



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Gintaras Kažukauskas**

**Asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Pranas Smolskas

**KAUNAS, 2015**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**Asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

**Elektros energetikos inžinerija (kodas 621H63003)**

**Vadovas**

(parašas) Doc. dr. Pranas Smolskas  
(data)

**Recenzentas**

(parašas) Doc. dr. Jonas Vanagas  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Gintaras Kažukauskas  
(data)

**KAUNAS, 2015**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

GINTARAS KAŽUKAUSKAS

(Studento vardas, pavardė)

M3016L21 Elektros energetikos inžinerija (621H63003)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA**

20 15 m. gegužės 25 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Gintaro Kažukauskio** baigiamasis projektas tema „Asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Kažukauskas, Gintaras. Asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais tyrimas. *Elektros energijos magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Pranas Smolskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2015. 69 psl.

## SANTRAUKA

Projektas skirtas trifazio asinchroninio narvelinio variklio, kai statoriaus geometriniai ir elektromagnetiniai parametrai yra nekeičiami, o narvelinis rotorius keičiamas vientisuoju, dvisluoksniu izotropiniu ir dvisluoksniu anizotropiniu, pagrindinių charakteristikų ir parametų skaičiavimui bei jų palyginimui. Sudarytas dvisluoksniu anizotropinio rotoriaus parametų ir charakteristikų skaičiavimo algoritmas. Atlikta 7,5 kW,  $2p=4$  ir 22 kW,  $2p=4$  asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais charakteristikų skaičiavimai. Atlikta dvisluoksniu anizotropinio rotoriaus cilindro storio, medžiagos, jos magnetinės skvarbos, oro tarpo didumo kitimo įtaka jo parametrams ir variklio charakteristikoms. Pateikta šių tiriamų variklių palyginamoji analizė pagal apskaičiuotąsias pagrindines charakteristikas, paleidimo kokybės ir variklio išnaudojimo pagal galią faktorius.

*Reikšminiai žodžiai:*

Asinchroninis variklis, narvelinis rotorius, dvisluoksniu anizotropinis rotorius.

Kažukauskas, Gintaras. Research on Induction Motor with Different Rotors. Final project of *Electricity Master* / supervisor doc. dr. Pranas Smolskas; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems.

Kaunas, 2015. 69 p.

## SUMMARY

The calculation and comparison of the main characteristics and parameters of the three-phase induction motor when the stator geometrical and electromagnetic parameters not changed, while the cage rotor replaced solid, double-layer isotropic and double-layer anisotropic presented in this project. The calculation algorithm of parameters and characteristics for double-layer anisotropic rotor is performed. The calculation characteristics of 7,5 kW,  $2p=4$  ir 22 kW,  $2p=4$  induction motor with different rotors are made. The influence on characteristics of the motor and parameters of double-layer anisotropic rotor such as the cylindrical rotor thickness, the material, change of magnetic permeability, specific resistance, air gap size of are made. The comparative analysis of the calculated basic characteristics of investigated motors with different rotors and start-up quality and motor power exploitation factors are presented.

*Keywords:*

Induction motor, cage rotor, double-layer anisotropic rotor.

# TURINYS

Įvadas .....	9
1. Asinchroniniai varikliai .....	11
1.1. Asinchroniniai varikliai su vientisaisiais feromagnetiniais rotoriais.....	11
2. Asinchroniniai varikliai su dvisluoksniais rotoriais.....	15
2.1. Asinchroninių variklių su dvisluoksniais rotoriais konstrukcija .....	16
2.2. Asinchroninių narvelinių variklių ir variklių su dvisluoksniais rotoriais palyginimas .....	18
3. Dvisluoksniai anizotropiniai rotoriai, jų parametrai .....	19
3.1. Rotorių gamyboje naudojamos medžiagos. Geležies - vario lydiniai .....	21
3.2. Asinchroninių variklių su dvisluoksniais rotoriais panaudojimas.....	24
3.3. Asinchroninio variklio su dvisluoksniumi anizotropiniu rotoriumi parametrų ir charakteristikų skaičiavimo algoritmas .....	25
3.4. Asinchroninių variklių su narveliniu, vientisuoju, dvisluoksniumi ir dvisluoksniumi anizotropiniu rotoriumi parametrų ir charakteristikų palyginimas.....	38
4. Asinchroninio variklio su dvisluoksniumi anizotropiniu rotoriumi tiriamoji dalis .....	45
5. Asinchroninių narvelinių variklių paleidimo problemos .....	53
5.1. Asinchroninio variklio charakteristikos pavarose su vienetiniu, bet sunkiu paleidimu .....	53
5.1.1. Asinchroninio variklio su dvisluoksniumi rotoriumi paleidimas, kai tinklas nėra pakankamai galingas, yra ribotos galios, arba kai naudojamas didesnės nominaliosios galios variklis.....	54
5.1.2. Asinchroninio variklio su dvisluoksniumi rotoriumi panaudojimas pavarose su greičio reguliavimu.....	58
Išvados.....	59
Literatūra .....	60
Priedai.....	62

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

<b>1 lentelė.</b> Asinchroninių narvelinių variklių paleidimo charakteristikos. ....	13
<b>2 lentelė.</b> Lydinio CM – 19 procentinė sudėtis. ....	23
<b>3 lentelė.</b> Geležies – vario lydinio $\rho$ ir $\mu_r$ priklausomybė nuo .....	23
<b>4 lentelė.</b> Medžiagų elektromagnetinės savybės. ....	24
<b>5 lentelė.</b> Asinchroninio variklio parametrų perskaičiavimo įvesties duomenys .....	27
<b>6 lentelė.</b> Asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi svarbiausieji parametrai .....	38
<b>7 lentelė.</b> 7,5 kW Asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais svarbiausieji parametrai.....	38
<b>8 lentelė.</b> 7,5 kW Asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais svarbiausių parametrų pokyčiai procentais .....	39
<b>9 lentelė.</b> 22 kW asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais svarbiausieji parametrai.....	39
<b>10 lentelė.</b> 22 kW sinchroninio variklio su skirtingais rotoriais svarbiausių parametrų pokyčiai procentais .....	39
<b>11 lentelė.</b> 7,5 kW, 2p=4 AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi svarbiausių parametrų palyginimas keičiant rotoriaus cilindro storį.....	45
<b>12 lentelė.</b> 7,5kW, 2p=4 AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi svarbiausių parametrų palyginimas keičiant oro tarpą.....	49
<b>13 lentelė.</b> 7,5kW, 2p=4 AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi svarbiausių parametrų palyginimas keičiant paviršiaus varžos padidėjimo faktorių .....	52

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

<b>1 pav.</b> Asinchroninio variklio su vientisuoju feromagnetiniu rotoriumi ekvivalentinė $\Gamma$ schema. ....	13
<b>2 pav.</b> Asinchroninio variklio su vientisuoju feromagnetiniu rotoriumi ekvivalentinė T schema. ....	13
<b>3 pav.</b> Vientisojo rotoriaus konstrukcijos: a) vientisasis lygus; b) vientisasis dantytas; c) vientisasis dantytas su trumpai jungtais žiedais galuose; d) vientisasis narvelinis; e) vientisasis lygus padengtas srovei laidžiu sluoksniu. ....	15
<b>4 pav.</b> Dvisluoksnio rotoriaus konstrukcija. 1 – velenas; 2 – trumpai sujungtas žiedas; 3 – cilindras; 4 – elektromagnetinio plieno paketas.....	17
<b>5 pav.</b> Dvisluoksnio rotoriaus magnetinio lauko linijos: a) prie didelių slydimų; b) prie mažų slydimų; 1 – monolitinis cilindras; 2 – rotoriaus šerdis iš elektrotechninio plieno lakštų. [ ].....	17
<b>6 pav.</b> Magnetinės anizotropijos formavimas dvisluoksniame rotoriuje: 1 – ekranas; 2 – dantys; 3 – grioveliai; 4 – jungė; 5 – šerdis (velenas).....	20
<b>7 pav.</b> Magnetinių medžiagų kreivės: 1 – elektromagnetinis plienas 2012, $\rho = (1 - 2) \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ ; 2 – plienas 30, $\rho = 2,5 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ ; 3 – plienas 20, $\rho = 2,6 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ ; 4 – chromuotas plienas, $\rho = (7 - 9) \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ ; 5 – ketus, $\rho = (4 - 5) \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ . ....	22
<b>8 pav.</b> Plieno-vario lydinių (CM) įmagnetinimo charakteristikos $B = fH$ .....	26

<b>9 pav.</b> 7,5kW AV su skirtingos konstrukcijos rotoriais mechaninės charakteristikos $M=f(s)$ .....	40
<b>10 pav.</b> 7,5kW AV su skirtingos konstrukcijos rotoriais naudingumo faktoriaus priklausomybė nuo slydimo.....	41
<b>11 pav.</b> 7,5kW AV su skirtingos konstrukcijos rotoriais galios faktoriaus priklausomybė nuo slydimo.....	42
<b>12 pav.</b> AV su narveliniu rotoriumi statoriaus ir rotoriaus srovių priklausomybė nuo naudingosios variklio galios.....	43
<b>13 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi statoriaus ir rotoriaus srovių priklausomybė nuo naudingosios variklio galios .....	43
<b>14 pav.</b> AV su narveliniu rotoriumi naudingumo ir galios faktorių priklausomybė nuo naudingosios variklio galios.....	44
<b>15 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi naudingumo ir galios faktorių priklausomybė nuo naudingosios variklio galios .....	44
<b>16 pav.</b> AV su dvisluoksniu rotoriumi imamosios iš tinklo galios ir naudingosios variklio galios priklausomybė nuo cilindro storio.....	45
<b>17 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi srovių priklausomybė nuo cilindro storio .....	46
<b>18 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi cilindro varžos priklausomybė nuo cilindro storio.....	46
<b>19 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi induktyviosios varžos priklausomybė nuo cilindro storio .....	47
<b>20 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi naudingumo ir galios faktorių priklausomybė nuo cilindro storio.....	47
<b>21 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi santykinio paleidimo momento, santykinės paleidimo srovės ir paleidimo kokybę apibūdinančio dydžio priklausomybė nuo cilindro storio .....	48
<b>22 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi santykinės magnetinės skvarbos priklausomybė nuo variklio oro tarpo.....	49
<b>23 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi naudingumo ir galios faktorių priklausomybė nuo variklio oro tarpo.....	50
<b>24 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi nuostolių priklausomybė nuo variklio oro tarpo.	50
<b>25 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi santykinio paleidimo momento, santykinės paleidimo srovės ir paleidimo kokybę apibūdinančio dydžio priklausomybė nuo variklio oro tarpo ....	51
<b>26 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi įmagnetinimo srovės priklausomybė nuo variklio oro tarpo .....	51
<b>27 pav.</b> AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi induktyviosios srovės priklausomybė nuo variklio oro tarpo .....	52
<b>28 pav.</b> AV su dvisluoksniu ir narveliniu rotoriais suminių nuostolių priklausomybė nuo slydimo .....	58



## Ivadas

Asinchroniniai varikliai su narveliniu rotoriumi yra plačiausiai naudojamos ir paprasčiausios konstrukcijos elektros mašinos lyginant jas su nuolatinės srovės ar sinchroninėmis elektros mašinomis. Tai kintamosios srovės elektros mašinos, kurių veikimas pagrįstas statoriuje sudaromu sukamuoju magnetiniu lauku, o rotorius sukasi greičiu, kuris nelygus statoriaus magnetinio lauko greičiui, todėl sukasi asinchroniškai. Asinchroniniai varikliai sudaro apie 90% visų pramonėje ir žemės ūkyje naudojamų variklių ir sunaudoja apie 60% visos pasaulyje pagaminamos elektros energijos. Nors lyginant su nuolatinės srovės elektros mašinomis asinchroninių variklių sandara yra gana paprasta, be to jie patikimi ir ekonomiški, tačiau svarbiausias jų trūkumas yra didelės paleidimo srovės ir maži paleidimo momentai. Dėl šių priežasčių pradėti gaminti asinchroniniai varikliai su pagerintomis darbo ir paleidimo charakteristikomis. [1]

Geresnės paleidimo charakteristikos, o svarbiausia didesnis santykinis paleidimo momentas ir mažesnė santykinė paleidimo srovė pasiekiami keičiant narvelinį (trumpai sujungtą) rotorius vientisuoju feromagnetiniu arba dvisluoksniu (dvisluoksniu anizotropiniu) rotoriumi. [5] [6]

Anizotropinės medžiagos panaudojimas rotorius gamyboje yra aktuali problema. Kol kas dar nėra gaminama tinkamų anizotropinių plienų anizotropinių rotorius gamybai. Tokie plienai leistų gaminti rotorius su mažesne magnetine varža pagrindiniam srautui, kita vertus – sumažėtų rotorius sklaidos srautai. Dėl to sumažėtų rotorius grandinės reaktyvioji galia, o dėl to padidėtų variklio galios faktorius, o statoriaus imamoji srovė sumažėtų. Taip pat sumažėtų statoriaus ir rotorius elektriniai nuostoliai ir padidėtų naudingumas.

Kadangi tokie plienai yra dar kuriami, todėl tirsime asinchroninio variklio rotorius su dirbtine anizotropija.

**Projekto tyrimo objektas** yra trifazis asinchroninis narvelinis variklis  $P_{2N} = 7,5 \text{ kW}$  ir  $22 \text{ kW}$ , kai  $2p=4$ . Varikliui keičiami rotorius: vientisasis; dvisluoksnis izotropinis; dvisluoksnis anizotropinis.

**Projekto tikslas.** Atlikti trifazio asinchroninio narvelinio variklio, kai variklio statoriaus geometriniai ir elektromagnetiniai parametrai yra nekeičiami, o narvelinis rotorius keičiamas vientisuoju, dvisluoksniu izotropiniu ir dvisluoksniu anizotropiniu, pagrindinių charakteristikų ir parametru palyginamąją analizę.

### Uždaviniai:

1. Apžvelgti trifazių asinchroninių variklių su vientisuoju ir dvisluoksniu rotorius konstrukcinius sprendimus, rotorius parametru ir variklio charakteristikų skaičiavimo algoritmus;
2. Patikslinti trifazio asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi rotorius parametru skaičiavimo algoritmą ir sudaryti variklio pagrindinių charakteristikų skaičiavimo

algoritmą, atsižvelgiant į tai, kad narvelinio variklio (7,5 kW ir 22 kW,  $2p=4$ ) statoriaus parametrai išlieka nekeičiami, išskyrus abipusio induktyvumo reaktyviąją varžą;

3. Atlikti trifazio asinchroninio narvelinio variklio ir pakeitus narvelinį rotorių vientisuoju, dvisluoksniu izotropiniu ir dvisluoksniu anizotropiniu rotoriais, pagrindinių charakteristikų ir parametrų skaičiavimus, atsižvelgiant į dvisluoksniu anizotropinio rotoriaus cilindro storį, cilindro medžiagos magnetinės skvarbos kitimą, keičiamą oro tarpo didumą, rotoriaus cilindro medžiagos savitosios varžos vertę;
4. Atlikti trifazio asinchroninio variklio (7,5 kW ir 22 kW,  $2p=4$ ) su narveliniu, vientisuoju, dvisluoksniu izotropiniu ir dvisluoksniu anizotropiniu rotoriais palyginamąją analizę, atsižvelgiant į paleidimo charakteristikas, paleidimo kokybės ir variklio išnaudojimo pagal galią faktorius.

## 1. Asinchroniniai varikliai

Tarp visų tipų elektros variklių šiuolaikiniai narveliniai asinchroniniai varikliai pagal gamybos apimtį ir įrengtąją galią yra dominuojantys. Asinchroninės mašinos su narveliniais rotoriais paprastos ir patikimos, todėl jos plačiai naudojamos. Dauguma mažos ir vidutinės galios asinchroninių variklių gaminami su narveliniais rotoriais. Beveik visi buitiniai ir bendrosios paskirties pramoniniai elektros varikliai yra asinchroniniai. Jie yra paprastos konstrukcijos, patikimi eksploatuojant ir turi pakankamai aukštus energetinius rodiklius. Tačiau prie trūkumų reiktų priskirti nepatenkinamas paleidimo ir reguliavimo charakteristikas. Didelės paleidimo srovės, 5 – 7 kartus viršijančios nominaliąją, sukelia įtampos kritimus variklius paleidžiant, kai tinklas nėra pakankamai galingas. Dideli energijos nuostoliai pereinamuosiuose vyksmuose riboja leistiną paleidimą, reversų, stabdymų skaičių laike, ypač kai elektros mašinos dirba dinaminiais režimais. Pulsuojamųjų elektromagnetinių momentų atsiradimas, kurių vertės gerokai viršija statinį paleidimo momentą, mažina variklio eksploatacijos trukmę. Kita vertus narvelinė rotorius apvija taip pat gerokai mažina paties variklio patikimumą. [1]

Eksploatuojant variklį galimi rotorius strypų nutrūkimai arba išsilydymai, kontakto tarp strypo ir žiedo praradimas, o taip pat rotorius užliejimo defektai: kiaurymių (dujapūslių) susidarymas strypuose ar trumpai sujungtuose žieduose. Taip pat vienas iš trūkumų – triukšmai ir vibracijos. Jų atsiradimas sąlygojamas aukštesniųjų magnetinio lauko harmonikų oro tarpe, kurių atsiradimo pagrindinė priežastis yra statorius ir rotorius dantytumas. [2]

Dėl visų šių ir dar kitų nepaminėtų priežasčių pradėti gaminti asinchroniniai varikliai su vientisaisiais feromagnetiniais ir dvisluoksniais rotoriais.

### 1.1. Asinchroniniai varikliai su vientisaisiais feromagnetiniais rotoriais

Tais atvejais, kai rotorius sukimosi greičiai dideli (siekiantys iki  $100000 \frac{r}{min}$ ), kartais naudojami visiškai be apvijos, mechaniškai atsparūs vientisieji feromagnetiniai rotorius. Šių tipų varikliuose sukimo momentas atsiranda dėl statorius magnetinio lauko sąveikos su rotorius sūkurinių srovių magnetiniu lauku. [3]

Asinchroniniai varikliai su paprasčiausios konstrukcijos vientisaisiais feromagnetiniais rotoriais yra žinomi jau nuo 1926 m., kai buvo pasiūlytas šio tipo asinchroninis variklis ir ištirtos variklio darbo charakteristikos, nors mokslininkai tokią mintį gliaudė žymiai anksčiau – dar XIX a. Dėl labai paprastos rotorius konstrukcijos, didelio mechaninio atsparumo, gerų paleidimo charakteristikų, didelio patikimumo tokie asinchroniniai varikliai domino įvairių šalių inžinierius ir mokslininkus. Bet šie varikliai plačiai nepaplito dėl prastų energetinių rodiklių (mažas naudingumo faktorius  $\eta$  ir galios

faktorius  $\cos\varphi$ ), o specifinės jų savybės tais laikais dar negalėjo būti panaudotos dėl neišvystytų technologijų pramonėje. [3] [5]

Yra žinoma, kad asinchroninio variklio rotoriaus konstrukcija lemia variklio charakteristikas. Neblogas paleidimo savybes turi asinchroniniai varikliai su dvigubu narveliu ir su giliais grioveliais. Paleidžiant variklį, srovės dažnis rotoriuje yra didelis, pasireiškia paviršiaus reiškinys, dėl to padidėja aktyvioji apvijos varža dėl to truputį pamažėja paleidimo srovė ir padidėja paleidimo momentas. Ypatingai stiprus paviršiaus reiškinys pasireiškia varikliuose su vientisuoju rotoriumi, ir asinchroniniuose varikliuose su dvisluoksniu rotoriumi. Vis dėlto, dirbant nominaliajame režime, šie asinchroniniai varikliai turi mažesnį naudingumo  $\eta$  ir galios faktorius  $\cos\varphi$  [6] [7].

Siekiant pagerinti asinchroninio variklio su vientisuoju rotoriumi charakteristikas ir savybes, profesorius V. Mogilnikovas pasiūlė rotorių iš specialaus lydinio su optimaliomis elektromagnetinėmis savybėmis, santykine magnetine skvarba  $\mu_r = 20 - 50$  ir savitąja elektrine varža  $\rho = (1 \div 4) \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ .

Feromagnetinės medžiagos, iš kurių paprastai gaminamas šio tipo rotorius, turi daug didesnę savitąją varžą  $\rho_2$  negu varis ar aliuminis, o darbo metu rotoriaus srovė dėl paviršiaus reiškinio teka tik plonu paviršiaus sluoksniu. Dėl šios priežasties vientisojo feromagnetinio rotoriaus varža yra labai didelė. Didelė rotoriaus aktyvioji varža padidina nuostolius rotoriuje ir sumažina sukimo momentą, ypač esant dideliems maitinimo įtampos dažniams. Magnetinio lauko skvarbos gylio feromagnetinio rotoriaus paviršiuje, kuriuo teka srovė, priklauso nuo savitosios rotoriaus varžos  $\rho_2$ , santykinės magnetinės skvarbos  $\mu_2$  ir nuo slydimo  $s$ . Šio tipo rotorių aktyvioji varža gerokai didesnė už induktyviąją varžą ir todėl didžiausias variklio sukimo momentas gaunamas kritiniam slydimui  $s_c$  didesniai už vienetą. Iš to galima teigti, kad variklių su vientisaisiais feromagnetiniais rotoriais paleidimo momentas yra didžiausias. Tam, kad sumažinti vientisojo rotoriaus aktyviąją varžą, jo paviršius padengiamas srovei laidžios medžiagos sluoksniu. Dažniausiai rotorius padengiamas vario sluoksniu, bet yra žinoma, kad geri rezultatai gali būti gaunami naudojant vario ir geležies lydinius. Taip pat rotoriaus paviršiuje ašine kryptimi išfrezuojami siauri grioveliai, dėl kurių sumažėja rotoriaus aktyvioji ir induktyvioji varža, o dėl to pagerėja variklio energiniai rodikliai [5].

Kaip jau minėjome, asinchroninių variklių su vientisuoju rotoriumi konstrukcija labai naudinga esant dideliems sukimosi greičiams. Mažos galios asinchroniniai varikliai su vientisuoju narveliniu rotoriumi naudojami gręžinių tyrimo įrenginiuose. Jie skirti darbui ekstremaliomis sąlygomis: kai aukšta aplinkos temperatūra, siekianti iki  $+200$  °C, didelis hidrostatinis slėgis iki 100 MPa, darbo terpė – hidrostatinis skystis, be to tokie varikliai su vientisuoju rotoriumi ar vientisuoju narveliniu gali dirbti dideliame slydimų diapazone (jiems nebūdingas nominalus darbo taškas). [8] [9]

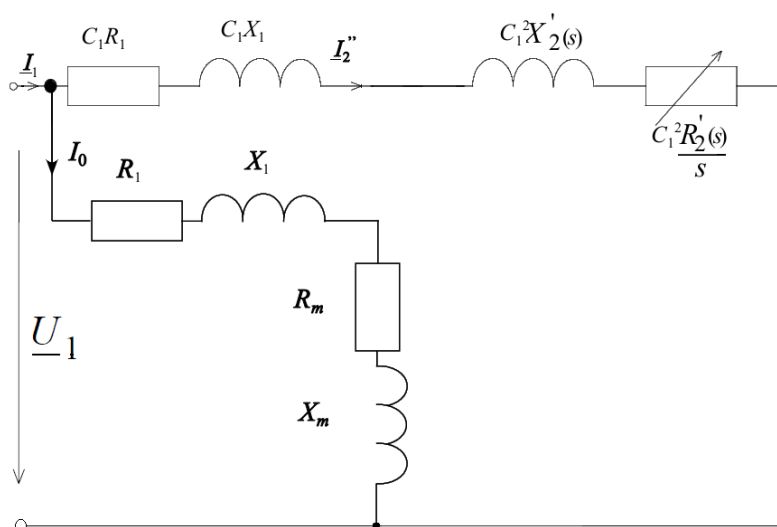
Žemiau pateikiamos asinchroninių variklių su skirtingomis rotoriaus konstrukcijomis santykinio paleidimo momento ir santykinės paleidimo srovės preliminarios vertės:

**1 lentelė.** Asinchroninių variklių su narveliniu rotoriumi paleidimo charakteristikos

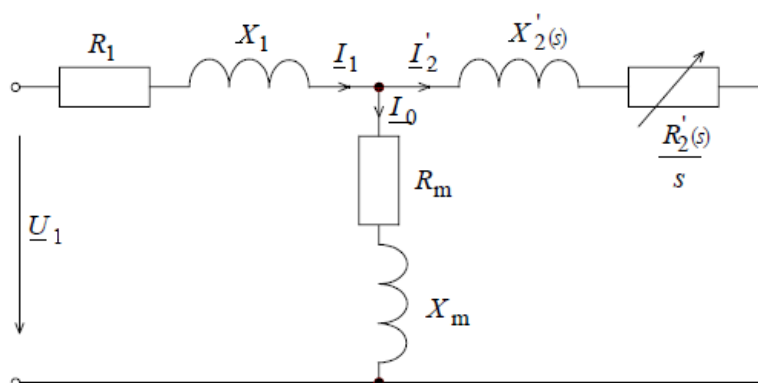
	$m_p$	$i_p$
Variklis su paprastu narveliniu rotoriumi	0,8 - 1,6	4,0 - 8,0
Variklis su gilių griovelių narveliniu rotoriumi	1,2 - 1,6	3,5 - 5,0
Variklis su vientisuoju feromagnetiniu rotoriumi	1,5 - 4,0	1,2 - 2,0

Šių variklių teigiamos savybės išryškėja jiems dirbant dažnų paleidimų ir stabdymų režime, o taip pat prie didelių sukimosi greičių – nesant rotoriaus dantytumui stipriai sumažėja vibracijos ir keliami triukšmai.

