ±1,5%rdg+200dgts. Tikslumas pateikiamas kaip ± (% + skaitmenys) esant 18~28°C, santykinis drėgnumas iki 80%.

4.3. Ričių induktyvumo matavimas

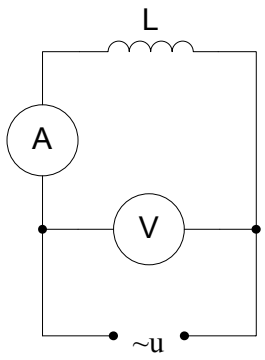
Ritės induktyvumą išmatuoti galima su tam skirtu matavimo prietaisu, jeigu prietaiso nėra, yra galimybė jį apsiskaičiuoti.

Magistro baigiamajame darbe TŽV ričių induktyvumas surandamas dvejais būdais:

1) apskaičiuotas pagal amperimetro ir voltmetro parodymus;
2) išmatuotas su LCR gandinių matuokliu.

Skaičiuoti induktyvumą pirmu būdu panaudojamas kintamos įtampos žeminantis transformatorius. Jis prijungiamas prie matuojamos variklio apvijos išvestų kontaktų. Nuosekliai įterpiamas amperimetras ir lygiagrečiai apvijai prijungiamas voltmetras. Kintamos įtampos transformatorius turi būti reguliuojamas.

Antras būdas prie apvijos prijungti HIOKI 3522-50 LCR induktyvumo matuoklį.



30 pav. Eksperimentinė elektros grandinė ritėms tirti

Eksperimentas buvo atliktas pirmuoju būdų, ritę sujungus su matavimo įrenginiais pagal 30 pav. pateiktą elektros grandinę [26]. Panaudojus išmatuotus parametrus apskaičiuojamas ritės

induktyvumas. Induktyvumas yra tiesiogiai proporcingas pilnutinei varžai ir priešingai proporcingas tinklo dažniui [19]:

$$L = \frac{X}{2\pi f}; \tag{58}$$

Čia: X – pilnutinė varža;

f – maitinimo tinklo dažnis.

Pilnutinė varža apskaičiuojama taip:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}; \tag{59}$$

Čia: Z – reaktyvioji varža.

Reaktyvioji varža – kintamos įtampos ir kintamos srovės santykis:

$$Z = \frac{u}{i}; \tag{60}$$

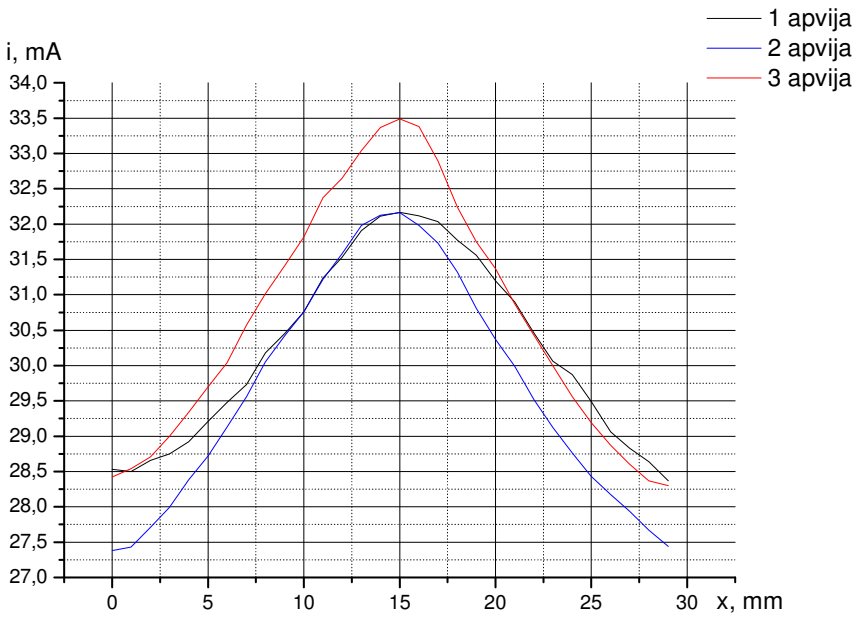
Pagal šias formules, apskaičiuojamas ritės induktyvumas.

Kaip jau buvo minėta, induktyvumas priklauso nuo magnetolaidžio magnetinės varžos, todėl slankiojo elemento matuojamas polius sulyginamas su krumpliastiebio dantimi taip, kad magnetinė varža būtų mažiausia. Tokioje padėtyje užrašomi matavimo įrenginių parodymai. Toliau bandymas kartojamas pastūmus judamąją dalį vienu milimetru į priekį.

Prieš tai apžvelgtoje teorijoje, buvo paminėta, kad srovė per apviją teka silpniausia, kai yra mažiausia magnetinė varža. Didėjant magnetinei varžai, t.y. atsirandant tarpui tarp polių, srovė stiprėja. Šis bandymas buvo atkiltas prie trijų skirtingų įtampų: 14V, 24V ir 48V. Iš eksperimentų matyti, srovė didėjo iki tol, kol slenkamojo elemento poliaus galus surikiavo su krumpliastiebio tarpu. Nuo danties vidurio iki tarpo vidurio yra 15 mm (žr. 1 lentelę). Matavimo prietaisų parodymai surašyti į 1, 2 ir 4 prieduose pateiktas lentelėse.

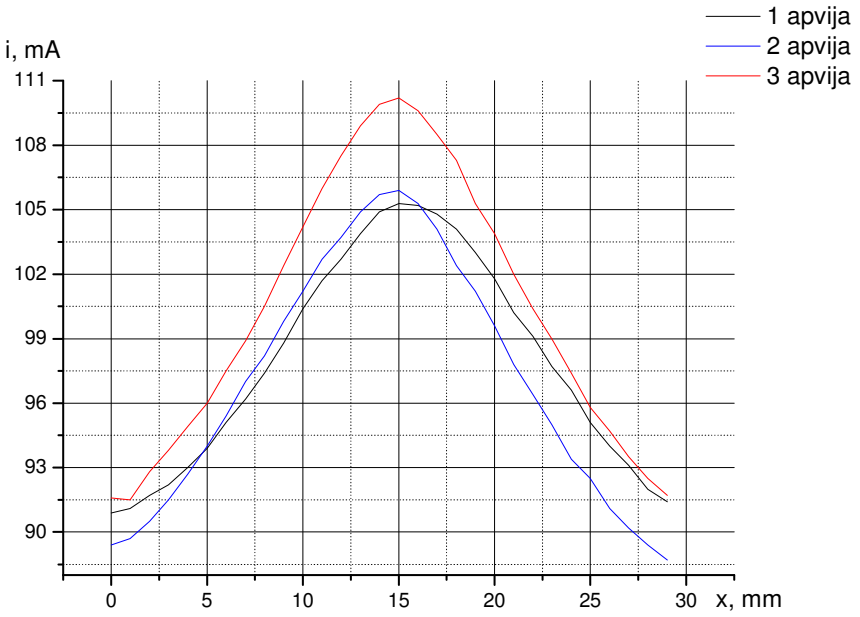
Ketvirtas bandymas atliktas panaudojus HIOKI 3522-50 LCR induktyvumo matuoklį. Jis prijungiamas lygiagrečiai matuojamai apvijai. Su šiuo matuokliu induktyvumas buvo matuojamas prie 2 V įtampos. Gauti rezultatai surašyti 3 priede.

Pagal 1 priedo duomenis nubraižyta apvijų srovių priklausomybė nuo antrinio elemento padėties atžvilgiu krumpliastiebio (žr. 31 pav.).



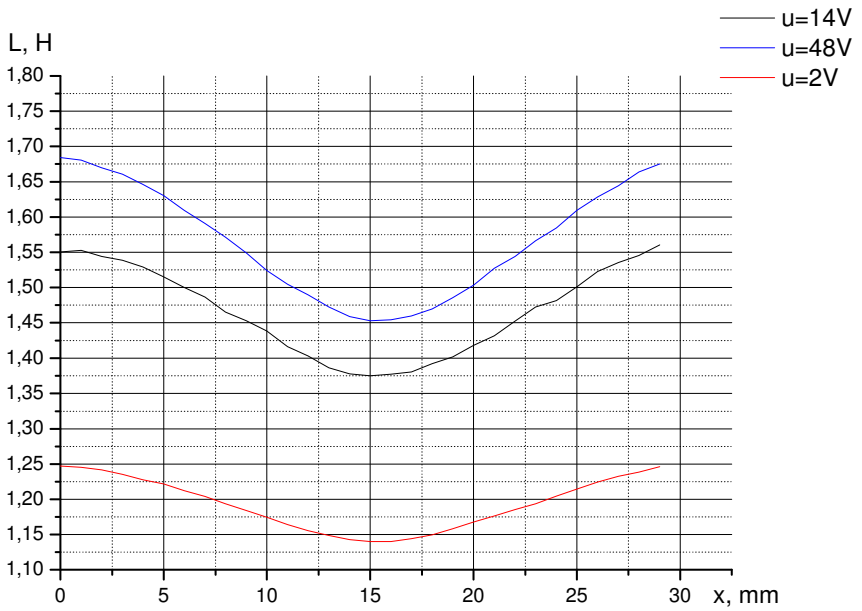
31 pav. Fazinių apvijų srovės kitimas poliui slenkant nuo danties ant kito danties, kai *u = 14* V

Iš paveikslo (žr. 31 pav.) matyti, jog TŽV fizinio modelio apvijos nevienodos. Trečios apvijos aktyvioji ir pilnutinė varžos yra mažiausios (žr. 1 priedas, 8 lentelė), dėl to per ją tekanti srovė yra didžiausia.



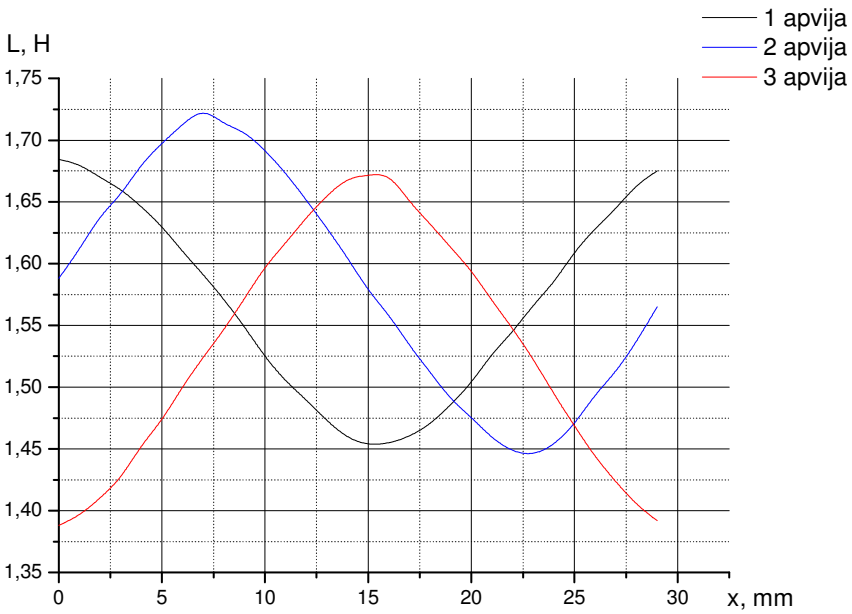
32 pav. Fazinių apvijų srovės kitimas poliui slenkant nuo danties ant kito danties, kai *u = 48* V

Kitu bandymu, kai maitinimo įtampa *u = 48* V, apvijose tekanti srovė atkartojo tą pačią formą, kaip ir eksperimento su mažesne įtampa, tik srovių vertės padidėjusios tris kartus.



33 pav. Induktyvumo pokytis poliui slenkant nuo danties per tarpą ant kito danties, esant skirtingoms įtampoms

Sudarant matematinį modelį, buvo nustatyta, kad ritei judant induktyvumas kinta kosinuso dėsniu. Po atlikto eksperimento, aiškiai matyti, kad parinktas dėsnis atitinka realybę (žr. 33 pav.). Grafike pavaizduotas pirmos ritės induktyvumo kitimas prie skirtingų įtampų. Slenkamajam elementui nejudant, dėl induktyvinės ritės nepilno įsisotinimo, prie skirtingų įtampų gaunamos skirtingos induktyvumo reikšmės.



34 pav. Visų apvijų induktyvumų kreivės poliui slenkant nuo danties per tarpą ant kito danties

Eksperimento metu gauti duomenys pavaizduoti 34 pav. Iš grafiko galima teigti, kad atskaitos taške pirma apvija yra ant danties, nes turi didžiausią induktyvumą, antra apvija užeinanti, o trečia – oro tarpe, nes TŽV judamojo elemento fazinių apvijų polių žingsnis nesutampa su krumpliastiebio dantų žingsniu.

Tiriamo TŽV trečia apvija turi didžiausią induktyvumą. Šie rezultatai buvo gauti srovę su įtampą išmatavus matavimo įtaisais, o induktyvumas apskaičiuotas. Kitas būdas panaudojant specialių RLC grandinių matuoklį. Charakteristikų formos, apskaičiuojant ir išmatuojant, gautos vienodos. Su HIOKI 3522-50 LCR induktyvumo matuokliu suminė varža gauta 20% mažesnė, nei apskaičiuota. Tokia paklaida atsirado dėl to, kad atliekant matavimus pirmu būdu, buvo naudojami matavimo prietaisai su savo paklaidomis, taip pat atliekant skaičiavimus gauti rezultatai apvalinami.

4.4. Srovės pereinamojo proceso tyrimas

Labai svarbu žinoti, kokios yra tikslios pereinamojo proceso charakteristikų, komutuojant TŽV apvijas, didžiausios vertės. Pagal šias charakteristikas projektuojamos TŽV valdymo grandinės, apskaičiuojami kiti būtini variklio parametrai (magnetinis srautas, traukos jėga, ričių įšilimas ir kt.).

Prieš tai buvusiame skyriuje buvo ištirtos fazinės TŽV. Panaudojus gautus parametrus, technines charakteristikas ir išvestas matematines išraiškas suskaičiuojamas srovės kitimas laiko atžvilgiu.

Atliekami skaičiavimai pirmai apvijai pagal 23 pav. pavaizduotą supaprastintą elektros grandinę vienai apvijai. Randami $i_L(-0)$, $u_L(-0)$, $i_L(+0)$, $u_L(+0)$, i'_L, u'_L parametrai. Iš gautų duomenų nubraižomi $i_L(t)$ kokybiniai grafikai.

Srovės kitimo priklausomybė nuo laiko yra (37) formulė.

Iki komutacijos ritė atjungta nuo šaltinio, todėl $i_L(-0)=0$, $u_L(-0)=0$.

Pagal pirmąjį komutacijos dėsnį $i_L(+0)=i_L(-0)=0$.

