

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Tomas Astrauskas

**ASINCHRONINIO VARIKLIO IR DAŽNIO
KEITIKLIO PAVAROS ENERGETINIŲ
RODIKLIŲ TYRIMAS**

Magistro darbas

ŠIAULIAI, 2005

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

doc. dr. T. Šimkevičius

2005 06

Tomas Astrauskas

**ASINCHRONINIO VARIKLIO IR DAŽNIO
KEITIKLIO PAVAROS ENERGETINIŲ
RODIKLIŲ TYRIMAS**

Magistro darbas

Recenzentas

_____ Z. Turauskas

2005 06

Vadovas

_____ doc. dr. Leonardas Buivis

2005 06

Atliko

_____ EM3 gr.stud. T. Astrauskas

2005 06

ŠIAULIAI, 2005

SANTRAUKA

T. Astrauskas. Asinchroninio variklio ir dažnio keitiklio pavaros energetinių rodiklių tyrimas. Magistro darbas.

Vadovas doc. dr. L. Buivis. Šiaulių Universitetas. Šiauliai 2005.

SUMMARY

T. Astrauskas. The research on power parameters of variable speed AC drive. Master thesis of Energetics engineer/research advisor doc. dr. L. Buivis. Siauliai University, Technological Faculty, Electrical Engineering Department.- Siauliai, 2005.

The theme of Master project of Energetics engineer is to analyze the power parameters of noncontrollable speed AC drive. Is to analyze the power parameters of variable speed AC drive. Is to accomplish the power parameters of variable and noncontrollable speed AC drive. Describe the results of investigate and render the respective findings.

TURINYS

IŽANGA.....	9
1. ELEKTROS PAVAROS ENERGETINIAI RODIKLIAI	10
1.1. Bendrieji principai.....	10
1.2. Galios ir energijos nuostoliai	11
1.2.1. Nuostoliai nereguliuojamose elektros pavarose.....	11
1.2.2. Nuostoliai reguliuojamose elektros pavarose	12
1.2.3. Nuostoliai pavarose pereinamųjų procesų metu	14
1.3. Naudingumo koeficientas.....	15
1.4. Netiesinių iškreipių faktorius	16
1.5. Galios koeficientas ir galios faktorius	19
2. ASINCHRONINĖ DAŽNINĖ PAVARA.....	20
2.1. Asinchroninis variklis ir jo valdymo dėsniai.....	21
2.2. Dažnio keitiklis	22
2.2.1. Išėjimo įtampos formavimas.....	23
2.2.2. Vietinis ir distancinis valdymas	23
2.2.3. Kritiniai greičiai	24
2.2.4. Variklio stabdymas	24
2.2.5. Apsauga nuo perkrovų	25
3. ASINCHRONINIO VARIKLIO TYRIMO STENDAS	25
3.1. Stendo principas	25
3.2. Stendo konstrukcija.....	26
4. TYRIMO PROGRAMA	31
4.1. Nereguliuojamo asinchroninio variklio tyrimas	31
4.2. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis 50Hz.....	31
4.3. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis padidintas.....	31
4.4. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis sumažintas	32
4.5. Tinklo varžos įtaka	32

5. PAVAROS ENERGETINIŲ RODIKLIŲ SKAIČIAVIMO METODIKA	32
6. TYRIMO REZULTATAI	36
6.1. Prietaisų tikslumo tyrimas.....	36
6.2. Nereguliuojamo asinchroninio variklio tyrimas	37
6.3. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis 50Hz.....	39
6.4. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis padidintas.....	41
6.5. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis sumažintas	43
6.6. Tinklo varžos įtaka	46
7. TYRIMO REZULTATŲ ANALIZĖ	48
7.1. Srovių analizė.....	48
7.2. Netiesinių iškreipčių faktoriaus analizė.....	49
7.3. Galios faktoriaus analizė.....	51
7.4. Naudingumo koeficiento analizė	52
7.5. Tinklo varžos įtakos analizė.....	54
IŠVADOS IR SIŪLYMAI	56
LITERATŪRA	57

LENTELĖS

2.1 lentelė. Dažnio keitiklio nustatymai

3.1 lentelė. Tyrimų stende naudojami prietaisai

6.1 lentelė. Nereguliuojamo asinchroninio variklio tyrimo rezultatai

6.2 lentelė. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu, kai dažnis 50Hz, tyrimo rezultatai

6.3 lentelė. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo rezultatai, kai dažnis padidintas

6.4 lentelė. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo rezultatai, kai dažnis sumažintas iki 45Hz

6.5 lentelė. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo rezultatai, kai dažnis sumažintas iki 40Hz

6.6 lentelė. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo rezultatai, kai dažnis sumažintas iki 35Hz

6.7 lentelė. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo rezultatai, kai kilpos fazė – nulis varža padidinta

PAVEIKSLAI

- 1.1 pav. Asinchroninio variklio rotoriaus ir statoriaus srovės priklausomybė nuo slydimo
- 1.2 pav. Variklio, maitinamo tiesiogiai iš tinklo įtampos ir srovės kreivių forma
- 1.3 pav. Variklio, maitinamo iš dažnio keitiklio pagrindinės kreivės forma
- 1.4 pav. Aukštesnės eilės harmonikų diagrama
- 2.1 pav. Siemens Micromaster Vector principinė schema
- 2.2 pav. Įtampos formavimas impulsų sekos metodu
- 2.3 pav. Valdymo įrenginių išdėstymas.
- 2.4 pav. Kritinių greičių kreivė.
- 2.5 pav. Variklio paprastas ir dinaminis stabdymas.
- 2.6 pav. Termorezistorinio daviklio prijungimas prie keitiklio valdymo gnybtų
- 3.1 pav. Apkrovos dydžio nustatymas dinamometru.
- 3.2 pav. Supaprastinta tyrime naudojamo asinchroninės dažninės pavaros stendo schema .
- 3.3 pav. Tyrime naudojamo stendo nuotrauka
- 6.1 pav. Prietaisų rodmenų skirtumas, keičiant dažnį ir apkrovą
- 6.2 pav. Parametrų kitimas didinant apkrovą, kai pavara nereguliuojama
- 6.3 pav. Srovės THD kintant apkrovai nereguliuojamoje pavaroje
- 6.4 pav. Įtampos THD kintant apkrovai nereguliuojamoje pavaroje
- 6.5 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F = 50\text{Hz}$
- 6.6 pav. Srovės THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F = 50\text{Hz}$
- 6.7 pav. Įtampos THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F = 50\text{Hz}$
- 6.8 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F=55\text{Hz}$
- 6.9 pav. Srovės THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F=55\text{Hz}$
- 6.10 pav. Įtampos THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F=55\text{Hz}$
- 6.11 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F= 45, 40$ ir 35Hz
- 6.12 pav. Srovės THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F= 45, 40$ ir 35Hz
- 6.13 pav. Įtampos THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F= 45, 40$ ir 35Hz
- 7.1 pav. Srovės kitimas didinant apkrovą ir keičiant darbo režimą