Skaičiuojant asinchroninių variklių su vientisaisiais feromagnetiniais rotoriais parametrus galima naudoti 1 ir 2 paveiksluose pateiktas variklio ekvivalentines  $\Gamma$  (arba L) ir T schemas. [1]



**1 pav.** Asinchroninio variklio su vientisuoju feromagnetiniu rotoriumi ekvivalentinė  $\Gamma$  schema.



**2 pav.** Asinchroninio variklio su vientisuoju feromagnetiniu rotoriumi ekvivalentinė T schema.

Asinchroninio variklio varžų parametrai prie skirtingų slydimo  $s$  reikšmių, kai rotorius viensluoksnis feromagnetinis:

$$R_2(s) = \frac{2 \cdot m_1 \cdot L_1 \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2}{\rho \cdot \tau_2} \cdot a_r \cdot k_{LR} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot \rho_2 \cdot \omega_1 \cdot s}{2}};$$

$$X_2(s) = \frac{2 \cdot m_1 \cdot L_1 \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2}{\rho \cdot \tau_2} \cdot a_x \cdot k_{LR} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot \rho_2 \cdot \omega_1 \cdot s}{2}};$$

čia  $R_2$  – variklio rotoriaus aktyvioji varža,  $\Omega$ ;

$X_2$  – variklio rotoriaus induktyvioji varža,  $\Omega$ ;

$m_1$  – statoriaus fazių skaičius;

$L_1$  – skaičiuojamasis statoriaus magnetolaidžio ilgis, m;

$w_1$  – fazės vijų skaičius;

$k_{w1}$  – apvijos faktorius;

$\rho$  – savitoji elektrinė varža,  $\Omega \cdot m$ ;

$\tau_2$  – poliaus žingsnis, m;

$a_r, a_x$  – koeficientai;

$k_{LR}$  – galų reiškinio faktorius;

$\mu_r$  – rotoriaus santykinė magnetinė skvarba;

$\mu_0$  – oro santykinė magnetinė skvarba,

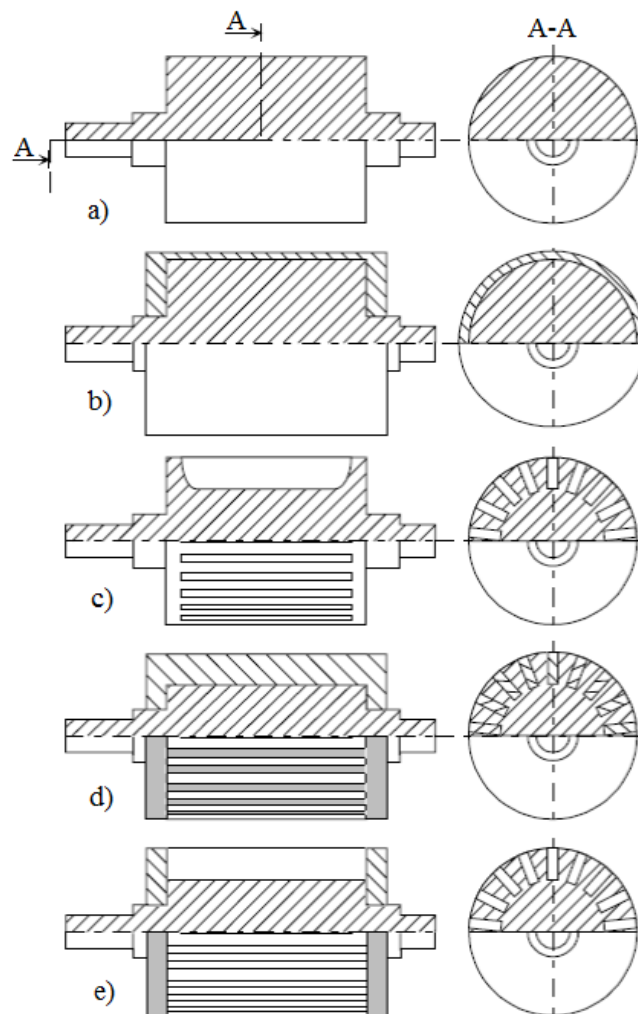
$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m;

$\rho_2$  – rotoriaus savitoji elektrinė varža,  $\Omega$ ;

$\omega_1$  – kampinis sukimosi greitis, 1/s;

$s$  – slydimas.

Praktikoje naudojami asinchroniniai varikliai su įvairiomis vientisojo rotoriaus konstrukcijomis [16]:



**3 pav.** Vientisojo rotoriaus konstrukcijos: a) vientisasis lygus; e) vientisasis lygus padengtas srovei laidžiu sluoksniu; b) vientisasis dantytas; d) vientisasis narvelinis; c) vientisasis dantytas su trumpai jungtais žiedais galuose.

Kai vientisajame rotoriuje nėra trumpai jungtų žiedų stipriau pasireiškia paviršiaus reiškinys. Trumpai jungti žiedai sumažina aktyviąją rotoriaus varžą.

## 2. Asinchroniniai varikliai su dvisluksniais rotoriais

Variklių su dvisluksniais rotoriais susidomėjimas padidėjo maždaug prieš du dešimtmečius. Tam įtakos turėjo vientisųjų rotorių konstrukcijos tobulėjimas ir variklio paleidimo kokybės faktoriaus ( $Q_p$ ) pagerėjimas, naujų geležies – vario lydinių, turinčių geresnes elektromagnetines savybes, kūrimas, variklių su dvisluksniais rotoriais taikymo sričių išsiplėtimas, atsižvelgiant į dažnus

paleidimus ir stabdymus, darbą dinamiame režime, aukštų temperatūrų aplinkas. Vientisojo rotoriaus konstrukcijos tobulinimas – keitimas jį dvisluoksniu – siejamas su svarbiausių asinchroninio variklio parametrų ir charakteristikų pagerinimu. [4][19]

## 2.1. Asinchroninių variklių su dvisluoksniais rotoriais konstrukcija

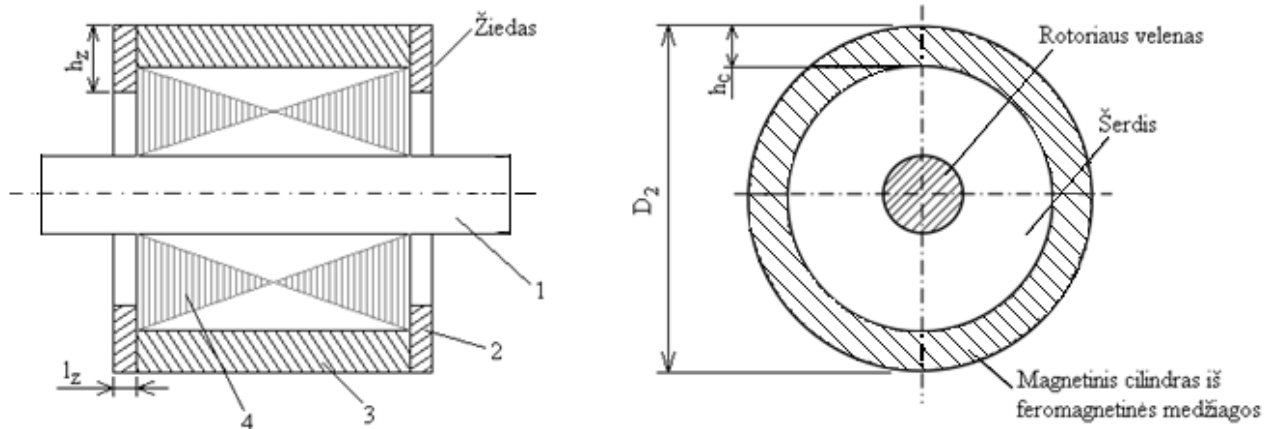
Šių variklių konstrukcija nėra labai sudėtinga – paliekamas esamas asinchroninio narvelinio variklio statorius, o rotorius gali būti naujai gaminamas iš vientisos medžiagos lydinio arba perdaromas, kai dantų zona nufrezuojama ir ant rotoriaus šerdies užmaunamas (užpresuojamas) cilindras, pagamintas iš feromagnetinės medžiagos, dažniausiai tai būna plieno ir vario lydiniai, sąlyginai žymimi raidėmis CM ir skaičiumi, kuris reiškia vario kiekį lydinyje, procentais (CM – 19, CM – 25 ir t.t.). Dvisluoksniu rotoriaus darbinė (aktyvioji) dalis, kuri yra feromagnetinis monolitinis cilindras, pagamintas iš medžiagos su optimaliomis elektromagnetinėmis savybėmis, suteikia geras paleidimo savybes bei gana patenkinamus nominaliuosius parametrus. Konstruojant dvisluoksnių rotorių svarbu rotoriaus cilindro storio  $h_c$  parinkimas, nes tai lemia variklio charakteristikas nominaliajame darbo režime. [4] [19]

Dvisluoksnius rotorius skirtas pagerinti variklio su vientisuoju (dažniausiai narveliniu) rotoriumi nominaliuosius parametrus. Varikliai su dvisluoksniais rotoriais turi geresnes paleidimo charakteristikas, ir gana gerus energetinius rodiklius – naudingumo faktorių  $\eta$  ir galios faktorių  $\cos\varphi$ . Jie gali dirbti dinamiuose režimuose, kai reikalingi dažni paleidimai ir reversavimai, taip pat kai yra sunkūs paleidimai.

Asinchroninių variklių su dvisluoksniais rotoriais privalumai: [19]

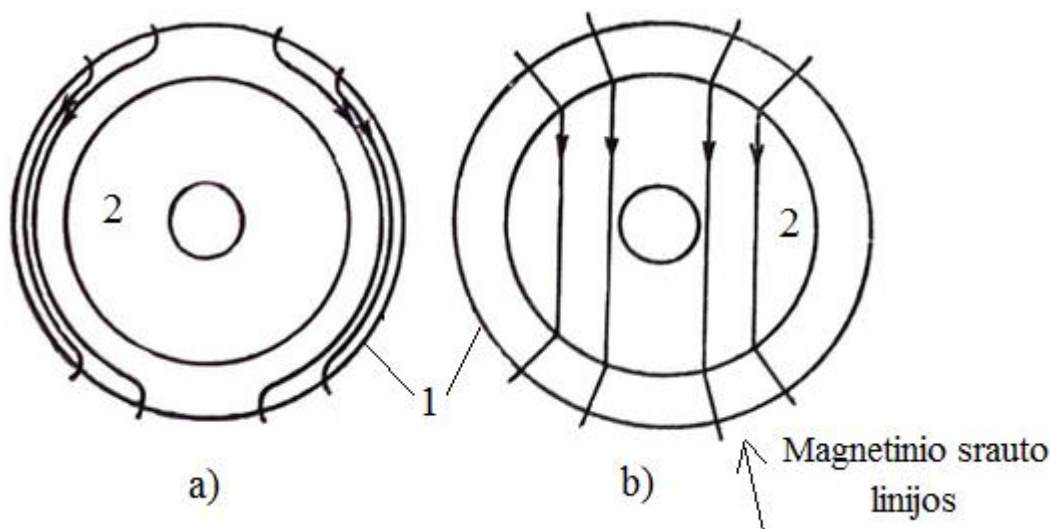
- rotoriaus konstrukcija paprasta ir patikima;
- rotoriaus mechaninis atsparumas ir puikios balansavimo savybės, ypač greitaeigių elektros variklių;
- maža santykinė paleidimo srovė, kai tuo tarpu didelis santykinis paleidimo momentas;
- galimi dažni reversavimai ir dažni paleidimai;
- maži paleidimo ir stabdymo nuostoliai (matoma reversuose);
- galimybė reguliuoti sukimosi greitį keičiant įtampą  $U_1$  (naudojant statorių reguliavimui);
- nėra problemos parenkant griovelių skaičiaus santykį  $Z_1/Z_2$ , nes čia nėra rotoriaus griovelių ir  $Z_2 = 0$ , dėl to sumažėja santykinis paleidimo momentas  $m_p$ , vibracijos ir triukšmai dėl aukštesniųjų harmonikų.





**4 pav.** Dvisluksnio rotoriaus konstrukcija. 1 – velenas; 2 – trumpai sujungtas žiedas; 3 – cilindras; 4 – elektromagnetinio plieno paketas (lakštai).

4 paveiksle pateiktoje dvisluksnio rotoriaus konstrukcijoje pavaizduoto aktyvaus sluoksnio (3) medžiaga turi laidininko ir magnetinės medžiagos savybes. Sujungtos šios savybės gaunasi kiek blogesnės nei būtų atskirai, dėl to variklis su dvisluksniu rotoriumi, lyginant jį su narveliniu varikliu, turi mažesnę naudingumo faktorių  $\eta$  ir galios faktorių  $\cos\varphi$ .



**5 pav.** Dvisluksnio rotoriaus magnetinio lauko linijos: a) prie didelių slydimų; b) prie mažų slydimų; 1 – monolitinis cilindras; 2 – rotoriaus šerdis iš elektrotechninio plieno lakštų.

Kuo magnetinio lauko linijos trumpesnę kelią praeina ir kuo tiesiau rotorių kerta ši linija, tuo geriau. Tai priklauso nuo magnetinės skvarbos gylis ir nuo rotoriaus savitosios elektrinės varžos.

Šių tipų varikliai dažniausiai lyginami su narveliniais, taip pat su varikliais, turinčiais vientisuosius feromagnetinius rotorius.

Vienas iš asinchroninio variklio su dvisluoksniu rotoriumi trūkumų yra tai, kad papildomieji nuostoliai 2 – 4 kartus didesni negu variklyje su narveliniu rotoriumi. Dėl to statorius ir rotorius labiau kaista, mažėja galia  $P_{2N}$ , naudingumo faktorius  $\eta$ , keičiasi charakteristika  $M = f(s)$ . Tačiau jų privalumas yra tas, kad jie gali būti dažnai reversuojami, dažnai paleidžiami ar dirbti trumpalaikiame darbo režime (S2), periodiškai pasikartojančiame trumpalaikiame darbo režime (S3), be to jie yra patikimi. Kai dirbama ilgalaikiame darbo režime (S1) – būtina sumažinti variklio galią.

Papildomuosius nuostolius galima sumažinti didinant oro tarpą  $\delta$ . Esant dvisluoksniui rotoriumi, sumažėja tuščiosios veikos papildomieji nuostoliai ir tuo pačiu apkrauto variklio nuostoliai. Atliekant rotoriaus paviršiaus rifliavimą papildomai dar galima sumažinti iki (20 – 40) % papildomuosius nuostolius. Taip pat dėl sumažintos varžos sumažės ir variklio nuostoliai. [10]

## **2.2. Asinchroninių narvelinių variklių ir variklių su dvisluoksniais rotoriais palyginimas**

Asinchroniniai narveliniai varikliai dėl savo paprastos konstrukcijos ir patikimo veikimo yra labiausiai paplitę pramonėje ir laivyne. Tačiau jų tobulinimas toli gražu nėra baigtas. Vienas iš trūkumų yra mažas paleidimo momentas – didelė paleidimo srovė esant nedideliui pradiniam sukimo momentui. Asinchroniniai varikliai su skirtingų tipų rotoriais lyginami atsižvelgiant į svarbiausius parametrus. Siekiama surasti optimalias parametrų vertes, kurioms esant gauname didžiausią išnaudojimą pagal galią  $k_p$ , gerą paleidimo kokybę  $Q_{pd}$ , o svarbiausia didelį (lyginant su narveliniu varikliu) santykinį paleidimo momentą  $m_{pd}$ , mažą santykinę paleidimo srovę  $i_{pd}$ .

Kitas žingsnis, siekiant pagerinti asinchroninio variklio su vientisuoju (narveliniu) rotoriumi charakteristikas – taikyti asinchroninį variklį su dvisluoksniu rotoriumi. Dvisluoksnis rotorius – tai vientisasis cilindras, pagamintas iš medžiagos su optimaliomis elektromagnetinėmis savybėmis, užmautas ant cilindro, surinkto iš elektrotechninio plieno lakštų. Vientisojo cilindro storis yra maždaug toks pats kaip ir įprasto narvelinio rotoriaus dantų aukštis. Taikant konstrukciją, pavaizduotą 5 paveiksle galima pagerinti naudingumo faktorių  $\eta$  ir  $\cos\varphi$  nominaliajame režime, išlaikant aukštą paleidimo kokybę. Kitas būdas siekiant pagerinti asinchroninio variklio charakteristikas yra vientisojo cilindro su magnetine anizotropija taikymas. Šiuo atveju apie tai nenagrinėjama, tačiau žinoma, kad skirtingai nei kitos feromagnetinės medžiagos – geležis – nikelis – kobaltas turi didžiausią anizotropiją. [10] [19]

Vientisojo rotoriaus keitimas dvisluoksniu rotoriumi, esant vienodoms sąlygoms, padidina aktyviąją galią ir sumažina reaktyviąją galią (sumažėja nuostoliai), todėl dvisluoksnio rotoriaus efektyvumui nustatyti yra tikslinga įvertinti aktyviąją ir reaktyviąją galią. Dvisluoksnio rotoriaus

skersiniai grioveliai (kanalai) sumažina papildomus nuostolius apie (20 – 40) %. Kai vientisasis rotorius ir dvisluoksnis rotorius su skersiniais grioveliais papildomieji nuostoliai yra maždaug tokie patys. Taip pat variklio su vientisuoju rotoriumi apkrovos srovė yra apie (30 – 40) % didesnė palyginus su dvisluoksnio rotoriumi. [14]

Žinant dvisluoksnio rotoriaus parametrus, nesunku apskaičiuoti variklio charakteristikas. Variklis su dvisluoksnio rotoriumi turi aukštą paleidimo kokybę ( $Q_p$ ). Pakeitus narvelinį rotorių dvisluoksnio, paleidimo momentas gali išaugti vidutiniškai iki 1,5 karto, o paleidimo srovė gali sumažėti apie (1,5 – 2) kartus. Be viso to, varikliai su dvisluoksniais rotoriais lengviau balansuojami, o tai taip pat svarbu užtikrinant reikiamas variklio charakteristikas.

Dvisluoksnio rotoriaus naudojimas asinchroniniame variklyje pagerina variklio charakteristikas, esant nominaliajam slydimui. Esmė tame, kad dvisluoksniam rotoriumi priimtas rotoriaus magnetolaidžio magnetinis laidis be galo didelis, realybėje šis dydis turi baigtinę vertę. Be to, tarp vientisojo rotoriaus ir feromagnetinės medžiagos cilindro visada egzistuoja oro tarpas – nors ir labai nedidelis. Rotoriaus cilindro medžiagos charakteristikų nevienodumas ir nuokrypiai dėl tobulai neišvystytos dvisluoksnio rotorių gamybos technologijos, taip pat turi įtakos variklio charakteristikoms.

Dvisluoksnio rotoriaus taikymas asinchroniniuose varikliuose sumažina vibracijų ir triukšmo lygį plačiame dažnių diapazone.

Varikliai su dvisluoksniais rotoriais, lyginant juos su narveliniais varikliais, turi 3 pagrindinius privalumus: didesnis patikimumas, platesnis reguliavimo diapazonas, ir geresnis rotoriaus šilumos atidavimas aplinkai [19].

Naudojant variklį su dvisluoksnio rotoriumi elektros pavarai su dažnu paleidimu, galima žymiai sumažinti šilumą statoriaus apvijoje dinaminiam režime, taip visapusiškai galima padidinti mechanizmo veikimo pajėgumus. Todėl variklio su dvisluoksnio rotoriumi mechaninės charakteristikos savybės leidžia efektyviai panaudoti šiuos įrenginius plačiame sukimosi greičio reguliavimo diapazone, reguliuoti paprasčiausiu būdu – keisti mažinant įtampą. Prie šių pagrindinių rodiklių dažniausiai tinka naudoti šiuos variklius, įrengtus su ventiliatoriniu momento pasipriešinimu.

Eksperimentiškai patvirtinta, kad tokie varikliai turi nenuginčijamų privalumų prieš variklius su narveliniais rotoriais elektros įrenginiuose su dažnu paleidimu ir reversavimu, su vienkartinu, tačiau sunkiu paleidimu, elektros įrenginiams siekiant sumažinti triukšmo lygį ir vibracijas. [17]

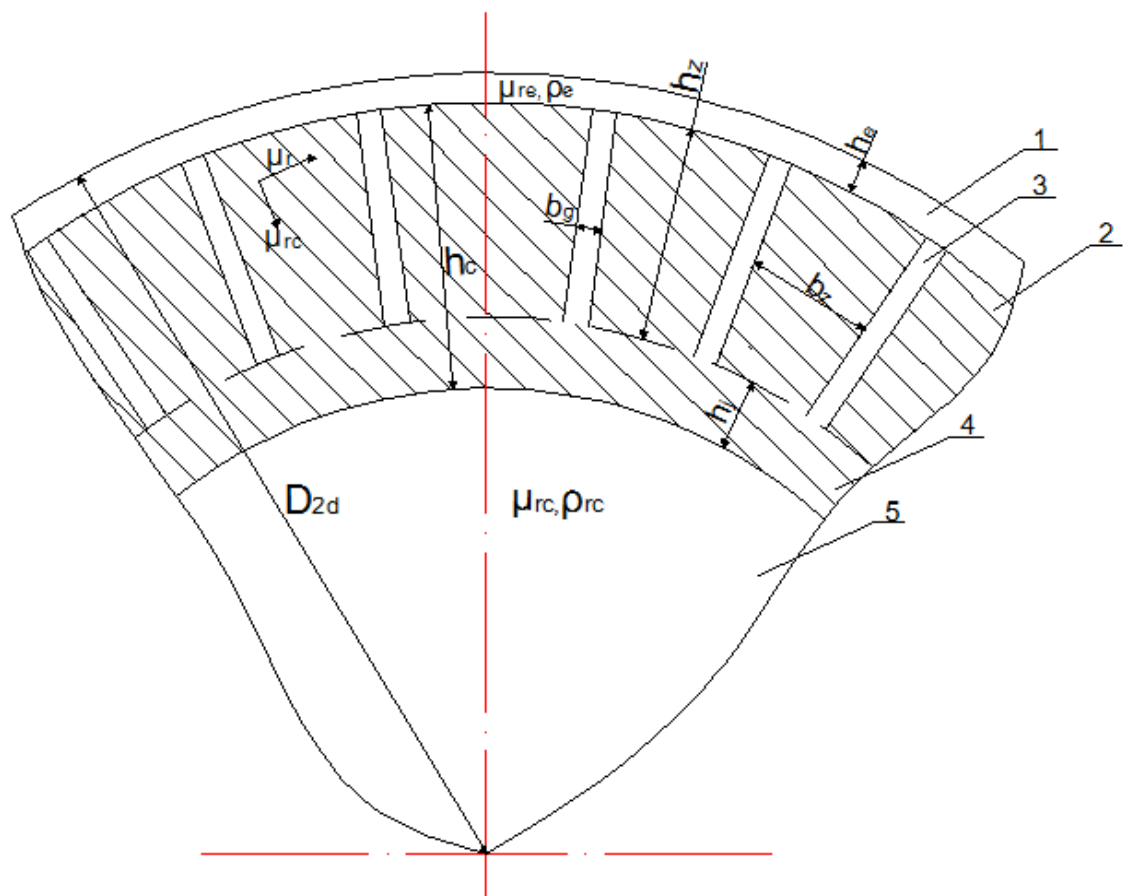
### **3. Dvisluoksniai anizotropiniai rotoriai, jų parametrai**

Literatūroje pateikiama, kad anizotropiniai plienai naudojami asinchroninių variklių darbo charakteristikoms pagerinti (ypač galios faktoriui esant mažam slydimui  $s$ ). Medžiagos su magnetine

anizotropija tokios, kurių magnetinė skvarba spinduline kryptimi yra artima optimaliai ( $30 \div 60$ ), o liestinės kryptimi – minimali. Anizotropiniame pliene magnetinė skvarba  $\mu$  yra orientuojama viena kryptimi. Toks plienas yra ir magnetinė medžiaga ir laidininkas viename.

Anizotropinės medžiagos panaudojimas rotorių gamyboje yra aktuali problema. Kol kas dar nėra gaminama tinkamų anizotropinių plienų (su optimaliomis charakteristikomis ar bent jau artimomis) anizotropinių rotorių gamybai. Tokie plienai leistų gaminti rotorius su mažesne magnetine varža pagrindiniam magnetiniam srautui, o taip pat sumažėtų ir rotoriaus sklaidos srautai. Dėl to sumažėtų rotoriaus grandinės reaktyvioji galia, o dėl to padidėtų variklio  $\cos\varphi$ , ir sumažėtų statoriaus imamoji srovė. Jeigu statoriaus srovė sumažėja, sumažėja bent truputį ir rotoriaus srovė, tuo pačiu sumažėtų statoriaus ir rotoriaus elektriniai nuostoliai ( $p_{e1} = m_1 I_1^2 R_1$ ;  $p_{e2} = m_2 I_2^2 R_2$ ) ir padidėtų variklio naudingumo faktorius  $\eta$ .

Kadangi tokie plienai yra dar kuriami, todėl tirsime rotorius su dirbtine anizotropija.



**6 pav.** Magnetinės anizotropijos formavimas dvisluoksniame rotoriuje: 1 – ekranas; 2 – dantys; 3 – grioveliai; 4 – jungė; 5 – šerdis (velenas).

Rotoriaus konstrukcija pateikiama 6 paveiksle. Vientisasis darbinis cilindras sudarytas iš dviejų koncentriškų, skirtingo storio cilindrų. Vidinis cilindras (2, 4), kurio storis  $h_c$ , turi išilginius griovelius,

kurie išfrezuojami taip, kad jo standumas būtų išlaikomas surinkimo technologinio proceso metu. Griovelių gylis  $h_z = h_g$  parenkamas  $\approx \frac{2}{3}h_c$ , o vidinės jungės storis  $h_j \approx \frac{1}{3}h_c$  ( $h_c = h_z + h_j$ ). Griovelio plotis  $b_g$  neviršija 1 mm. Griovelių skaičius parenkamas atsižvelgiant į narvelinio rotorius rekomendacijas. Išorinio cilindro (1) storis parenkamas 2 – 2,5 mm ir atlieka ekrano funkciją. Ekranas tikslas sumažinti papildomuosius nuostolius dėl aukštesniųjų statoriaus magnetinio lauko harmonikų poveikio.

### **3.1. Rotorių gamyboje naudojamos medžiagos. Geležies - vario lydiniai**

Darbo sąlygos ir gamybos technologijos funkcijos vientisiems ir dvisluoksniams rotoriams nustatomos eile specialių reikalavimų, taikomų geležies lydinių mechaninėms charakteristikoms. Visų pirma lydiniai turi turėti geras liejimo savybes, nesunkiai pasiduoti suvirinimui ir litavimui, o taip pat mechaniniam apdorojimui. Kadangi dirbant variklio rotorius veikia ženkli mechaninė apkrova, lydinio atsparumas turėtų būti ne mažesnis už elektrotechninio plieno atsparumą.