Į (30) formulę įstačius žinomus parametrus, surandama pirmoji srovės dedamoji:

$$i'_1=\frac{E}{R_{b1}+R_1+R_E}=\frac{48}{0,15+33,84+0,29}=1,4\,\text{A}.$$

Randamas būdingosios lygties sprendinys iš (32) formulės. Priimama, kad induktyvumas yra pastovus. Panaudotas induktyvumo matematinis vidurkis (žr. 2 lentelė), kuris apskaičiuotas panaudojus eksperimentinius duomenis gautus matuojant prie 48V įtampos (žr. 2 priedas, 9 lentelė):

$$\alpha_1=-\frac{R_{b1}+R_1+R_E}{L_1}=-\frac{0,15+33,84+0,29}{1,567}=-21,88; \qquad (61)$$

Apskaičiuojama laisvoji dedamoji laiko momentu $t = +0$:

$$A_i = -i_1' = -1,4\,\text{A}; \tag{62}$$

Analizinė srovės forma yra tokia:

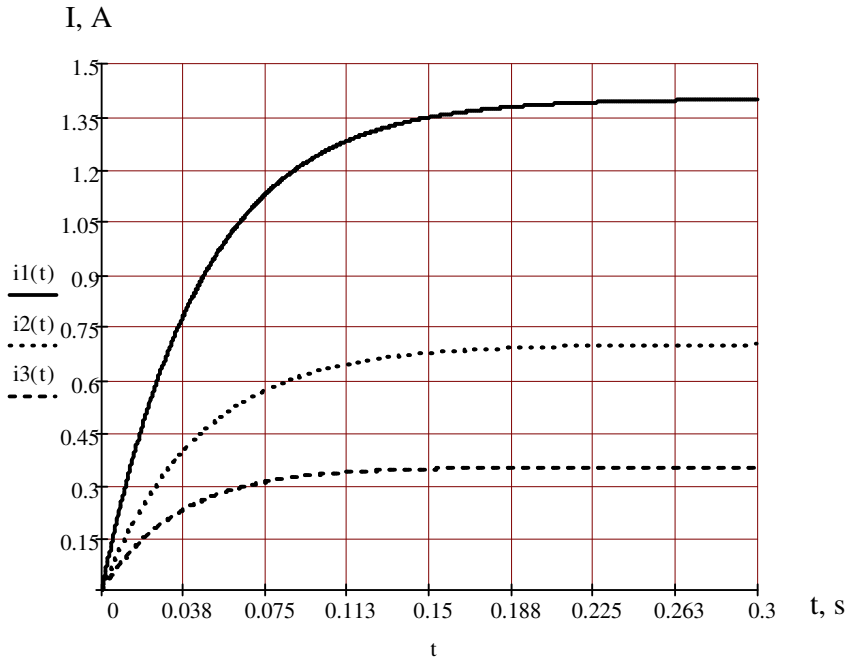
$$i_1(t) = 1,4 \cdot \left(1 - e^{-21,88 \cdot t}\right). \tag{63}$$

Tokiu pačiu būdu surandami visų fazinių apvijų srovių kitimo dėsniai ir surašomi į 4 lentelę. Apvijų teoriniai srovės pereinamieji procesai pateikti 5 priede.

4 lentelė. Fazinių apvijų srovių priklausomybių nuo laiko analizinės formos

Maitinimo įtampos	**I apvija**	**II apvija**	**III apvija**
$U = 48\,\text{V}$	$i_1(t) = 1,4 \cdot \left(1 - e^{-21,88 \cdot t}\right)$	$i_2(t) = 1,407 \cdot \left(1 - e^{-21,54 \cdot t}\right)$	$i_3(t) = 1,415 \cdot \left(1 - e^{-22,14 \cdot t}\right)$
$U = 24\,\text{V}$	$i_1(t) = 0,7 \cdot \left(1 - e^{-22,46 \cdot t}\right)$	$i_2(t) = 0,704 \cdot \left(1 - e^{-21,99 \cdot t}\right)$	$i_3(t) = 0,708 \cdot \left(1 - e^{-22,8 \cdot t}\right)$
$U = 12\,\text{V}$	$i_1(t) = 0,35 \cdot \left(1 - e^{-28,72 \cdot t}\right)$	$i_2(t) = 0,352 \cdot \left(1 - e^{-27,69 \cdot t}\right)$	$i_3(t) = 0,354 \cdot \left(1 - e^{-28,6 \cdot t}\right)$

Pirmos apvijos srovės kitimo kreivės prie skirtingų maitinimo įtampų pateiktos 35 pav.



35 pav. Pirmos ritės teorinis pereinamieji procesai prie skirtingų įtampų

Čia: *i1(t)* – pirmos fazinės ritės srovės kitimas atžvilgiu laikui, kai $U = 48\,\text{V}$;

i2(t) – pirmos fazinės ritės srovės kitimas atžvilgiu laikui, kai $U = 24\,\text{V}$;

i3(t) – pirmos fazinės ritės srovės kitimas atžvilgiu laikui, kai $U = 12\,\text{V}$;

Šios charakteristikos parodo, kad esant skirtingoms įtampoms, srovė nusistovi prie skirtingų verčių, t.y. didinant maitinimo įtampą, nusistovėjusi srovė didėja. Pereinamojo proceso laiko pastovioji mažai kinta esant skirtingoms maitinimo įtampoms (žr. 35 pav.). Skirtingos įtampos nulemia tik nusistovėjusios srovės vertes.

Kaip buvo minėta anksčiau, laiko pastovioji priklauso nuo aktyviosios varžos ir ritės induktyvumo santykio. Suskaičiuojamos laiko pastoviosios skirtingoms apvijoms ir prie skirtingų induktyvumo verčių (induktyvumai išmatuoti, apvijas maitinant skirtingomis įtampomis).

Laiko pastoviosios analizinė forma:

$$\tau = \frac{L}{R}; \tag{64}$$

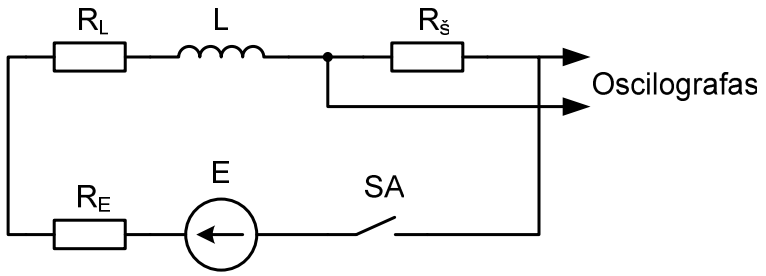
Pagal (64) formulę apskaičiuotos laiko pastoviosios surašytos į 5 lentelę.

5 lentelė. Laiko pastoviųjų vertės

Kintama maitinimo įtampa matuojant ritės induktyvumą	τ_1, s	τ_2, s	τ_3, s
$U = 48\,\text{V}$	0,046	0,046	0,045
$U = 24\,\text{V}$	0,045	0,045	0,044
$U = 2\,\text{V}$	0,035	0,036	0,035

Kaip matyti iš 5 lentelės duomenų, TŽV pirmos ritės laiko pastoviųjų vertės apskaičiuos skirtingos. Gautas didelis skirtumas, kai induktyvumas buvo išmatuotas su HIOKI 3522-50 LCR grandinės matuokliu (apvijos maitinamos $U = 2\,\text{V}$ įtampa). Panašūs skirtumai gauti su antra ir trečia ritėmis. Iš šių rezultatų galima daryti išvadą, jog TŽV apvijų induktyvumą apskaičiuojant ir išmatuojant su specialiu įrenginiu gaunama 22% paklaida. Tokia didelė paklaida atsirado dėl to, kad matuojant kintamą srovę buvo naudojamas nešiojamas daugiafunkcinis matavimo prietaisas ESCORT 179, kurio srovės matavimo tikslumas labai priklauso nuo jo maitinimo elemento tinkamos įtampos.

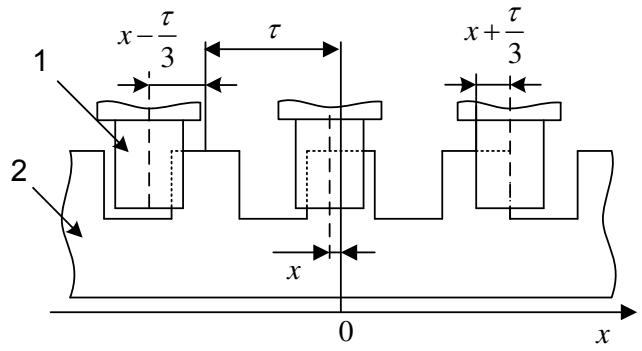
Iš gautos teorinės srovės pereinamojo proceso charakteristikos matoma, kad didžiausia srovė tekanti per apvijas ne viršija 1,5 A. Įjungiant nuosekliai apvijai $R_š = 1\Omega$ šunto varža, ant oscilografo įėjimo kanalo kristų iki 1,5 V įtampa. Ji neviršija matavimo įrenginio įėjimo įtampos, todėl parenkama $R_š = 1\Omega$ aktyvioji varža.



36 pav. Oscilografo jungimo schema

Įjungiant nuosekliai TŽV apvijai šuntuotą, stebimas įtampos kryčio pereinamasis procesas šunto aktyvioje varžoje (žr. 36 pav.). Šunto varža turi būti didelio tikslumo, kad nekeistų savo parametrų keičiantis temperatūrai.

Eksperimentas buvo atliktas apvijas maitinant skirtingomis įtampomis. Stebimos apvijos poliaus didžiausias plotas, pradiniame taške, susilygina su krumpliastiebio trapu. Norint gauti judesį, būtina variklio judamąją dalį pastatyti toje vietoje, kad įjungus maitinimą apvijai, judamoji dalis pajudėtų į kurią nors pusę ir nusistovėti poliaus galus surikiavusi su dantimi.



37 pav. Tiesiaeigio žingsninio variklio pradinė pradėtis prieš pirmos apvijos komutaciją

Čia: 1 – Pirmos fazinės apvijos magnetolaidis;

2 – Krumpliastiebis;

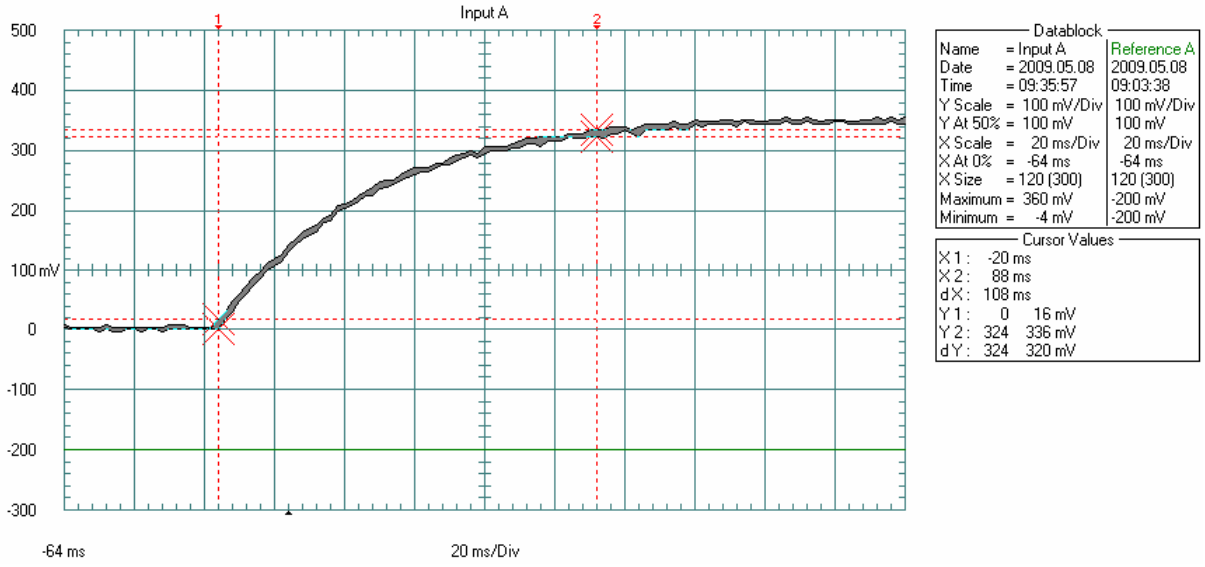
$\tau = 2 \cdot b$ - dantyto antrinio elemento poliaus žingsnis;

b – antrinio elemento vienodas danties ir tarpo tarp dantų plotis.

Polių padėtis atžvilgiu krumpliastiebio pateikta 37 paveiksle. Pradedama tirpti nuo primos apvijos. Kaip matyti iš paveikslo, judama dalis pasislinkus x atstumu. Įjungus pirmai fazinei apvijai maitinimą, judama dalis pasislenka į dešinę pusę $x-\frac{\tau}{3}$ atstumu. Tokiu būdu gaunamas TŽV pirmos apvijos šunto įtampos pereinamasis procesas.

Eksperimentas. Parametrai: $R_š = 1\Omega$; $E = 12\,\text{V}$; $x = 1\,\text{mm}$; $x - \frac{\tau}{3} = 14\,\text{mm}$.

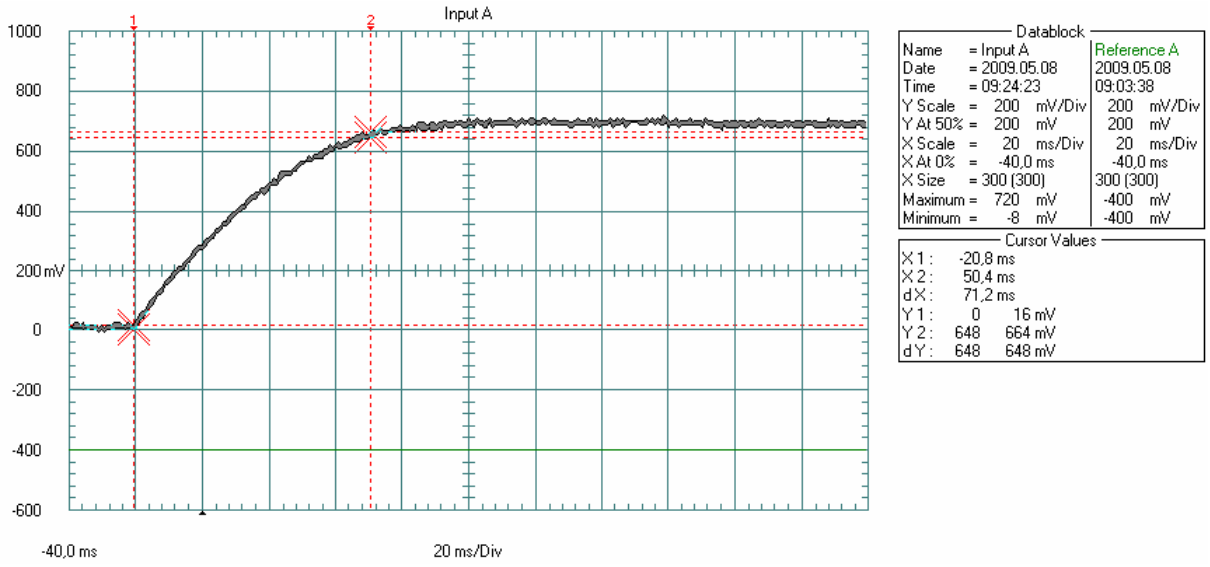
TŽV tyrimui buvo sukurta puslaidininkinė valdymo schema. Naudojant šį valdymo įrenginį, išvengiamas kibirkščiavimas apvijos įjungimo ir išjungimo metu.