- 7.2 pav. Srovės pokytis įvedus į pavarą dažnio keitiklį
- 7.3 pav. Srovės ir įtampos THD kitimas nereguliuojamoje pavaroje
- 7.4 pav. Srovės THD kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F=35-55\text{Hz}$
- 7.5 pav. Įtampos THD kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F=35-55\text{Hz}$
- 7.6 pav. Galios faktoriaus kitimas įvedus į pavarą dažnio keitiklį
- 7.7 pav. Galios faktoriaus pokytis įvedus į pavarą dažnio keitiklį
- 7.8 pav. Naudingumo koeficiento kitimas įvedus į pavarą dažnio keitiklį
- 7.9 pav. Pavaros galios nuostoliai esant skirtingiems darbo režimams
- 7.10 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F= 35-55\text{Hz}$
- 7.11 pav. Srovės THD kitimas padidinus kilpos fazę – nulis varžą
- 7.12 pav. Įtampos THD kitimas padidinus kilpos fazę – nulis varžą
- 7.13 pav. Srovės bei galios pokytis pavaroje su dažnio keitikliu, kai kilpos fazė – nulis varža padidinta

IŽANGA

Ekspertų vertinimais [4] industrinėse šalyse elektros pavaros sudaro stambiausią elektros energijos vartotojų grupę. Jos sunaudoja, t.y. perduoda mechaninės energijos pavidalu technologiniams įrenginiams apie 60 % pagaminamos elektros energijos.

Svarbiausia elektros pavaros funkcija yra suteikti judesį pavieniams arba bendro technologinio proceso susietiems mechanizmams ir kuo geriau, taip pat su mažiausiais energijos nuostoliais visose pavaros grandyse patenkinti tų mechanizmų reikmes, t.y. optimizuoti viso technologinio mechanizmo ar proceso veikimą.

Atsiradus galingiems puslaidininkiniams dažnio keitikliams, pavaros su asinchroniniais varikliais tapo dominuojančiomis. Tai lengva paaiškinti, nes šiuolaikiniai dažnio keitikliai įgalino panaudoti pavarose bekontaktį trumpai sujungto rotoriaus asinchroninį variklį, kuris yra vienas iš labiausiai paplitusių, paprasčiausių, patikimiausių ir pigiausių elektros variklių, kurių sukimosi dažnis priklauso nuo maitinančio tinklo dažnio, o maksimalus sukimosi momentas – nuo įtampos.

Dažnio keitiklis sukuria trifazį elektros tinklą, kurio įtampą ir dažnį galima keisti nuo nulio iki nominalių, o reikalui esant – net didesnių už nominalų reikšmių. Be to, elektros tinklo parametrai keičiami ne nepriklausomai, o atsižvelgiant į asinchroninio variklio ir jo varomų įrenginių ypatumus. Dažnio keitiklis kompensuoja asinchroninio variklio trūkumus, o pavaros su valdomu varikliu įgyja kokybiškai naujų savybių, kurios leidžia praplėsti jų taikymo sritį ir efektyviai taupyti elektros energiją. Manoma kad, turėtų būti valdomas kas antras pramonėje naudojamas variklis. Toks lygis dar nepasiektas net labiausiai išsivysčiusiose šalyse.

1. ELEKTROS PAVAROS ENERGETINIAI RODIKLIAI

1.1. Bendrieji principai

Elektros pavaros šiuo metu pasaulyje yra pagrindinis elektros energijos vartotojas, todėl pagrindinių energetinių pavaros darbo rodiklių nustatymas ir būdų, kaip juos pagerinti ieškojimas turi didelę praktinę reikšmę [5].

Prie pagrindinių elektros pavarų energetinių rodiklių galima būtų priskirti galios, energijos nuostolius, naudingumo koeficientą η , netiesinių iškreipų faktorių THD (Total Harmonic Distortion), galios koeficientą $\cos \varphi$ bei galios faktorių λ .

Galios ir energijos nuostoliai pavarose gali būti išmatuojami arba apskaičiuojami. Tokių nuostolių nustatymas matuojant yra problematiškas, nes reikia turėti matavimo prietaisus, kurie galią ir energiją matuoja vienu metu keliuose taškuose. Todėl dažniausiai šie rodikliai apskaičiuojami.

Pavaros naudingumo koeficientas suprantamas kaip santykis mechaninės galios ant variklio veleno su pavaros naudojama elektrine galia. Kada pavara yra be dažnio keitiklio, šis rodiklis sutampa su variklio naudingo veikimo koeficientu, tačiau, kai pavaroje yra dažnio keitiklis, filtrai ar kiti įrenginiai, šį rodiklį reikėtų vadinti elektrinės galios išnaudojimo efektyvumo koeficientu. Tolimesniuose nagrinėjimuose tokią prasmę šiam rodikliui ir suteikiame.

Šiuo metu pavarose plačiai pradėjus naudoti puslaidininkinius dažnio keitiklius išryškėjo svarbus parametras, galintis įtakoti į pavaros darbo efektyvumą. Tai aukštesniosios harmonikos, apibūdinamos netiesinių iškreipų faktoriumi THD. Nereguliuojamose pavarose THD nėra toks aktualus, kadangi jo dydis dažniausiai būna mažas, ko negalima pasakyti apie pavaras su keitikliu.

Galios faktoriaus λ terminas yra dažnai siejamas su galios koeficientu $\cos \varphi$, tačiau šie parametrai yra ekvivalentūs tik tuomet, kai maitinančiosios įtampos ir srovės kreivės yra sinusinės formos [8]. Realiame tinkle įtampos ir srovės sudėtyje yra aukštesniųjų harmonikų, iškraipančių

sinusoidę. Tokiu atveju $\cos \varphi$ ir λ dydžiai bus nevienodi, todėl tolimesniuose nagrinėjimuose jie bus traktuojami ir vertinami kaip atskiri parametrai.

Elektros pavaros energetiniai rodikliai priklauso nuo pavaros darbo režimo, apkrovos momento kitimo pobūdžio ir reguliavimo būdo. Dažniausiai energetiniai rodikliai nustatomi atskirai nereguliuojamai ir reguliuojamai elektros pavarai, dirbant nusistovėjusiame ir pereinamuosiuose režimuose, kas leidžia lengviau suprasti atskirų pavarų tipų savybes.

1.2. Galios ir energijos nuostoliai

Bendru atveju galios nuostoliai nereguliuojamose pavarose susideda iš nuostolių sumos atskiruose pavaros elementuose, tame tarpe variklyje ir mechaninėje dalyje. Mechaniniai nuostoliai būdingi visų tipų elektros pavaroms. Jie atsiranda dėl besisukančių dalių trinties ir priklauso nuo perdavimo momento. Energijos nuostoliai mechaninėje dalyje dažniausiai nusakomi naudingos veikos koeficientu. Jo dydis priklauso nuo apkrovos pobūdžio.