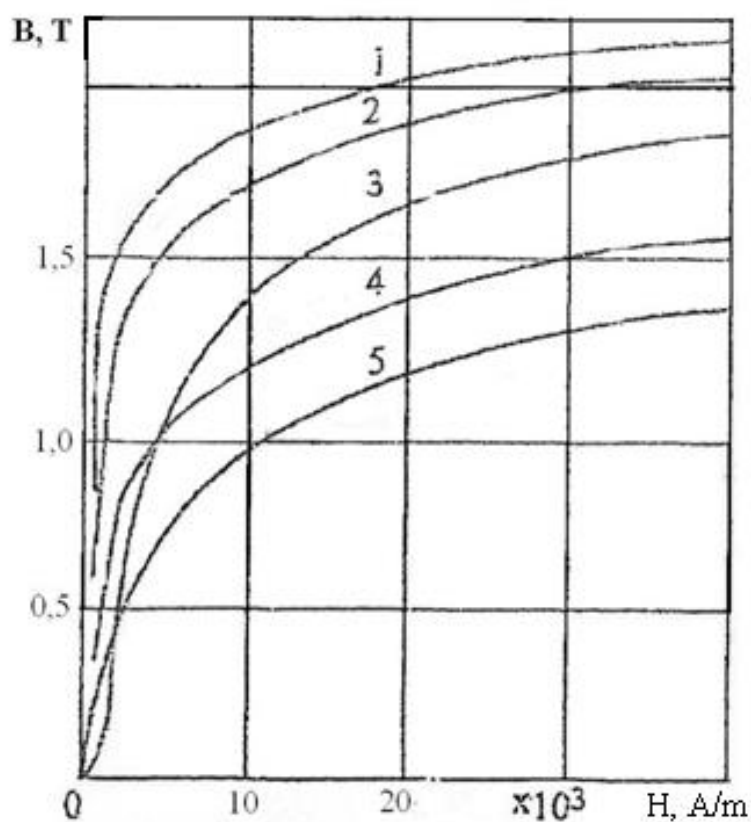
Gaminant dvisluoksnius rotorius, jų cilindrus gamybos technologijoje gali būti taikoma miltelinė technologija. Tai labai greit progresuojanti technologija, skirta masinei precizinių detalių gamybai iš metalų, jų lydinių, keramikos ir įvairių kompozicinių medžiagų. Ji ypač svarbi pramonei šalių, kurios neturi savos metalurginės bazės, nes leidžia taupyti energiją, žaliavas ir gauti unikalias detales, kurių pagaminti kitokiais būdais neįmanoma. Detalės, pagamintos miltelinės metalurgijos būdu, turi geresnę struktūrą, tačiau šios detalės yra poringos. Šiuo metu procesai leidžia gauti praktiškai visų metalų ir daugumos metalų lydinių miltelius. Šie milteliai naudojami ne tik miltelinėje metalurgijoje, bet suvirinime, apvirinime ir net pirotechnikoje. Gaminant konstrukcines detales dažniausiai naudojami geležies ir plieno milteliai, o taip pat milteliai iš vario lydinių. Gaminant lydinius ir detales su specialiomis savybėmis naudojami aliuminio, titano, keramikos, oksidų ir kitų medžiagų milteliai.

Šiuo būdu gaminant detales metalo nereikia iš pradžių išlydyti, o po to sulieti. Pagrindinės miltelinės metalurgijos technologinės operacijos yra pradinių medžiagų (miltelių) gamyba, miltelių presavimas ir jų sukaitinimas temperatūroje, žemesnėje už metalų lydymosi temperatūrą. Be to šis procesas nesunkiai automatizuojamas. Šiuo būdu galima gaminti sudėtingos konfigūracijos detales, kurioms nereikalingas tolesnis mechaninis apdirbimas. Gaminant medžiagas miltelinio būdu gamyba vyksta be gamybos atliekų. Dar vienas šios technologijos privalumas, kad miltelius galima gaminti iš atliekų – metalo drožlių (taip sutaupomos žaliavos). Priklausomai nuo paskirties, detalės po sukepinimo gali būti naudojamos tiesiogiai ar papildomai apdirbamos (cementuojamos, azotinos). Šiuo metu miltelinės metalurgijos būdu gaminami magnetai, elektrodai, kontaktai, slydimo guoliai,

stabdžių kaladėlės, filtrai. Ši gamybos technologija leidžia pakeisti deficitinius metalus pigesniais. [4][19]

Geriausias elektromagnetines savybes turi geležies ir vario lydiniai. Jie leidžia keisti  $\mu_2$  ir  $\rho$  reikšmes užduotame intervale, šie lydiniai yra lengvai apdirbami, nebrangūs ir todėl naudojami vientisųjų ir dvisluoksnių rotorių gamyboje. Sąlyginai šie lydiniai žymimi CM raidėmis ir skaičiumi, kuris parodo vario kiekį lydinyje procentais. Lydinyje CM – 19 yra apie 19 % vario, lydinyje CM – 25 vario yra apie 25 % ir t.t. Priemaišos sudaro (1 – 1,5)%.

Vario kiekis lydinyje mažina santykinę magnetinę skvarbą  $\mu_2$  ir savitąją elektrinę varžą  $\rho$ . Rotoriui gaminti naudojamų lydinių Kiuri taško temperatūra turi būti ne mažesnė nei 300 – 350 °C [5].



**7 pav.** Magnetinių medžiagų kreivės: 1 – elektromagnetinis plienas 2012,  $\rho = (1 - 2) \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ ; 2 – plienas 30,  $\rho = 2,5 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ ; 3 – plienas 20,  $\rho = 2,6 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ ; 4 – chromuotas plienas,  $\rho = (7 - 9) \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ ; 5 – ketus,  $\rho = (4 - 5) \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ .

2 lentelėje pateikta geležies – vario lydinių savitosios elektrinės varžos  $\rho$  ir santykinės magnetinės skvarbos  $\mu_r$  priklausomybė nuo vario kiekio lydinyje. Skaičiavimais ar aproksimuojant atitinkamus dydžius, šių parametru vertės gaunamos artimos teorinėms, pateiktoms 3 lentelėje.

**2 lentelė.** Geležies – vario lydinio  $\rho$  ir  $\mu_r$  priklausomybė nuo procentinio vario kiekio lydinyje.

Lydinys	$\rho \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ (prie 20 °C)	$\mu_r$ (prie $H = 5 \cdot 10^3$ A/m)
CM – 15	2,16	108
CM – 19	1,6	89
CM – 20	1,29	83
CM – 24	1,17	67
CM – 25	1,07	48
CM – 30	1	40
CM – 40	0,8	32
CM – 60	0,6	12

**3 lentelė.** Lydinio CM – 19 procentinė sudėtis.

Lydinio CM - 19 procentinė sudėtis	
Geležis	78...79
Varis	19,2...19,4
Manganas	0,9...1,1
Aliuminis	0,35...0,45
Silicis	0,3...0,4
Nikelis	0,055...0,09
Chromas	0,055...0,09
Anglis	0,025...0,045
Fosforas	0,015...0,035
Siera	0,02

4 lentelėje pateikiamos žinomų medžiagų elektromagnetinės savybės. Taip pat nurodoma skirtingoms medžiagoms būdinga individuali temperatūra, dar vadinama Kiuri temperatūra. Viršijus šią temperatūrą feromagnetinės medžiagos savybės išnyksta ir jis tampa tiesiog poliniu dielektriku.

**4 lentelė. Skirtingų medžiagų elektromagnetinės savybės.**

Medžiaga	$\rho, 10^{-7} \Omega \cdot m,$ (prie 20 °C)	$\mu_2,$ prie $H=5 \cdot 10^3$ A/m	Kiuri taško temp. T, °C
Kobaltas	0,62	1200	1500
Elektrotechninis plienas 2013	5	287	773
Plienai 1211, 1511	2,5	250	773
Plienas 40X	1,5	250	773
Plienas CT5	2,1	350	773
Plienas 35 markės	1,1	250	773
Geležis	0,98	238	768
Geležies – nikelio lydinys	4,5	230	700
Chromuotas plienas	7...9	175	
Turbogeneratorių rotorų plienas	2,6	144	773
Pilkasis ketus	4...5	116	240
Nikelis	0,73	79,5	385

Šiuo atveju, kai pakeičiamas rotorius, variklio slydimas nominaliajame režime buvo maždaug 2 kartus mažesnis. Maždaug tiek pat sumažėja ir nuostoliai, atsirandantys variklio rotoriuje.

Iš variklio su dvisluoksniu rotoriumi eksperimentinių tyrimų ir eksploatacinių bandymų nustatyta, kad geležies – vario lydiniai (CM) iš esmės atitinka reikalavimus. Šie lydiniai pasižymi geromis lydymosi savybėmis, dideliu takumu, kas leidžia plonai liejant iš jų gauti bet kokias konfigūracijas (plonasienis liejimas). Lydinio kalimas sunkus, kadangi prie temperatūros didesnės kaip 800 °C lydiniai linkę įtrūkti, o prie mažesnės temperatūros lydiniai turi pakankamai aukštą (didelį) kietumą. Dėl tų pačių priežasčių neįmanomas ir šių lydinių štapavimas. Lydiniai paprastai apdorojami staklėmis, gręžimu ir frezavimu.

### 3.2. Asinchroninių variklių su dvisluoksniais rotoriais panaudojimas

Dėl savitos konstrukcijos ir išskirtinių gerų variklio parametrų reikšmių paleidimo metu, šio tipo asinchroniniai varikliai gali būti taikomi įvairiose srityse dėl didesnio paleidimo momento ( $M_p$ ) ir mažesnės paleidimo srovės ( $I_p$ ), lyginant su narveliniu varikliu. Juos bandoma taikyti vėjo energetikos įrenginiuose, tačiau susiduriama su projektavimo problemomis. Vis dėl to, remiantis skaičiavimais ir analizės pavyzdžiais asinchroniniai varikliai su dvisluoksniais rotoriais dažniausiai naudojami laivų mechanizmuose ir ten kur yra sunkios paleidimo sąlygos. [19]

Variklių su dvisluoksniais rotoriais taikymo sritys:

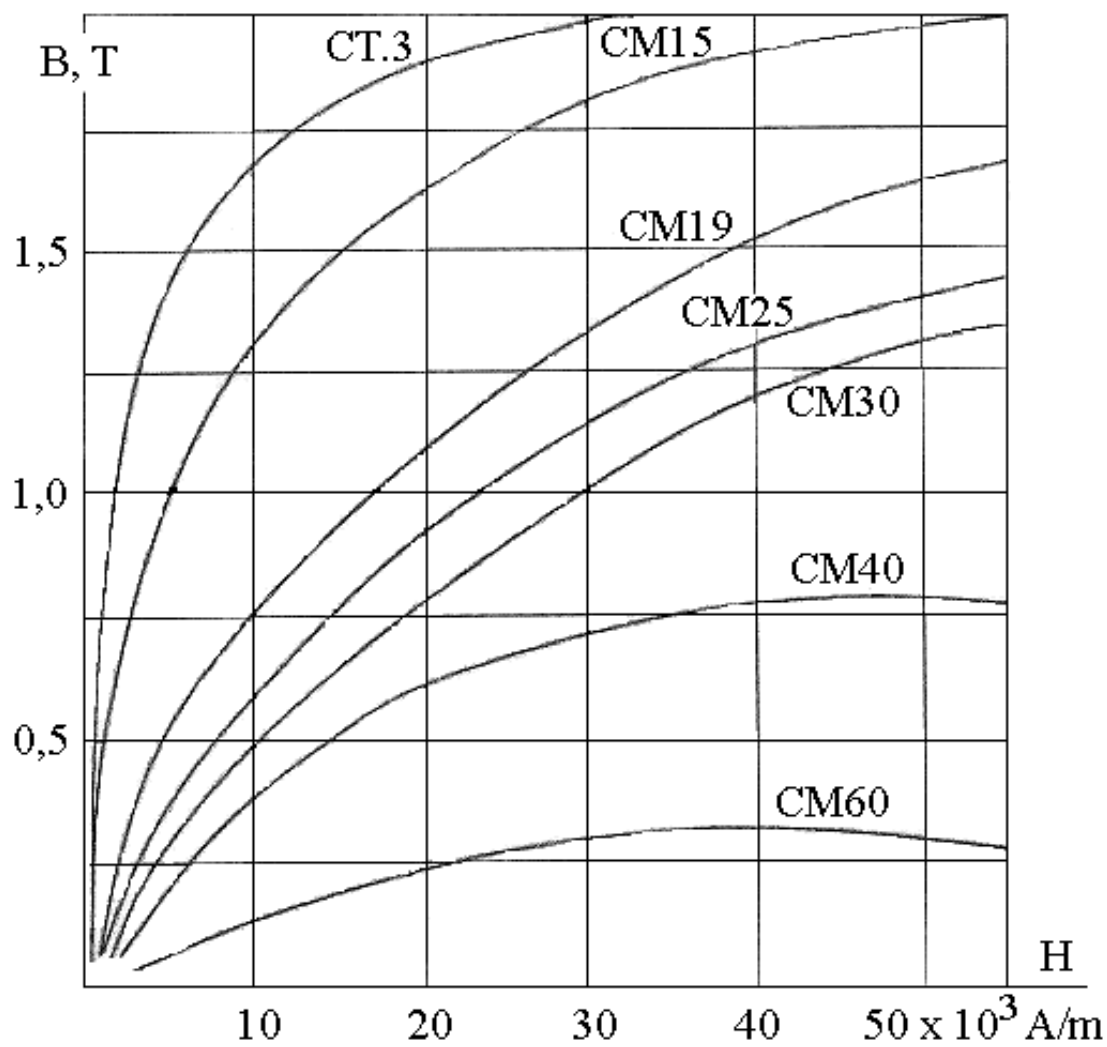


- Ten, kur sunkios paleidimo sąlygos ir reikalingas didelis paleidimo momentas ir maža paleidimo srovė;
- Elektros pavaros darbui trumpalaikiame režime – inkaro, švartavimosi įranga, kėlimo įtaisai, povandeniniai gręžimo įrenginiai;
- Metalurgijos pramonėje;
- Automatinio valdymo sistemose;
- Elektriniai laivų kėlimo mechanizmai – gervės, kranai, liftai, keltuvai;
- Elektromechaniniam vairo mechanizmui;
- Pozicionavimo sistemų valdymas distanciniu būdu;
- Elektriniam dujų turbinų paleidimui.
- Darbui trumpalaikiame ir trumpalaikiame kartotiniame su dažnais paleidimais režime;
- Didelio tikslumo metalo apdirbimo staklėse;
- Laivo špiliuose – mechanizmams inkarui pakelti ir nuleisti, švartlyniui įtempti, tinklams traukti.

### **3.3. Asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi parametrų ir charakteristikų skaičiavimo algoritmas**

Nagrinėjant darbą pasirinkta tema ir norint gauti charakteristikas, daromas 7,5 kW asinchroninio narvelinio variklio perskaičiavimas į asinchroninį variklį su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi. Šiame darbe dvisluoksnio rotoriaus cilindro medžiaga CM – 19 lydinys (8 pav.). Rotoriaus parametrų perskaičiavimai atliekamas siekiant pagerinti paleidimo ir darbo charakteristikas, sumažinti variklio papildomuosius nuostolius. Perskaičiuojant parametrus, statoriaus geometriniai matmenys yra žinomi. Šiame darbe bus atliekamas patikrinamasis elektromagnetinis asinchroninio narvelinio variklio skaičiavimas. Rotoriaus medžiaga (CM lydinys) apsprendžiama įmagnetinimo charakteristika (8 pav.), iš kurios nustatoma santykinė magnetinė skvarba –  $\mu_r$  ir savitoji elektrinė varža –  $\rho$ . Tai yra pagrindiniai parametrai proporcingi varžoms  $R_2$  ir  $X_2$ .

Žemiau pateikiamos plieno lydinių įmagnetinimo charakteristikos, reikalingos variklio su dvisluoksniu rotoriumi charakteristikų skaičiavimui:



**8 pav.** Plieno-vario lydinių (CM) įmagnetinimo charakteristikos  $B = f(H)$ .

**5 lentelė.** Asinchroninio variklio parametrų perskaičiavimo įvesties duomenys [11]:

$P_{2N}$	Nominalioji galia	W
$U_{1N}$	Fazinė įtampa	V
$I_{1N}$	Fazinė srovė	A
$\eta$	Naudingumo faktorius	s.v.
$\cos \varphi$	Galios faktorius	s.v.
$s_N$	Nominalusis slydimas	s.v.
$n_N$	Nominalusis sukimosi greitis	$\frac{r}{\text{min}}$
$m_1$	Fazių skaičius	
$Z_s$	Statoriaus dantų skaičius	
$w_1$	Fazės vijų skaičius	
$k_{W1}$	Apvijos faktorius	
$R_1$	Statoriaus apvijos fazės aktyvioji varža	$\Omega$
$X_1$	Statoriaus apvijos induktyvioji varža	$\Omega$
$A_1$	Ilginė apkrova	$\frac{A}{m}$
$B_\delta$	Oro tarpo magnetinio srauto tankis	T
$\delta_t$	Oro tarpas	m
$k_\delta$	Oro tarpo faktorius	
$k_\mu$	Soties faktorius	
$D_2$	Rotoriaus skersmuo	m
$L_2$	Rotoriaus paketo ilgis	m
$t_1$	Statoriaus griovelio žingsnis	m
$b_{S1}$	Dantų prapjovos plotis	m
$h_2$	Rotoriaus griovelio aukštis	m
$m_p$	Santykinis paleidimo momentas	s.v.
$i_p$	Santykinė paleidimo srovė	s.v.
$I_0$	Tuščiosios veikos srovė	A
$X_m$	Abipusė induktyvioji varža (įmagnetinimo kontūro varža)	$\Omega$
$f_1$	Tinklo dažnis	Hz
$2p$	Polių skaičius	
$D_1$	Statoriaus vidinis skersmuo	m
$X_m$	Statoriaus magnetolaidžio induktyvioji varža	$\Omega$
$R_m$	Statoriaus magnetolaidžio aktyvioji varža	$\Omega$
$\Delta p_{mech}$	Mechaniniai nuostoliai	W

Žemiau pateikiamas asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi parametų perskaičiavimo (iš tos pačios galios asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi) algoritmas. [1]  
Rotoriaus vientisasis cilindras gali turėti didesnę perkaitimo temperatūrą nei statoriaus apvija.

- statoriaus poliaus žingsnis  $\tau_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{2p}$ , m;
- savitoji lydinio varža  $\rho_{CM} = \rho_{CM19} \cdot \left[1 + \alpha_{CM19} \cdot (\Theta_{perk} + \Theta_0)\right]$

Priimama:  $\rho_c = \rho_{CM}$ ; čia  $\rho_c$ ,  $\Omega \cdot m$  – rotoriaus cilindro savitoji elektrinė varža;

- žiedo aukštis –  $h_z$ , m;
- preliminarus oro tarpas –  $\delta_0 = (1,5 \div 2,0) \cdot \delta_t$ , m.

Iteruoti priimamas pasirenkamas preliminarus rotoriaus cilindro aukštis –  $h_c$ , m.

Vientisojo cilindro magnetinės skvarbos suradimas:

- Rotoriaus srovė:

$$I_2 = I_{1N} \cdot \cos \varphi, \text{ A};$$

čia  $I_{1N}$  – asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi nurodytoji fazinė srovė, A;  
 $\cos \varphi$  – asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi galios faktorius.

- Rotoriaus magnetinio lauko stipris:

$$H_2 = 0,5 \cdot \frac{A_1 \cdot I_2}{I_{1N}}, \text{ A/m};$$

čia  $A_1$  – asinchroninio variklio ilginė apkrova, A/m;

- Išorinis dvisluoksniu rotoriaus skersmuo:

$$D_{2d} = D_1 - 2 \cdot k_1 \cdot \delta_t, \text{ m};$$

čia  $D_1$  – asinchroninio narvelinio variklio statoriaus magnetolaidžio vidinis skersmuo, m;

- Pasirenkama  $k_1$  reikšmė ( $k_1 = 1,2 - 1,5$ ).

čia  $k_1$  – oro tarpo padidavimo faktorius.

- Iš CM lydinio įmagnetinimo kreivės surandamas magnetinio lauko stipris  $H_0$ , atitinkantis oro tarpo magnetinio srauto tankį  $B_\delta$ , T:

$$H_0, \text{ A/m};$$

- Apskaičiuojamas rotoriaus cilindro magnetinio lauko stipris  $H_c$ :

$$H_c = \sqrt{H_2^2 + H_0^2}, \text{ A/m};$$

- Iš CM lydinio įmagnetinimo kreivės pagal magnetinio lauko stiprio vertę surandame magnetinio srauto tankį  $B_c$ :

$B_c, T$ ;

- Turint magnetinio srauto tankį  $B_c$  ir magnetinio lauko stiprį  $H_c$  apskaičiuojama rotoriaus santykinė magnetinė skvarba  $\mu_r$ :

$$\mu_r = \frac{B_c}{\mu_0 \cdot H_c};$$

čia  $\mu_0$  – vakuomo santykinė magnetinė skvarba (const), H/m;

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m.}$$

Rotoriaus cilindro magnetinio srauto tankio aproksimacija pagal atitinkamą H vertę:

- CM – 19 lydinio magnetinio srauto tankio polinomas [5]:

$$B_{19} = b_1 + b_2 \cdot H_{19} - b_3 \cdot e^{-b_5 \cdot H_{19}} - b_4 \cdot e^{-b_6 \cdot H_{19}};$$

$$b_1 = 1,112; \quad b_2 = 0,0007; \quad b_3 = 9,788; \quad b_4 = 0,866; \quad b_5 = 18; \quad b_6 = 0,9;$$

čia  $B_{19}$  – CM – 19 lydinio magnetinio srauto tankis;  $H_{19}$  – CM – 19 lydinio magnetinio lauko stipris.

- CM – 25 lydinio magnetinio srauto tankio polinomas [5]:

$$B_{25} = a_1 + a_2 \cdot H_{25} - a_3 \cdot e^{-a_4 \cdot H_{25}} - (a_1 - a_2) \cdot e^{-a_5 \cdot H_{25}};$$

$$a_1 = 0,684; \quad a_2 = 0,149; \quad a_3 = 0,717; \quad a_4 = 1,928; \quad a_5 = 2,156;$$

čia  $B_{25}$  – CM – 25 lydinio magnetinio srauto tankis;  $H_{25}$  – CM – 25 lydinio magnetinio lauko stipris.

- CM – 19 lydinio santykinė magnetinė skvarba:

$$\mu_{r19} = \frac{B_{19}}{\mu_0 \cdot H_c}.$$

Dvisluoksnio anizotropinio rotoriaus parametrai:

- Pasirenkamas slydimo intervalas:

$$s = 0,1, 0,2 \dots 1$$

- Žiedo aukštis:

$$h_z = \frac{2}{3} \cdot h_c, \text{ m}$$

- Išorinio cilindro (ekrano) aukštis:

$$h_e, \text{ m}$$

- Jungės aukštis:

$$h_j = \frac{1}{3} \cdot h_c, \text{ m}$$

- Dantų sluoksnio skersmuo:

$$D_z = D_{2d} - 2h_e - h_z, \text{ m};$$

- Vidutinis jungės skersmuo:

$$D_{jvid} = D_{2d} - 2(h_e - h_z) - h_j, \text{ m};$$

Perskaičiuotieji rotoriaus parametrai:

- Išorinio cilindro (ekrano) aktyvioji varža:

$$R_e = \rho_e \frac{L_2}{S_e} k_\rho, \Omega$$

čia  $\rho_e$  - ekrano medžiagos savitoji varža, atsižvelgiant į perkaitimą:  $\rho_e = \rho_{20}(1 + 0,004\Theta_{perk.})$ ;

$\rho_{e20} = (2 \div 3) \cdot 10^{-7} \Omega m$ ;  $S_e = \pi D_{2d} h_e$  - ekrano skerspjūvio plotas;  $D_{2d}$  - rotoriaus skersmuo;

$h_e = (1,5 \div 2,5) \cdot 10^{-3} m$  - ekrano storis;  $L_2$  - rotoriaus aktyvusis ilgis;  $k_\rho = 1$ , jei nėra skersinių grioveliai (rifliavimas);  $k_\rho = 2$ , jei yra skersiniai grioveliai (rifliavimas);

- Griovelinės dalies aktyvioji varža:

$$R_z = \rho_c \frac{L_2}{S_z z_2}, \Omega$$

čia  $\rho_c$  - rotoriaus cilindro medžiagos savitoji varža, atsižvelgiant į perkaitimą;  $S_z = h_z b_z$ ;

$h_z \approx \frac{2}{3} h_c$  - griovelio (danties) aukštis;  $h_c$  - rotoriaus cilindro storis;  $b_z = \frac{\pi(D_{2d} - 2h_e)}{8p}$  -

danties plotis;  $Z_2$  - rotoriaus dantų skaičius;  $p$  - polių porų skaičius.

- Vidinės jungės aktyvioji varža:

$$R_j = \rho_c \cdot \frac{L_2}{S_j}, \Omega$$

čia  $S_j = \pi D_{jv} h_j$ ;  $D_{jv} = D_{2d} - 2(h_e + h_z) - h_j$  - vidutinis jungės skersmuo;  $h_j \approx \frac{1}{3} h_c$  - jungės aukštis

$(h_c = h_z + h_j)$ .

- Anizotropinio rotoriaus aktyvioji varža:

$$R_{2a} = \frac{1}{\frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_z} + \frac{1}{R_j}} = \frac{R_e R_z R_j}{R_e R_z + R_e R_j + R_j R_z}, \Omega$$

Ši varža susideda iš trijų lygiagrečiai sujungtų aktyviųjų rotorių pagrindinių dalių: išorinio cilindro (ekrano), griovelinės dalies ir jungės.