38 pav. Pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 12,05\,\text{V}$

Kaip matyti iš oscilografo gautos kreivės (žr. 38 pav.), pereinamasis procesas trunka 108 ms ir srovė nusistovi prie 0,324 A vertės, kai apvija prijungiama prie $U = 12,05\,\text{V}$ nuolatinės įtampos šaltinio. Kaip jau buvo minėta, srovė kinta eksponentiškai, tai patvirtina eksperimento būdu gauti rezultatai. Srovė neturi švytuojamojo pobūdžio, todėl galima teigti, jog variklį veikia didelės išorinės jėgos. Jų pasipriešinimą įveikti 0,324 A srovės sukurta jėga yra per maža ir neefektyvi. Variklio judama dalis paslenka su mažu pagreičiu ir silpna traukos jėga. Poslinkis turi silpnus padėties švytavimus. Lyginant teorinį srovės pereinamąjį procesą (žr. 35 pav.) su eksperimentiniu pastebima, jog charakteristikos panašios. Teorinės ir eksperimentinės srovės pereinamasis procesas nusistovi per panašų laiką, taip pat nusistovėjusios srovės vertės skiriasi 26 mA.

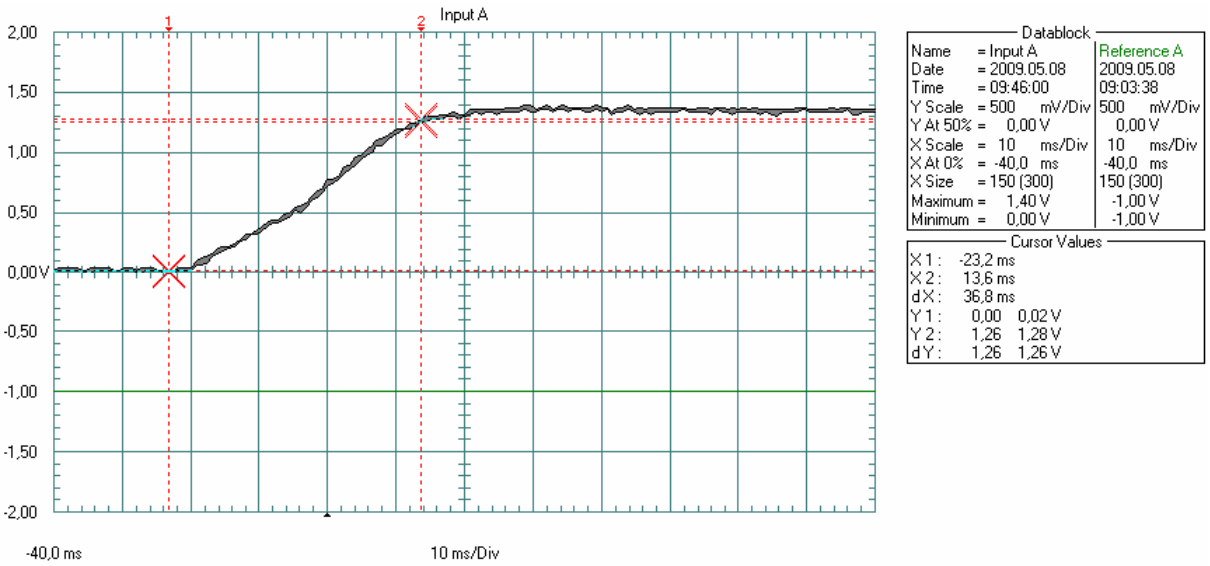
Kitas bandymas atliktas padidinus apvijos maitinimo įtampą iki 24 V. Eksperimentas kartojamas variklio judamą dalį atstačius į pradinę padėtį kaip pavaizduota 37 pav. Gautas srovės pereinamasis procesas pateiktas 39 pav.



39 pav. Pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 23{,}85\,\text{V}$

Padidinus fazinės apvijos maitinimo įtampą, srovės pereinamojo proceso laikas sutrumpėjo, jo trukmė 71 ms (žr. 39 pav.). Padidėjus įtampai, padidėjo ir nusistovėjusi srovė. Kaip matoma iš paveikslo, srovė nusistovėjo prie 0,648 A. TŽV judamas elementas prieš užtikrintai surikiuodamas poliaus galus su krumpliastiebio dantimi, sušvytuoja kelis kartus. Lyginant su teorine charakteristika, eksperimentinė nusistovėjusi srovės vertė mažesnė 7 %.

Eksperimentas toliau tęsiamas didinant maitinimo įtampą iki 48V.

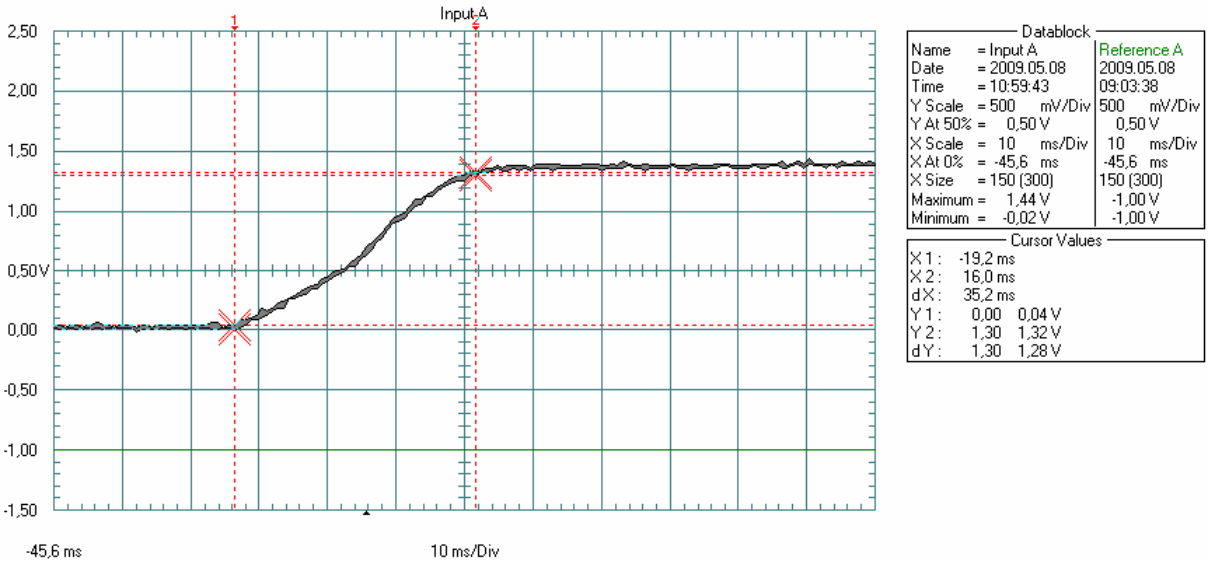


40 pav. Pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 47{,}94\,\text{V}$

Iš 40 pav. matyti, jog pereinamasis laikas sutrumpėjo pusiau, nei prieš tai nagrinėtu atveju. Esant 48V apvijos maitinimui, per apviją nusistovėjusiu režimu teka daugiau nei 1,26 A stiprumo srovė ir pereinamasis procesas pasibaigia po 37 ms. Eksperimento metu, buvo aiškiai pastebėti judamos dalies padėties švytavimai. Dėl šių švytavimų ir fazinės apvijos induktyvumo tiesiogiai surišto su padėtimi, eksperimentinė srovės pereinamojo proceso kreivė susiformavo kitokia lyginant su teorine charakteristika. Eksperimentinėje kreivėje matyti TŽV fazinės apvijos magnetinis srautas įsisotinimas (charakteristikos išlinkimas). Srovės pereinamojo proceso laikas nepriklauso nuo maitinimo įtampos vertės, jis priklauso nuo aktyviosios varžos ir induktyvumo santykio. Realiomis sąlygomis gautas trumpesnis pereinamojo proceso laikas parodo, kad laiko pastovioji pasikeitė dėl reaktyviosios varžos kintamo dydžio. Tai pat galima įvertinti ir apvijų įšilimą ir aktyvios varžos pokytį. Eksperimento metu gauta charakteristika parodo, kad pereinamojo proceso laikas sutampa su laiko pastovia.

Tiriant apvijų induktyvumą buvo pastebėta, jog trečia fazine apvija tekanti kintama srovė stipresnė nei pirmoje ir antroje apvijose. Eksperimentiniai tyrimai su srovės pereinamaisiais procesai taip pat buvo atlikti visoms apvijomis prie skirtingų maitinimo įtampų. Gautas skirtingu fazinių apvijų charakteristikas prie tos pačios maitinimo įtampos galima palyginti.

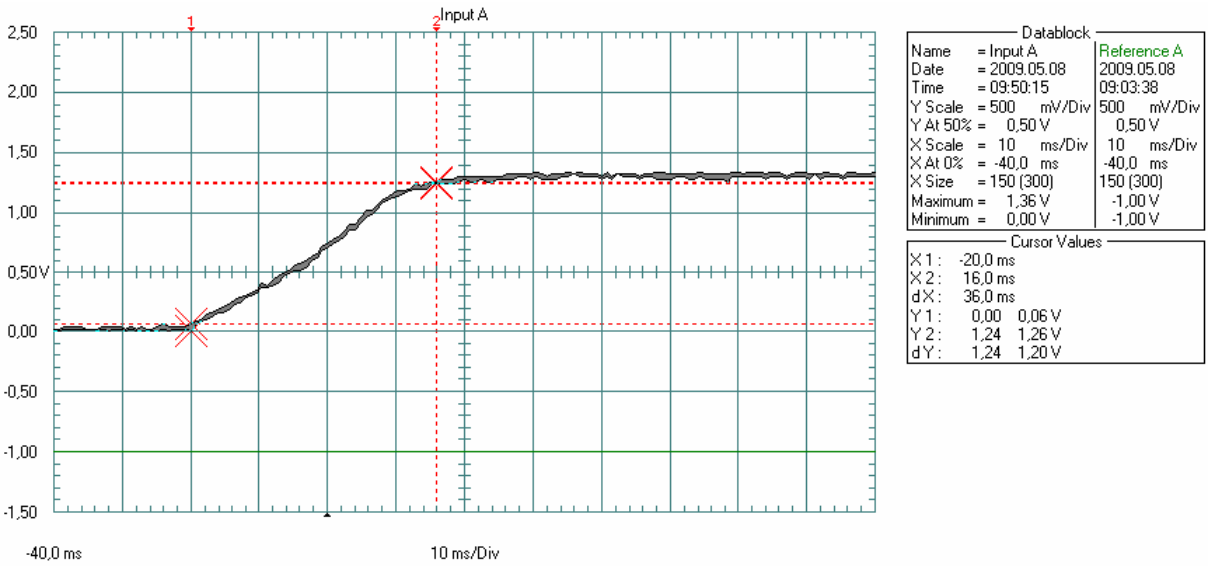
Trečios apvijos palyginimui paimama pereinamojo proceso charakteristika gauta prie 48 V nuolatinės maitinimo įtampos.



41 pav. Trečios ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 47,94\,\text{V}$

Kaip buvo tikėtasi, eksperimentas parodė, jog srovė tik po komutacijos nusistovi 1,3 A (žr. 41 pav.), t.y. ji 5 % stipresnė nei pirmos ar antros ričių esant vienodai maitinimo įtampai.

TŽV dažniausiai naudojami kaip nedidelė kompleksinės sistemos dalis, todėl projektuojant valdymo elektros grandinę, būtina žinoti užfiksuoto variklio apvijomis tekančios srovės vertę. Jeigu sistema neturi greičio grįžtamojo ryšio, pagal gautus srovės parametrus valdymo schema galėtų nustatyti variklio užsikirtimą. Dėl to buvo atlikti matavimai ir su užfiksuota TŽV judamąja dalimi.

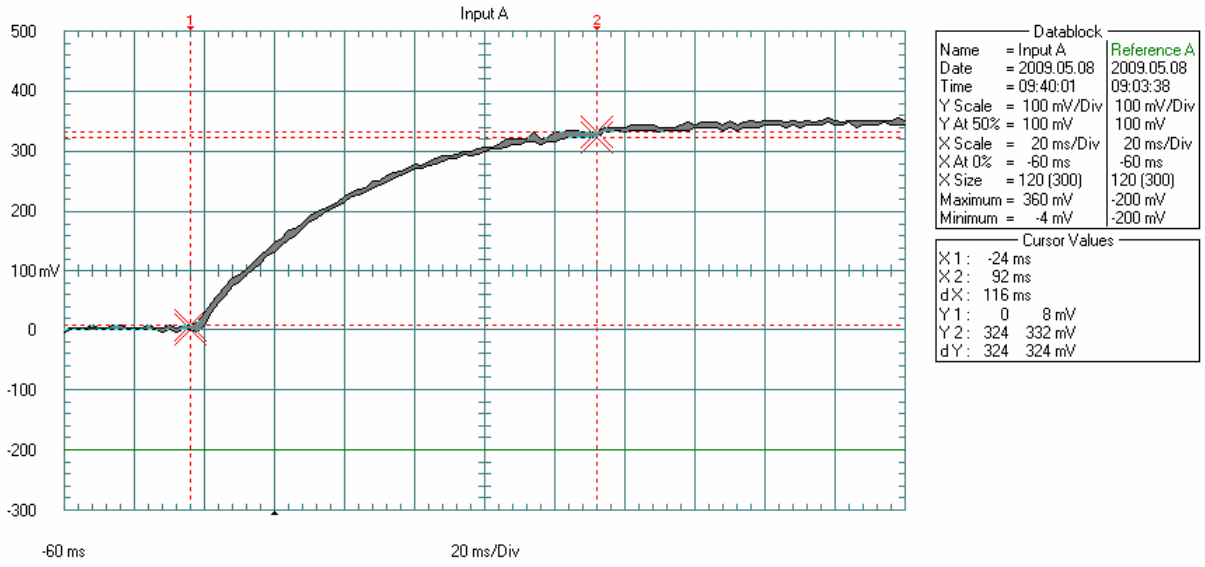


42 pav. Užfiksuoto variklio pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 47,94\,\text{V}$

Pirmos ritės pereinamasis procesas, kai TŽV judamoji dalis užfiksuota, pateiktas 42 pav. Lyginant šią charakteristiką su prieš tai atliktu bandymu, pereinamojo proceso kreivėje didelio skirtumo nėra. Užfiksuoto variklio charakteristikoje srovė nusistovi prie 1,24 A. Ši vertė priklauso nuo poliaus galų padėties krumpliastiebio atžvilgiu. Variklio judamoji dalis buvo užfiksuota, kai ritės polių galai pastatyti tarp dantų, t.y. magnetinis laukas užsidaro per oro tarpą. Šioje padėtyje teka didžiausia srovė per apviją.