Galios nuostolius atsirandančius variklyje galima skirstyti į pastoviuosius ir kintamus:

$$\Delta P_{el.v} = \Delta P_{past.} + \Delta P_{k.int.} \quad ; \quad (1.1)$$

Pastovieji nuostoliai nepriklauso nuo variklio apvijomis tekančių srovių. Tai magnetolaidžio plieno nuostoliai, nuostoliai, kylantys dėl trinties goliuose, bei dėl aušinimo. Pastovieji nuostoliai nėra nekintami, jie priklauso nuo variklio sukimosi greičio, maitinimo įtampos amplitudės ir dažnio. Tačiau, kadangi jie kinta nedaug, juos priimta vertinti kaip nekintamus ir lygius nominaliems pastoviesiems nuostoliams.

Kintamieji nuostoliai atsiranda tekant kintamai apkrovos srovei variklio apvijomis.

1.2.1. Nuostoliai nereguliuojamose elektros pavarose

Yra žinoma, kad didžiausios variklio naudingumo koeficiento reikšmės būna tuomet, kai pastovieji nuostoliai yra lygūs kintamiems. Todėl, norint išvengti didesnių energijos nuostolių nereguliuojamose elektros pavarose, reikia jas apkrauti pilna, nominalia galia ir riboti darbą tuščiosios eigos metu. Jei apkrovos vidurkis yra mažesnis nei 45% variklio nominaliosios galios, tai jo pakeitimas

mažesnios galios elektros varikliu ekonomine prasme yra tikslingas. Jei apkrovos vidurkis viršija 70% variklio nominalios galios, pavaroje naudojamą variklį keisti netikslinga. Apkrovos vidurkiui svyruojant tarp 45% - 70% variklį keisti patartina tik atlikus papildomus skaičiavimus [6].

Tam, kad pagerinti kintamos srovės elektros variklių galios koeficientą bei sumažinti reaktyviosios galios sunaudojimą reikia:

- a) nepilnai apkrautus elektros variklius pakeisti mažesnės galios varikliais;
- b) nepilnai apkrautiems varikliams pamažinti maitinimo įtampą;
- c) naudoti reaktyviosios galios kompensavimo įrenginius, pvz.: kondensatorių baterijas, statinius reaktyviosios galios šaltinius.

1.2.2. Nuostoliai reguliuojamose elektros pavarose

Kadangi šiame tiriamajame darbe naudojamas reguliuojamas trifazis asinchroninis variklis, tai nuostolius reguliuojamose asinchroninėse pavarose reikia apžvelgti plačiau.

Galios ir energijos nuostolių nustatymas reguliuojamose pavarose yra kur kas sudėtingesnis. To priežastys yra:

1. Variklio rotoriaus apsisukimų greičio kitimas, ko pasekoje bendru atveju kinta pastovieji nuostoliai.
2. Papildomi galios nuostoliai pačiame keitiklyje.
3. Yra taikomi įvairūs pavarų reguliavimo būdai. Pagal energijos nuostolius juos galima suskirstyti į nuostolingus ir mažiau nuostolingus. Šiame tiriamajame darbe naudojamas dažninis asinchroninės pavaros reguliavimas, kurį galima priskirti prie mažiau nuostolingų, kadangi energijos nuostoliai yra mažesni nei kitu būdu valdomų elektros pavarų.

Asinchroninio variklio pastovieji nuostoliai susideda iš mechaninių nuostolių ΔP_{mech} , statoriaus bei rotoriaus plieno nuostolių $\Delta P_{st.}$ ir $\Delta P_{rot.}$ ir nuostolių statoriaus apvijose, kurie atsiranda dėl magnetinio srauto Φ įtakos:

$$\Delta P_{past.} = \Delta P_{mech.} + \Delta P_{st.} + \Delta P_{rot.} + 3\Phi^2 R_1; \quad (1.2)$$

čia R_1 - statoriaus apvijų varža, Ω .

Tarkim, kad mažėjant variklio rotoriaus apsisukimų greičiui, didėjantys plieno nuostoliai yra kompensuojami mechaninių nuostolių sumažėjimu, tai pastovieji galios nuostoliai gali būti laikomi kaip nekintami ir lygūs nominaliesiems galios nuostoliams:

$$\Delta P_{past.} = \Delta P_{mech.nom.} + \Delta P_{st.nom.} + 3\Phi^2 R_1 \approx const. ; \quad (1.3)$$

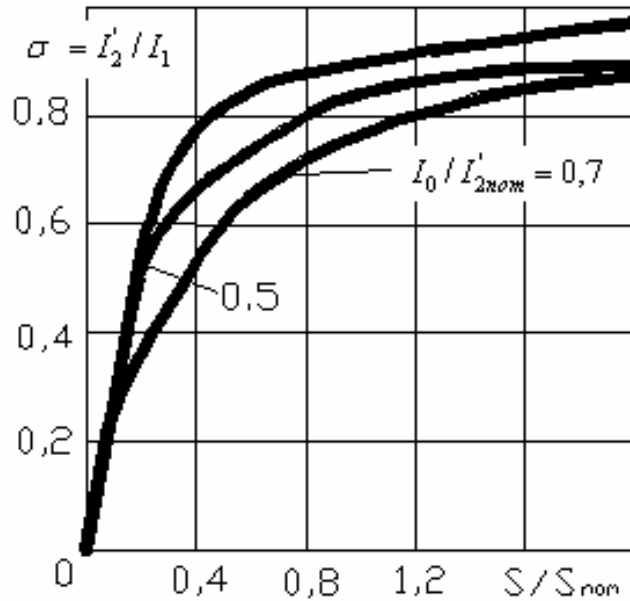
Trifaziams asinchroniniams varikliams kintamieji galios nuostoliai užrašomi formule:

$$\begin{aligned} \Delta P_{k\,int.} &= 3I_1'^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' = 3I_2'^2 (R_2' + R_1 / \sigma^2) \approx \\ &\approx 3I_{2nom}'^2 (R_2' + R_1 / \sigma_{nom}^2) (I_2' / I_{2nom}')^2 = & ; \quad (1.4) \\ &= \Delta P_{k\,int.nom.} (I_2' / I_{2nom}') \end{aligned}$$

čia $\Delta P_{k\,int.nom.} = I_{2nom}'^2 (R_2' + R_1 / \sigma_{nom}^2)$ - kintamieji nominalūs asinchroninio variklio nuostoliai, W;

$\sigma_{nom} = I_{2nom}' / I_{1nom}' \approx 0,85 - 0,95$ ir $\sigma = I_2' / I_1'$ - nominali ir esama rotoriaus ir statoriaus srovės dedamosios;

Apytikslės σ reikšmės gali būti surastos iš 1.1pav. kreivių:



1.1 pav. Asinchroninio variklio rotoriaus ir statoriaus srovės priklausomybė nuo slydimo

1.2.3. Nuostoliai pavarose pereinamųjų procesų metu

Pereinamųjų procesų metu variklio apvijomis tekančios srovės ženkliai viršija nominaliąsias reikšmes ir sukelia papildomus energijos nuostolius, o taip pat ir papildomą variklio šilimą. Ypač svarbu nustatyti energijos nuostolius tokiose pavarose, kuriose dinaminis režimas yra pagrindinis. Prie tokių pavarų galima priskirti valcavimo staklių, keliamųjų kranų, obliavimo staklių ir kt. pavaras. Bendru atveju energijos nuostolius pereinamųjų procesų metu galima užrašyti:

$$\Delta P_{p.p.} = \Delta P_{past.p.p.} + \Delta P_{k.int.p.p.}; \quad (1.5)$$

čia $\Delta P_{past.p.p.}$ - pastovieji nuostoliai pereinamųjų procesų metu, W;

$\Delta P_{k.int.p.p.}$ - kintami nuostoliai pereinamųjų procesų metu, W.