- Rotoriaus žiedo aktyvioji varža:

$$R_k = 1,1 \cdot \rho_z \cdot \frac{2 \cdot (\tau_2)^2}{\pi^3 \cdot D_{2d} \cdot h_c \cdot L_z}, \Omega$$

čia  $\rho_z$  – žiedo savitoji elektrinė varža,  $\Omega \cdot m$ ;  $\tau_2$  – rotoriaus poliaus žingsnis, m; rotoriaus žiedo plotis  $L_z = 0,1 \cdot L_2$ ;

- Rotoriaus cilindro aktyvioji varža:

$$R_c = 4,4 \cdot m_1 \cdot \rho_c (w_1 \cdot k_{\omega 1})^2 \cdot \frac{L_2}{\pi \cdot D_{2d} \cdot h_c}, \Omega$$

čia  $m_1$  – fazių skaičius;  $w_1$  – fazės vijų skaičius;  $k_{\omega 1}$  – apvijos faktorius;  $L_2$  – rotoriaus paketo ilgis, m;  $D_{2d}$  – dvisluoksnio rotoriaus išorinis skersmuo, m.

- Perskaičiuotoji anizotropinio rotoriaus aktyvioji varža, atsižvelgiant į paviršiaus reiškinių ir trumpai jungtus žiedus:

$$R_2(s) = (R_{2d} k_r(s) + R_z) k_p k_L, \Omega$$

čia  $k_r(s) = \frac{\xi(s)(\sinh(2\xi(s)) + \sin(2\xi(s)))}{\cosh(2\xi(s)) - \cos(2\xi(s))}$  - cilindro aktyviosios varžos padidėjimo faktorius;

$k_p = 4m_1(w_1 k_{w1})^2$  - rotoriaus parametrų perskaičiavimo faktorius;  $k_L = 1$  - rotoriaus aktyviosios varžos padidėjimo faktorius dėl kraštų reiškinių (įvertina galų reiškinių rotoriuje);  $\xi(s) = \frac{h_c}{\Delta(s)}$  -

santykinis rotoriaus cilindro aukštis;  $\Delta(s) = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\omega_1 \mu_0 \mu_r s}}$  - magnetinio lauko skvarbos

skaičiuojamasis gylis dvisluoksnio rotoriaus cilindre;  $\rho_c$  - rotoriaus cilindro medžiagos savitoji varža;  $\mu_r$  - rotoriaus cilindro medžiagos santykinė magnetinė skvarba;  $\omega_1 = 2\pi f_1$ .

Faktorius  $k_L$  skaičiuojamas, kai rotorius yra be trumpai jungtų žiedų. Kai  $R_z \neq 0$ , tai  $k_L = 1$ .

- Anizotropinio rotoriaus induktyvioji varža:

Anizotropinio rotoriaus induktyvioji varža susideda iš keturių dedamųjų – ekrano  $X_e$ , vidinio cilindro dantų  $X_z$ , dantų zonos  $\Sigma X_z$  ir jungės  $X_j$ :

$$X_{2a} = X_e + X_z + \Sigma X_z + X_j, \Omega$$

- Išorinio cilindro (ekrano) induktyvioji varža:

$$X_e = \frac{1}{3} \omega_1 \mu_0 \mu_{re} \frac{h_e L_2}{\pi D_{2d}}, \Omega$$

čia  $\mu_{re} = 30 \div 60$  - išorinio cilindro (ekrano) santykinė magnetinė skvarba, užsiduodama darbinio cilindro  $\mu_{re}$  ribose.

- Vidinio cilindro dantų induktyvioji varža:

$$X_z = \frac{1}{12} \omega_1 \mu_0 \mu_{rc} \frac{h_z L_2}{2(b_z + h_z) Z_2}, \Omega$$

- Vidinio cilindro su grioveliais dantų zonos induktyvioji varža:

$$\Sigma X_z = \frac{1}{12} \omega_1 \mu_0 \mu_{re} \frac{h_z L_2}{\pi D_{zv}}, \Omega$$

čia  $D_{zv} = D_{2d} - 2h_e - h_z$  - vidutinis dantų sluoksnio skersmuo;  $\mu_{re} = \frac{t_2}{\frac{b_z}{\mu_{rc}} + \frac{b_g}{\mu_0}}$  - dantų sluoksnio

santykinė ekvivalentinė skvarba (tangentinė) liestinės kryptimi;  $t_2 = b_g + b_z$  - rotoriaus dantų žingsnis;  $b_g = 1 \text{ mm}$  – rekomenduojamas griovelio plotis.

- Vidinio cilindro jungės induktyvioji varža:

$$X_j = \frac{1}{3} \omega_1 \mu_0 \mu_r \frac{h_j L_2}{\pi D_{jv}};$$

čia  $\mu_r = \mu_{rc}$ .

- Perskaičiuotoji rotoriaus darbinio cilindro induktyvioji varža:

$$X_2(s) = X_{2a} k_p k_x(s) k_{Lx}(s);$$

čia  $k_x(s) = \frac{3(\sinh(2\xi(s)) - \sin(2\xi(s)))}{2\xi(s)(\cosh(2\xi(s)) - \cos(2\xi(s)))}$  - rotoriaus cilindro induktyviosios varžos kitimo

faktorius, atsižvelgiant į paviršiaus reiškini;  $k_{Lx}(s) = 1 + \frac{R_k}{R_c \cdot k_r(x)}$  - realus rotoriaus galų

reiškinio faktorius, kai yra trumpai jungti žiedai.

•

Priimame  $\delta_d = 1,5\delta_t, \text{ m}$ ;

- Dvisluoksnio anizotropinio rotoriaus skaičiuojamasis oro tarpo dydis:

$$\delta_d = k_\delta \cdot (\delta_t \cdot k_1) + \delta_\mu;$$



čia  $k_\delta$  – oro tarpo faktorius,  $k_\delta = 1,19$ ;

$$k_1 = 1,5$$

$\delta_\mu$  – ekvivalentinis oro tarpo dydis, įvertinantis cilindro storį  $\delta_\mu = \frac{h_C}{\mu_r}$ , m ;

- Tikslinama abipusio induktyvumo varža, priklausomai nuo oro tarpo:

$$X_{md} = \frac{\mu_0 \cdot m_1 \cdot \omega_1 (w_1 \cdot k_{\omega 1})^2 \cdot D_1 \cdot L_2}{\pi \cdot p^2 \cdot \delta_d}, \Omega ;$$

$$Z_1 = R_1 + j \cdot X_1 ;$$

$$Z_{md} = R_m + j \cdot X_{md} ;$$

$$R_{2d}(s) = R_c \cdot k_r(s) + R_k \quad ;$$

čia  $R_1$  - statoriaus apvijos fazės aktyvioji varža,  $\Omega$ ;  $X_1$  - statoriaus apvijos induktyvioji varža,  $\Omega$ ;  
 $Z_1$  - statoriaus apvijos fazės pilnutinė varža,  $\Omega$ ;  $Z_{md}$  – abipusė induktyvioji kompleksinė varža,  
 $\Omega$ ;  $R_{2d}$  – dvisluoksniu rotorius aktyvioji varža,  $\Omega$ ;

- Variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi slydimas:

$$s_{d_1} = \frac{R_{2d}(s_N)}{\sqrt{\left(\frac{U_{1N}}{I_2}\right)^2 - (X_C(s_N))^2 - R_1}} .$$

- Aktyvioji darbinės šakos varža:

$$R(s) = R_1 + \frac{R_{2d}(s)}{s}, \Omega .$$

- Induktyvioji darbinės šakos varža:

$$X(s) = X_1 + X_C(s), \Omega$$

- Pilnutinė darbinės šakos varža:

$$Z(s) = \sqrt{R(s)^2 + X(s)^2}, \Omega .$$

- Rekomenduojamas dvisluoksniu anizotropinio rotorius cilindro storis:

$$h_C = (0,7 \div 0,9) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_C}{\omega_1 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot s_d}}; \quad h_C = (0,7 \div 0,9) \cdot \Delta, \text{ m}$$

- Asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi įmagnetinimo srovė:

$$I_{0\mu C} = I_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{k_\mu} + \frac{1}{k_\mu} \cdot \frac{\delta_1}{\delta_d}\right), \text{ A}$$

čia  $\delta_1 = k_1 \cdot \delta_t + \delta_\mu$ ;  $k_\mu$  – asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi soties faktorius.

Asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi nuostoliai:

Siekiant sumažinti dvisluoksniu (ar dvisluoksniu anizotropiniu) rotoriaus aktyviają varžą ir papildomuosius nuostolius, rotoriaus cilindro paviršiuje daromi skersiniai (žiediniai) grioveliai (rotoriaus paviršiaus rifliavimas).

- Rekomenduojami griovelių matmenys, atsižvelgiant į rotoriaus skersmenį:

$$h_g = (1,5 - 2,0) \cdot 10^{-3} \text{ m} - \text{griovelio aukštis}; b_g = (0,8 - 1,0) \cdot 10^{-3} \text{ m} - \text{griovelio plotis};$$

$$a_g = (2,5 - 3,0) \cdot 10^{-3} \text{ m} - \text{tarpas tarp gretimų griovelių}.$$

- Preliminariai apskaičiuojamas rotoriaus skersinių griovelių skaičius:

$$n_g = \frac{L_2}{a_g + b_g} - 2;$$

čia  $n_g$  – apvalinamas iki sveiko skaičiaus.

- Faktorius, įvertinantis rotoriaus paviršiaus varžos padidėjimą, dėl skersinių griovelių:

$$k_p = 1 + 0,55 \cdot \frac{2h_g + b_g + a_g}{L_2} \cdot n_g;$$

Priimame  $k_p$  sveiką skaičių. Jei nėra skersinių griovelių, tai priimama, kad  $k_p$  lygus 1.

- Dvisluoksniu rotoriaus tuščiosios veikos papildomieji nuostoliai:

$$p_{d0} = \frac{0,27}{\sqrt{\mu_r \cdot \rho_c \cdot k_p}} \cdot (Z_s \cdot 60 \cdot n_1)^{1,5} \cdot (B_0 \cdot t_1)^2 \cdot \pi \cdot D_{2d} \cdot L_2, \text{ W}$$

čia  $t_1$  – statoriaus griovelio žingsnis, m;  $b_{s1}$  – statoriaus dantų prapjovos plotis, m;  $b_{s11} = 0,7 \cdot b_{s1}$ ,

m;  $Z_s$  – Statoriaus dantų skaičius;  $B_0 = 0,047 \cdot \frac{b_{s11}}{\delta_d} \cdot B_\delta \cdot \sin\left(1,5 \cdot \frac{b_{s11}}{t_1} \cdot \pi\right)$ ,  $T$  – dvisluoksniu

anizotropiniu rotoriaus pulsuojamasis magnetinio srauto tankis.

- Dvisluoksniu anizotropiniu rotoriaus suminiai tuščiosios veikos nuostoliai:

$$\sum p_0 = p_{past} + p_{d0}, \text{ W}$$

čia  $p_{past} = \sum p_N - p_{el1} - p_{el2}$ , W – pastovieji variklio nuostoliai.

- Aktyvioji dvisluoksniu anizotropiniu rotoriaus tuščiosios veikos srovė:

$$I_{0ad} = \frac{\sum p_0}{m_1 \cdot U_{1N}}, \text{ A}$$

- Aktyvioji dvisluoksniu anizotropiniu rotoriaus srovės dedamoji:

$$I_{2ad}(s) = I_{2d}(s) \cdot \frac{R(s)}{Z(s)}, \text{ A}$$

- Reaktyvioji dvisluoksniu anizotropinio rotoriaus srovės dedamoji:

$$I_{2rd}(s) = I_{2d}(s) \cdot \frac{X(s)}{Z(s)}, \text{ A}$$

- Apkrauto asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi papildomieji nuostoliai:

$$P_{pap.a} = 1,25 \cdot \mu_0 \cdot A_1^2 \cdot v_1 \left( \frac{I_2}{I_{1N}} \right)^2 \cdot \pi \cdot D_{2d} \cdot L_2 \cdot \lambda_v, \text{ W}$$

čia  $v_1 = 2 \cdot f_1 \cdot \tau_2 \cdot \frac{m}{s}$ ;  $\tau_v = \frac{\tau_1}{v}$ , m;  $v$  – dantų harmonikos numeris,  $v = \frac{Z_s}{p}$ ;  $\lambda_v$  – sklaidos

santykinis magnetinis laidis:

$$\lambda_v = \frac{1}{a_v \cdot \sinh(\gamma_v)^2 + 2 \sinh(\gamma_v) \cdot \cosh(\gamma_v) + 2 \cdot \frac{\cosh(\gamma_v)^2}{a_v}};$$

$\gamma_v$  – savitasis elektrinis laidis,  $\gamma_v = \frac{\pi \cdot \delta_d}{\tau_v}$ ;

$$\text{koeficientas } a_v = \frac{\pi}{\tau_2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_r \cdot \rho_c \cdot k_p \cdot v}{\omega_1 \cdot \mu_0}}.$$

Charakteristikos:

- Variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi elektromagnetinė galia:

$$P_{emd}(s) = m_1 \cdot (|I_{2d}(s)|)^2 \cdot \frac{R_2(s)}{s};$$

- Galia, imama iš tinklo:

$$P_{1d}(s) = P_{emd}(s) + p_{el1d}(s) + p_{past}.$$

čia  $p_{el1d} = m_1 \cdot (|I_{1d}(s)|)^2 \cdot R_2(s)$  – elektriniai nuostoliai.

- Naudingoji variklio galia:

$$P_{2d}(s) = P_{emd}(s) - p_{el2d}(s) - p_{d0} - p_{pap.a} - p_{mech}, \text{ W}$$

čia  $p_{el2d} = m_1 \cdot (|I_{2d}(s)|)^2 \cdot R_2(s)$  – elektriniai nuostoliai.

- Suminiai variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi nuostoliai:

$$\sum p_d(s) = |P_{1d}(s)| - |P_{2d}(s)|, \text{ W}$$

- Variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi kompleksinės varžos:

$$Z_{2d}(s) = \frac{R_2(s)}{s} + j \cdot X_2(s); \quad Z_{2m}(s) = \frac{Z_{md} \cdot Z_{2d}(s)}{Z_{md} + Z_{2d}(s)};$$

$$Z_v(s) = Z_1 + \frac{Z_{md} \cdot Z_{2d}(s)}{Z_{md} + Z_{2d}(s)}.$$

- Variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi srovės, nuostoliai ir galios:

$$I_{2d}(s) = I_{1d}(s) \cdot \frac{Z_{md}}{Z_{md} + Z_{2d}(s)}; \quad P_{el2d}(s) = m_1 \cdot (|I_{2d}(s)|)^2 \cdot R_{2d}(s);$$

$$I_{2d}(s) = I_{1d}(s) \cdot \frac{Z_{md}}{Z_{md} + Z_{2d}(s)}; \quad I_{1d}(s) = \frac{U_{1N}}{Z_v(s)};$$

$$I_{1ad}(s) = I_{2ad}(s) + I_{0ad}; \quad P_{1d}(s) = \operatorname{Re}(I_{1d}(s)); \quad S_{1d}(s) = m_1 \cdot U_{1N} (I_{1d}(s));$$

$$P_{emd}(s) = m_1 \cdot (|I_{2d}(s)|)^2 \cdot \frac{R_2(s)}{s};$$

- Variklio su dvisluoksniu rotoriumi momentai, naudingumo ir galios faktoriai:

$$M_{emd}(s) = \frac{p \cdot P_{emd}(s)}{2\pi f_1}; \quad M_d(s) = \frac{p \cdot P_{2d}(s)}{2\pi f_1 \cdot (1-s)}; \quad \eta_{em}(s) = \frac{P_{emd}(s)}{P_{1d}(s)};$$

$$\eta_d(s) = \frac{P_{2d}(s)}{P_{1d}(s)}; \quad \cos \varphi_d(s) = \frac{\operatorname{Re}(I_{1d}(s))}{|I_{1d}(s)|}.$$

Paleidimo charakteristikos:

- Statoriaus ilginė apkrova:

$$A_{1p} = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{w1} \cdot I_{1d}(1)}{\pi \cdot D_1}, \frac{A}{m}.$$

- Dvisluoksniu anizotropinio rotoriaus magnetinio lauko stipris:

$$H_{2p} = 0,5 \cdot \frac{A_{1p} \cdot I_{2d}(1)}{I_{1d}(1)}, \frac{A}{m}.$$

- Efektinis rotoriaus magnetinio lauko stipris:

$$H_{cp} = \sqrt{H_{2p}^2 + H_0^2}, \frac{A}{m}$$

- Santykinė magnetinė skvarba, kai  $s = 1$ :

$$\mu_{rp} = \frac{B_{cp}}{\mu_0 \cdot H_{cp}}.$$

- Variklio su dvisluoksniu rotoriumi parametrai, kai  $s = 1$ :

$$k_{rp}(1) = \frac{\xi_p(1) \cdot (\sinh(2 \cdot \xi_p(1)) + \sin(2 \cdot \xi_p(1)))}{(\cosh(2 \cdot \xi_p(1)) - \cos(2 \cdot \xi_p(1)))};$$

$$k_{xp}(1) = \frac{3}{2 \xi_p(1)} \cdot \frac{(\sinh(2 \cdot \xi_p(1)) - \sin(2 \cdot \xi_p(1)))}{(\cosh(2 \cdot \xi_p(1)) - \cos(2 \cdot \xi_p(1)))};$$

$$\xi_p(1) = h_C \sqrt{\frac{\omega_1 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rp}}{2 \cdot \rho_c \cdot s}}; \quad R_{2dp}(1) = k_{rp}(1) \cdot R_C; \quad X_{2dp}(1) = k_{xp}(1) \cdot X_C(1);$$

$$R_{dp}(1) = R_{2dp}(1) + R_1; \quad X_{dp}(1) = X_{2dp}(1) + X_1;$$

$$Z_p(1) = \sqrt{R_{dp}(1)^2 + X_{dp}(1)^2}; \quad I_{1dp}(s) = \frac{U_{1N}}{Z_p(s)};$$

$$M_{dp}(s) = \frac{m_1 \cdot p \cdot I_{1dp}(s)^2 \cdot R_{2dp}(s)}{\omega_1}; \quad M_{dN} = \frac{p \cdot P_{2d}(s_d)}{2\pi f \cdot (1 - s_d)};$$

$$i_{dp} = \frac{I_{1dp}(s)}{I_{1d}(s_d)}; \quad m_{dp} = \frac{M_{dp}(s)}{M_{dN}};$$

- Asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi paleidimo kokybę apibūdinantis dydis:

$$Q_{pd} = \frac{m_{dp}}{i_{dp}};$$

čia  $m_{dp}$  – asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi santykinis paleidimo momentas;  $i_{dp}$  – asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi santykinė paleidimo srovė.

Variklio su narveliniu rotoriumi paleidimo kokybę apibūdinantis dydis:

$$Q_{pn} = \frac{m_p}{i_p};$$

čia  $m_p$  – asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi santykinis paleidimo momentas;  $i_p$  – asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi santykinė paleidimo srovė.

Paleidimo kokybę apibūdinama dviem dydžiais, tai santykiniu paleidimo momentu  $m_p$  ir santykinė paleidimo srove  $i_p$ . Geriausia paleidimo kokybė pasiekama esant dideliame santykiniam paleidimo momentui ir mažai santykiniai paleidimo srovei. Taigi, kuo didesnis paleidimo kokybę apibūdinantis dydis  $Q_p$ , tuo asinchroninio variklio paleidimo kokybė yra geresnė. [3], [10], [12]

- Asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi išnaudojimo pagal galią faktorius:

$$k_p = \frac{P_{2d}(s_d)}{P_{2N}}, \text{ kai } k_I = \frac{|I_{1d}(s_d)|}{I_{1N}};$$

Kuo šis faktorius artimesnis 1, tuo geresnis variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi išnaudojimas.

Taikant prieš tai pateiktą charakteristikų skaičiavimo algoritmą asinchroniniam varikliui su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi iš skaičiavimų matyti, kad variklio su dvisluoksniu rotoriumi papildomieji nuostoliai yra apie 4 kartus didesni, nei asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi. Vis dėl to variklio efektyvumas padidėja priklausomai nuo slydimo. Keičiant variklio slydimą mažinami nuostoliai rotoriuje.

**6 lentelė.** Asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi svarbiausieji parametrai (kai momentas lygus narvelinio variklio momentui)

Parametras	$P_{2d}$ , kW	$\eta_d$	$\cos\varphi_d$	$s_d$	$I_{1d}$ , A	$I_{2d}$ , A	$i_{pd}$	$m_{pd}$	$M_d$ , Nm	$k_{pd}$	$Q_{pd}$
Vertė	7,235	0,789	0,725	0,05	18,34	13,75	1,372	2,125	48,49	0,965	1,549

### 3.4. Asinchroninių variklių su narveliniu, vientisuoju, dvisluoksniu ir dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi parametų ir charakteristikų palyginimas

Toliau pateikiamas asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais svarbiausių parametų palyginimas, kai nominalusis sukimo momentas išlaikomas apytikriai vienodas:

**7 lentelė.** 7,5 kW Asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais svarbiausieji parametrai

Rotoriaus konstrukcija	$P_2$ , kW	$\eta$	$\cos\varphi$	$s_N$	$I_1$ , A	$I_2$ , A	$i_p$	$m_p$	$M_N$ , Nm	$k_p$	$Q_p$
Narvelinis	7,5	0,87	0,875	0,027	14,28	12,49	6,34	1,65	49,06	-	0,26
Vientisas	7,616	0,655	0,546	0,4	19,19	14,68	1,421	1,485	48,49	1,015	1,045
Dvisluoksniis CM-19	5,483	0,712	0,569	0,04	21,09	13,94	3,41	4,4	49,03	0,731	1,29
Dvisluoksniis anizotropinis CM-19	7,235	0,789	0,725	0,05	18,34	13,75	1,372	2,125	48,49	0,965	1,549
Dvisluoksniis anizotropinis CM-25	7,423	0,778	0,724	0,04	19,09	13,96	1,586	2,403	49,23	0,99	1,515

Iš 7 lentelės duomenų matome, kad didžiausius naudingumo ir galios faktorius ( $\eta$  ir  $\cos\varphi$ ) turi asinchroninis variklis su narveliniu rotoriumi, tačiau dėl apie 7 kartus išaugančios jo santykinės paleidimo srovės, narvelinio variklio paleidimo kokybė yra blogiausia, apie 4 kartus blogesnė nei variklių su vientisuoju ar dvisluoksniu rotoriumi. Geriausią paleidimo kokybę turi asinchroninis variklis su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi, šiek tiek prastesnę variklis su dvisluoksniu

izotropiniu ir vientisuoju rotoriumi. Dėl išaugusios statoriaus srovės ir didesnių nuostolių variklių su dvisluoksniais rotoriais naudingumo ir galios faktoriai yra ženkliai mažesni nei narvelinį rotorių turinčio asinchroninio variklio (šių parametų pokyčiai procentais pateikiami 8 lentelėje).