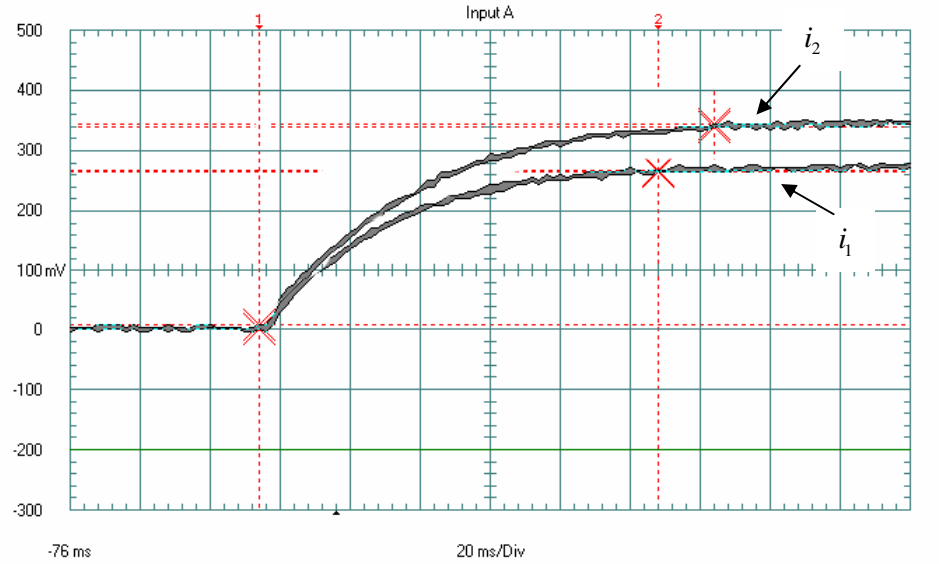
Šis eksperimentas parodė, kad užfiksavus judamą elementą, srovės nusistovėjusi vertė sumažėjo 2 %, o pereinamo proceso laikas pakito nežymiai. Pagal srovės vertę, judamojo elemento užstrigimo užfiksuoti neįmanoma esant 48 V maitinimo įtampai.

Tą patį eksperimentą atlikus su 12 V maitinimo įtampa, tarp charakteristikų gautas didesnis skirtumas. Užfiksuoto antrinio elemento srovės pereinamasis procesas pasibaigia po 96 ms, o srovė pasiekia 276 mA stiprumą (žr. 43 pav.). Neužfiksuoto antrinio elemento pereinamasis procesas nusistovi per 108 ms, o nusistovėjusi srovės vertė pasiekia 324 mA.



43 pav. Užfiksuoto variklio pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai $U = 12,05\,\text{V}$

Siekiant ištirti srovių kitimą po komutacijos, kai padidinta pilnutinė aktyvioji varža, buvo atskirai prijungiamos $6,83\,\Omega$, $8,31\,\Omega$ ir $10,05\,\Omega$ aktyviosios varžos. Palyginimui pateikta ištirta trečia TŽV fazinė apvija.



44 pav. Trečios ritės srovių pereinamųjų procesų palyginimas, kai $U = 12,05\,\text{V}$

Čia: i_1 – srovės pereinamojo proceso kreivė, kai matuojamos fazinės apvijos pilnutinė aktyvioji varža $R_L = 44,33\,\Omega$;

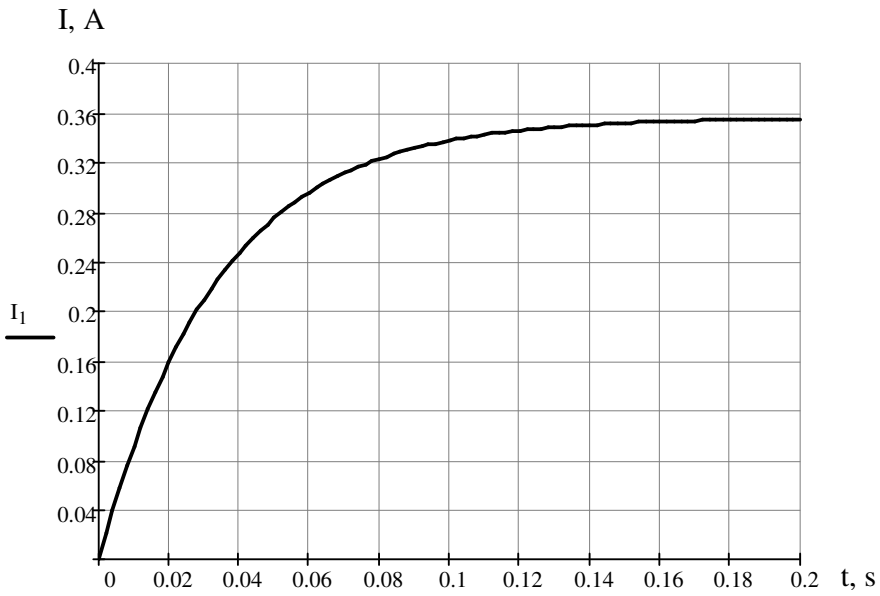
i_2 – srovės pereinamojo proceso kreivė, kai matuojamos fazinės apvijos pilnutinė aktyvioji varža $R_L = 34,28\,\Omega$.

Kaip matyti iš charakteristikų palyginimo (žr. 44 pav.), srovė greičiau nusistovi ir sumažėja nusistovėjusios srovės vertė, kai apvijos aktyvioji varža padidinta. Per variklio ritę tekančios srovės pereinamasis procesas nusistovi po 98 ms, o pasibaigus pereinamajam procesui srovė nusistovi 0,324 A stiprio. Padidinus 10 Ω pilnutinę apvijos aktyviąją varžą, srovės pereinamasis procesas nusistovi per 88 ms, nusistovėjusi srovė lygi 0,252 A stipriui.

Matematinio modelio charakteristikos.

Atlikus eksperimentą, buvo įsitikinta, jog srovės analizinė kitimo išraiška nėra tiksli, nes jai sudarant buvo paneigta per daug esminių fizikinių dėsnių. Viena iš pagrindinių priimtų prielaidų yra ta, kad induktyvumas nekita, t.y. $L_1 = const$. Kaip buvo ištirta, induktyvumo dydis priklauso nuo TŽV judamo elemento padėties. Jis buvo įvertintas kuriant TŽV matematinį modelį.

TŽV matematinį modelį sudaro diferencialinių lygčių sistema (žr. (57) formulę). Šiai lygčių sistemai spręsti buvo panaudotas MatCad 2001 programinis paketas.



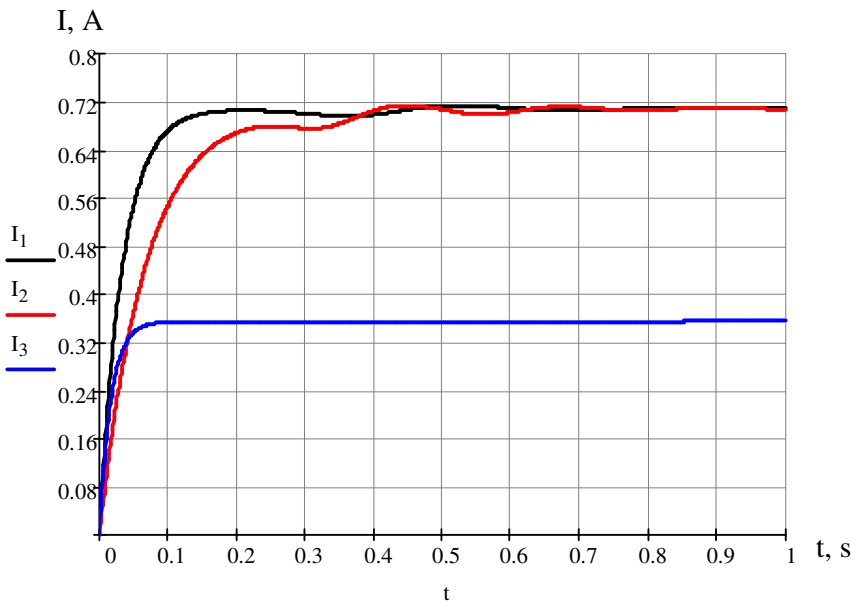
45 pav. Tiesiaeigio žingsninio variklio matematinio modelio pirmos apvijos srovės pereinamasis procesas, kai maitinimo įtampa $U = 12,05\,\text{V}$

Matematinis modelis išspręstas Rungerio ir Kuto (Runge-Kutto) metodu. Sprendžiant šiuo metodu nustatoma x koordinatės atkarpa ir atliekamų diferencijavimų skaičius. Galutinis rezultatas pateikiamas matricoje. Matricos dydis priklauso nuo diferencijavimu skaičiaus. Iš gautų duomenų nubraižoma srovės pereinamojo proceso kreivė (žr. 45 pav.).

Kaip matoma iš 45 pav., matematinio modelio pereinamasis procesas pasibaigia per 81 ms, o nusistovėjusi srovės vertė - 0,322 A. Lyginant su eksperimentine kreive (žr. 6 priedas) pereinamojo proceso laikas skiriasi 25%, t.y. srovės pereinamasis procesas baigiasi po 108 ms, ir

nusistovi 324 mA stiprumo. Ši paklaida galėjo atsirasti dėl netiksliai įvertintų jėgų, veikiančių TŽV, tai pat nebuvo atsižvelgta į greičio ir padėties slopinimus laiko atžvilgiu.

Kitu bandymu tiriama variklio srovės reakcija į pakeitimus. Naudojant matematinį modelį, tiriamos srovės, padidinus ritės aktyviąją varžą ir induktyvumą. Gautos srovės pereinamojo proceso kreivės pateiktos 46 pav.



46 pav. Tiesiaeigio žingsninio variklio matematinio modelio pirmos apvijos srovės pereinamasis procesas kai maitinimo įtampa $U = 24\,\text{V}$

Čia: I_1 – pirmos apvijos pereinamasis procesas, kai $R_L = 33{,}84\,\Omega$, $L_{1,\min} = 1{,}25\,\text{H}$ ir $L_{1,\max} = 1{,}14\,\text{H}$;

I_2 – pirmos apvijos pereinamasis procesas, kai $R_L = 33{,}84\,\Omega$, $L_{1,\min} = 2{,}5\,\text{H}$ ir $L_{1,\max} = 2{,}28\,\text{H}$;

I_3 – pirmos apvijos pereinamasis procesas, kai $R_L = 67{,}68\,\Omega$, $L_{1,\min} = 1{,}25\,\text{H}$ ir $L_{1,\max} = 1{,}14\,\text{H}$;

Kaip matyti iš gautų charakteristikų (žr. 46 pav.), padidinus ritės induktyvumą du kartus, srovės pereinamasis procesas gaunamas švytuojantis (paveiksle pavaizduota raudona kreivė), o padidinus aktyviąją varžą du kartus, srovės nusistovėjusi vertė sumažėja nuo 0,7 A iki 0,34 A (paveiksle mėlyna kreivė). Paveiksle pavaizduota juoda linija, tai tiriamo TŽV srovės kitimo kreivė.

Srovės pereinamojo proceso laikas pailgėjo, kai buvo padidintas ritės induktyvumas, sumažėjo – padidinus aktyviąją varžą lyginant su TŽV srovių pereinamuoju procesu.

Apibendrinant pereinamųjų procesų tyrimą, galima teigti, jog eksperimentiniai bandymai atkartojo teorinius skaičiavus. Apskaičiavus srovės kitimo funkciją, kuri buvo sudaryta „Pereinamųjų procesų“ poskyryje, srovė laiko atžvilgiu kito eksponentės dėsniu. Padidinus maitinimo įtampą, keitėsi laiko pastovioji ir nusistovėjusi srovės vertė. Atlikus eksperimentinius matavimus gautos srovės formos vienodos lyginant su teoriniu. Nesutapimas išryškėjo prie didesnės apvijos maitinimo įtampos.

Matematinio modelio charakteristikų parametrai išsiskyrė 25% paklaida. Ši paklaida galėjo atsirasti dėl netiksliai įvertintų jėgų, matavimo prietaisų paklaidos.

Su gautu matematiniu modeliu toliau galima tirti kitas TŽV charakteristikas, modeliuoti valdymo schemas.

5. Išvados ir siūlymai

Apibendrinant tyrimo rezultatus, galima suformuluoti tokias išvadas:

1. Tiriamas tiesiaeigis žingsninis variklis yra klasikinis reaktyvusis.
2. Tyrimui sukurta vienkryptė puslaidininkinė valdymo schema.
3. Pagal principinę elektrinė grandinę išvesta srovės kitimo funkcija.
4. Atlikus eksperimentinius induktyvumo matavimus, antriniam elementui judant krumpliastiebio atžvilgiu, buvo gauta *cos* dėsniu kintanti kreivė. Taip pat pastebėta, kad tiriamo TŽV fizinio modelio apvijos nėra visiškai vienodos. Trečia apvija turi didesnį induktyvumą.
5. Atsižvelgiant į TŽV struktūrą ir antriniam elementui judant x ašies kryptimi veikiančias jėgas, buvo sudaryta trijų diferencialinių lygčių sistema, analitiškai apibūdinanti TŽV. Šią sistemą sudaro padėties, greičio ir srovės kitimai laiko atžvilgiu.
6. Eksperimentas parodė, kad nusistovėjusios srovės vertė priklauso nuo poliaus galų padėties atžvilgiu krumpliastiebio. Srovė per apviją teka silpnesnė tada, kai poliaus galai surikiuoti su krumpliastiebio tarpu. Antrinio elemento apviją maitinant 12 V nuolatine įtampa, srovės pereinamasis procesas nusistovi po 100 ms, srovė lygi 320 mA. Užfiksavus TŽV judamą elementą, kai magnetinis laukas užsidaro per oro tapą, srovės pereinamasis procesas pasibaigia po 95 ms, srovė nusistovi – 270 mA.
7. Kai apvijos maitinimo įtampa 12 V, tai apvijoje teka 0,35 A stiprumo srovė.
8. Esant 24 V maitinimo įtampai, srovė šokteli iki 0,7 A.
9. Padidinus apvijos įtampą iki 48 V, srovė nusistovi prie 1,32 A.
10. Eksperimento metu pastebėta, kad prie 48V įtampos apvijos magnetinis srautas įsistotina ir kreivėje gaunamas išlinkimas didėjant srovei.
11. Didinant TŽV fizinio modelio trečios ritės pilnutinę aktyviąją varžą 6,83 Ω, 8,31 Ω ir 10,05 Ω, kai maitinimo įtampa U = 12,05 V atitinkamai gautos susistovėjusios srovės: 0,28 A, 0,26 A ir 0,25 A. Didinant apvijos aktyviąją varžą nusistovėjusi srovė mažėja.
12. Sudarytas matematinis modelis nėra tikslus, dėl netiksliai įvertintos jėgos funkcijos. Matematinio modelio paklaida siekia iki 25%.
13. Matematinis modelis gali būti pritaikytas tolesniems TŽV tyrimams, valdymo grandinių modeliavimui.