$\Delta P_{past.p.p.}$ galima lengvai rasti, tuo atveju, kada pastovieji galios nuostoliai pereinamųjų procesų metu nekinta:

$$\Delta P_{past.p.p.} = \int_0^{t_{p.p.}} \Delta P_{past.} dt = \Delta P_{past.} t_{p.p.} ; \quad (1.6)$$

čia $t_{p.p.}$ - pereinamojo proceso laikas, s.

$\Delta P_{k\text{ int.}p.p.}$ randamas :

$$\Delta P_{k\text{ int.}p.p.} = \int_0^{t_{p.p.}} i^2(t) R dt = \int_0^{t_{p.p.}} \Delta P_{k\text{ int.}} dt ; \quad (1.7)$$

Formulės (1.7) naudojimas daugeliu atvejų būna sudėtingas, dėl to, kad reikia žinoti variklio srovių kitimo dėsnį pereinamųjų procesų metu $i(t)$, taip pat pasikeitusios varžos R reikšmę.

Labai svarbu rasti energijos nuostolių mažinimo būdą pereinamųjų procesų metu, ypač tokio tipo pavarose, kurių bendrą darbo ciklą daugiausiai sudaro pereinamieji procesai. Yra du pagrindiniai būdai sumažinti energijos nuostolius pereinamųjų procesų metu:

1. Elektros pavaros inercijos momento sumažinimas.
2. Variklių tuščiosios eigos greičio reguliavimas pereinamųjų procesų metu.

Inercijos momentą sumažinti galima keliais būdais:

- a) Mažainercinių elektros variklių panaudojimas su sumažintu rotoriaus inercijos momentu. Prie tokių priskiriami varikliai su prailgintu rotoriaus velenu.
- b) Racionali pavaros mechaninės dalies konstrukcija, o taip pat variklio pakeitimas dviem, pusiau mažesnės nominalios galios varikliais.

Tuščiosios eigos greičio reguliavimas asinchroniniams varikliams galimas keičiant maitinimo įtampos dažnį (pavaros su keitikliais) arba polių porų skaičių.

1.3. Naudingumo koeficientas

Pavaros naudingumo koeficientas η yra nusakomas santykiu mechaninės galios ant variklio veleno su pavaros iš tinklo imama elektrine galia:

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P}; \quad (1.8)$$

čia P - iš tinklo pareikalaujama elektrinė galia, W;

P_{mech} - pavaros mechaninė galia, W.

Mechaninė pavaros galia yra lengvai apskaičiuojama žinant apkrovos momentą bei variklio rotorius apsisukimų greitį:

$$P_{mech} = \frac{2\pi n}{60} \cdot M \quad (1.9)$$

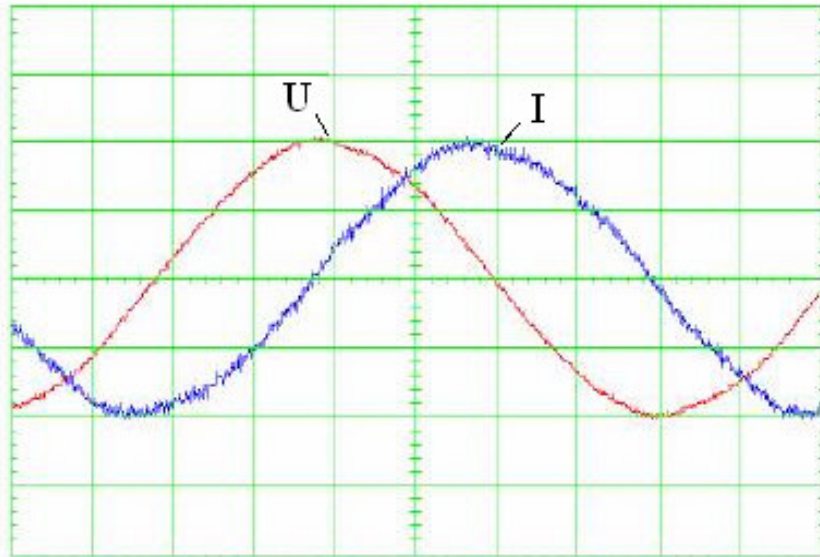
čia n - variklio rotorius apsisukimų greitis, aps/min;

M - apkrovos momentas, Nm.

Didesnis pavaros naudingumo koeficientas reiškia efektyvesnį iš tinklo imamos galios išnaudojimą, t.y. nusako energijos nuostolius pavaroje.

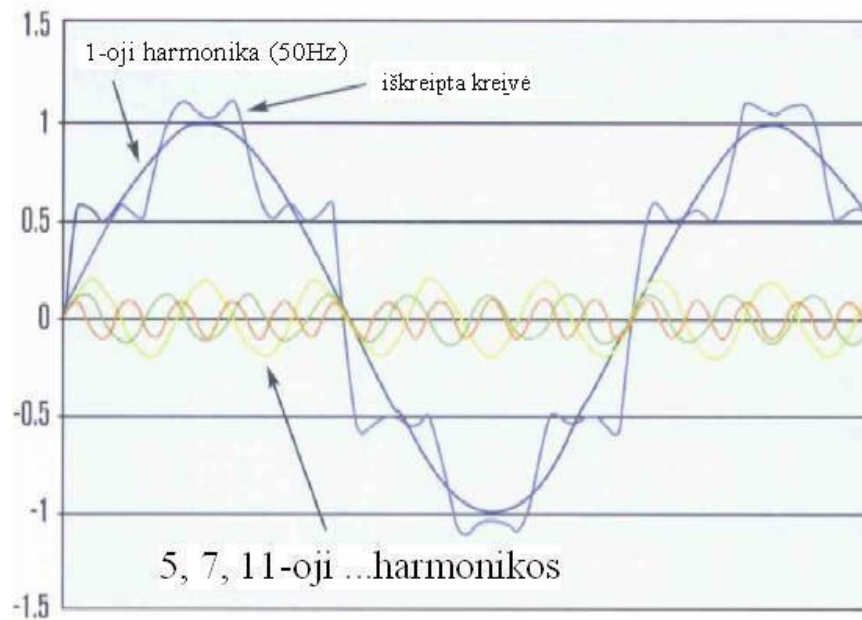
1.4. Netiesinių iškreipčių faktorius

Kai kintamos srovės variklis yra tiesiogiai prijungtas prie maitinimo tinklo, jo įtampos ir srovės kreivės forma yra artima sinusinei:



1.2 pav. Variklio, maitinamo tiesiogiai iš tinklo įtampos ir srovės kreivių forma

Asinchroninio variklio, kuris įtampą gauna ne tiesiogiai iš tinklo, bet per dažnio keitiklį, pagrindinės kreivės forma būna iškreipta:



1.3 pav. Variklio, maitinamo iš dažnio keitiklio pagrindinės kreivės forma

Įtampos ar srovės kreivės formos iškreipimai kintamoje elektros energijos sistemoje atsiranda dėl aukštesniųjų harmonikų įtakos. Aukštesnės srovės harmonikos tekėdamos tinklo elementais sukelia įtampos kritimus šių elementų varžose, kurie sumuojasi prie pagrindinės įtampos sinusoidės, tokiu būdu iškreipdami jos formą. Tinklo įtampos ar srovės nukrypimą nuo sinusinės kreivės formos priimta

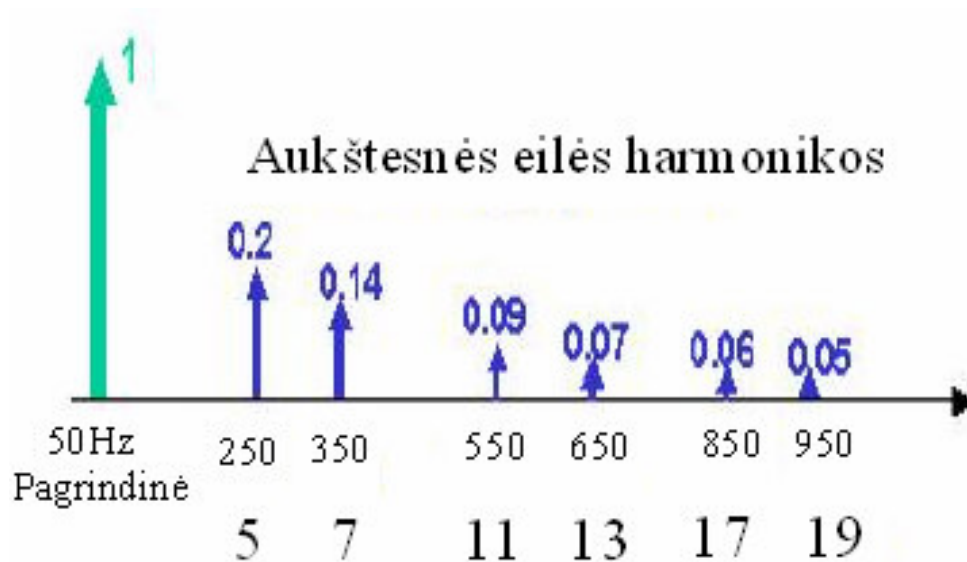
apibūdinti netiesinių iškreipimų faktoriumi, kuris anglų kalboje žinomas kaip THD (Total Harmonic Distortion). THD išreiškiamas procentais %:

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (M_n)^2}}{M_{pagr.}} \times 100\% ; \quad (1.10)$$

čia: $M_{pagr.}$ - pagrindinės įtampos ar srovės harmonikos dydis;

M_n - n-tosios įtampos ar srovės harmonikos dydis.

Harmonikos suprantamos kaip aukštesnio dažnio įtampos ar srovės sinusinės kreivės, kurios yra pirmosios (pagrindinės) 50 Hz dažnio harmonikos kartotinės. Tarkim, penktosios kintamo 50Hz dažnio sistemos harmonikos dažnis bus 250Hz, septintosios – 350Hz, vienuoliktosios – 550Hz ir t.t.



1.4 pav. Aukštesnės eilės harmonikų diagrama

Aukštesnės eilės harmonikos elektros tiekimo sistemoje sukelia šiuos neigiamus veiksnius:

1. Papildomi aktyviosios galios ir elektros energijos nuostoliai tinklo elementuose.
2. Galios faktoriaus sumažėjimas.
3. Ribotas kondensatorių baterijų panaudojimas, dėl galimų rezonansinių režimų atsiradimo.

4. Greitesnis elektros įrangos izoliacijos senėjimas, dėl papildomo šilimo.
5. Padidėja indukcinė aktyviosios ir reaktyviosios energijos skaitiklių paklaidos, atsiranda netikslumų įtampos ir srovės matavimo prietaisų parodymuose.
6. Kai kurių relinių apsaugų klaidingas suveikimas; valdymo, automatikos, telemechanikos ir ryšių sistemų darbo kokybės prastėjimas, kai kada jų sugedimas.

To pasekoje, elektros energijos tiekėjai reikalauja vartotojų slopinti aukštesniųjų harmonikų lygį, t.y. THD pagal standartų rekomendacijas reikia riboti 8% verte.

Trifaziai lygintuviniai imtuvai (kaip ir puslaidininkinis dažnio keitiklis) negeneruoja arba generuoja labai mažą 3-iąją aukštesniąją harmoniką, o taip pat ir aukštesniąsias jos kartotines – 3, 9, 15, 21-ąją..., kurios yra vadinamos trilypėmis harmonikomis. Jų nebūna daugumoje dažninių pavarų (1.3 ir 1.4 paveikslai) [9].

11-osios ir toliau sekančių aukštesniųjų harmonikų įtaka į kreivės formą mažėja iki nereikšmingų dydžių, todėl dažninėse pavarose nesant trilypių lieka 5 ir 7-oji harmonikos, kitaip dar vadinamos dažninių pavarų „juodaisiais arkliukais“. Sumažintas šių dviejų komponentų dydis turėtų teigiamą įtaką kreivės formai.

Harmonikų problema plačiai gvildinama vakarų šalių mokslinių konferencijų straipsniuose [11]. Minima, kad harmonikos tapo neatsiejama vandenviečių, kuriose naudojami puslaidininkiniai dažnio keitikliai, elektros energijos sistemos dalimi. Ne išimtis ir Šiaulių Birutės vandenvietė. Čia įdiegtas ABB firmos dažnio keitiklis, kuris reguliuoja variklio apsisukimus taip, kad vandens tiekimo sistemoje būtų palaikomas optimalus slėgis. Šioje įmonėje buvo atlikta elektros kokybės analizė, kurios metu nustatyta, kad keitiklis generuoja aukštesniąsias harmonikas, tuo darydamas neigiamą įtaką elektros tinklui, bei prie jo prijungtiems įrenginiams. Puslaidininkinių dažnio keitiklių generuojamos harmonikos bei dėl jų atsirandančios problemos yra viena iš priežasčių, paskatinusių imtis šio tiriamojo darbo.

1.5. Galios koeficientas ir galios faktorius

Vienas iš energetinių rodiklių yra galios koeficientas $\cos \varphi$. Jis nusakomas aktyviosios ir pilnosios galios santykiu:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{[kW]}{[kVA]}; \quad (1.11)$$

$\cos \varphi$ nusako kampą tarp sinusinės įtampos ir srovės fazių, o taip pat atspindi reaktyviosios galios sunaudojimą. Jo dydis dažniausiai priklauso nuo elektros variklio nominaliosios galios ir dažniausiai būna apie 0,85. Nepilnai apkrovus variklį sumažėja aktyviosios galios sunaudojimas, tačiau reaktyviosios išlieka nepakitęs. Dėl to mažėja galios koeficiento reikšmė, už ką elektros energijos vartotojas turi papildomai mokėti.