**8 lentelė.** 7,5 kW Asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais svarbiausių parametų pokyčiai procentais

Rotoriaus konstrukcija	$\eta$ , %	$\cos\varphi$ , %	$i_p$ , %	$m_p$ , %	$Q_p$ , %
Narvelinis	0,87	0,875	6,34	1,65	0,26
Vientisas	-24,71	-37,60	-77,59	-10,00	301,92
Dvisluoksnis CM-19	-18,16	-34,97	-46,21	166,67	396,15
Dvisluoksnis anizotropinis CM-19	-9,31	-17,14	-78,36	28,79	495,77
Dvisluoksnis anizotropinis CM-25	-10,57	-17,26	-74,98	45,64	482,69

Palyginimui pateikiami paskaičiuoti 22 kW asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais parametrai:

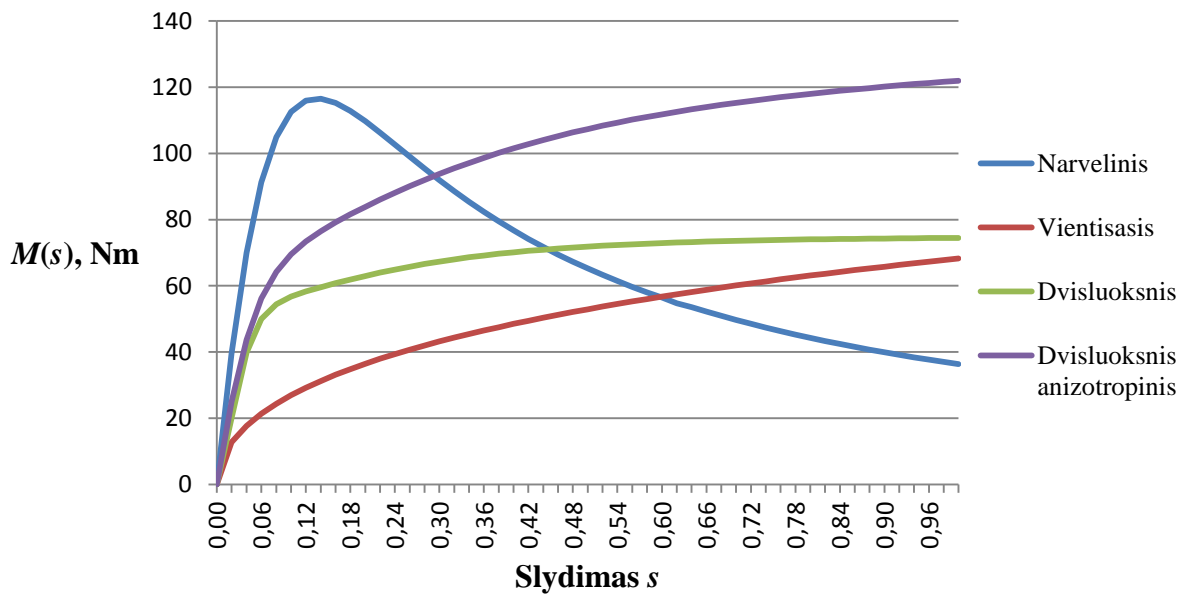
**9 lentelė.** 22 kW asinchroninio variklio su skirtingais rotoriais svarbiausieji parametrai

Rotoriaus konstrukcija	$P_2$ , kW	$\eta$	$\cos\varphi$	$s_N$	$I_1$ , A	$I_2$ , A	$i_p$	$m_p$	$M_N$ , Nm	$k_p$	$Q_p$
Narvelinis	22	0,91	0,9	0,021	38,9	36,5	6,8	1,6	143	-	0,233
Vientisas	21,13	0,75	0,57	0,35	47,2	39,5	1,49	1,51	135	0,96	1,015
Dvisluoksnis CM-19	18,05	0,828	0,64	0,04	47,7	37,7	4,2	3,93	138	0,82	0,937
Dvisluoksnis anizotropinis CM-19	21,36	0,841	0,828	0,055	44,5	38,3	1,89	2,27	143	0,971	1,199

**10 lentelė.** 22 kW sinchroninio variklio su skirtingais rotoriais svarbiausių parametų pokyčiai procentais

Rotoriaus konstrukcija	$\eta$	$\cos\varphi$	$i_p$	$m_p$	$Q_p$
Narvelinis	0,91	0,9	6,8	1,6	0,233
Vientisas	-17,58	-36,67	-78,09	-5,63	335,62
Dvisluoksnis CM-19	-9,01	-28,89	-38,24	145,63	302,15
Dvisluoksnis anizotropinis CM-19	-7,58	-8,00	-72,21	41,88	414,59

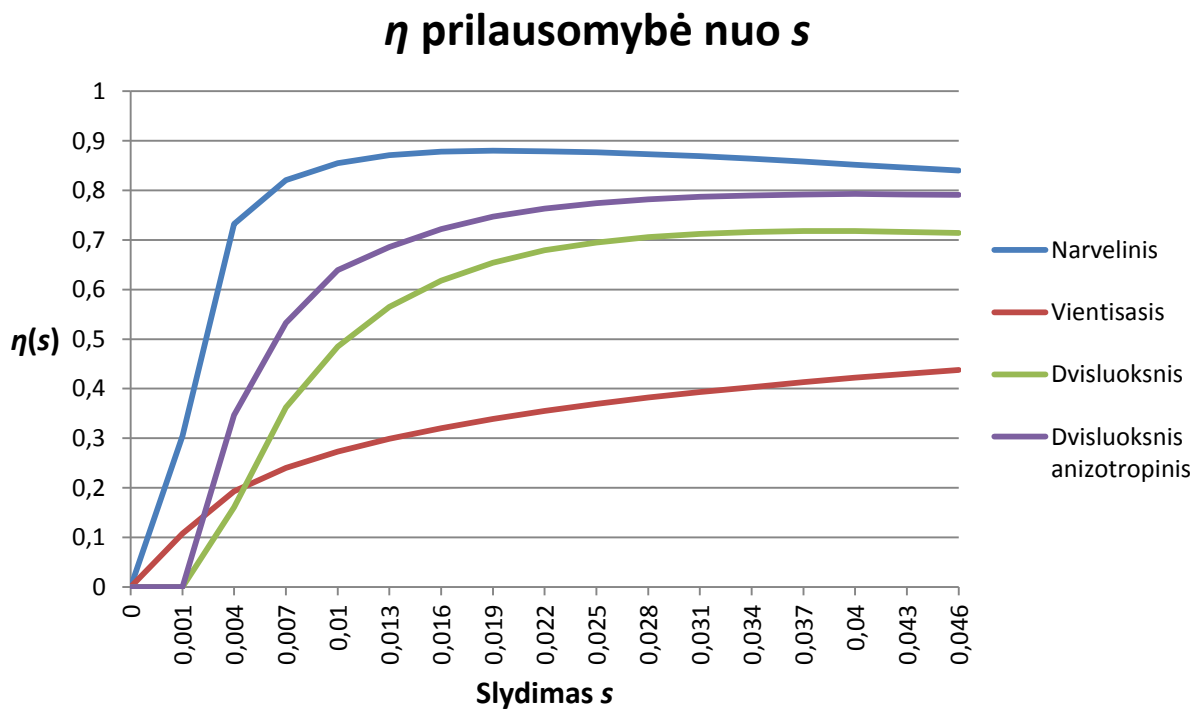
## $M$ prilausomybė nuo $s$



9 pav. 7,5kW AV su skirtingos konstrukcijos rotoriais mechaninės charakteristikos  $M=f(s)$

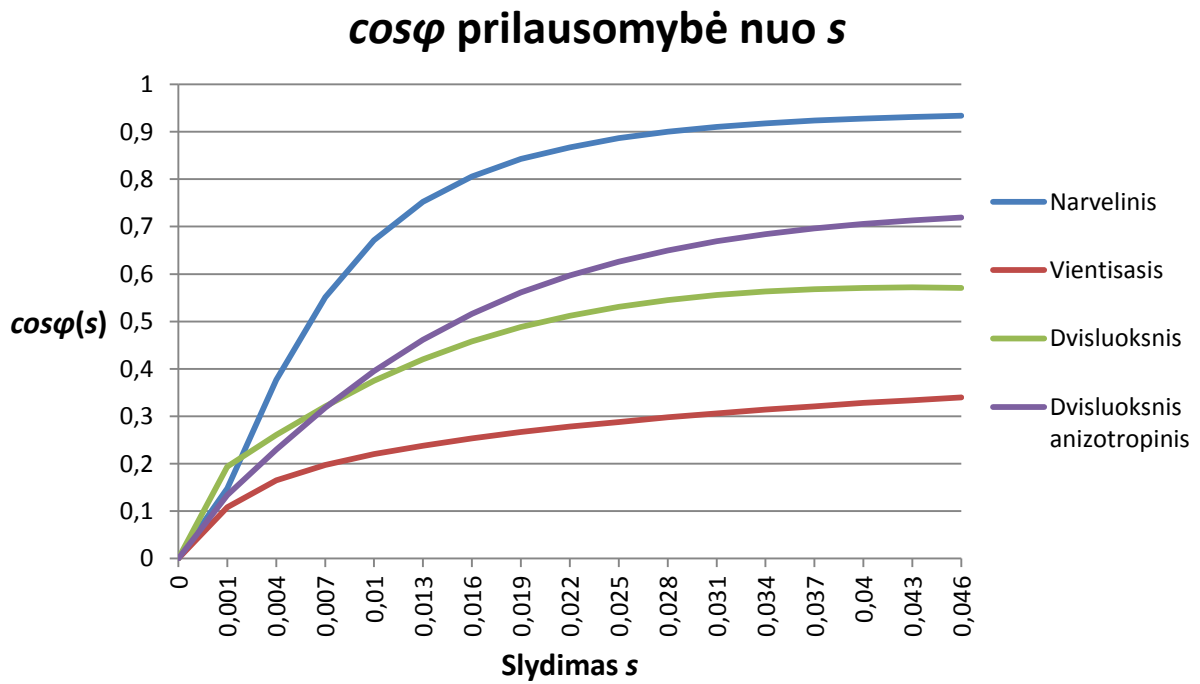
Iš 9 paveiksle pateiktų charakteristikų matome, kad esant mažoms slydimo reikšmėms stačiausia mechaninė charakteristika yra asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi, bet palyginus su kitais jo paleidimo momentas yra mažiausias. Asinchroninio variklio su vientisuoju rotoriumi mechaninė charakteristika pasislinkusi link didesnių slydimo reikšmių dėl didelės rotoriaus aktyviosios varžos, dėl to gaunamas gana didelis paleidimo momentas, bet esant mažoms slydimo reikšmėms variklio išvystomas sukimo momentas yra ženkliai mažesnis už variklio su narveliniu ar dvisluoksnio rotoriumi. Asinchroninio variklio su dvisluoksnio anizotropiniu rotoriumi mechaninė charakteristika apjungia narvelinį ir vientisą rotorių turinčių variklių mechanines charakteristikas. Ši mechaninė charakteristika esant mažoms slydimo reikšmėms pasižymi narveliniam varikliui būdingu charakteristikos kietumu, ir tuo pat metu turi didžiausią variklio paleidimo momentą. Charakteristika neturi ekstremumo taško, todėl galime teigti, kad variklio su dvisluoksnio anizotropiniu rotoriumi darbas vyksta stabiliai visame slydimų diapazone.





**10 pav.** 7,5kW AV su skirtingos konstrukcijos rotoriais naudingumo faktoriaus priklausomybė nuo slydimo

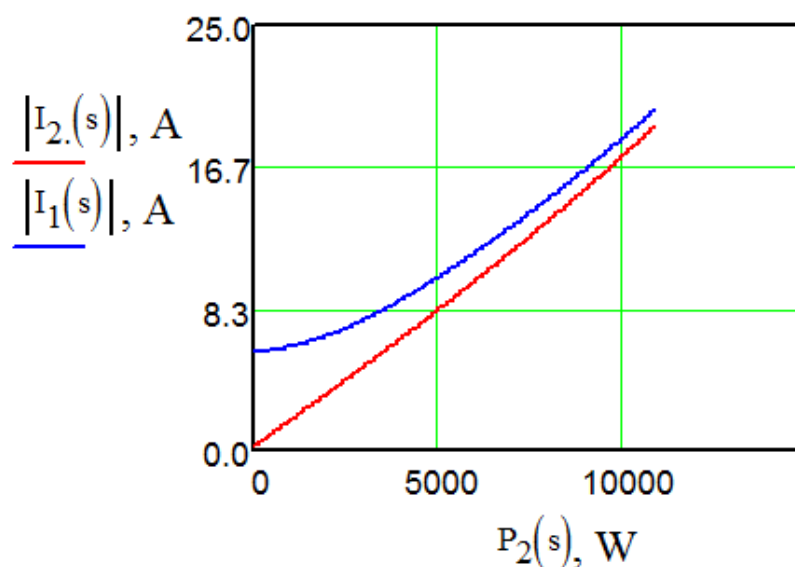
Iš 10 paveikslo matome, kad didžiausią naudingumo faktorių turi asinchroninis variklis su narveliniu rotoriumi. Kiek mažesnę naudingumo faktorių turi variklis su dvisluoksniu anizotropiniu ir dvisluoksniu izotropiniu rotoriumi, o asinchroninis variklis su vientisuoju rotoriumi, dėl didelių nuostolių rotoriuje, turi patį mažiausią naudingumo faktorių palyginus su kitais trimis varikliais.



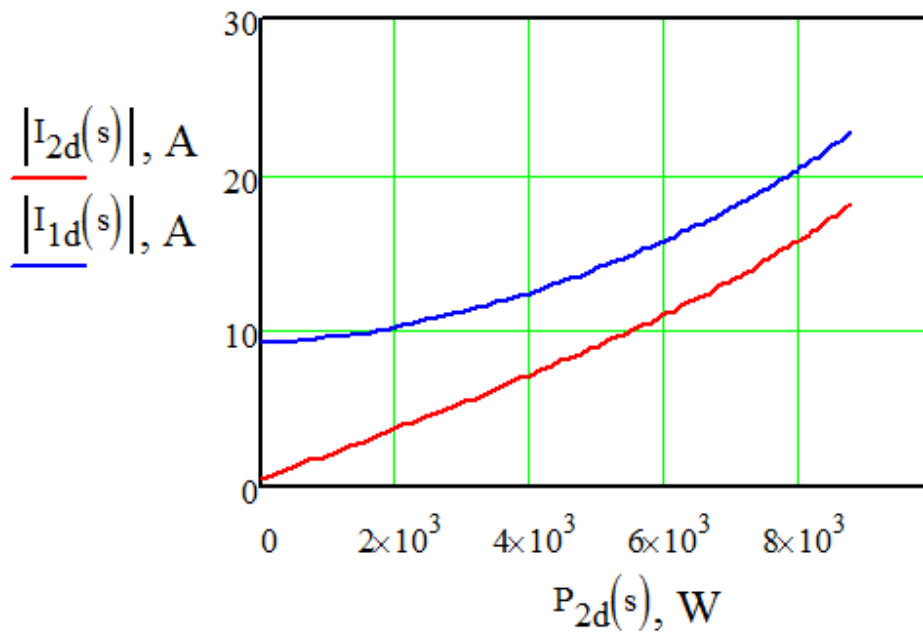
**11 pav.** 7,5kW AV su skirtingos konstrukcijos rotoriais galios faktoriaus priklausomybė nuo slydimo

Iš 11 paveiksle pateiktų charakteristikų matome, kad didžiausią galios faktorių turi asinchroninis variklis su narveliniu rotoriumi, kuris yra daug didesnis už dvisluoksnį izotropinį, dvisluoksnį anizotropinį ir vientisą rotorį turinčių variklių galios faktorių.

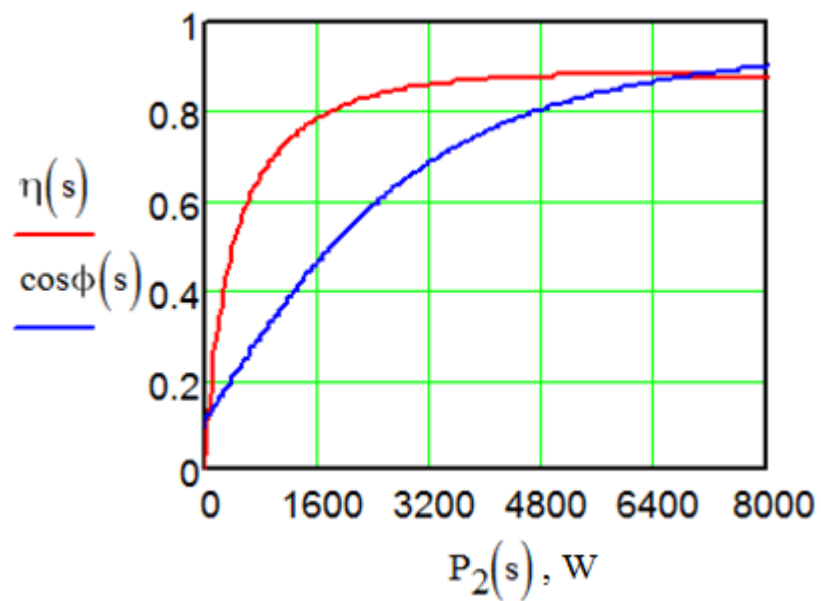
AV su narveliniu ir dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi darbo charakteristikų palyginimas:



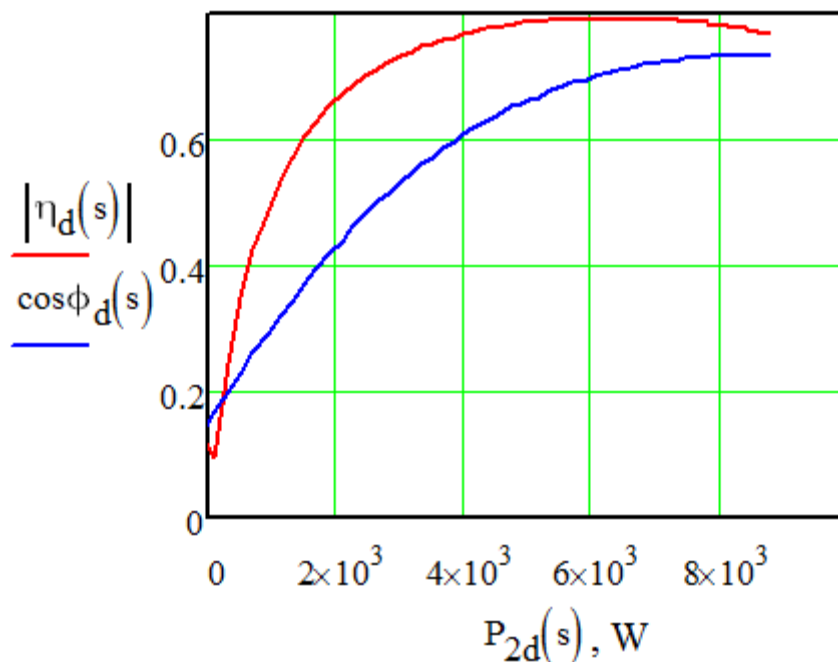
**12 pav.** AV su narveliniu rotoriumi statoriaus ir rotoriaus srovių priklausomybė nuo naudingos variklio galios



**13 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi statoriaus ir rotoriaus srovių priklausomybė nuo naudingos variklio galios



**14 pav.** AV su narveliniu rotoriumi naudingumo ir galios faktorių priklausomybė nuo naudingosios variklio galios



**15 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi naudingumo ir galios faktorių priklausomybė nuo naudingosios variklio galios

Iš asinchroninio variklio su narveliniu ir dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi darbo charakteristikų (12 – 15 paveikslai) matome, kad variklio su narveliniu rotoriumi statoriaus srovė esant vienodai variklio galiai yra mažesnė nei variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi, dėl to šio variklio galios faktorius yra didesnis. Taip yra dėl to, kad asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi papildomieji nuostoliai keičiantis variklio apkrovai yra didesni nei asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi.

#### 4. Asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi tiriamoji dalis

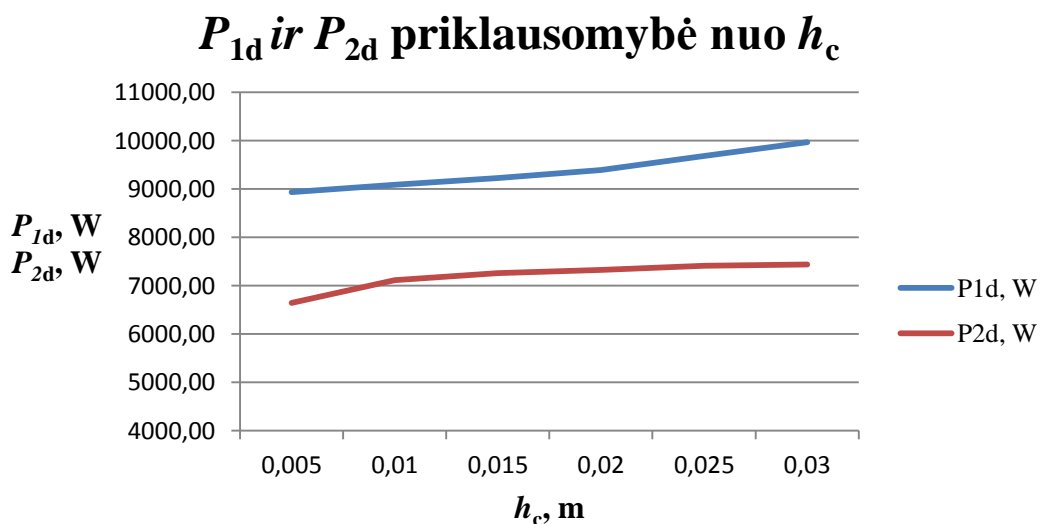
Turint sudaryta asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi programinę priemonę su baigiamojo projekto vadovu pasitarę nusprendėme toliau patyrinti variklio su skirtingais rotoriais parametrus.

Tyrinėjant asinchroninį variklį su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi didelę įtaką variklio parametrams turi pasirinktas išorinio rotoriaus cilindro storis ir oro tarpas. Norėdamas labiau pasigilinti į jų įtaką variklio parametrams atlikau palyginamuosius skaičiavimus prieš tai lygintam 7,5 kW asinchroniniam varikliui su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi.

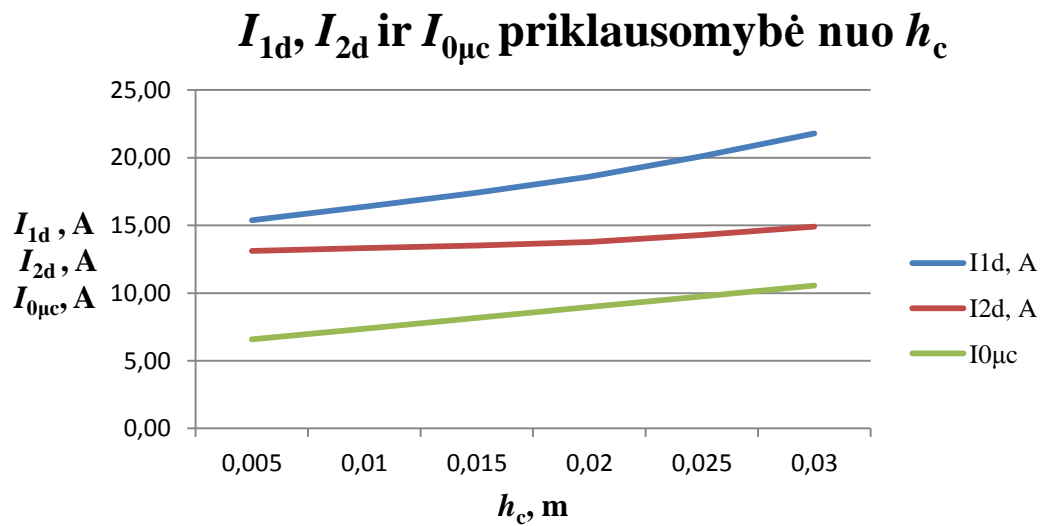
Pirmiausiai buvo keičiamas variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi išorinio cilindro storis ir stebima kaip keičiasi svarbiausieji variklio parametrai.

**11 lentelė.** 7,5 kW, 2p=4 AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi svarbiausių parametru palyginimas keičiant rotoriaus cilindro storį

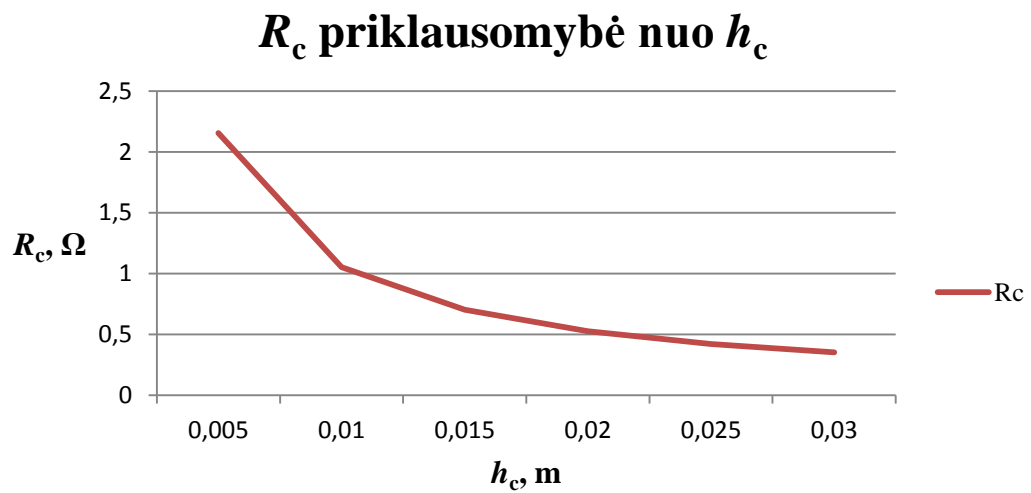
$h_c, m$	$P_{1d}, W$	$P_{2d}, W$	$\eta_d$	$\cos\varphi_d$	$M_{emd}, Nm$	$I_{1d}, A$	$I_{2d}, A$	$m_{pd}$	$i_{pd}$	$k_p$	$Q_{pd}$	$X_{md}$	$\mu_{rp}$	$R_c$	$I_{0\mu c}$
0,005	8931,76	6646,98	0,815	0,798	49,98	15,38	13,12	2,958	3,677	0,986	0,805	31,25	25,259	2,154	6,58
0,01	9086,69	7116,94	0,805	0,79	49,19	16,36	13,33	2,966	3,033	0,949	0,978	27,02	25,098	1,052	7,38
0,015	9224,78	7263,15	0,789	0,768	49,09	17,41	13,52	2,633	2,042	0,968	1,289	23,798	25,338	0,701	8,17
0,02	9393,61	7325,61	0,78	0,732	48,99	18,60	13,78	2,302	1,523	0,977	1,512	21,263	25,333	0,526	8,96
0,025	9681,60	7413,42	0,766	0,698	49,37	20,11	14,29	2,099	1,192	0,988	1,761	19,216	25,695	0,421	9,76
0,03	9969,29	7438,73	0,746	0,663	49,54	21,79	14,90	2,04	0,978	0,932	2,085	17,528	26,012	0,351	10,55



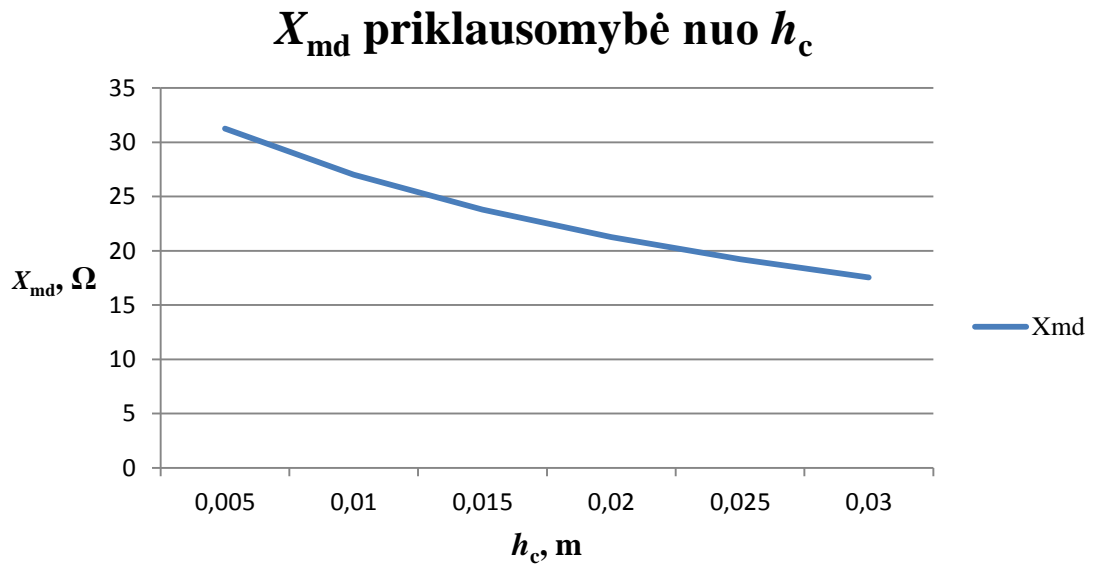
**16 pav.** AV su dvisluoksniu rotoriumi imamosios iš tinklo galios ir naudingosios variklio galios priklausomybė nuo cilindro storio