Literatūros sąrašas

1. Charles Wheatstone [žiūrėta 2008-01-12]. Interneto prieiga: http://www.kcl.ac.uk/college/history/people/wheatstone.html
2. Gliding into the Future of Mass Transportation [žiūrėta 2008-01-24]. Interneto prieiga: http://cem.colorado.edu/archives/fl1997/thor.html
3. Linear motor [žiūrėta 2008-01-24]. Interneto prieiga: http://en.wikipedia.org/wiki/Linear_motor
4. Smilgevičius, A. Automatikos mikromašinos. Vilnius: Technika, 2005. 344 p.
5. Viorel, I. A. A Modular Hybrid Linear Stepper Motor. Roma: Technical University of Cluj.
6. Lorand, S. Modular hybrid linear and surface stepper motors. Roma: Technical University of Cluj, 2003
7. Карпенко, Б. К. Шаговые электродвигатели. Киев: Техника, 1972. 216 p.
8. Khorrami, F., Krishnamurthy, P., Melkote, H. Modeling and Adaptive Nonlinear Control of Electric Motors. Berlin: Springer, 2003. 523 p.
9. Gerdžiūnas, P., Plakys, V. Bendrieji akademinių darbų įforminimo reikalavimai. Vilnius: Technika, 2007. 75 p.
10. Corda, J. Cylindrical linear stepper motor. Department of Electronic and Electrical Engineering Univesity of Leeds, UK. 1994.
11. Stepper Motor Basics [žiūrėta 2008-03-12]. Interneto prieiga: www.solarbotics.net/library/pdflib/pdf/motorbas.pdf
12. Seilius, A., Žitkevičius, E. Principinių elektrinių schemų svarbiausių elementų grafiniai žymenys ir jų simboliai. Radio. Nr 12. 2003.
13. Douglas, W. J. Stepping Motors Fundamentals. University of Iowa, 2004.
14. Control of Stepping Motors [žiūrėta 2008-03-15]. Interneto prieiga: http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step/
15. Pukys, P., Stonys, J., Virbalis, A. Teorinė elektrotechnika. Kaunas: Technologija 2004, 316p.
16. Афонин А. А., Гребеников В. В. Линейный электромагнитный прибод. Расчет статических и динамических характеристик. Киев, 1981.
17. Ионкин, П. А., Мельников, Н. А. Теоретические основы электротехники. Москва, 1965, 735 с.
18. Modelling of linear motor feed drives for grinding machines [žiūrėta 2008-04-20]. Interneto prieiga: http://www.inderscience.com/storage/f110341112829576.pdf

19. The Linear Induction Motor(LIM) Power Factor, Efficiency and Finite Element Considerations. [žiūrėta 2008-04-20]. Interneto prieiga: http://www.camacho.prof.ufu.br/icem02_472.pdf
20. Gan, W. C., Cheung, N. C. Position Control of Linear Switched Reluctance Motors for High-Precision Applications. Iš IEEE Transactions On Industry. VOL 39. 2003. 1350 – 1362 p.
21. Poška, A., J. Lanksčiosios gamybos sistemų automatizavimas. Vilnius: Technika, 2004. 96 p.
22. A Modular Hybrid Linear Stepper Motor [žiūrėta 2008-05-05]. Interneto prieiga: http://users.utcluj.ro/~szabol/Papers/Oradea99.pdf
23. Dinamics Modeling and analysis of a sawyer linear stepper motor [žiūrėta 2008-05-19]. Interneto prieiga: http://dspace.mit.edu/bitstream/1721.1/12642/1/28467437.pdf
24. Quick Start for Beginners to Drive a Stepper Motor [žiūrėta 2008-05-28]. Interneto prieiga: http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN2974.pdf
25. Stepper motors and drive methods [žiūrėta 2008-07-17]. Interneto prieiga: http://www.northcountryradio.com/PDFs/column006.pdf
26. Current Measurements of ATA Stepper Motors [žiūrėta 2008-08-03]. Interneto prieiga: http://astro.berkeley.edu/~gharp/documents/StepperMotorCurrents.pdf
27. Radzevičius, L. Elektros inžinerijos magistrantūros studijų tiriamieji ir baigiamieji darbai. Metodiniai nurodymai. Vilnius: Technika, 2009. 66 p.
28. Masiokas, S. Elektrotechnika. Kaunas: "Candela", 1994. 423 p.
29. Matkevicius, E., Radzevicius, L. Mathematical model of the linear motor. Iš Electronics and Electrical Engineering. No 5 (77). 2007.
30. Elektromagnetinių laukų poveikis žmogaus organizmui [žiūrėta 2009-01-15]. Interneto prieiga: http://www.vsv.lt/mokymas/Elektromagnetiniu_lauku

Priedai

1 priedas. Ričių parametrų matavimai, kai U = 14V.

6 lentelė. Pirmos ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 14V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	28,53	13,93	488,258	487,0839	1,550436
1	28,5	13,94	489,1228	487,9508	1,553196
2	28,66	13,94	486,3922	485,2136	1,544483
3	28,75	13,93	484,5217	483,3386	1,538514
4	28,92	13,93	481,6736	480,4834	1,529426
5	29,21	13,94	477,2338	476,0325	1,515259
6	29,48	13,93	472,5237	471,3105	1,500228
7	29,73	13,92	468,2139	466,9894	1,486474
8	30,18	13,93	461,5639	460,3218	1,46525
9	30,45	13,94	457,7997	456,5473	1,453235
10	30,76	13,94	453,186	451,9208	1,438508
11	31,24	13,94	446,2228	444,9378	1,416281
12	31,53	13,94	442,1186	440,8216	1,403179
13	31,91	13,94	436,8537	435,541	1,38637
14	32,11	13,94	434,1327	432,8118	1,377683
15	32,17	13,94	433,323	431,9996	1,375097
16	32,12	13,94	433,9975	432,6762	1,377251
17	32,04	13,94	435,0811	433,7631	1,380711
18	31,77	13,94	438,7787	437,4719	1,392516
19	31,56	13,94	441,6984	440,4001	1,401837
20	31,2	13,94	446,7949	445,5115	1,418107
21	30,9	13,94	451,1327	449,8617	1,431954
22	30,46	13,94	457,6494	456,3965	1,452755
23	30,06	13,94	463,7392	462,5029	1,472192
24	29,87	13,94	466,689	465,4605	1,481607
25	29,49	13,94	472,7026	471,4898	1,500799
26	29,06	13,94	479,6972	478,5021	1,523119
27	28,83	13,94	483,5241	482,3385	1,535331
28	28,64	13,94	486,7318	485,5541	1,545567
29	28,37	13,94	491,3641	490,1975	1,560347

7 lentelė. Antros ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 14V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	27,38	13,96	509,8612	508,7483	1,619396
1	27,43	13,96	508,9318	507,8168	1,616431
2	27,71	13,96	503,7892	502,6628	1,600026
3	27,99	13,96	498,7496	497,6117	1,583947
4	28,38	13,96	491,8957	490,742	1,56208
5	28,72	13,96	486,0724	484,9049	1,5435
6	29,13	13,96	479,231	478,0468	1,52167
7	29,56	13,96	472,2598	471,058	1,499424
8	30,05	13,96	464,5591	463,3373	1,474848
9	30,42	13,96	458,9086	457,6718	1,456814
10	30,76	13,96	453,8362	452,5854	1,440624
11	31,22	13,96	447,1493	445,8798	1,419279
12	31,58	13,96	442,0519	440,7678	1,403007
13	31,98	13,96	436,5228	435,2224	1,385356
14	32,13	13,96	434,4849	433,1783	1,378849
15	32,16	13,96	434,0796	432,7718	1,377555
16	31,98	13,96	436,5228	435,2224	1,385356
17	31,73	13,96	439,9622	438,6719	1,396336
18	31,32	13,96	445,7216	444,448	1,414722
19	30,81	13,96	453,0996	451,8469	1,438273
20	30,37	13,96	459,6641	458,4293	1,459226
21	29,99	13,96	465,4885	464,2692	1,477815
22	29,52	13,96	472,8997	471,6996	1,501466
23	29,12	13,96	479,3956	478,2117	1,522195
24	28,76	13,96	485,3964	484,2272	1,541343
25	28,43	13,96	491,0306	489,8749	1,55932
26	28,17	13,96	495,5627	494,4175	1,57378
27	27,94	13,96	499,6421	498,5063	1,586795
28	27,67	13,96	504,5175	503,3928	1,602349
29	27,44	13,96	508,7464	507,631	1,61584

8 lentelė. Trečios ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 14V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	28,42	13,96	491,2034	490,0611	1,559913
1	28,54	13,96	489,1381	487,9909	1,553323
2	28,71	13,96	486,2417	485,0877	1,544082
3	29	13,96	481,3793	480,2136	1,528567
4	29,34	13,96	475,801	474,6216	1,510767
5	29,7	13,96	470,0337	468,8398	1,492363
6	30,04	13,96	464,7137	463,5061	1,475386
7	30,57	13,96	456,6569	455,4279	1,449672
8	31,02	13,96	450,0322	448,7851	1,428527
9	31,41	13,96	444,4444	443,1816	1,410691
10	31,82	13,96	438,7178	437,4384	1,39241
11	32,38	13,96	431,1303	429,8284	1,368186
12	32,65	13,96	427,5651	426,2523	1,356803
13	33,04	13,96	422,5182	421,1896	1,340688
14	33,37	13,96	418,3398	416,998	1,327346
15	33,49	13,96	416,8408	415,4941	1,322559
16	33,38	13,96	418,2145	416,8722	1,326946
17	32,9	13,96	424,3161	422,9932	1,346429
18	32,24	13,96	433,0025	431,7062	1,374163
19	31,75	13,96	439,685	438,4085	1,395498
20	31,37	13,96	445,0112	443,75	1,4125
21	30,87	13,96	452,219	450,9779	1,435507
22	30,43	13,96	458,7578	457,5345	1,456378
23	30	13,96	465,3333	464,1274	1,477363
24	29,56	13,96	472,2598	471,0716	1,499467
25	29,19	13,96	478,246	477,0726	1,518569
26	28,87	13,96	483,5469	482,3865	1,535484
27	28,6	13,96	488,1119	486,9623	1,550049
28	28,37	13,96	492,0691	490,9288	1,562675
29	28,3	13,96	493,2862	492,1487	1,566558

2 priedas. Ričių induktyvumo matavimai, kai U = 48V.

9 lentelė. Pirmos ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 48V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	90,9	48,2	530,253	529,1721	1,684407
1	91,1	48,2	529,0889	528,0056	1,680694
2	91,7	48,2	525,627	524,5366	1,669652
3	92,2	48,2	522,7766	521,6802	1,66056
4	93	48,2	518,2796	517,1736	1,646215
5	93,9	48,2	513,312	512,1954	1,630369
6	95,1	48,2	506,8349	505,7039	1,609706
7	96,2	48,2	501,0395	499,8954	1,591217
8	97,4	48,2	494,8665	493,7081	1,571522
9	98,8	48,2	487,8543	486,6792	1,549148
10	100,4	48,2	480,0797	478,8855	1,52434
11	101,7	48,2	473,943	472,7333	1,504757
12	102,7	48,2	469,3281	468,1066	1,490029
13	103,9	48,2	463,9076	462,6717	1,47273
14	104,9	48,2	459,4852	458,2374	1,458615
15	105,3	48,2	457,7398	456,4872	1,453044
16	105,2	48,2	458,1749	456,9235	1,454433
17	104,8	48,2	459,9237	458,677	1,460014
18	104,1	48,2	463,0163	461,7781	1,469885
19	103	48,2	467,9612	466,736	1,485667
20	101,8	48,2	473,4774	472,2666	1,503271
21	100,2	48,2	481,0379	479,8462	1,527398
22	99,1	48,2	486,3774	485,1987	1,544436
23	97,7	48,2	493,347	492,185	1,566674
24	96,6	48,2	498,9648	497,816	1,584597
25	95,1	48,2	506,8349	505,7039	1,609706
26	94	48,2	512,766	511,6481	1,628626
27	93,1	48,2	517,7229	516,6158	1,644439
28	92	48,2	523,913	522,819	1,664185
29	91,4	48,2	527,3523	526,2654	1,675155

10 lentelė. Antros ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 48V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	89,4	48,2	539,1499	538,0975	1,712818
1	89,7	48,2	537,3467	536,2908	1,707067
2	90,5	48,2	532,5967	531,5313	1,691917
3	91,5	48,2	526,776	525,6988	1,673351
4	92,7	48,2	519,9569	518,8655	1,6516
5	94	48,2	512,766	511,6593	1,628662
6	95,4	48,2	505,2411	504,1179	1,604657
7	97	48,2	496,9072	495,7652	1,57807
8	98,2	48,2	490,835	489,6788	1,558696
9	99,8	48,2	482,9659	481,7908	1,533588
10	101,2	48,2	476,2846	475,093	1,512268
11	102,7	48,2	469,3281	468,1188	1,490068
12	103,7	48,2	464,8023	463,5812	1,475625
13	104,9	48,2	459,4852	458,2499	1,458655
14	105,7	48,2	456,0076	454,7628	1,447555
15	105,9	48,2	455,1464	453,8993	1,444806
16	105,3	48,2	457,7398	456,4998	1,453084
17	104,1	48,2	463,0163	461,7905	1,469925
18	102,4	48,2	470,7031	469,4974	1,494456
19	101,2	48,2	476,2846	475,093	1,512268
20	99,6	48,2	483,9357	482,763	1,536682
21	97,8	48,2	492,8425	491,6911	1,565101
22	96,4	48,2	500	498,865	1,587937
23	95	48,2	507,3684	506,25	1,611444
24	93,4	48,2	516,06	514,9604	1,63917
25	92,5	48,2	521,0811	519,9921	1,655186
26	91,1	48,2	529,0889	528,0165	1,680729
27	90,2	48,2	534,3681	533,3063	1,697567
28	89,4	48,2	539,1499	538,0975	1,712818
29	88,7	48,2	543,4047	542,3606	1,726387

11 lentelė. Trečios ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 48V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	91,6	48,2	526,2009	525,1347	1,671556
1	91,5	48,2	526,776	525,7109	1,67339
2	92,8	48,2	519,3966	518,3164	1,649852
3	93,8	48,2	513,8593	512,7674	1,632189
4	94,9	48,2	507,9031	506,7984	1,613189
5	96	48,2	502,0833	500,9658	1,594624
6	97,5	48,2	494,359	493,224	1,569981
7	98,9	48,2	487,361	486,2096	1,547653
8	100,5	48,2	479,602	478,432	1,522896
9	102,4	48,2	470,7031	469,5109	1,4945
10	104,2	48,2	462,572	461,3588	1,468551
11	106	48,2	454,717	453,4828	1,44348
12	107,5	48,2	448,3721	447,1204	1,423228
13	108,9	48,2	442,6079	441,3398	1,404828
14	109,9	48,2	438,5805	437,3008	1,391972
15	110,2	48,2	437,3866	436,1033	1,38816
16	109,6	48,2	439,781	438,5048	1,395804
17	108,5	48,2	444,2396	442,9762	1,410037
18	107,3	48,2	449,2078	447,9584	1,425896
19	105,3	48,2	457,7398	456,5138	1,453128
20	103,9	48,2	463,9076	462,6979	1,472813
21	102	48,2	472,549	471,3615	1,50039
22	100,4	48,2	480,0797	478,9108	1,524421
23	99	48,2	486,8687	485,7162	1,546083
24	97,4	48,2	494,8665	493,7327	1,5716
25	95,8	48,2	503,1315	502,0164	1,597968
26	94,7	48,2	508,9757	507,8734	1,616611
27	93,5	48,2	515,508	514,4197	1,637449
28	92,5	48,2	521,0811	520,0044	1,655225
29	91,7	48,2	525,627	524,5597	1,669725