Dažninėms pavaroms yra būdinga iškraipyta sinusoidės forma. Tokiu atveju $\cos \varphi$ bus nusakomas pirmosios (pagrindinės) įtampos ir srovės harmonikos fazių kampu, kai tuo tarpu rezultuojanti įtampa ar srovė bus visų aukštesniųjų harmonikų suma. Tada galios koeficiento sąvoka tampa klaidinga ir įvedamas naujas terminas – galios faktorius λ , kuris įvertina visų harmonikų įtaką pavaros darbo efektyvumui [8]. $\cos \varphi$ ir λ yra ekvivalentūs tik tuomet, kai maitinančiosios įtampos ir srovės kreivės yra sinusinės arba labai panašios į ją formos ir harmonikų įtaka yra labai maža:

$$\cos \varphi = \lambda = \frac{P}{S} = \frac{[kW]}{[kVA]}; \quad (1.12)$$

Šiame tiriamajame darbe naudojamas dažnio keitiklis yra aukštesniųjų harmonikų generatorius, todėl, atsižvelgiant į aukščiau išdėstytą informaciją tolimesniuose skaičiavimuose bus vadovaujama galios faktoriumi λ .

2. ASINCHRONINĖ DAŽNINĖ PAVARA

2.1. Asinchroninis variklis ir jo valdymo dėsniai

Asinchroninis variklis žinomas daugiau kaip 100 metų ir yra gerai ištyrinėtas. Vykstantys jame procesai ir jų matematiniai modeliai smulkiai aprašyti literatūroje apie elektros mašinas bei elektros pavaras. Galima paminėti tik pagrindinius momentus, į kuriuos būtina atsižvelgti valdant elektros variklį.

Pastovaus sukimo momento palaikymui variklyje reikia palaikyti pastovų magnetinį srautą, kuris proporcingas statoriaus apvijų įmagnetinimo srovėms I_s . Kadangi srovės I_s teka per induktyvumą joms galioja dėsnis:

$$I_s \sim E_s / (2 \pi f L_s); \quad (2.1)$$

čia f - dažnis, Hz;

L_s - statoriaus apvijų induktyvumas,

E_s - jų saviindukcijos e.v.j..

Jeigu statorius maitinamas įtampa U_s , tai nekreipiant dėmesio į įtampos kritimą statoriuje ΔU , turime $E_s = U_s$. Iš šio fakto ir formulės 2.1 seka, kad keičiant dažnį pastovaus variklio sukimo momento palaikymui turi būti išlaikyta sąlyga:

$$U_s / f = U_{nom} / f_{nom}; \quad (2.2)$$

Čia U_{nom} , f_{nom} - variklio maitinimo nominali įtampa ir nominalus dažnis.

Variklio valdymas pagal dėsnį (2.2) vadinasi tiesiniu.

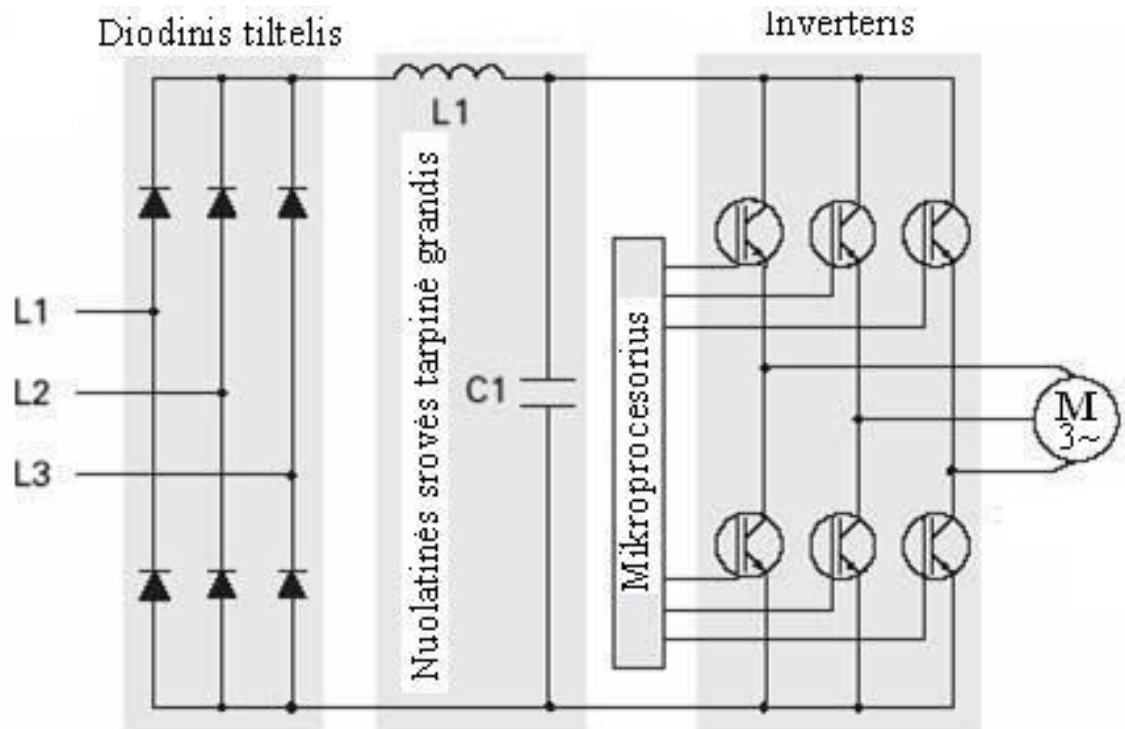
Ventiliatorių ir siurblių variklių atliekamas darbas proporcingas sūkių greičio kvadratui, todėl jų variklių sukimo momentas gali mažėti proporcingai dažniui, ir iš formulės (2.2) seka, kad U_s gali keistis pagal dėsnį, kuris vadinasi kvadratinu valdymu. Kaip teigiama literatūroje apie pavaras [3], valdymas pagal (2.3) dėsnį, sumažina energijos nuostolius variklyje:

$$U_s^2 / f = U_{nom} / f_{nom}; \quad (2.3)$$

Srityse kur svarbios pavarų mechaninės ir dinaminės charakteristikos naudojami keitikliai, kurie jutiklių pagalba fiksuoja esamą variklio būseną, matematinių modelių pagalbą ją įvertina bei parenka įtampą ir dažnį optimaliu būdu. Toks variklio valdymas vadinasi vektoriniu.