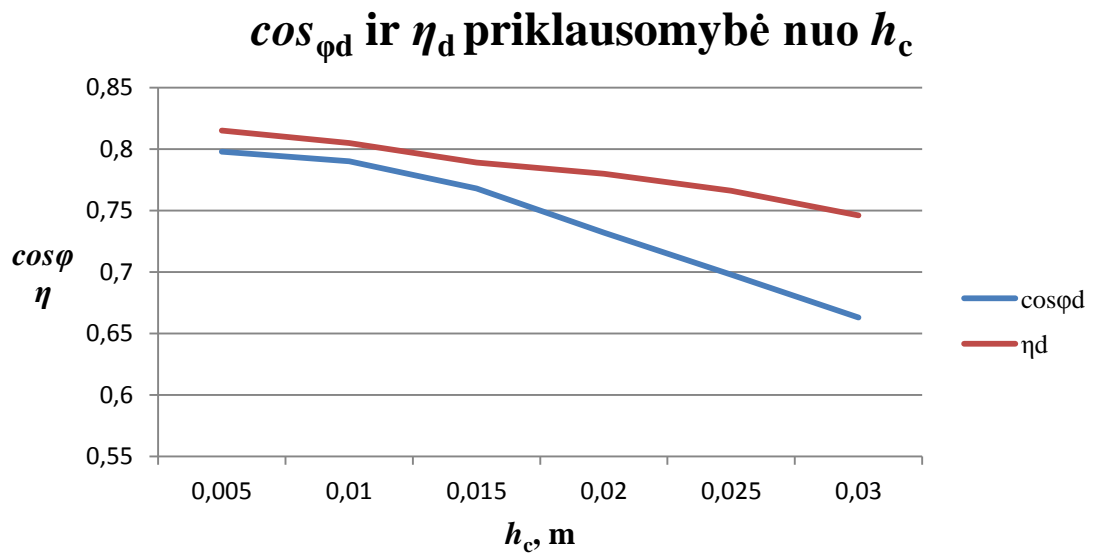
**17 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi srovių priklausomybė nuo cilindro storio



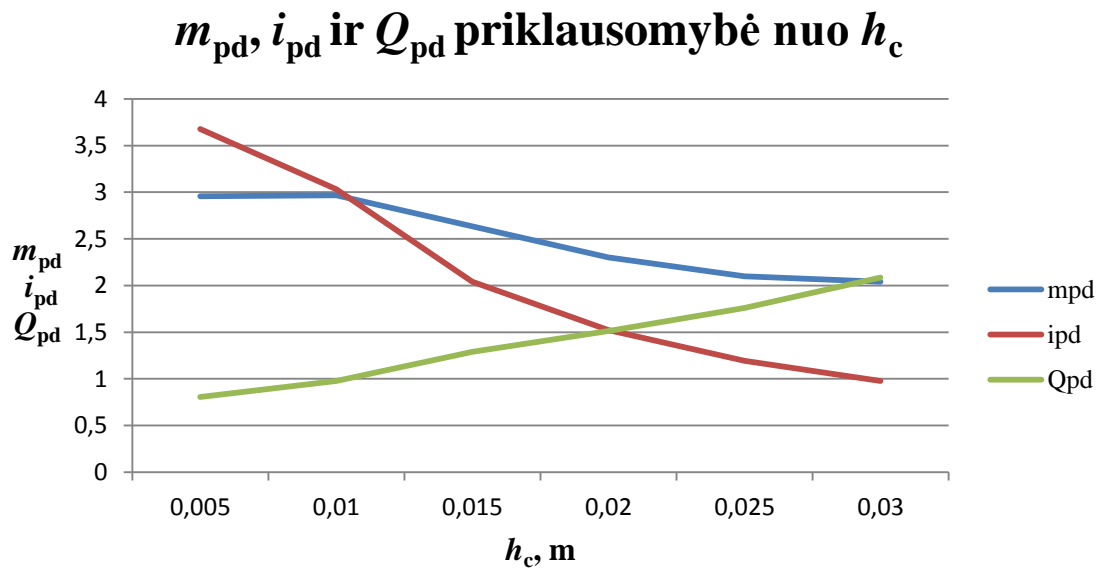
**18 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi cilindro varžos priklausomybė nuo cilindro storio



**19 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi induktyviosios varžos priklausomybė nuo cilindro storio



**20 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi naudingumo ir galios faktorių priklausomybė nuo cilindro storio



**21 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi santykinio paleidimo momento, santykinės paleidimo srovės ir paleidimo kokybę apibūdinančio dydžio priklausomybė nuo cilindro storio

Iš 11 lentelės duomenų ir 16 – 21 paveikslų matome, kad rotoriaus cilindro storis įtakoja visus AV su dvisluoksniu rotoriumi svarbiausius parametrus.

Toliau buvo atlikti 7,5 kW AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi pagrindinių parametru skaičiavimai keičiant variklio oro tarpą.

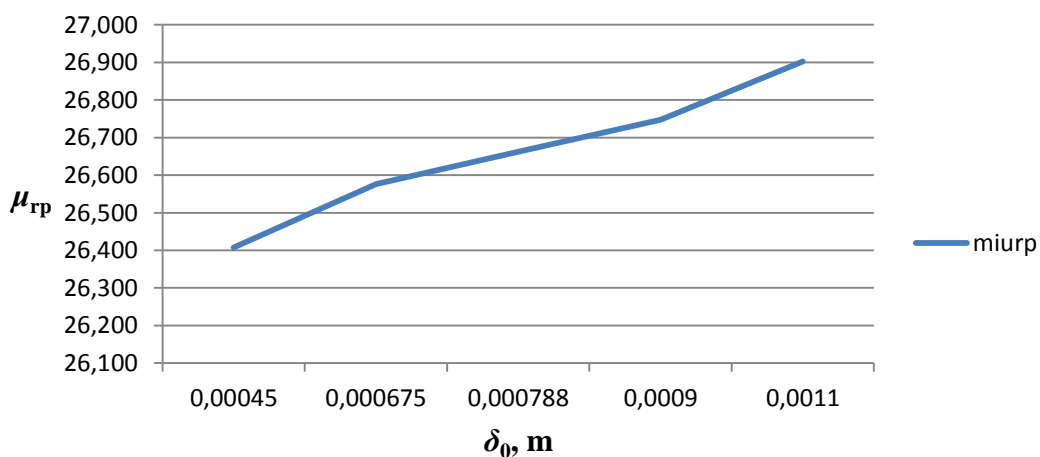
Variklio parametru pokyčio palyginimui procentais, kaip racionaliausia vertė buvo priimta prieš tai skaičiavimuose buvusi rotoriaus išorinio cilindro vertė - 0,021 m, oro tarpas – 0,000675 m.



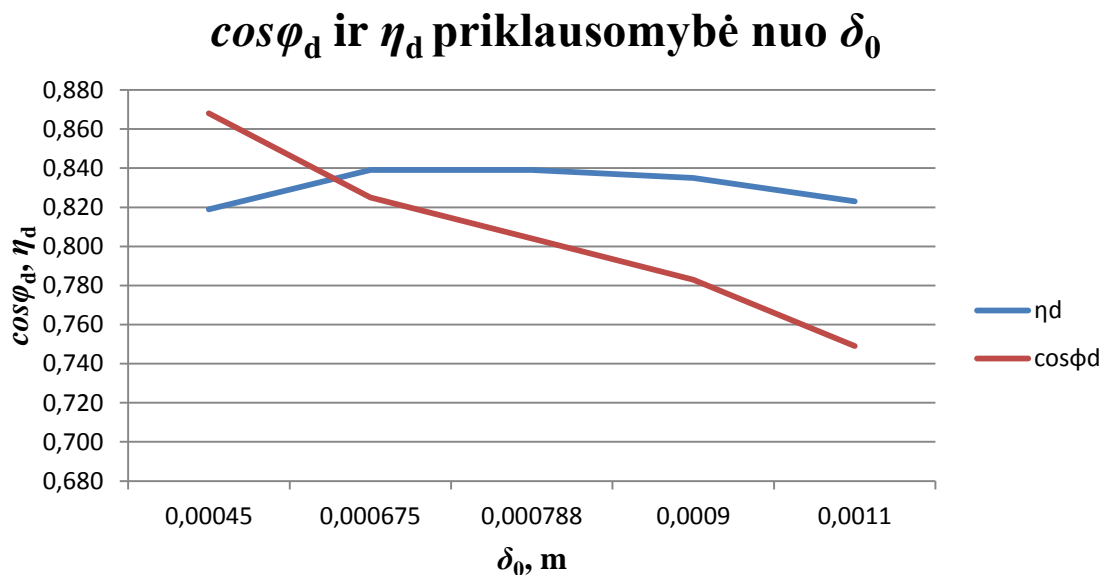
**12 lentelė.** 7,5kW, 2p=4 AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi svarbiausių parametru palyginimas keičiant oro tarpą

Parametras	$\delta_0=0,00045\text{m}$		$\delta_0=0,000675\text{m}$		$\delta_0=0,000788\text{m}$		$\delta_0=0,0009\text{m}$		$\delta_0=0,00011\text{m}$	
	vertė	pokytis %	vertė	pokytis %	vertė	pokytis %	vertė	pokytis %	vertė	pokytis %
$P_{1d}, \text{W}$	8,995	2,13	8,807		8,79	-0,19	8,781	-0,30	8,91	1,17
$P_{2d}, \text{W}$	7,371	-0,27	7,391		7,374	-0,23	7,337	-0,73	7,334	-0,77
$\eta_d$	0,819	-2,38	0,839		0,839	0,00	0,835	-0,48	0,823	-1,91
$\cos\varphi_d$	0,868	5,21	0,825		0,804	-2,55	0,783	-5,09	0,749	-9,21
$M_{emd}, \text{Nm}$	49,292	-0,17	49,378		49,263	-0,23	49,012	-0,74	49,049	-0,67
$I_1, \text{A}$	15,02	-2,72	15,44		15,85	2,66	16,255	5,28	17,244	11,68
$I_2, \text{A}$	13,859	2,70	13,495		13,423	-0,53	13,352	-1,06	13,44	-0,41
$i_{pd}$	1,636	4,01	1,573		1,541	-2,03	1,511	-3,94	1,441	-8,39
$m_{pd}$	1,94	0,26	1,935		1,959	1,24	1,993	3,00	2,045	5,68
$Q_{pd}$	1,186	-3,58	1,23		1,271	3,33	1,319	7,24	1,419	15,37
$k_p$	0,983	-0,30	0,986		0,983	-0,30	0,978	-0,81	0,978	-0,81
$X_{md}$	66,137	50,00	44,091		37,768	-14,34	33,068	-25,00	27,056	-38,64
$P_{d0}, \text{W}$	226,106	104,64	110,492		73,737	-33,26	56,526	-48,84	37,84	-65,75
$P_{papa}, \text{W}$	310,07	90,06	163,144		115,04	-29,49	89,293	-45,27	60,012	-63,22
$I_{0\mu c}, \text{A}$	11,29	36,72	8,258		7,388	-10,54	6,741	-18,37	5,914	-28,38
$\mu_{rp}$	26,408	-0,63	26,576		26,662	0,32	26,747	0,64	26,902	1,23

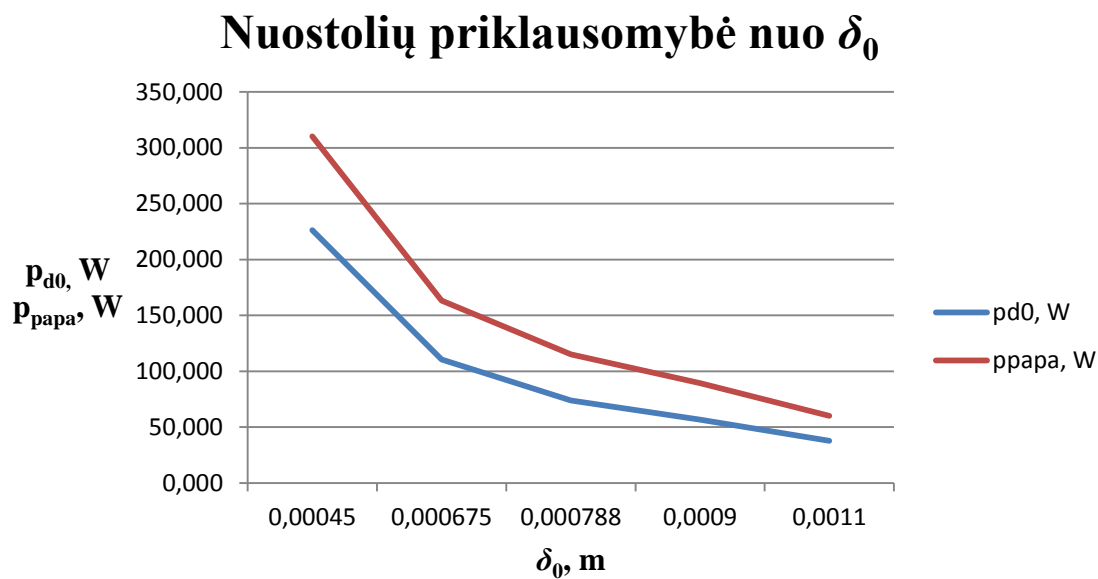
**$\mu_{rp}$  priklausomybė nuo  $\delta_0$**



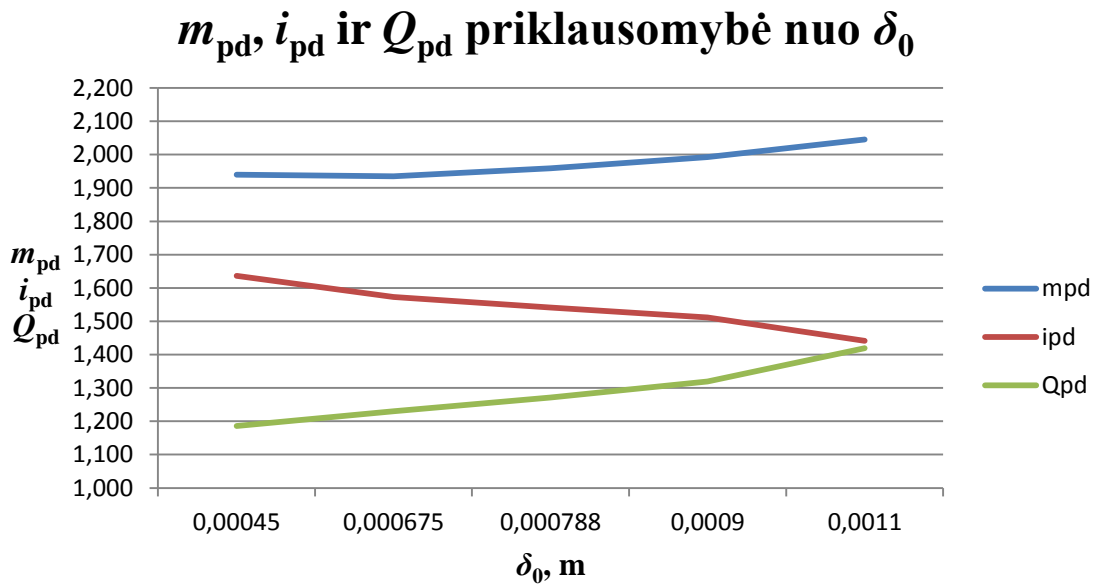
**22 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi santykinės magnetinės skvarbos priklausomybė nuo variklio oro tarpo



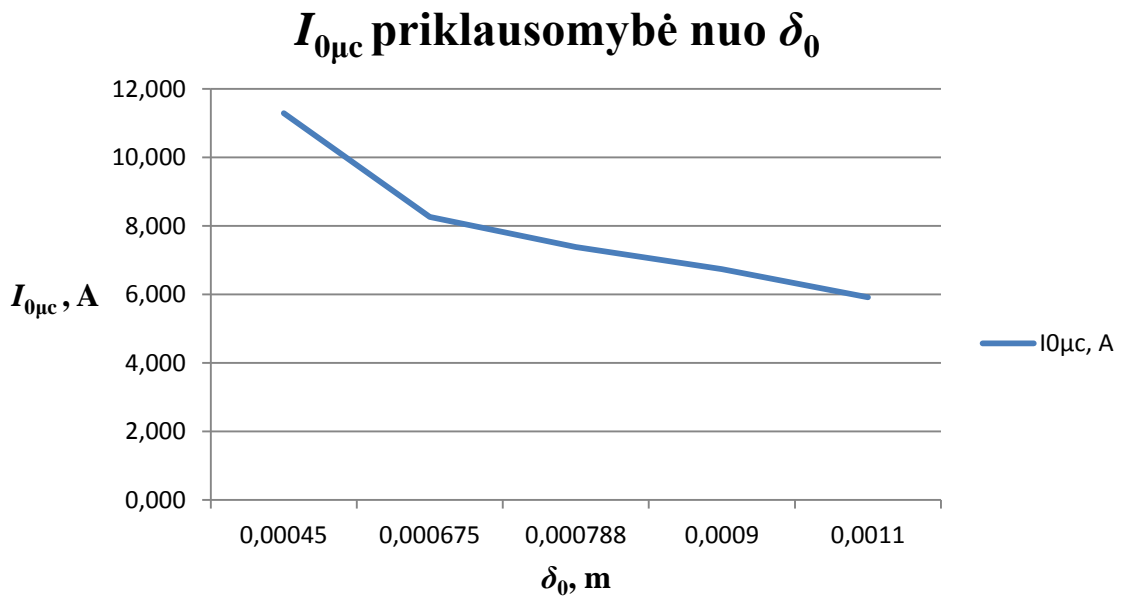
**23 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi naudingumo ir galios faktorių priklausomybė nuo variklio oro tarpo



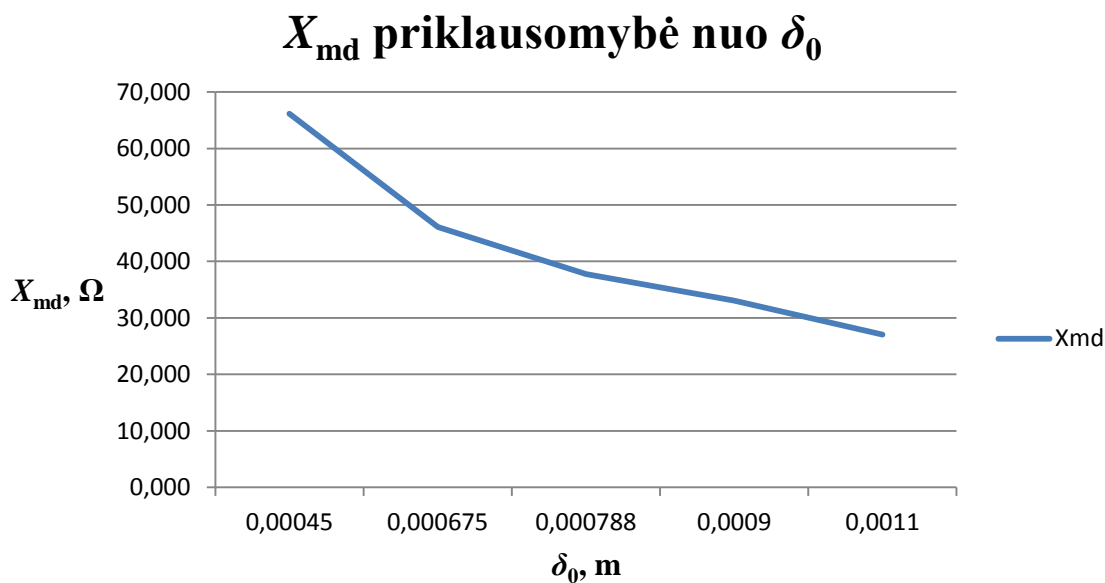
**24 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi nuostolių priklausomybė nuo variklio oro tarpo



**25 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi santykinio paleidimo momento, santykinės paleidimo srovės ir paleidimo kokybę apibūdinančio dydžio priklausomybė nuo variklio oro tarpo



**26 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi įmagnetinimo srovės priklausomybė nuo variklio oro tarpo



**27 pav.** AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi induktyviosios srovės priklausomybė nuo variklio oro tarpo

Iš 12 lentelės duomenų ir 22 – 27 paveikslų matome, kad didinant oro tarpą mažėja rotoriaus induktyvioji varža. Dėl jos sumažėjimo pagerėja variklio santykinis paleidimo momentas ir pagerėja variklio paleidimo kokybę įvertinantis faktorius.

Taip pat buvo atliktas 7,5kW asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi elektromagnetinis parametų perskaičiavimas, kai rotoriaus cilindras turi skersinius griovelius (paviršiaus varžos padidėjimo faktorius lygus 2) ir kai neturi skersinių griovelių (paviršiaus varžos padidėjimo faktorius lygus 1). Žemiau pateikiamas palyginimas (**13 lent.**).

**13 lentelė.** 7,5kW, 2p=4 AV su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi svarbiausių parametų palyginimas keičiant paviršiaus varžos padidėjimo faktorių

	$P_{1d}, W$	$P_{2d}, W$	$\eta_d$	$\cos\varphi_d$	$M_{emd}, Nm$	$I_{1d}, A$	$I_{2d}, A$	$i_{pd}$	$m_{pd}$	$Q_{pd}$	$k_p$	$p_{d0}, W$
$k_p=1$	8,81	7,39	0,839	0,825	49,38	15,44	13,50	1,57	1,94	1,23	0,99	110,49
$k_p=2$	8,68	7,36	0,848	0,825	49,11	15,24	13,28	1,60	1,95	1,22	0,98	71,06

Iš 13 lentelės duomenų matome, kad naudojant rotoriaus skersinius griovelius gaunami mažesni papildomieji nuostoliai ir geresnis variklio naudingumo faktorius, tačiau sumažėja santykinis paleidimo momentas ir paleidimo kokybę įvertinantis faktorius.

## 5. Asinchroninių narvelinių variklių paleidimo problemos

Asinchroninių variklių paleidimo savybės charakterizuojamos priklausomybėmis  $M_{em} = f(s)$  ir  $I_1 = f(s)$  šiais rodikliais: paleidimo trukme, energijos nuostoliais apvijoje ir išilimu.

Paleidimo trukmę ir apvijų išilimą galima pasiekti didinant  $M_p$  ir mažinant  $I_{1p}$ . Asinchroniniai narveliniai varikliai pasižymi didele paleidimo srove  $I_{1p} \sim (5-7)I_{1N}$ , o tai neigiamai atsiliepia paleidimo vyksmui, kitų vartotojų darbo stabilumui (ypač tai gali pasireikšti, kai tinklas nėra galingas).

Didelės paleidimo srovės sukelia dideles elektromagnetines jėgas, veikiančias statoriaus apvijų galūnes ir narvelinės apvijų strypus. Dėl to trumpėja eksploatacijos trukmė, galimi gedimai ypač rotorius apvijoje: perkaista trumpai jungti žiedai, galimas kontakto praradimas (tarp strypo ir trumpai jungtų žiedo), o tada dar išsilydęs aliuminis (apvija) užtrumpins magnetolaidžio lakštus, dėl to padidės plieno nuostoliai. Tai žinoma aktualu, kai variklis eksploatuojamas trumpalaikiame darbo režime, ar kai gamybiniam įrengimams reikia dažnų paleidimų (liftai, gervės, špiliai, kranai, ekskavatoriai, įvairūs laivų įrengimai ir pan.).

Pagerintų paleidimo charakteristikų asinchroniniai narveliniai varikliai (su giliais grioveliais, su dvigubu narveliu ar su padidinta rotorius varža) yra išnagrinėti elektros mašinų vadovėliuose, bet jų (variklių) problemos yra tokios pačios kaip ir standartinių asinchroninių narvelinių variklių. [4][10]

### 5.1. Asinchroninio variklio charakteristikos pavarose su vienetiniu, bet sunkiu paleidimu

Kaip pavyzdys gali būti elektros energetikos sistema, kurios galia nėra pakankamai galinga, palyginti su asinchroninio variklio galia.

$$m = f(k);$$

$$k_1 = \frac{M_{p1}}{M_p}; \quad k_2 = \frac{I_{1p}}{I_p};$$

čia  $k$  – parodo kiek kartų didesnės nominaliosios galios variklio paleidimo momentas ir atitinkama paleidimo srovė didesnė už lyginamojo variklio.

$m$  – charakterizuoja elektros pavaros paleidimo galimybę esant užduotoms sąlygoms, kai panaudojamas galingesnis asinchroninis variklis.

Paleidimas galimas, kai  $m > 1$ .

Paleidimo kokybės rodiklis  $Q_p = \frac{m_p}{i_p}$ , kur  $m_p = \frac{M_p}{M_N}$ ,  $i_p = \frac{I_{1p}}{I_{1N}}$ .

Paprastai  $Q_p \approx 1,5$  karto didesnė nei standartinio asinchroninio narvelinio variklio. Standartinis asinchroninis variklis – tai variklis, kurio rotoriuje nepasireiškia paviršiaus reiškiny, arba jis pasireiškia labai silpnai.

**5.1.1. Asinchroninio variklio su dvisluoksniu rotoriumi paleidimas, kai tinklas nėra pakankamai galingas, yra ribotos galios, arba kai naudojamas didesnės nominaliosios galios variklis**

Santykinis paleidimo momentas:

$$m_{pa} = \frac{M_p}{M_a}$$

čia  $M_p$  – paleidimo momentas;

$M_a$  – apkrovos momentas.

Imami narvelinio variklio ir variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriais parametrai ir vienoje koordinačių sistemoje palyginami. Gaunami skirtingi parametrai, kurie gali būti artimi realiams.