12 lentelė. Pirmos ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 2V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	4,773	1,88	391,78	390,3158	1,24715
1	4,778	1,88	391,2	389,7336	1,2453
2	4,792	1,88	389,9	388,4287	1,24155
3	4,816	1,88	387,9	386,4211	1,2351
4	4,845	1,88	385,6	384,1122	1,2278
5	4,869	1,88	383,7	382,2048	1,22165
6	4,905	1,88	380,7	379,193	1,2123
7	4,937	1,88	378,1	376,5826	1,2039
8	4,98	1,88	374,9	373,3696	1,1934
9	5,018	1,88	371,8	370,2568	1,184
10	5,057	1,88	368,8	367,2442	1,1745
11	5,102	1,88	365,6	364,0305	1,16405
12	5,138	1,88	363	361,4192	1,1556
13	5,169	1,88	360,81	359,2196	1,14865
14	5,194	1,88	359	357,4015	1,1429
15	5,204	1,88	358,1	356,4975	1,14015
16	5,204	1,88	358,2	356,5979	1,1403
17	5,188	1,88	359,3	357,7029	1,14405
18	5,164	1,88	361,1	359,5109	1,14965
19	5,127	1,88	363,75	362,1725	1,158
20	5,087	1,88	366,7	365,1352	1,1674
21	5,048	1,88	369,5	367,9471	1,1763
22	5,009	1,88	372,5	370,9597	1,1858
23	4,977	1,88	375	373,47	1,1938
24	4,932	1,88	378,3	376,7834	1,2046
25	4,893	1,88	381,4	379,8958	1,21435
26	4,855	1,88	384,6	383,1084	1,22445
27	4,823	1,88	387,2	385,7184	1,2327
28	4,799	1,88	389	387,5253	1,2386
29	4,772	1,88	391,4	389,9344	1,24615

13 lentelė. Antros ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 2V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	4,601	1,88	405,89	404,4911	1,2921
1	4,607	1,88	405,26	403,8589	1,2903
2	4,625	1,88	403,31	401,9021	1,2853
3	4,661	1,88	400,45	399,032	1,275
4	4,697	1,88	397,28	395,8506	1,265
5	4,74	1,88	393,6	392,1572	1,253
6	4,783	1,88	389,92	388,4636	1,24175
7	4,808	1,88	387,07	385,6028	1,2325
8	4,869	1,88	383	381,5171	1,21945
9	4,906	1,88	380,05	378,5556	1,21005
10	4,969	1,88	375,19	373,6762	1,1944
11	5,01	1,88	371,9	370,3727	1,18415
12	5,058	1,88	368,34	366,7979	1,17265
13	5,091	1,88	365,8	364,2471	1,1646
14	5,116	1,88	364,04	362,4796	1,2822
15	5,126	1,88	363,27	361,7063	1,15655
16	5,11	1,88	364,45	362,8914	1,16025
17	5,071	1,88	367,26	365,7133	1,1693
18	5,029	1,88	370,5	368,9669	1,17955
19	4,981	1,88	374,15	372,6319	1,1912
20	4,933	1,88	377,9	376,3971	1,2031
21	4,885	1,88	381,75	380,2623	1,2153
22	4,834	1,88	385,84	384,3681	1,2283
23	4,796	1,88	388,97	387,51	1,2385
24	4,75	1,88	392,8	391,3543	1,2506
25	4,714	1,88	395,95	394,5158	1,26065
26	4,676	1,88	399,2	397,7775	1,271
27	4,64	1,88	402,4	400,9889	1,2813
28	4,811	1,88	404,95	403,5478	1,2893
29	4,589	1,88	406,97	405,5748	1,29565

14 lentelė. Trečios ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 2V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	4,73	1,88	394,5	393,0768	1,2549
1	4,74	1,88	393,8	392,3742	1,25395
2	4,75	1,88	391,2	389,7647	1,25
3	4,795	1,88	388,2	386,7536	1,23905
4	4,841	1,88	385,56	384,1036	1,22755
5	4,88	1,88	382,02	380,5501	1,2165
6	4,927	1,88	378,32	376,8357	1,2046
7	4,984	1,88	372,75	371,2434	1,1903
8	5,013	1,88	371,41	369,8979	1,18305
9	5,064	1,88	368	366,4739	1,1715
10	5,127	1,88	363,39	361,8444	1,15665
11	5,186	1,88	358,71	357,1442	1,1425
12	5,237	1,88	356,14	354,5628	1,1321
13	5,272	1,88	353	351,4087	1,124
14	5,306	1,88	350,74	349,1384	1,1168
15	5,325	1,88	349,3	347,6918	1,1131
16	5,314	1,88	350,32	348,7165	1,1149
17	5,277	1,88	352,66	351,0672	1,1227
18	5,232	1,88	355,72	354,1409	1,13255
19	5,168	1,88	358	356,431	1,14245
20	5,131	1,88	363	361,4527	1,155
21	5,077	1,88	367,37	365,8412	1,1688
22	5,016	1,88	371,49	369,9783	1,18265
23	4,97	1,88	375,05	373,5527	1,194
24	4,921	1,88	378,49	377,0063	1,2065
25	4,878	1,88	382,07	380,6003	1,2166
26	4,833	1,88	386,01	384,5553	1,22875
27	4,79	1,88	389,4	387,9581	1,23985
28	4,759	1,88	392,2	390,7684	1,24875
29	4,734	1,88	393,8	392,3742	1,25355

15 lentelė. Pirmos ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 24V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	46,71	24,04	514,665	513,5512	1,634684
1	46,86	24,04	513,0175	511,9002	1,629429
2	47,16	24,04	509,754	508,6296	1,619018
3	47,52	24,04	505,8923	504,7592	1,606698
4	48,13	24,04	499,4806	498,3329	1,586243
5	48,76	24,04	493,0271	491,8644	1,565653
6	49,39	24,04	486,7382	485,5604	1,545587
7	49,92	24,04	481,5705	480,3801	1,529097
8	50,44	24,04	476,6059	475,403	1,513255
9	51,07	24,04	470,7265	469,5085	1,494492
10	51,7	24,04	464,9903	463,7573	1,476185
11	52,28	24,04	459,8317	458,5848	1,459721
12	52,91	24,04	454,3565	453,0945	1,442245
13	53,36	24,04	450,5247	449,252	1,430014
14	53,62	24,04	448,3402	447,0613	1,42304
15	53,63	24,04	448,2566	446,9774	1,422773
16	53,51	24,04	449,2618	447,9855	1,425982
17	53,07	24,04	452,9866	451,7209	1,437872
18	52,67	24,04	456,4268	455,1706	1,448853
19	52,04	24,04	461,9523	460,7112	1,466489
20	51,36	24,04	468,0685	466,8437	1,48601
21	50,69	24,04	474,2553	473,0464	1,505754
22	50,13	24,04	479,5532	478,3577	1,52266
23	49,53	24,04	485,3624	484,1813	1,541197
24	49,04	24,04	490,2121	489,0427	1,556671
25	48,38	24,04	496,8995	495,7459	1,578008
26	47,97	24,04	501,1465	500,0027	1,591558
27	47,52	24,04	505,8923	504,7592	1,606698
28	47,1	24,04	510,4034	509,2804	1,62109
29	46,88	24,04	512,7986	511,6809	1,628731

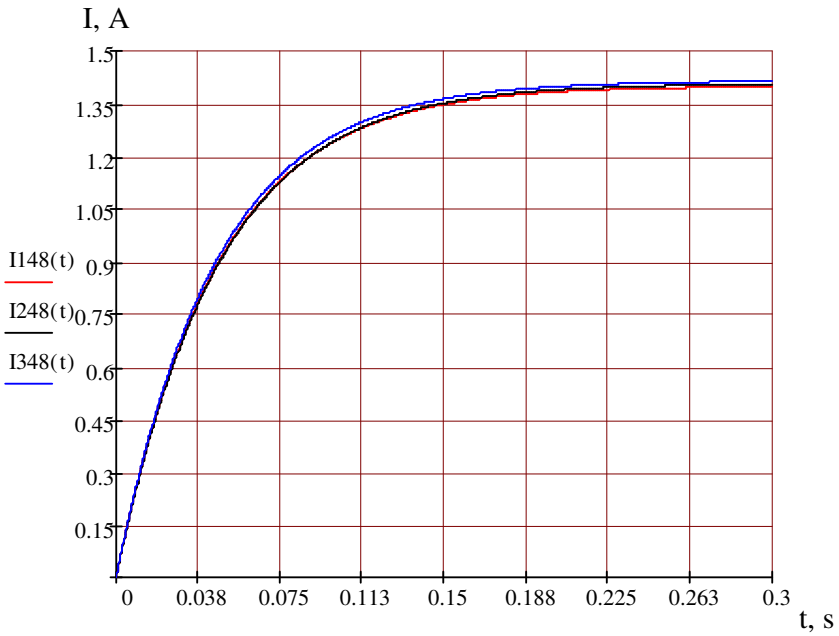
16 lentelė. Antros ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 24V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	45,56	24,1	528,9728	527,9001	1,680358
1	45,69	24,1	527,4677	526,392	1,675558
2	45,93	24,1	524,7115	523,6301	1,666766
3	46,36	24,1	519,8447	518,7532	1,651243
4	46,9	24,1	513,8593	512,755	1,63215
5	47,74	24,1	504,8178	503,6937	1,603307
6	47,91	24,1	503,0265	501,8984	1,597592
7	48,63	24,1	495,5789	494,4338	1,573832
8	49,27	24,1	489,1415	487,9813	1,553293
9	49,94	24,1	482,5791	481,4031	1,532354
10	50,61	24,1	476,1905	474,9986	1,511968
11	51,5	24,1	467,9612	466,7483	1,485706
12	52,27	24,1	461,0675	459,8365	1,463705
13	52,88	24,1	455,7489	454,5034	1,446729
14	53,41	24,1	451,2264	449,9684	1,432294
15	53,81	24,1	447,8721	446,6047	1,421587
16	53,79	24,1	448,0387	446,7717	1,422119
17	53,45	24,1	450,8887	449,6298	1,431216
18	52,92	24,1	455,4044	454,158	1,44563
19	52,19	24,1	461,7743	460,5451	1,465961
20	51,47	24,1	468,2339	467,0218	1,486576
21	50,79	24,1	474,5029	473,3068	1,506582
22	50,17	24,1	480,3668	479,1853	1,525294
23	49,4	24,1	487,8543	486,691	1,549185
24	48,74	24,1	494,4604	493,3127	1,570263
25	47,99	24,1	502,188	501,058	1,594917
26	47,19	24,1	510,7014	509,5903	1,622076
27	46,58	24,1	517,3894	516,2927	1,643411
28	46,18	24,1	521,8709	520,7836	1,657706
29	45,62	24,1	528,2771	527,203	1,678139

17 lentelė. Trečios ritės eksperimentiniai duomenys, kai U = 24V

Poslinkis x, mm	**i, mA**	**u, V**	**Z, Ω**	**X, Ω**	**L, H**
0	47,44	24,1	508,0101	506,8931	1,613491
1	47,49	24,1	507,4753	506,3571	1,611785
2	47,81	24,1	504,0786	502,9529	1,600949
3	48,26	24,1	499,3784	498,242	1,585954
4	48,83	24,1	493,549	492,3992	1,567355
5	49,53	24,1	486,5738	485,4074	1,5451
6	50,1	24,1	481,0379	479,8581	1,527436
7	50,82	24,1	474,2227	473,0259	1,505688
8	51,61	24,1	466,9638	465,7483	1,482523
9	52,3	24,1	460,8031	459,5713	1,462861
10	53,05	24,1	454,2884	453,0389	1,442068
11	53,92	24,1	446,9585	445,6884	1,41867
12	54,64	24,1	441,0688	439,7818	1,399869
13	55,31	24,1	435,7259	434,4231	1,382812
14	55,87	24,1	431,3585	430,0424	1,368868
15	56,12	24,1	429,4369	428,1149	1,362732
16	56,03	24,1	430,1267	428,8069	1,364935
17	55,56	24,1	433,7653	432,4565	1,376552
18	55,02	24,1	438,0225	436,7265	1,390144
19	54,36	24,1	443,3407	442,0603	1,407122
20	53,55	24,1	450,0467	448,7854	1,428528
21	52,79	24,1	456,5259	455,2825	1,449209
22	52,11	24,1	462,4832	461,2559	1,468223
23	51,31	24,1	469,694	468,4856	1,491236
24	50,46	24,1	477,606	476,4177	1,516485
25	49,8	24,1	483,9357	482,763	1,536682
26	49,08	24,1	491,035	489,8793	1,559334
27	48,54	24,1	496,4977	495,3548	1,576763
28	48,08	24,1	501,2479	500,1158	1,591918
29	47,65	24,1	505,7712	504,6493	1,606349

Srovės pereinamieji procesai skirtingose fazinėse ritėse, kai U = 48 V



Čia: $I148(t)$ - pirmos fazinės ritės pereinamasis procesas;

$I248(t)$ - antros fazinės ritės pereinamasis procesas;

$I348(t)$ - trečios fazinės ritės pereinamasis procesas;

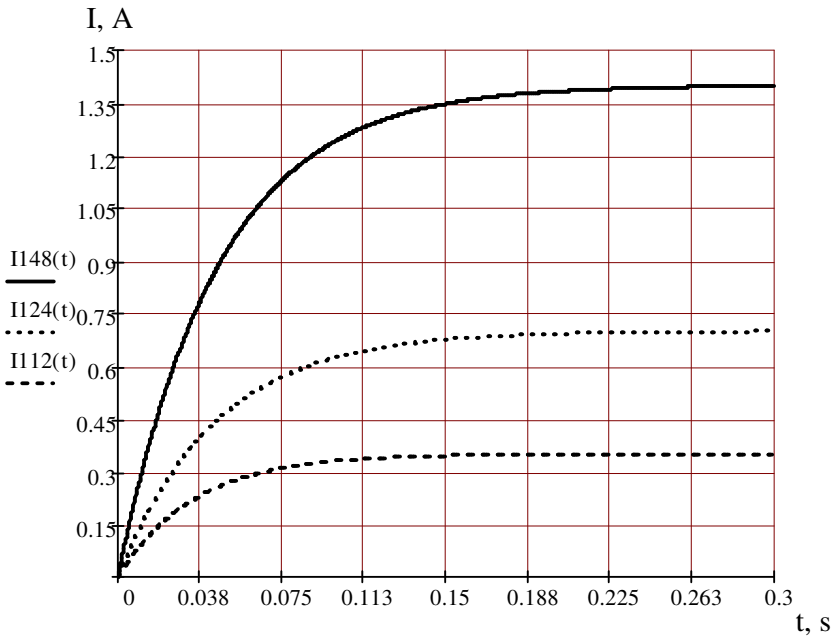
Analizinė išraiška:

$i_1(t) = 1,4 \cdot \left(1 - e^{-21,88 \cdot t}\right)$;

$i_2(t) = 1,407 \cdot \left(1 - e^{-21,54 \cdot t}\right)$;

$i_3(t) = 1,415 \cdot \left(1 - e^{-22,14 \cdot t}\right)$.