2.2. Dažnio keitiklis

Tiriamajame darbe naudojamas Siemens Micromaster Vector dažnio keitiklis su autonomiškai komutuojamais tranzistoriais ir impulsiniu įtampos reguliavimu. Dažnio keitiklio principinė schema pateikta 2.1 paveiksle:



2.1 pav. Siemens Micromaster Vector principinė schema

Norint palengvinti vartotojo darbą ir pagerinti darbo našumą bei tikslumą, keitiklis programuojamas. Programuojami visi keitiklio parametrai. 2.1 lentelėje minimi tik keletas iš jų:

2.1 lentelė

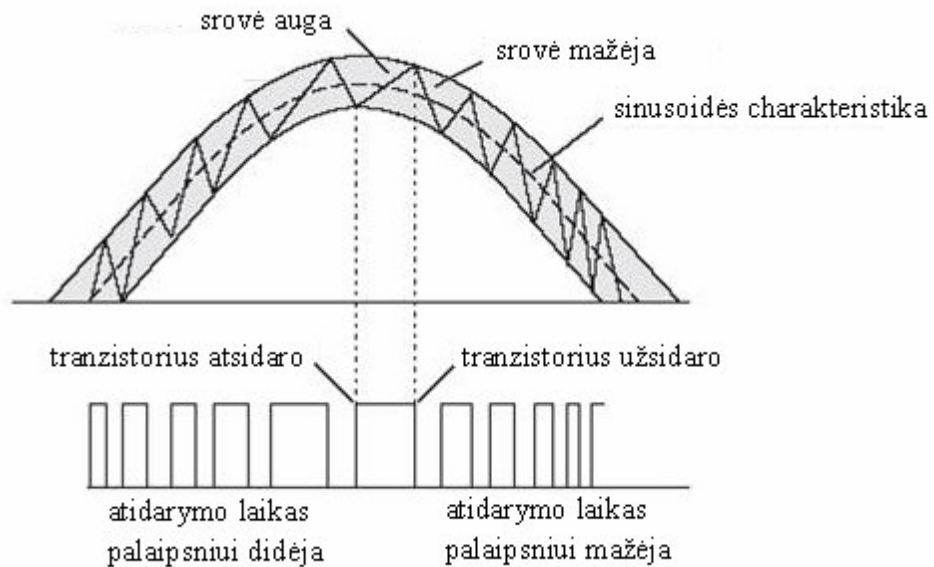
Dažnio keitiklio nustatymai

<i>Parametrai</i>	<i>Diapazonas</i>	<i>Aprašymas</i>
-------------------	-------------------	------------------

P081	0-400[Hz]	Vardinis variklio maitinimo dažnis
P082	0-9999[aps/min]	Vardinis variklio sukimosi greitis
P083	0,1-99,9[A]	Vardinė variklio srovė
P084	0-1000[V]	Vardinė variklio maitinimo įtampa
P085	0-100[kW]	Vardinė variklio galia

2.2.1. Išėjimo įtampos formavimas

Variklio valdymo metu keitiklis turi keisti išėjimo įtampą plačiame ruože. Nors varikliui geriausiai tinka sinusinė įtampa, keitiklio išėjimo elementai dirba rakto režime ir formuoja ją impulsų sekos pavidale. Tinkamai parinkus impulsų sekos parametrus (jų kiekį periode, pradžios taškus ir pločius) galima gauti artimą sinusinei pagrindinę įtampos kreivę, kuri apsprendžia statoriaus srovę:

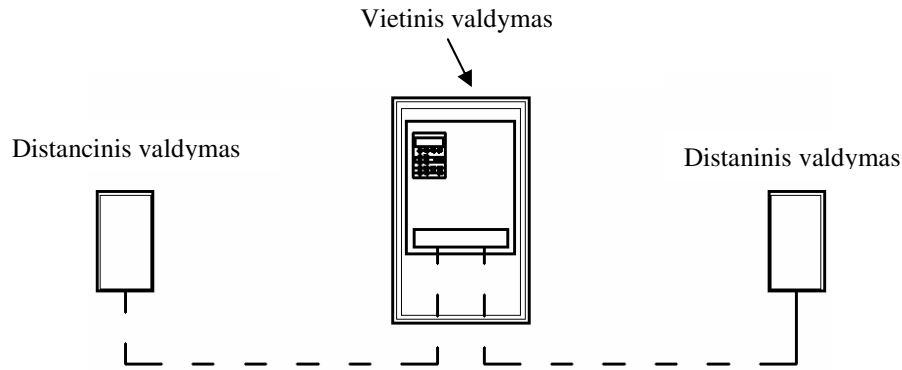


2.2 pav. Įtampos formavimas impulsų sekos metodu

Siekiant pagerinti pavaros energetinius rodiklius, bei sumažinti nuostolius dėl atsirandančių veiksnių pavaros darbo metu, dažnio keitiklyje yra numatytos apsaugos bei valdymai.

2.2.2. Vietinis ir distancinis valdymas

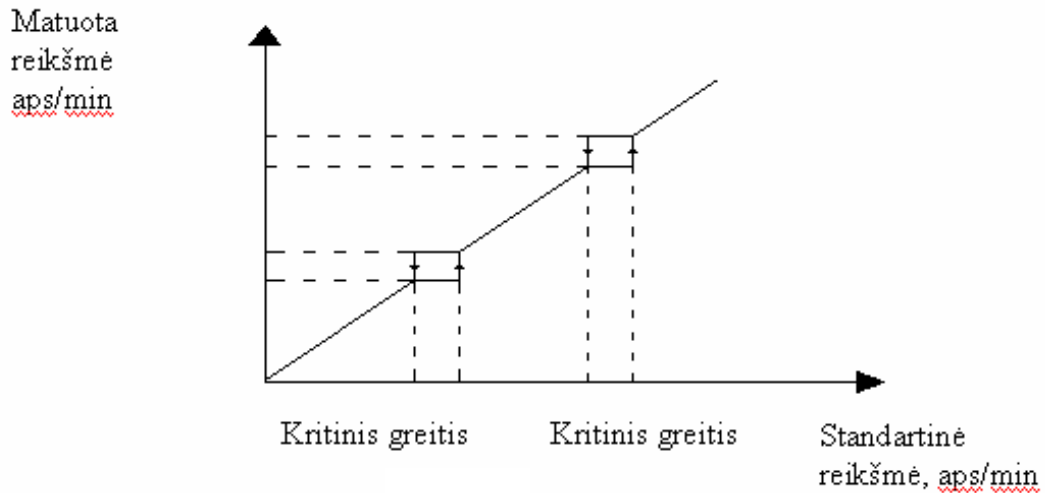
Keitikliai valdomi vietiniu arba distanciniu būdu.



2.3 pav. Valdymo įrenginių išdėstymas

2.2.3. Kritiniai greičiai

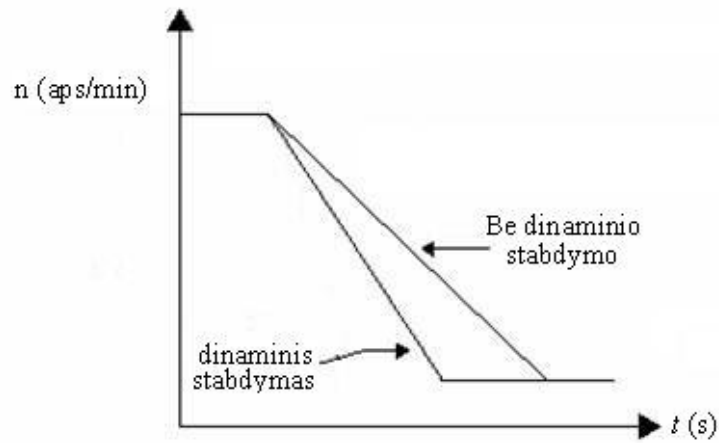
Kai kuriose mechaninėse sistemose prie tam tikrų greičių atsiranda rezonansiniai reiškiniai. Šiems reiškiniams apriboti naudojama šių greičių uždraudimas, t.y. programiškai šie greičiai yra uždrausti ir mechanizmui dirbant ar pereinant į sekantį darbo režimą šie darbo režimai nebus naudojami.