Kai

$$m_{pa} = 1,5:$$

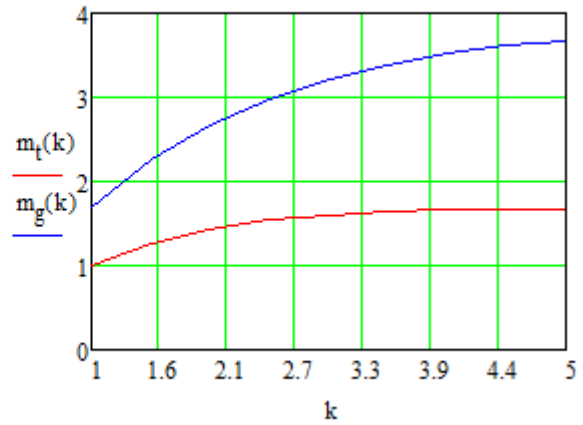
Kai tinklas ribotos galios [4]:

$$m_t(k) = \frac{k \cdot m_{pa}}{\left[1 + k \cdot (\sqrt{m_{pa}} - 1)\right]^2}$$

Kai naudojamos padidintos nominaliosios galios variklis [4]:

$$m_g(k) = \frac{1,5 \cdot k \cdot m_{pa}}{\left[1 + \frac{k}{1,5} \cdot (\sqrt{m_{pa}} - 1)\right]^2}$$

k =	$m_t(k) =$	$m_g(k) =$
1	1	1.702
1.5	1.258	2.25
2	1.428	2.664
2.5	1.537	2.977
3	1.605	3.213
3.5	1.645	3.389
4	1.664	3.519
4.5	1.669	3.612
5	1.663	3.677



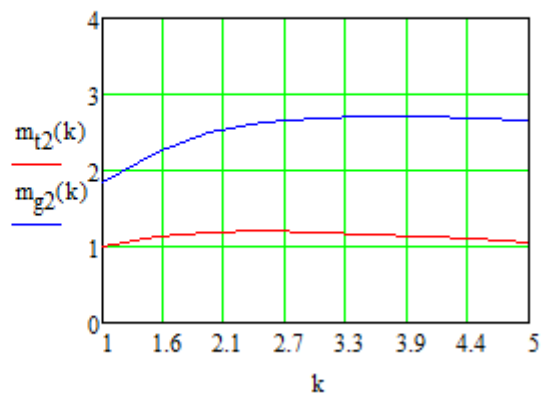
kai

$$m_{pa} = 2$$

$$m_{t_2}(k) = \frac{k \cdot m_{pa}}{\left[1 + k \cdot (\sqrt{m_{pa}} - 1)\right]^2}$$

$$m_{g_2}(k) = \frac{1,5 \cdot k \cdot m_{pa}}{\left[1 + \frac{k}{1,5} \cdot (\sqrt{m_{pa}} - 1)\right]^2}$$

k =	$m_{t_2}(k) =$	$m_{g_2}(k) =$
1	1	1.842
1.5	1.141	2.25
2	1.196	2.49
2.5	1.207	2.625
3	1.193	2.692
3.5	1.166	2.715
4	1.133	2.709
4.5	1.097	2.684
5	1.06	2.647



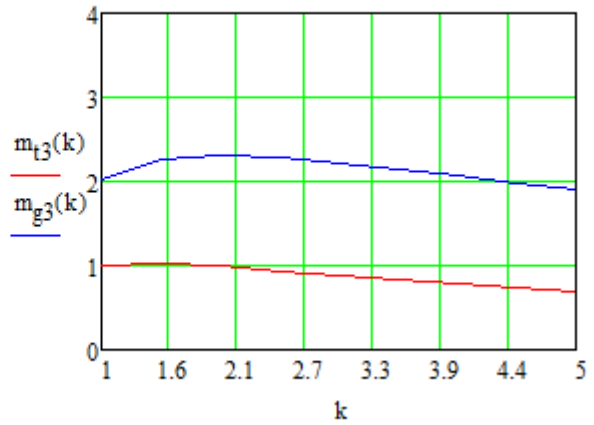
kai

$$m_{pa} = 3$$

$$m_{t_3}(k) = \frac{k \cdot m_{pa}}{\left[1 + k \cdot (\sqrt{m_{pa}} - 1)\right]^2}$$

$$m_{g3}(k) = \frac{1,5 \cdot k \cdot m_{pa}}{\left[1 + \frac{k}{1,5} \cdot (\sqrt{m_{pa}} - 1)\right]^2}$$

k =	$m_{t2}(k) =$	$m_{g2}(k) =$
1	1	1.842
1.5	1.141	2.25
2	1.196	2.49
2.5	1.207	2.625
3	1.193	2.692
3.5	1.166	2.715
4	1.133	2.709
4.5	1.097	2.684
5	1.06	2.647



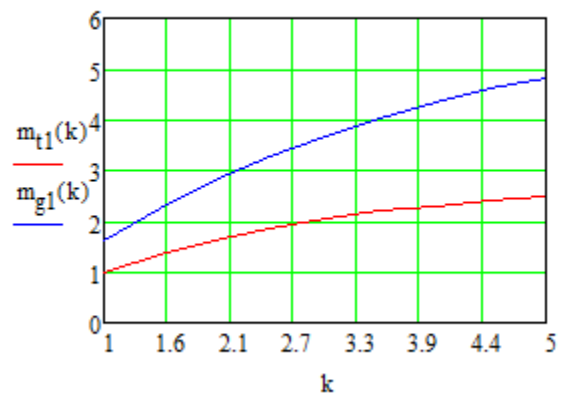
kai  $k = 1, 1,5, \dots, 7$

$$m_{pa} = 1,25$$

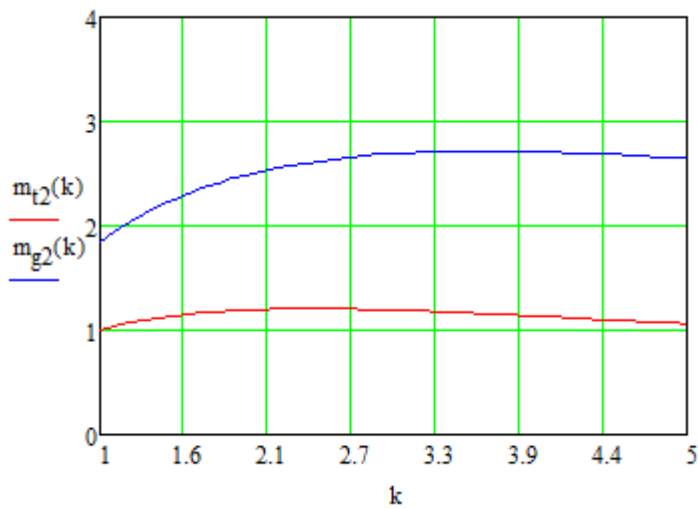
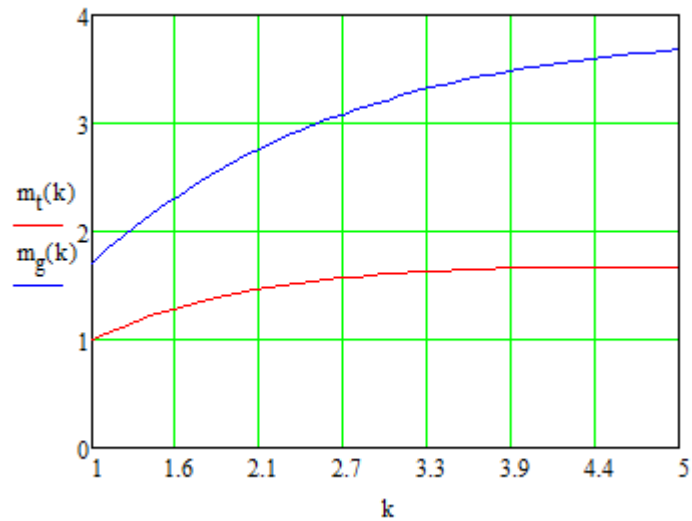
$$m_{t1}(k) = \frac{k \cdot m_{pa}}{\left[1 + k \cdot (\sqrt{m_{pa}} - 1)\right]^2}$$

$$m_{g1}(k) = \frac{1,5 \cdot k \cdot m_{pa}}{\left[1 + \frac{k}{1,5} \cdot (\sqrt{m_{pa}} - 1)\right]^2}$$

k =	$m_{t1}(k) =$	$m_{g1}(k) =$
1	1	1.611
1.5	1.353	2.25
2	1.636	2.799
2.5	1.863	3.273
3	2.045	3.682
3.5	2.191	4.034
4	2.307	4.339
4.5	2.399	4.602
5	2.472	4.828







Asinchroninio variklio su dvisluoksniu rotoriumi panaudojimo, kai tinklas nėra pakankamai galingas, privalumas yra tas, kad gerokai sumažėja nuostoliai paleidžiant variklį (nes  $I_p$  bus mažesnė ir mažiau kris įtampa paleidimo metu).

Be sumažėjusios įtampos sumažėja rotoriaus medžiagos išotinimas, nes rotoriaus medžiagos santykinė magnetinė skvarba  $\mu$  padidėja, o  $R_2'$  sumažėja. Kai dvisluoksniu rotoriaus lydinio su artimai optimaliomis savybėmis ( $\mu_2, \rho_2$ ),  $R_2'$  kitimas yra proporcingas įtampos kitimui. Todėl paleidimo metu asinchroninio variklio su dvisluoksniu rotoriumi nuostoliai dar papildomai sumažės lyginant su asinchroniniu narveliniu varikliu. [4][10]

### 5.1.2. Asinchroninio variklio su dvisluoksniu rotoriumi panaudojimas pavarose su greičio reguliavimu

Pastaruoju metu gerokai padidėjo susidomėjimas galimybe panaudoti asinchroninius variklius su vientisuoju rotoriumi ar variklius su dvisluoksniu rotoriumi greičio reguliavimo pavarose. Šių variklių privalumas tas, kad mechaninė charakteristika yra didesnio nuolydžio, o tai leidžia panaudoti įtampos reguliavimo būdą. Šis būdas nėra sudėtingas.

Pagrindinių asinchroninio variklio rotoriaus nuostolių kitimas [4]:

asinchroninio variklio su dvisluoksniu rotoriumi

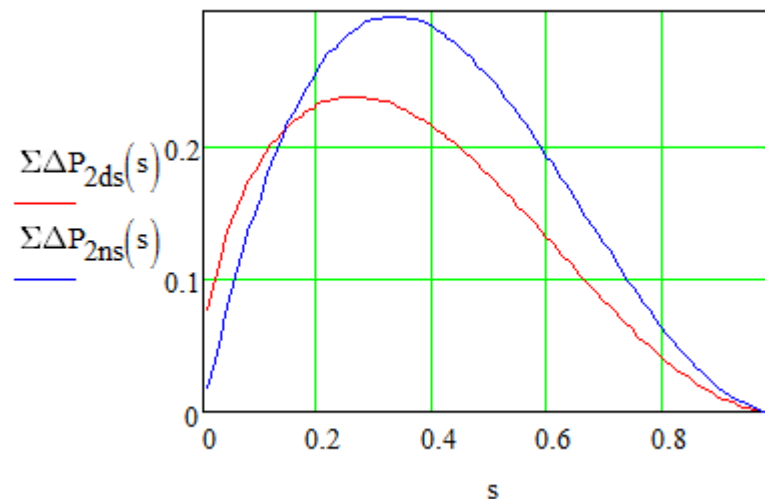
$$\sum \Delta P_{2ds}(s) = \left(1 + \frac{1}{4 \cdot s^{0,72}}\right) \cdot (1-s)^2 \cdot s;$$

asinchroninio variklio su narveliniu rotoriumi

$$\sum \Delta P_{2ns}(s) = (1-s)^2 \cdot s;$$

čia  $\Sigma \Delta P$  – suminiai statoriaus apvijos ir pagrindiniai rotoriaus nuostoliai, kai naudojamas įtampos reguliavimo būdas sukimosi greičiui keisti.

Šios pateiktos formulės [4] yra apytikrės, bet aiškiai parodo nuostolių kitimo tendenciją. Čia yra paneigti mechaniniai ir papildomieji nuostoliai ir priimant kad statoriaus ir rotoriaus nuostoliai yra



28 pav. AV su dvisluoksniu ir narveliniu rotoriais suminių nuostolių priklausomybė nuo slydimo

## Išvados

1. Elektros pavarose, kai yra sunkios paleidimo sąlygos, reikalingas didelis paleidimo momentas  $M_p$  ir maža paleidimo srovė  $I_p$ , o darbas trumpalaikiame (S2) ir kartotiniame periodiniame (S3) režimuose, geriau tiktų trifaziai asinchroniniai varikliai su dvisluoksniu arba su vientisuoju rotoriumi.
2. Projekte patikslintas asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi parametru ir charakteristikų perskaičiavimo iš variklio su narveliniu rotoriumi į dvisluoksnį anizotropinį algoritmas, įvertinant, kad esamas parametru skaičiavimas pagal  $\Gamma$  (arba L) schemą netinkamas naudoti su kompleksiniais dydžiais, todėl buvo pritaikytas skaičiavimas pagal T schemą. Ji tinkama variacijoms su kompleksiniais parametrais priklausančiais nuo slydimo. Dėl šios priežasties gerokai pagreitėja variklio charakteristikų skaičiavimai, vertinimas anizotropinės medžiagos savybių ( $\mu_2$  ir  $\rho_2$ ),  $\mu_2$  kitimas,  $h_c$  parinkimas pagal magnetinio srauto skvarbos gylį, oro tarpo dydžio ir nominaliojo slydimo parinkimas.
3. Dėl išaugusios statoriaus srovės ir didesnių variklio nuostolių asinchroninio variklio su dvisluoksniu ir vientisuoju rotoriais naudingumo ir galios faktoriai yra mažesni (iki 35 %) nei narvelinį rotorių turinčio asinchroninio variklio. Tačiau, lyginant šiuos variklius pastebima, jog variklio su dvisluoksniu izotropiniu ar dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi santykinis paleidimo momentas yra didesnis (iki 167 %) nei vientisąjį ar narvelinį rotorių turinčio asinchroninio variklio, o santykinė paleidimo srovė mažiausia variklyje su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi (iki 79 %), čia taip pat didžiausias paleidimo kokybę apibūdinantis faktorius (iki 496 %).
4. Iš asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi charakteristikų nustatyta, kad mažėjant rotoriaus cilindro storiui didėja naudingumo ir galios faktoriai (iki 20 %), tačiau sumažėja paleidimo kokybė (iki 54 %). Variklio naudingumo faktorius didėja ir kai didinamas oro tarpas, bet tada mažėja variklio paleidimo kokybė. Racionaliausias, pagal paleidimo kokybę, 7,5 kW asinchroninio variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi rotoriaus cilindro storis  $h_c=0,02$  m, kai panaudotas lydinys CM–19, ir oro tarpo dydis  $0,675 \cdot 10^{-3}$  m. Atitinkamai 22 kW variklio – rotoriaus cilindro storis  $h_c=0,026$  m, kai panaudotas lydinys CM–19, ir oro tarpo dydis  $1,2 \cdot 10^{-3}$  m.
5. Geriausią paleidimo kokybę, lyginant juos su narveliniais, turi asinchroninis variklis su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi (7,5 kW, iki 496 %), (22 kW, iki 415 %), šiek tiek prastesnę asinchroninis variklis su dvisluoksniu izotropiniu (7,5 kW, iki 397 %), (22 kW, iki 303 %) ir vientisuoju (7,5 kW, iki 302 %), (22 kW, iki 336 %) rotoriumi.

## Literatūra

1. Gečys S., Mukulys R. Asinchroninių narvelinių variklių ekvivalentinės schemos parametrų ir charakteristikų skaičiavimas. Mokomoji knyga. Kaunas: Technologija, 2011. – 114 p.
2. Yuan Hong, Zhang Bingyi, Wan Li, Lu Zhongshu. Performance calculation of the induction motor with a double-layer rotor // Proceedings of International Conference on Electrical Machines. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2000. pp. 1335-1337.
3. Aho T., Sihvo V, Nerg J., Pyrhonen J. Rotor Materials for Medium-Speed Solid-Rotor Induction Motors // IEEE International Conference on Electric Machines & Drives, (IEMDC '07), 2007, vol. 1, pp. 525-530.
4. Могильников В. С., Олейников А. М. Теория, технология и режимы работы асинхронных двигателей с двухслойным ротором: монография. // Севастоп. нац. техн. ун-т. – Севастополь : Изд-во Севастоп. нац. техн. ун-та, 2008. – 352 с.
5. Лопухина Е.М., Захаренко А.Б. Оптимизация проектирования асинхронных двигателей с массивными ферромагнитными роторами // Электричество.–1999.– № 3. – С. 37-42.
6. Вербовой А., Вербовой П., Съянов А. Динамические характеристики асинхронного двигателя с массивным ферромагнитным ротором и коротко замкнутой обмоткой // Unconventional electromechanical and electrotechnical systems. Szczecin and Miedzyzdroje, UEES 1996. p. 397-400.
7. Changhong Liu, Ruoping Yao. A New Approach to Calculate Equivalent Circuit Parameters of the Induction Motor with Solid Rotor // IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, Piscataway, NJ, USA:, 2003. p. 1612-1615.
8. Лопухина Е.М., Захаренко А.Б. Улучшение показателей асинхронных двигателей с массивными ферромагнитными роторами. // Электричество.–1999.–№ 12. – С. 42 – 45.
9. Cao Junci, Li Weili, Qi Ge, Luo Yingli. The Influence off Different Material Characteristic in Compound Cage Rotor of Induction Motor on Staring // Proceedings of the CSEE, 2005, vol.25, №14, pp.103-108.
10. Олейников А. М., Агафонов В. В, Попов С. В. К определению оптимальной толщины работающего цилиндра двухслойного ротора асинхронного двигателя. // Вестник СевГТУ. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. - Вып. 80: Механика, энергетика, экология. - С. 85-93.
11. Žebrauskas S., Januševičius V., Klimavičius J., Marcinkevičius S., Mukulys R. J., Navickas A., Smilgevičius A., Stonys J. J., Virbalis J. A. Aiškinamasis elektrotechnikos terminų žodynas. Kaunas, KTU, 2010. – 1080 p.
12. Bukšnaitis J. Kintamosios srovės trifazių elektros mašinų apvijų elektromagnetinis efektyvumas. Kaunas: Technologija, 2007. – 198 p.

13. Žilinskas P.J. Patarimai rengiantiems rašto darbus. – Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2003. – 172p.
14. Способ ремонта и модернизации роторов электрических машин переменного тока. Патент Российской Федерации, H02K15/00 No 2089989. Дата публикации, 10.09.1997.
15. Мартынов В. Н. Олейников А. М. Сравнительная оценка переходных процессов асинхронных электродвигателей с различными роторами: сборник научных трудов // Вестник СевГТУ. - Севастополь : Изд-во СевГТУ, 2002. - Вып. 39: Механика, энергетика, экология : Экология. - С. 144-148.
16. Куцевалов В.М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. Москва, 1966.-304 с.
17. Gečys S., Smolskas P. Copper-squirrel-cage Solid Rotor Teeth Zone Parameter Rational Choice for Induction Motor Operating under Geophysical Conditions // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2009. No. 1 (89). P. 91– 94.
18. Gečys S., Smolskas P. Parametrical Optimization of Equivalent Circuit Parameters of Copper-squirrel-cage Solid Rotor Induction Motor Supplied through Long Geophysical Cable // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2009. No. 2 (90). P.73 –.76.
19. ДВУХСЛОЙНЫЙ РОТОР. Prieiga per internetą: <http://www.ngpedia.ru/id405123p2.html> (žiūrėta 2015-01-12).

## Priedai

### Asinchroninio variklio su dvisluksniu anizotropiniu rotoriumi parametru skaičiavimo algoritmas

Ivesties duomenys:

$$P_{2N} := 7500\text{W} \quad p := 2 \quad U_{1N} := 230\text{V} \quad I_{1N} := 14.279\text{A} \quad \eta := 0.87 \quad \cos\phi := 0.875 \quad s_N := 0.0267$$

$$n_1 := 1500 \frac{1}{\text{min}} \quad Z_s := 36 \quad w_1 := 144 \quad k_{w1} := 0.96 \quad R_1 := 0.841\Omega \quad X_1 := 1.559\Omega \quad m_1 := 3$$

$$A_1 := 26000 \text{A}\cdot\text{m}^{-1} \quad B_\delta := 0.757\text{T} \quad \delta_t := 0.45 \cdot 10^{-3} \text{m} \quad k_{\delta 1} := 1.19 \quad k_{\mu} := 1.61 \quad D_1 := 0.153\text{m}$$

$$L_2 := 0.108\text{m} \quad t_1 := 0.013352\text{m} \quad b_{s1} := 0.0035\text{m} \quad h_z := 0.035\text{m} \quad m_p := 1.65 \quad i_p := 6.34$$

$$I_0 := 5.787\text{A} \quad X_m := 38.188\Omega \quad P_{\text{mech}} := 66.314\text{W} \quad f_1 := 50\text{-Hz} \quad \omega_1 := 2 \cdot \pi \cdot f_1 = 314.159 \frac{1}{\text{s}} \quad h_c := 21 \cdot 10^{-3} \text{m}$$

$$R_m := 1.706 \cdot \Omega$$

Dvisluksnio rotoriaus preliminarūs parametrai: magnetinę skvarbą randame iš lydinio įmagnetinimo kreivės

Lydinys CM

$$\Theta := 115 \quad \text{CM} - 19 \quad \alpha_{\text{CM}} := 0.00245$$

$$\rho_{\text{CM}19} := 1.6 \cdot 10^{-7} \quad \Theta_0 := 20 \quad \alpha_{\text{Cu}} := 0.0041 \quad \alpha_{\text{Fe}} := 0.006$$

$$\rho_{\text{CM}20} := 1.29 \cdot 10^{-7} \quad \rho_{\text{Cu}20} := 0.175 \cdot 10^{-7} \quad \rho_{\text{Fe}20} := 2 \cdot 10^{-7}$$

$$\rho_{\text{Cu}} := \rho_{\text{Cu}20} \cdot [1 + \alpha_{\text{Cu}} \cdot (\Theta - \Theta_0)] = 2.43162 \times 10^{-8}$$

$$\rho_{\text{Fe}} := \rho_{\text{Fe}20} \cdot [1 + \alpha_{\text{Fe}} \cdot (\Theta - \Theta_0)] = 3.14 \times 10^{-7}$$

$$\Theta_{\text{perk}} := 75$$

Vientasis cilindras gali turėti didesnę perkaitimo temperatūrą nei statoriaus apvija

$$\rho_{\text{CM}} := \rho_{\text{CM}19} \cdot [1 + \alpha_{\text{CM}} \cdot (\Theta_{\text{perk}} + \Theta_0)] = 1.9724 \times 10^{-7}$$

$$\tau_1 := \frac{\pi \cdot D_1}{2 \cdot p} = 0.12\text{m}$$

Patikslinimui dėl temperatūros

$$\rho_c := \rho_{\text{CM}} = 1.9724 \times 10^{-7} \quad 1 + \alpha_{\text{Cu}} \cdot (\Theta - \Theta_0) = 1.389$$

$$k_1 := 1.5$$

Duota

Lydinys CM-19

$$\rho_c := 1.97 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$$

$$h_c := 0.8 \cdot h_c = 0.017\text{m}$$

$$\delta_d := k_1 \cdot \delta_t = 0.000675\text{m}$$

$$h_{\text{or}} := 0.021\text{-m}$$

$$B_\delta = 0.757\text{T}$$

Vientisojo cilindro magnetinės skvarbos suradimas

$$I_2 := I_{1N} \cdot \cos\phi = 12.494\text{A}$$

$$H_2 := 0.5 \cdot \frac{A_1 \cdot I_2}{I_{1N}} = 11375 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$D_{2d} := D_1 - 2 \cdot k_1 \cdot \delta_t = 0.152\text{m}$$

Surandame magnetinio lauko stiprį  $H_0$

atitinkantį oro tarpo magnetinio srauto tankį  $B_\delta$

iš lydinio įmagnetinimo kreivės

$$H_0 := 1.1 \cdot 10^4 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

$$H_c := \sqrt{H_2^2 + H_0^2} = 15823.736 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

magnetinio srauto tankį  $B_c$  atitinkantį  $H_c$  surandame iš lydinio įmagnetinimo kreivės

$$B_c := 0.9\text{T}$$

$$\mu_r := \frac{B_c}{\mu_0 \cdot H_c} = 45.261$$

Rotoriaus cilindro magnetinio srauto tankio aproksimacija pagal atitinkamą H vertę

CM - 25     $a_1 := 0.684$      $a_2 := 0.149$      $a_3 := 0.717$      $a_4 := 1.928$      $a_5 := 2.156$      $H_{25} := 18632.289 \cdot 10^{-4}$

$B_{25} := a_1 + a_2 \cdot H_{25} - a_3 \cdot e^{-a_4 H_{25}} - (a_1 - a_2) \cdot e^{-a_5 H_{25}} = 0.932$      $H_{c25} := H_c$      $\mu_{r25} := \frac{B_{25} \cdot T}{\mu_0 \cdot H_{c25}} = 46.883$

CM - 19     $b_1 := 1.112$      $b_2 := 0.0007$      $b_3 := 9.788$      $b_4 := 0.866$      $b_5 := 18$      $b_6 := 0.9$      $H_{19} := 15600 \cdot 10^{-4}$

$B_{19} := b_1 + b_2 \cdot H_{19} - b_3 \cdot e^{-b_5 H_{19}} - b_4 \cdot e^{-b_6 H_{19}} = 0.9$      $\mu_{r19} := \frac{B_{19} \cdot T}{\mu_0 \cdot H_c} = 45.281$

Dvisluoksnio anizotropinio rotoriaus parametrai

$s := 0.1, 0.2 \dots 1$

$s := 0.1, 0.2 \dots 1$

$h_e := 2 \cdot 10^{-3} \cdot m$      $\Theta_{per} := 80$      $h_{\text{wv}} := \frac{2}{3} \cdot h_c = 0.014 \cdot m$      $h_j := \frac{1}{3} \cdot h_c = 0.007 \cdot m$      $b_g := 1 \cdot 10^{-3} \cdot m$      $\mu_e := 40$

$\rho_c = 1.97 \times 10^{-7} \cdot \Omega \cdot m$      $\rho_z = 1.3 \cdot 0.175 \cdot 10^{-7} \cdot \Omega \cdot m$      $\rho_e = 1.8 \cdot 10^{-7} \cdot \Omega \cdot m$      $Z_s = 36$     **Primu**     $Z_r := 26$   
26; 44; 46

$\rho_{et} := \rho_e \cdot (1 + 0.004 \Theta_{per}) = 2.376 \times 10^{-7} \cdot \Omega \cdot m$      $D_z := D_{2d} - 2h_e - h_z = 0.134 \cdot m$

$D_{jvid} := D_{2d} - 2(h_e + h_z) - h_j = 0.113 \cdot m$

$t_2 := \frac{\pi \cdot (D_{2d} - 2h_e)}{Z_r} = 0.018 \cdot m$

$b_z := t_2 - b_g = 0.017 \cdot m$

$S_e := \pi \cdot D_{2d} \cdot h_e = 9.528 \times 10^{-4} \cdot m^2$

$S_z := h_z \cdot b_z = 2.358 \times 10^{-4} \cdot m^2$

$S_j := \pi \cdot D_{jvid} \cdot h_j = 0.002 \cdot m^2$

$R_e := \rho_{et} \cdot \frac{L_2}{S_e} = 2.693 \times 10^{-5} \cdot \Omega$      $R_z := \rho_c \cdot \frac{L_2}{S_z \cdot Z_r} = 3.471 \times 10^{-6} \cdot \Omega$      $R_j := \rho_c \cdot \frac{L_2}{S_j} = 8.588 \times 10^{-6} \cdot \Omega$