Pirmos apvijos srovės pereinamieji procesai prie skirtingų maitinimo įtampų



Čia: *i148(t)* – pirmos fazinės ritės pereinamasis procesas, kai $U = 48\,\mathrm{V}$;

i124(t) – pirmos fazinės ritės pereinamasis procesas, kai $U = 24\,\mathrm{V}$;

i112(t) – pirmos fazinės ritės pereinamasis procesas, kai $U = 12\,\mathrm{V}$;

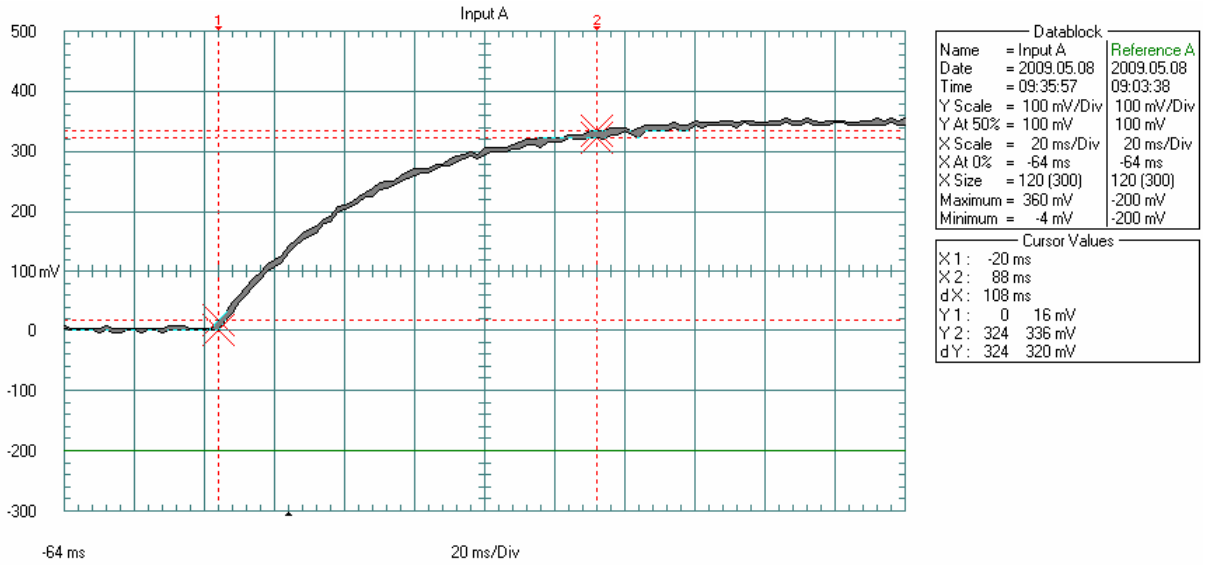
Analizinė išraiška:

$i_1(t) = 1,4 \cdot \left(1 - e^{-21,88 \cdot t}\right)$;

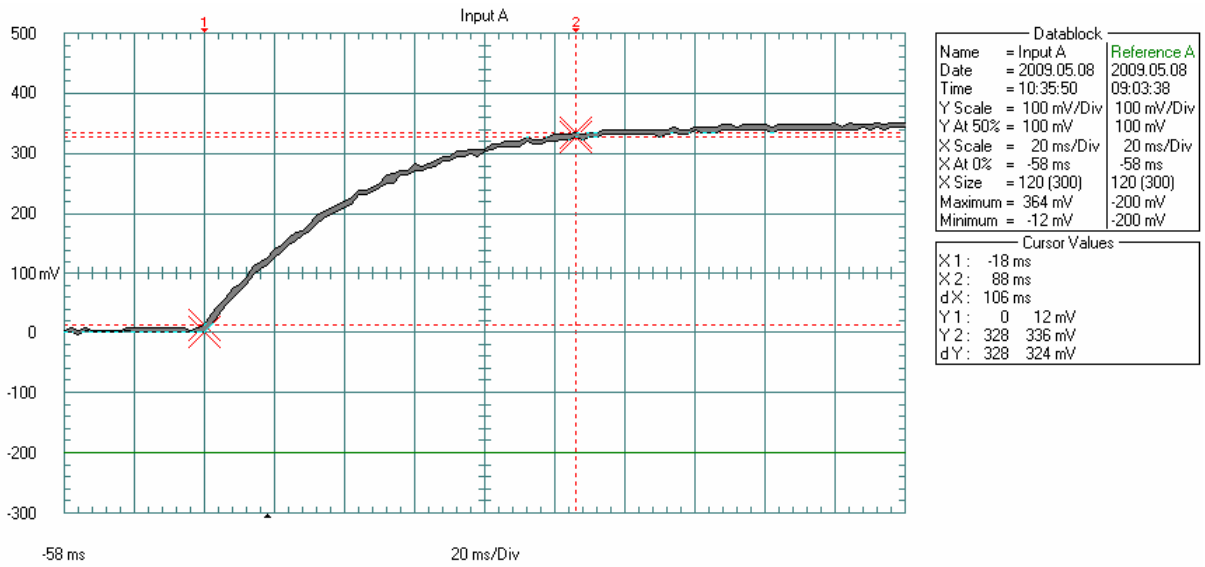
$i_1(t) = 0,7 \cdot \left(1 - e^{-22,46 \cdot t}\right)$;

$i_1(t) = 0,35 \cdot \left(1 - e^{-28,72 \cdot t}\right)$.

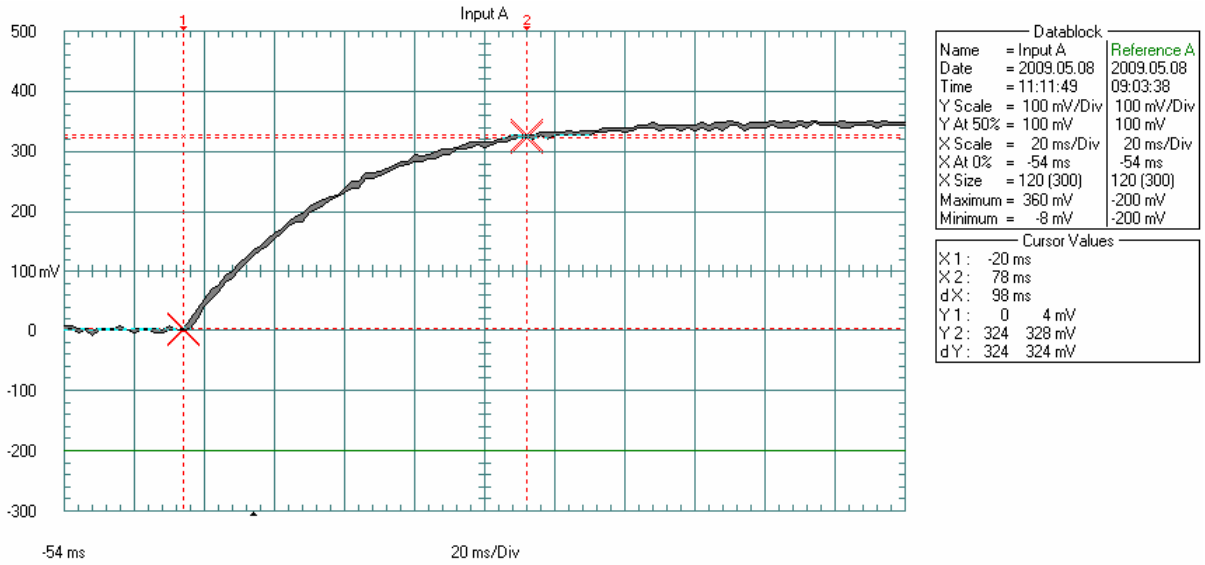
Pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 12,05 V



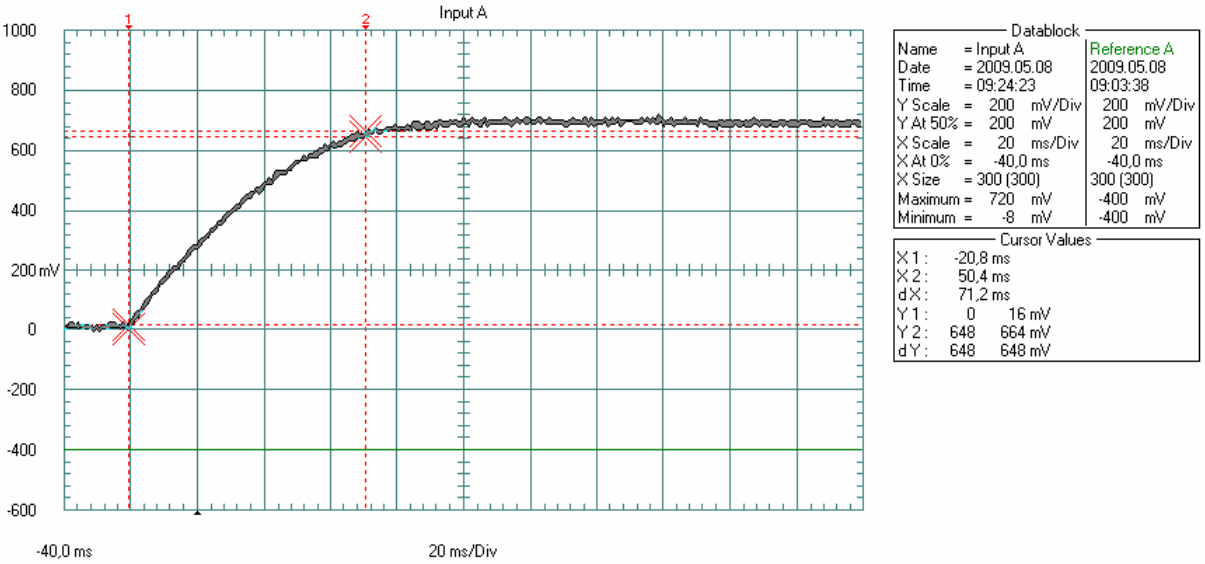
Antros ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 12,05 V



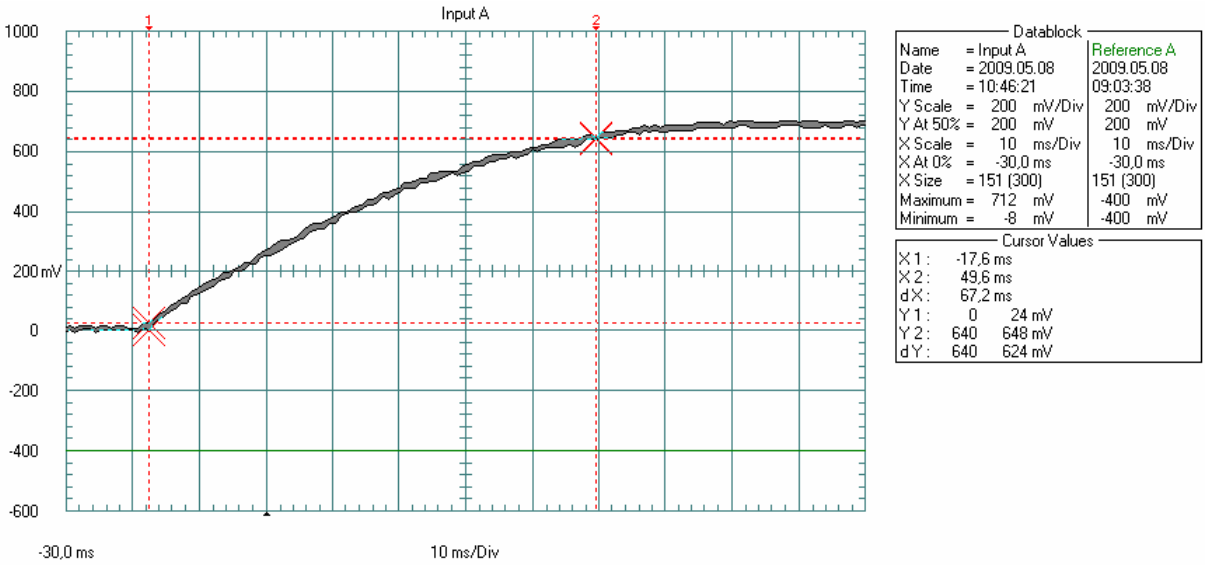
Trečios ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 12,05 V



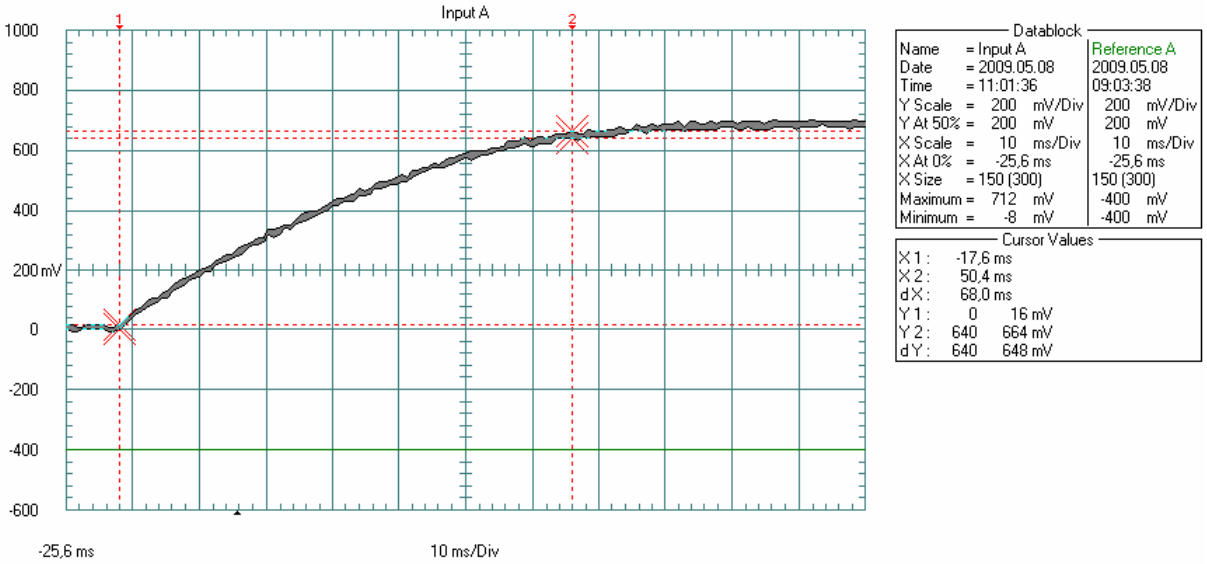
Pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 23,83 V