Perskaičiuotieji rotoriaus parametrai :

$\mu_r = 45.261$

$\mu_{r19} = 45.281$

$R_{2a} := \frac{R_e \cdot R_z \cdot R_j}{R_e \cdot R_z + R_e \cdot R_j + R_z \cdot R_j} = 2.264 \times 10^{-6} \cdot \Omega$      $k_L := 1$

$\tau_2 := \frac{\pi \cdot D_{2d}}{2 \cdot p} = 0.119 \cdot m$

$L_z := 0.1 L_2 = 0.011 \cdot m$

Apvaliname  $L_{\text{wv}} := 0.012 \cdot m$

$\Delta(s) := \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_c}{\omega_1 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot s}}$

$R_k := 1.1 \cdot \rho_z \cdot \frac{2 \cdot (\tau_2)^2}{\pi^3 \cdot D_{2d} \cdot h_c \cdot L_z} = 5.992 \times 10^{-7} \cdot \Omega$

$\zeta(s) := \frac{h_c}{\Delta(s)}$

$k_p := 4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2 = 229323.571$

$k_x(s) := \frac{3 \cdot (\sinh(2 \cdot \zeta(s)) - \sin(2 \cdot \zeta(s)))}{2 \cdot \zeta(s) \cdot (\cosh(2 \cdot \zeta(s)) - \cos(2 \cdot \zeta(s)))}$

$k_r(s) := \frac{\zeta(s) \cdot (\sinh(2 \cdot \zeta(s)) + \sin(2 \cdot \zeta(s)))}{(\cosh(2 \cdot \zeta(s)) - \cos(2 \cdot \zeta(s)))}$

$$R_c := 4.4 \cdot m_1 \cdot \rho_c \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2 \cdot \frac{L_2}{\pi \cdot D_{2d} \cdot h_c} = 0.536 \Omega$$

$$k_L = 1$$

$$k_{Lx}(s) := 1 + \frac{R_k}{R_c \cdot k_r(s)}$$

$$R_2(s) := (R_{2a} \cdot k_r(s) + R_k) \cdot k_p \cdot k_L$$

$$t_{2\_} := 0.008$$

$$b_{z\_} := 0.007$$

$$b_{g\_} := 0.001$$

$$\mu_{0\_} := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

$$X_e := \frac{1}{3} \cdot \omega_1 \cdot \mu_e \cdot \mu_0 \cdot \frac{h_e \cdot L_2}{\pi \cdot D_{2d}} = 2.386 \times 10^{-6} \Omega$$

$$X_z := \frac{1}{12} \cdot \omega_1 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{h_z \cdot L_2}{2 \cdot (b_z + h_z) \cdot Z_r} = 1.404 \times 10^{-6} \Omega$$

$$\mu_e = 40 \quad \mu_{re} := \frac{t_{2\_}}{\frac{b_{z\_}}{\mu_r} + \frac{b_{g\_}}{\mu_{0\_}}} = 1.005 \times 10^{-5}$$

$$\mu_r = 45.261$$

$$\mu_{re} = 0.00001005$$

$$X_j := \frac{1}{3} \cdot \omega_1 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \frac{h_j \cdot L_2}{\pi \cdot D_{jvid}} = 1.272 \times 10^{-5} \Omega$$

$$\Sigma X_z := \frac{1}{12} \cdot \omega_1 \cdot \mu_{re} \cdot \mu_0 \cdot \frac{h_z \cdot L_2}{\pi \cdot D_z} = 1.191 \times 10^{-12} \Omega$$

$$X_{2a} := X_e + X_z + \Sigma X_z + X_j = 1.651 \times 10^{-5} \Omega$$

$$X_2(s) := X_{2a} \cdot k_p \cdot k_x(s)$$

$$\text{Kai } s_{\_} := s_N$$

Priimta

$$\delta_d = 0.00068 \text{ m}$$

$$k_\delta = 1.19 \quad \delta_t = 4.5 \times 10^{-4} \text{ m} \quad k_1 = 1.5$$

$$\delta_\mu := \frac{h_c}{\mu_r} = 4.64 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\delta_d := k_\delta \cdot (\delta_t \cdot k_1) + \delta_\mu = 1.267 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$X_{md} := \frac{\mu_0 \cdot m_1 \cdot \omega_1 \cdot (w_1 \cdot k_{w1})^2 \cdot D_1 \cdot L_2}{\pi \cdot p^2 \cdot \delta_d} = 23.485 \Omega$$

$$Z_{1\_} := R_1 + i \cdot X_1 = (0.841 + 1.559i) \Omega$$

$$R_m = 1.706 \Omega$$

$$Z_{md} := R_m + i \cdot X_{md} = (1.706 + 23.485i) \Omega$$

$$X_m = 38.188 \Omega$$

$$Z_m := R_m + i \cdot X_m = (1.706 + 38.188i) \Omega$$

$$s_N = 0.027$$

Preliminariai

$$s_{d\_} := \frac{R_2(s_N)}{\sqrt{\left(\frac{U_{1N}}{I_2}\right)^2 - (X_2(s_N))^2 - R_1}} = 0.039$$

$$\text{Priimu } s_d := 0.05$$

$$h_{c\_} := 0.9 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_c}{\omega_1 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot s_d}} = 0.019 \text{ m}$$

Priimta

$$h_c = 0.021 \text{ m}$$

Priimu

$$h_{c_{\Omega\Omega}} = 0.021 \text{ m}$$

Imagnetinimo sovė

$$\text{Pasirenkame } \delta_{00} := \frac{h_c}{\mu_r} = 4.64 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\delta_1 := k_1 \cdot \delta_t + \delta_{00} = 1.139 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\delta_{d\_} := k_1 \cdot \delta_t = 6.75 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$I_{0\mu c} := I_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{k_\mu} + \frac{1}{k_\mu} \cdot \frac{\delta_1}{\delta_{d\_}}\right) = 8.258 \text{ A}$$

$$k_1 = 1.5$$

$$k_\mu = 1.61$$

$$\frac{\delta_1}{\delta_{d\_}} = 1.687$$



### Nuostoliai

$$I_{1N} = 14.279 \text{ A}$$

#### Narvelinio variklio

$$\Sigma P_{2N} := P_{2N} \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) = 1120.69 \text{ W}$$

$$P_{el1} := m_1 \cdot I_{1N}^2 \cdot R_1 = 514.414 \text{ W}$$

$$P_{el2} := P_{2N} \cdot s_N = 200.25 \text{ W}$$

$$P_{past} := \Sigma P_{2N} - P_{el1} - P_{el2} = 406.026 \text{ W}$$

#### Variklio su dvisluoksniu anizotropiniu rotoriumi nuostoliai

Jei nėra išilginių griovelių (rifliavimo), tai priimamas  $k_p$

$$k_p := 1$$

Rekomenduojami griovelių matmenys, atsižvelgti į rotoriaus skersmenį

$$h_g := (1.5 - 2.0) \cdot 10^{-3} \cdot m$$

$$b_g := (0.8 - 1.0) \cdot 10^{-3} \cdot m$$

$$a_g := (2.5 - 3.0) \cdot 10^{-3} \cdot m$$

$n_g$  - griovelių skaičių apvalinti iki sveiko skaičiaus

Primama  $h_g := 2 \cdot 10^{-3} \cdot m$   $b_g := 1 \cdot 10^{-3} \cdot m$   $a_g := 3 \cdot 10^{-3} \cdot m$

$$n_g := \frac{L_2}{a_g + b_g} - 2 = 25$$

$$k_p := 1 + 0.55 \cdot \frac{2h_g + b_g + a_g}{L_2} \cdot n_g = 2.019$$

Primama  $k_p := 1$

$$b_{s11} := 0.7 \cdot b_{s1} = 0.002 \text{ m}$$

$$B_0 := 0.047 \cdot \frac{b_{s11}}{\delta_d} \cdot B_{\delta} \cdot \sin \left( 1.5 \cdot \frac{b_{s11}}{t_1} \cdot \pi \right) = 0.098 \text{ T}$$

$$P_{d0} := \frac{0.27 \cdot \frac{A \cdot s}{m^{0.5} \cdot kg^{0.5}}}{\sqrt{\mu_r \cdot \rho_c \cdot k_p}} \cdot (Z_s \cdot 60 \cdot n_1)^{1.5} \cdot (B_0 \cdot t_1)^2 \cdot \pi \cdot D_{2d} \cdot L_2 = 100.492 \text{ W}$$

$$s := s_d = 0.05$$

$$\Sigma P_0 := P_{past} + P_{d0} = 506.517 \text{ W}$$

#### Apkrauto variklio papildomieji nuostoliai

$$v_1 := 2 \cdot f_1 \cdot \tau_2 = 11.911 \frac{m}{s}$$

$$\nu := \frac{Z_s}{p} = 18$$

$$\tau_{\nu} := \frac{\tau_1}{\nu} = 0.007 \text{ m}$$

$$k_{1-} := 2 \sin \left( \frac{\pi \cdot p}{Z_s} \right) = 0.347$$

$$a_{\nu} := \frac{\pi}{\tau_2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \mu_r \cdot \rho_c \cdot k_p \cdot \nu}{\omega_1 \cdot \mu_0}} = 23.784$$

$$\gamma_{\nu} := \frac{\pi \cdot \delta_d}{\tau_{\nu}} = 0.318$$

$$\lambda_{\nu} := \frac{1}{a_{\nu} \cdot \sinh(\gamma_{\nu})^2 + 2 \sinh(\gamma_{\nu}) \cdot \cosh(\gamma_{\nu}) + 2 \cdot \frac{\cosh(\gamma_{\nu})^2}{a_{\nu}}} = 0.307$$

$$\cosh(\gamma_{\nu}^2) = 1.005$$

$$\cosh(\gamma_{\nu})^2 = 1.104$$

$$P_{pap.a} := 1.25 \cdot \mu_0 \cdot A_1^2 \cdot v_1 \left( \frac{I_2}{I_{1N}} \right)^2 \cdot \pi \cdot D_{2d} \cdot L_2 \cdot \lambda_{\nu} = 153.144 \text{ W}$$

$$I_2 = 12.494 \text{ A}$$

$$s := 0.01, 0.02, \dots, 1.5 \cdot s_d$$

### Charakteristikos

$$X_{md} = 23.485 \Omega$$

$$Z_1 = (0.841 + 1.559i) \Omega$$

$$Z_{2d}(s) := \frac{R_2(s)}{s} + i \cdot X_2(s)$$

$$Z_V(s) := Z_1 + \frac{Z_{md} \cdot Z_{2d}(s)}{Z_{md} + Z_{2d}(s)}$$

$$I_{1d}(s) := \frac{U_{1N}}{Z_V(s)}$$

$$I_{2d}(s) := I_{1d}(s) \cdot \frac{Z_{md}}{Z_{md} + Z_{2d}(s)}$$

$$P_{el1d}(s) := m_1 \cdot (|I_{1d}(s)|)^2 \cdot R_2(s)$$

$$P_{el2d}(s) := m_1 \cdot (|I_{2d}(s)|)^2 \cdot R_2(s)$$

$$S_{1d}(s) := m_1 \cdot U_{1N} \cdot I_{1d}(s)$$

$$P_{1d}(s) := \text{Re}(S_{1d}(s))$$

$$P_{past} = 406.026 \text{ W}$$

$$P_{emd}(s) := m_1 \cdot (|I_{2d}(s)|)^2 \cdot \frac{R_2(s)}{s}$$

$$P_{1d\_}(s) := P_{emd}(s) + P_{el1d}(s) + P_{past}$$

$$P_{2d}(s) := P_{emd}(s) - P_{el2d}(s) - P_{d0} - P_{pap.a} - P_{mech}$$

$$M_{emd}(s) := \frac{P \cdot P_{emd}(s)}{2 \cdot \pi \cdot f_1}$$

$$M_d(s) := \frac{P \cdot P_{2d}(s)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (1 - s)}$$

$$\Sigma P_d(s) := |P_{1d\_}(s)| - |P_{2d}(s)|$$

$$\eta_d(s) := \frac{P_{2d}(s)}{P_{1d}(s)}$$

$$\cos \phi_d(s) := \frac{\text{Re}(I_{1d}(s))}{|I_{1d}(s)|}$$

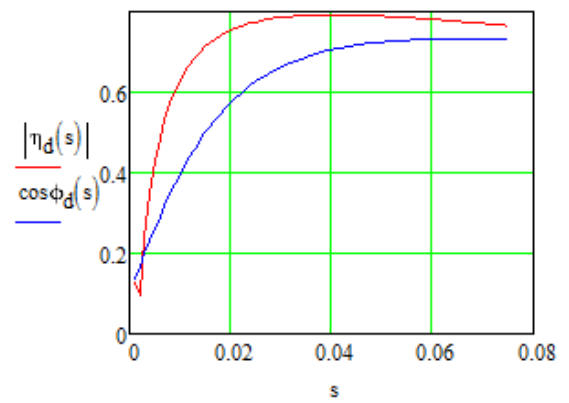
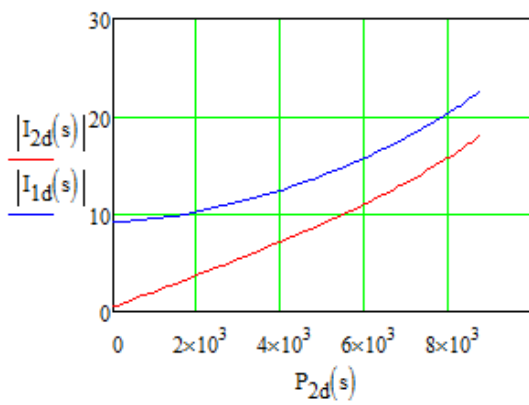
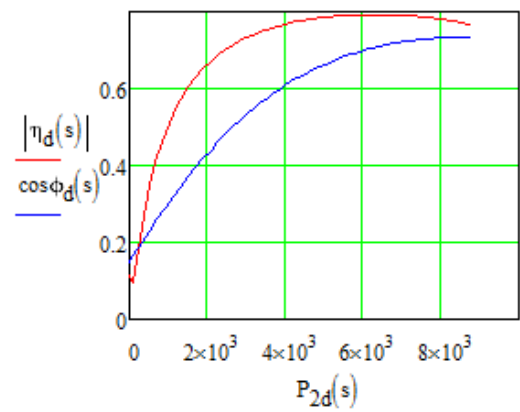
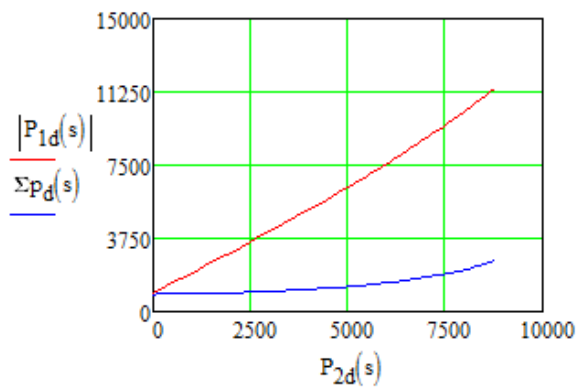
$$\eta_{em}(s) := \frac{P_{emd}(s)}{P_{1d}(s)}$$

s =	$P_{el1d}(s) =$	$P_{el2d}(s) =$	$ Z_V(s)  =$	$ I_{1d}(s)  =$	$ I_{2d}(s)  =$
0.01	196.12 W	20.492 W	23.083 $\Omega$	9.964 A	3.221 A
0.02	276.438	78.155	19.524	11.781	6.264
0.03	395.424	165.52	16.435	13.995	9.054
0.04	542.219	274.428	14.164	16.238	11.552
0.05	707.208	397.656	12.543	18.337	13.75
0.06	883.059	529.71	11.372	20.225	15.664
0.07	1064.83	666.913	10.508	21.889	17.323

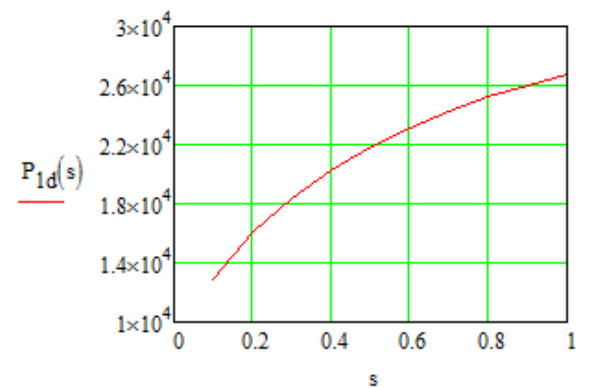
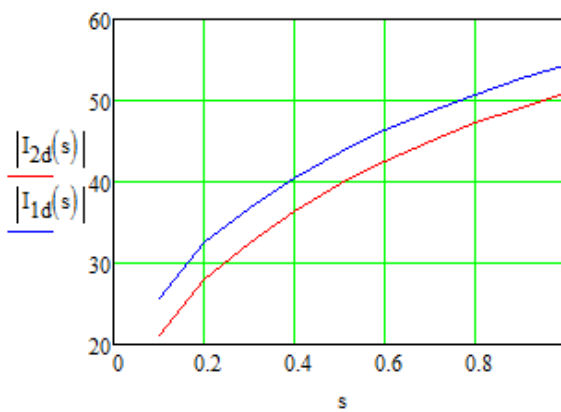
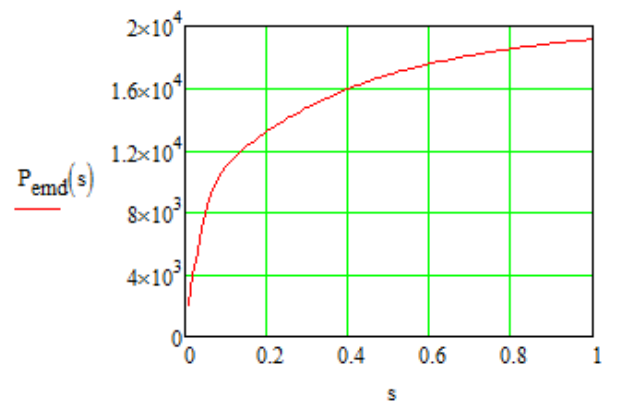
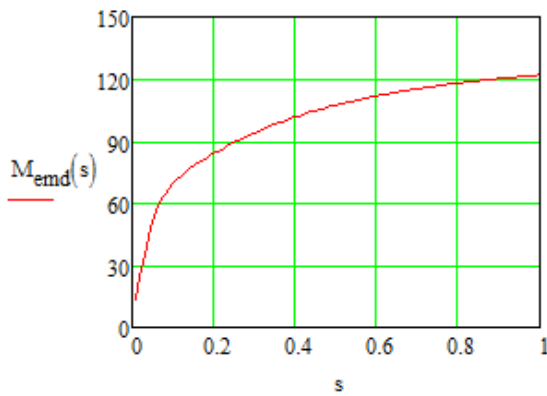
s =	$ P_{1d}(s)  =$	$ P_{emd}(s)  =$	$M_{emd}(s) =$	$\eta_d(s) =$	$\cos \phi_d(s) =$	$\eta_{em}(s) =$
0.01	2716.153 W	2049.152 W	13.045 N·m	0.629	0.395	0.754
0.02	4662.204	3907.757	24.878	0.753	0.574	0.838
0.03	6402.939	5517.331	35.124	0.786	0.663	0.862
0.04	7904.812	6860.709	43.677	0.793	0.706	0.868
0.05	9168.404	7953.12	50.631	0.789	0.725	0.867
0.06	10216.566	8828.504	56.204	0.781	0.732	0.864
0.07	11082.533	9527.329	60.653	0.771	0.734	0.86

$\Sigma P_d(s) =$	$ P_{2d}(s)  =$	$ I_{1d}(s_d)  =$	$M_{emd}(s_d) =$
942.586 W	1708.711 W	18.337 A	50.631 N·m
1080.568	3509.652	$ I_{2d}(s_d)  = 13.75 \text{ A}$	$\eta_d(s_d) = 0.789$
1286.918	5031.862		$\cos \phi_d(s_d) = 0.725$
1542.622	6266.331		
1830.839	7235.515		
2138.744	7978.845		
2457.718	8540.467		

$s := 0.001, 0.002 \dots 1.5 \cdot s_d$



$s := 0.01, 0.02 \dots 1$



Paleidimo charakteristikos

$s := 1$

$\mu_r = 45.261$

CM – 19

$$A_{1p} := \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot |I_{1d}(1)|}{\pi \cdot D_1} = 97649.772 \frac{A}{m}$$

$$H_{2p} := 0.5 \cdot \frac{A_{1p} \cdot |I_{2d}(1)|}{|I_{1d}(1)|} = 45798.873 \frac{A}{m}$$

$H_0 = 11000 \frac{A}{m}$

$$H_{cp} := \sqrt{H_{2p}^2 + H_0^2} = 47101.345 \frac{A}{m}$$

$B_{cp} := 1.6T$

$$\mu_{rp} := \frac{B_{cp}}{\mu_0 \cdot H_{cp}} = 27.032$$

Aktyvioji varža, kai  $s=1$   $\mu_r$  surandame atitinkamam lydiniui CM iš grafikų arba apskaičiuojame

Kai  $\mu_{rp} = 27.032$

tai  $\zeta_p(s) := h_c \cdot \sqrt{\frac{\omega_1 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rp}}{2 \cdot \rho_c \cdot s}}$

$$k_{rp}(s) := \frac{\zeta_p(s) \cdot (\sinh(2 \cdot \zeta_p(s)) + \sin(2 \cdot \zeta_p(s)))}{(\cosh(2 \cdot \zeta_p(s)) - \cos(2 \cdot \zeta_p(s)))}$$

$k_{rp}(1) = 3.466$

$$k_{xp}(s) := \frac{3 \cdot (\sinh(2 \cdot \zeta_p(s)) - \sin(2 \cdot \zeta_p(s)))}{2 \cdot \zeta_p(s) \cdot (\cosh(2 \cdot \zeta_p(s)) - \cos(2 \cdot \zeta_p(s)))}$$

$k_{xp}(1) = 0.434$

$$R_{2dp}(s) := k_{rp}(s) \cdot R_2(s)$$

$$X_{2dp}(s) := k_{xp}(s) \cdot X_2(s)$$

$$Z_{dp}(s) := R_{2dp}(s) + iX_{2dp}(s)$$

$$Z_{vp}(s) := Z_1 + \frac{Z_{md} \cdot Z_{dp}(s)}{Z_{md} + Z_{dp}(s)}$$

$$I_{1dp}(s) := \frac{U_{1N}}{|Z_{vp}(s)|}$$

$I_{1dp}(1) = 25.158 A$

$$M_{dp}(s) := \frac{m_1 \cdot p \cdot I_{1dp}(s)^2 \cdot R_{2dp}(s)}{\omega_1}$$

$M_{dp}(1) = 103.018 \cdot N \cdot m$

$$M_{dN} := \frac{p \cdot P_{2d}(s_d)}{2\pi f_1 \cdot (1 - s_d)} = 48.487 \cdot N \cdot m$$

$$i_{dp} := \frac{I_{1dp}(s)}{|I_{1d}(s_d)|} = 1.372$$

$$m_{dp} := \frac{M_{dp}(s)}{M_{dN}} = 2.125$$

$i_p = 6.34$

$m_p = 1.65$

$P_{2d}(s_d) = 7235.515 W$

$I_{1d}(s_d) = (13.288 - 12.637i) A$

$M_{dp}(s) = 103.018 \cdot N \cdot m$

$M_{dN} = 48.487 \cdot N \cdot m$

$P_{2N} = 7500 W$

$I_{1dp}(s) = 25.158 A$

$I_{1N} = 14.279 A$

$I_p = 49.8 A$

$$M_N := \frac{p \cdot P_{2N}}{2\pi f_1 \cdot (1 - s_N)} = 49.056 \cdot N \cdot m$$

$s_d = 0.05$

$s_N = 0.027$

$$I_{0\mu n} := \frac{U_{1N}}{X_1 + X_m} = 5.787 A$$

$$C_{1-} := 1 + \frac{X_1}{X_{md}} = 1.066$$

$$I_{0n} := \frac{U_{1N}}{Z_1 + Z_m} = (0.369 - 5.763i) A$$

$$I_{0\mu-} := \frac{U_{1N}}{X_1 + X_{md}} = 9.184 A$$

$$I_{0-} := 2 \cdot I_{1dp}(1) \cdot (C_{1-} - 1) = 3.34 A$$

$$I_{0da-} := \frac{U_{1N}}{Z_1 + Z_{md}} = (0.924 - 9.09i) A$$

$I_{0\mu c} = 8.258 A$

$I_0 = 5.787 A$

Palyginimas

$$s_d = 0.05$$

$$s_{d_1} = 0.05$$

$$P_{1d}(s_d) = 9168.404 \text{ W}$$

$$P_{2d}(s_d) = 7235.515 \text{ W}$$

$$\eta_d(s_d) = 0.789$$

$$\cos\phi_d(s_d) = 0.725$$

$$M_d(s_d) = 48.487 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$|I_{1d}(s_d)| = 18.337 \text{ A}$$

$$|I_{2d}(s_d)| = 13.75 \text{ A}$$

$$|I_{1d}(1)| = 54.325 \text{ A}$$

$$s_N = 0.027$$

$$P_{1N} = 5081 \cdot \text{W}$$

$$P_{2N} = 7500 \text{ W}$$

$$\eta = 0.87$$

$$\cos\phi = 0.875$$

$$M_N = 49.056 \cdot \text{N} \cdot \text{m}$$

$$I_{1N} = 14.279 \text{ A}$$

$$I_{2N} = 7.4 \text{ A}$$

$$I_p = 49.8 \text{ A}$$

$$P_{1N} := m_1 \cdot U_{1N} \cdot I_{1N} \cdot \cos\phi = 8620.946 \text{ W}$$

Paleidimo kokybė

$$Q_{pd} := \frac{m_{dp}}{i_{dp}} = 1.549$$

$$Q_{pn} := \frac{m_p}{i_p} = 0.26$$

$$k_p := \frac{P_{2d}(s_d)}{P_{2N}} = 0.965 \quad \text{kai} \quad k_I := \frac{|I_{1d}(s_d)|}{I_{1N}} = 1.284$$