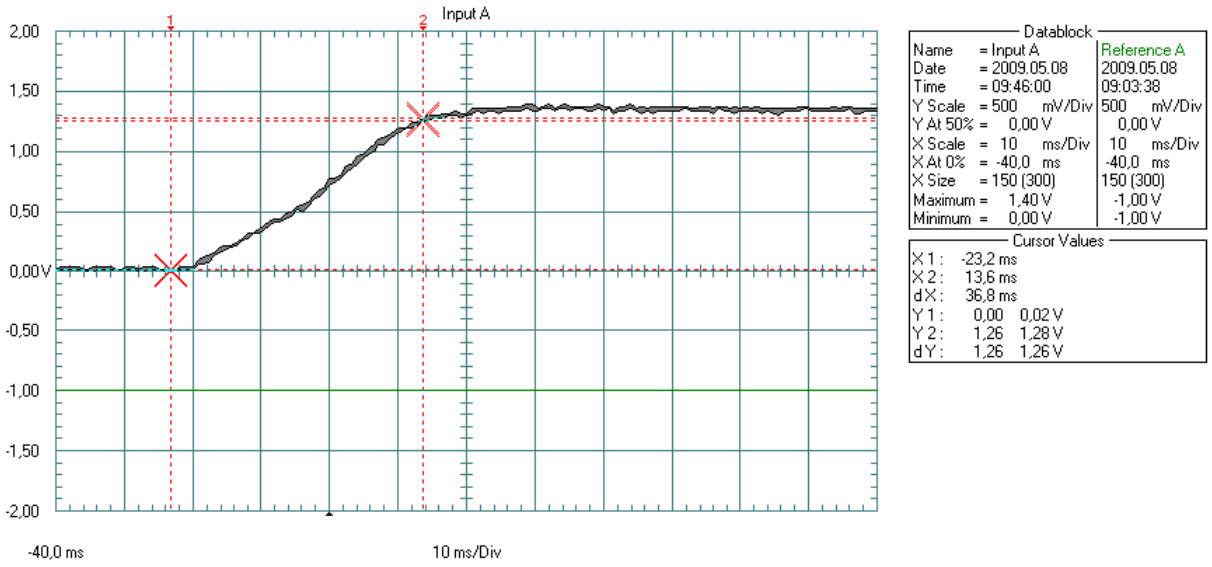
Antros ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 23,83 V



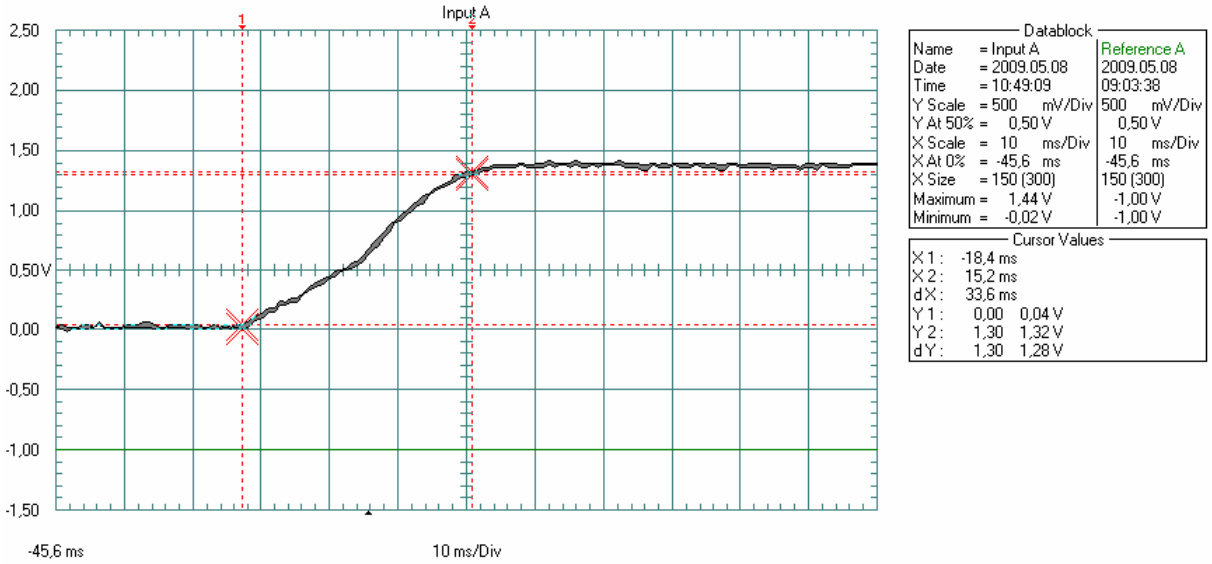
Trečios ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 23,83 V



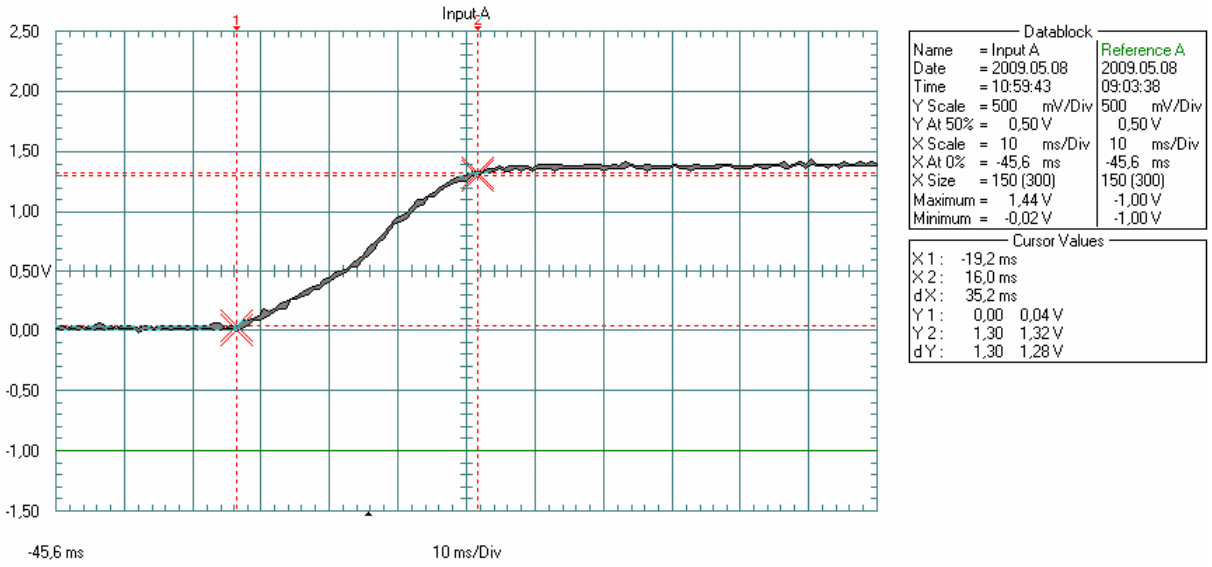
Pirmos ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 47,91 V



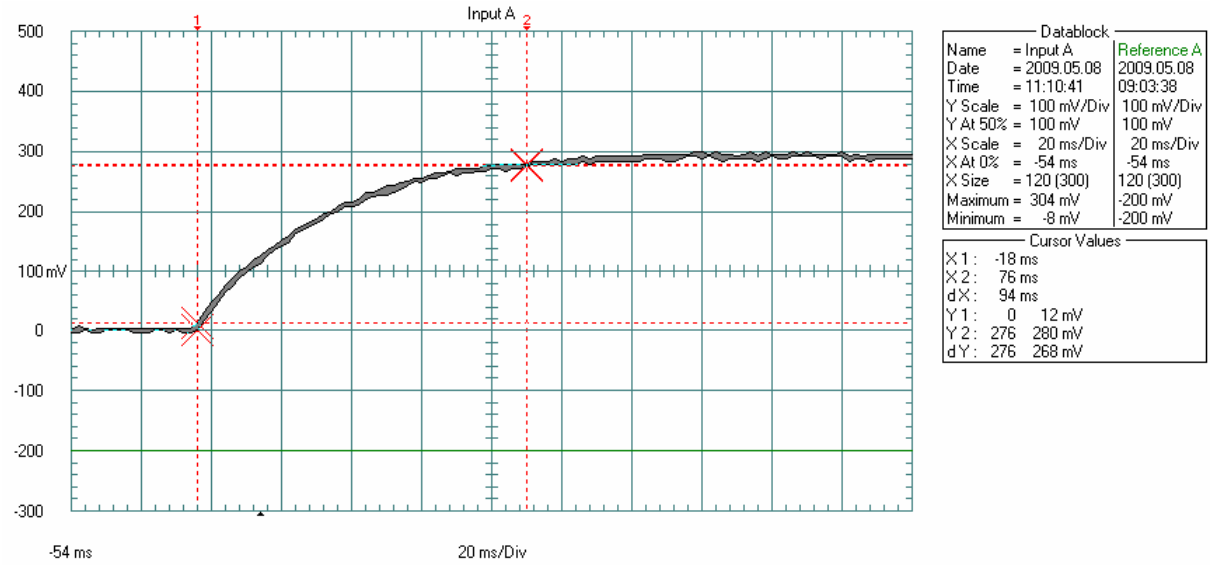
Antros ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 47,91 V



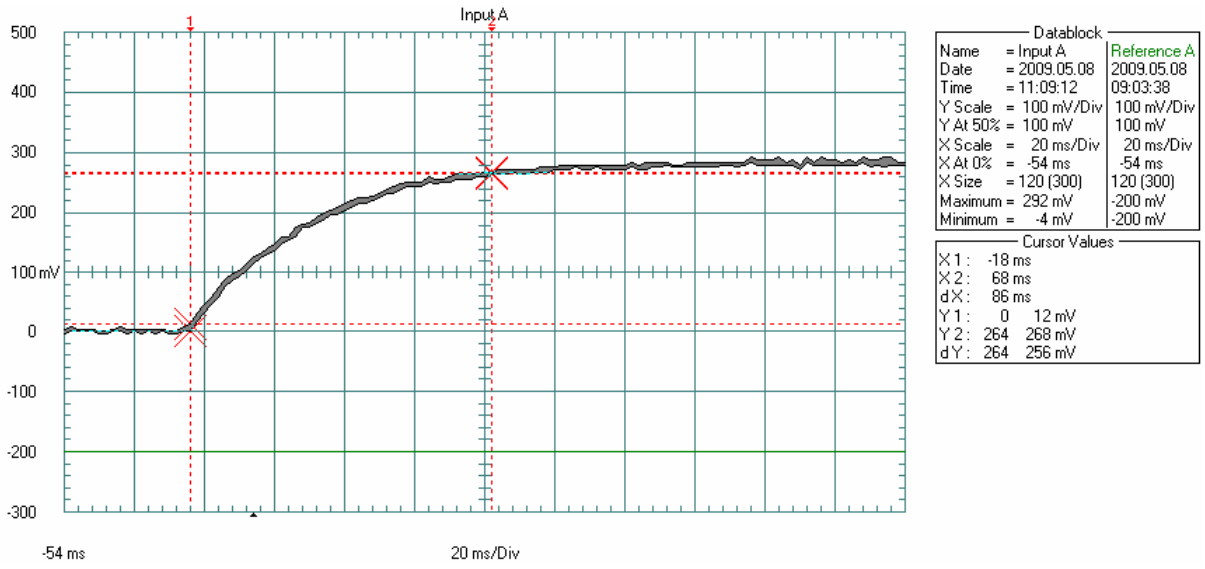
Trečios ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 47,91 V



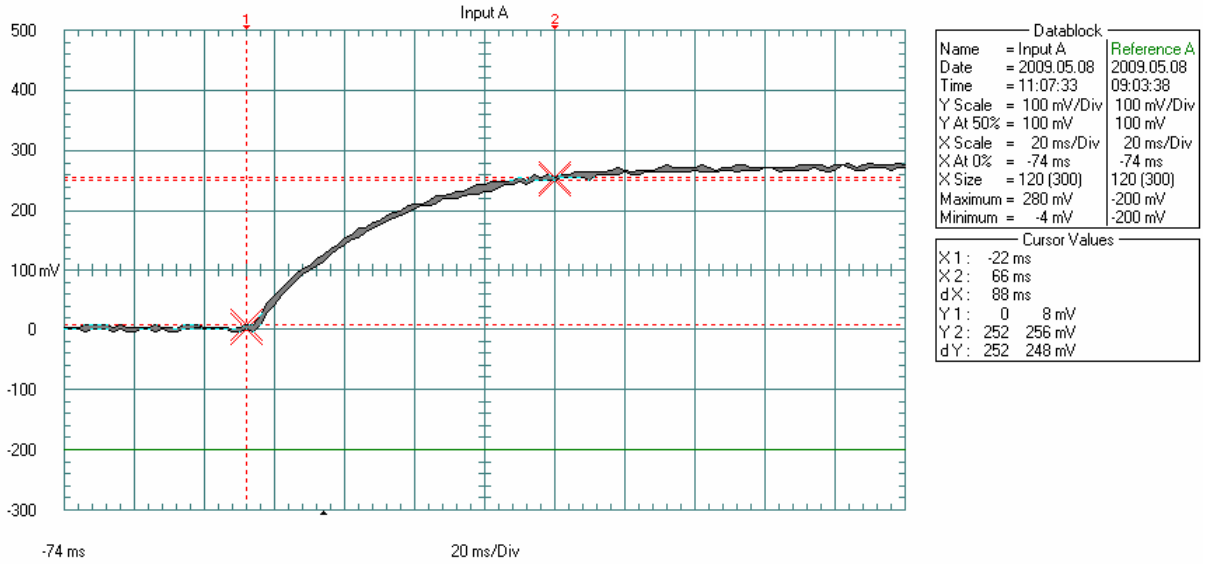
Trečios ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 12,05 V ir ritės aktyvioji varža padidinta 6,83 Ω



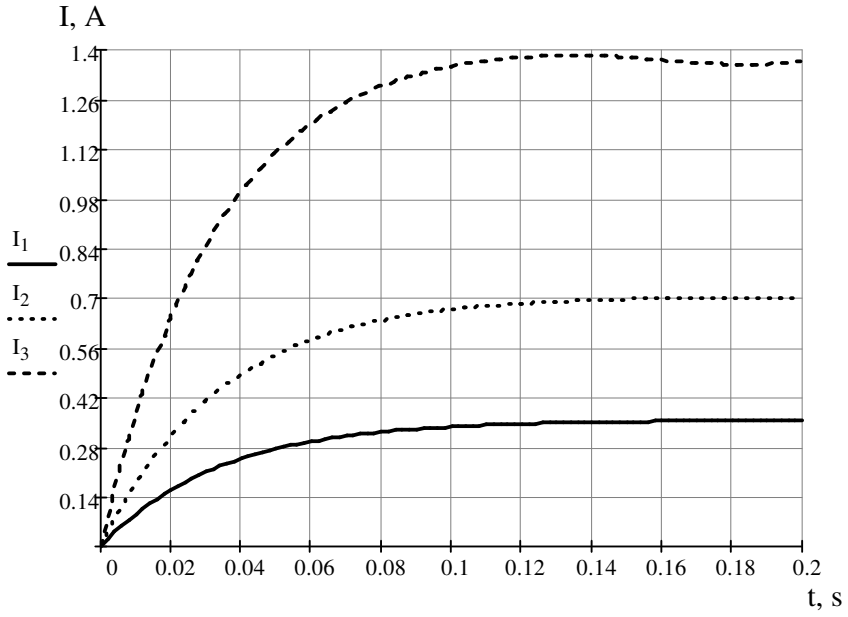
Trečios ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 12,05 V ir ritės aktyvioji varža padidinta 8,31 Ω



Trečios ritės srovės pereinamasis procesas, kai U = 12,05 V ir ritės aktyvioji varža padidinta 10,05 Ω



Tiesiaeigio žingsninio variklio matematinio modelio visų trijų apvijų prie skirtingų maitinimo įtampų



Čia: $I_1(t)$ – pirmos fazinės ritės pereinamasis procesas, kai $U = 12\,\mathrm{V}$;

$I_2(t)$ – antros fazinės ritės pereinamasis procesas, kai $U = 24\,\mathrm{V}$;

$I_3(t)$ – trečios fazinės ritės pereinamasis procesas, kai $U = 48\,\mathrm{V}$;