2.4 pav. Kritinių greičių kreivė

2.2.4. Variklio stabdymas

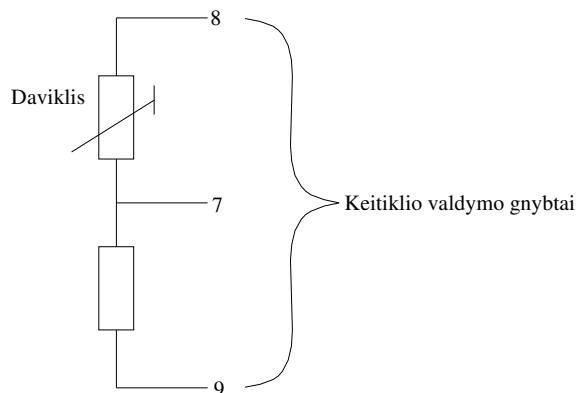
Keitiklis gali užtikrinti greitą variklio stabdymą nuolatine srove (dinaminis stabdymas). Šio proceso metu variklyje išsiskiria šiluma ir variklio velenas laikomas stacionarioje padėtyje iki stabdymo proceso pabaigos.



2.5 pav. Variklio paprastas ir dinaminis stabdymas

2.2.5. Apsauga nuo perkrovų

Variklio rotorui sukantis greičiu, mažesniu už vardinį, prie variklio veleno pritvirtinto ventiliatoriaus aušinimo efektyvumas sumažėja. Dėl šios piežasties daugeliui nepertraukiamu ciklu dirbančių variklių, maitinamų žemo dažnio įtampa, reikia sumažinti apkrovos dydį. Siekiant apsaugoti nuo perkaitimo tokiomis sąlygomis dirbantį variklį, prie jo reikia pritvirtinti termorezistorinį daviklį ir prijungti prie atitinkamų keitiklio valdymo gnybtų:



2.6 pav. Termorezistorinio daviklio prijungimas prie keitiklio valdymo gnybtų

3. ASINCHRONINIO VARIKLIO TYRIMO STENDAS

3.1. Stendo principas

Energetinių rodiklių tyrimui atlikti reikalingas asinchroninės dažninės pavaros stendas. Pagrindinės jo sudedamosios dalys – asinchroninis variklis ir dažnio keitiklis. Komplektuojant stendą, buvo pasirinktas AOJI tipo serijinis asinchroninis variklis. Parenkant tokį variklį buvo siekiama nustatyti energetinius pavaros rodiklius tokiomis sąlygomis, kaip dirba realios pavaros su dažnio keitikliais Lietuvos įmonėse, kurios dėl lėšų stokos, kaip pavyzdžiui AB “Šiaulių vandenys“, esamiems agregatams įrengia šiuolaikinius dažnio keitiklius ir juos eksploatuoja. Šio variklio duomenys pateikti 2.1 lentelėje. Tuo pačiu tikslu buvo pasirinktas Siemens firmos Micromaster Vector dažnio keitiklis, kuris, kaip ir analogiški kitų firmų gaminiai, yra plačiai naudojamas šalies įmonių pavarose.

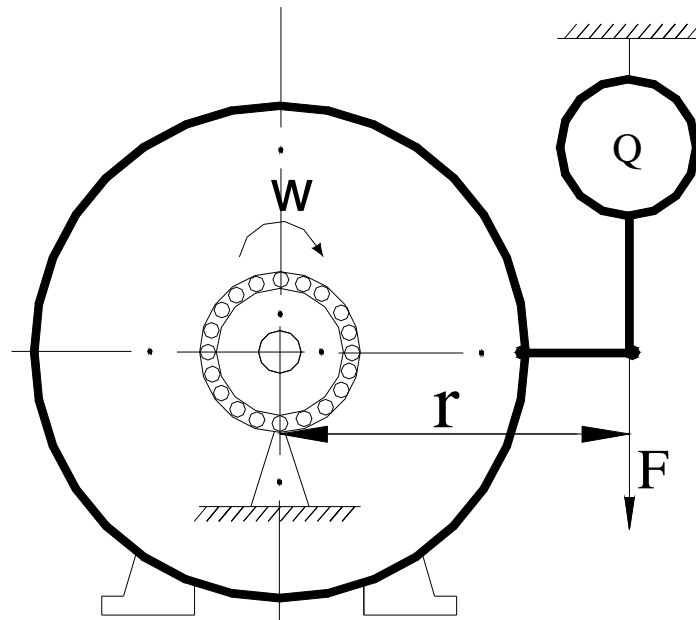
Tyrimui reikalingi duomenys, kurie gaunami pavarai dirbant skirtingais režimais, pvz.: kintant maitinimo įtampos dažniui arba keičiantis apkrovos dydžiui. Pirmoji sąlyga yra išpildoma keitiklio pagalba, antroji – panaudojant reguliuojamą apkrovą ir momentometrą.

Variklio pavaroje esant dažnio keitikliui galima gauti duomenis, kurie leis įvertinti jo įtaką į pavaros darbo efektyvumą. Bandymuose naudojamas puslaidininkinis dažnio keitiklis generuoja aukštesniąsias harmonikas, kurios gali įtakoti į aktyviosios ir reaktyviosios energijos indukcinį skaitiklių bei matavimo prietaisų paklaidas. Dėl šios priežasties numatyta tiriamajame pavaros stende naudoti indukcinis ir impulsinius matavimo prietaisus bei palyginti jų parodymus.

Atsižvelgiant į aukščiau pateiktą informaciją, tiriamajam darbui atlikti buvo padarytas asinchroninio variklio ir dažnio keitiklio pavaros stendas su atitinkamais įrenginiais ir matavimo prietaisais, kurie aptarti žemiau.

3.2. Stendo konstrukcija

Reguliuojama variklio apkrova gali būti realizuojama frikcine mova, elektromagnetiniu stabdžiu, o šiame stende tam tikslui pasirinktas lygiagretaus žadinimo nuolatinės srovės generatorius, kurio velenas mechanine jungtimi sujungtas su asinchroninio variklio velenu. Apkrovos dydis bus keičiamas į generatoriaus žadinimo grandinę įjungus reostatą bei prie generatoriaus maitinimo gnybtų prijungus papildomas varžas. Variklio maitinimo įtampos dažnį keis puslaidininkinis dažnio keitiklis, o apkrovos dydis bus įvertinamas dinamometru, pritvirtintu prie statoriaus (3.1 pav.):



3.1 pav. Apkrovos dydžio nustatymas dinamometru.

- čia w – asinchroninio variklio veleno sukimosi kryptis;
 Q – dinamometras;
 F – dinamometrą veikianti jėga, kN;
 r – dinamometrą veikiančios jėgos peties spindulys, m.

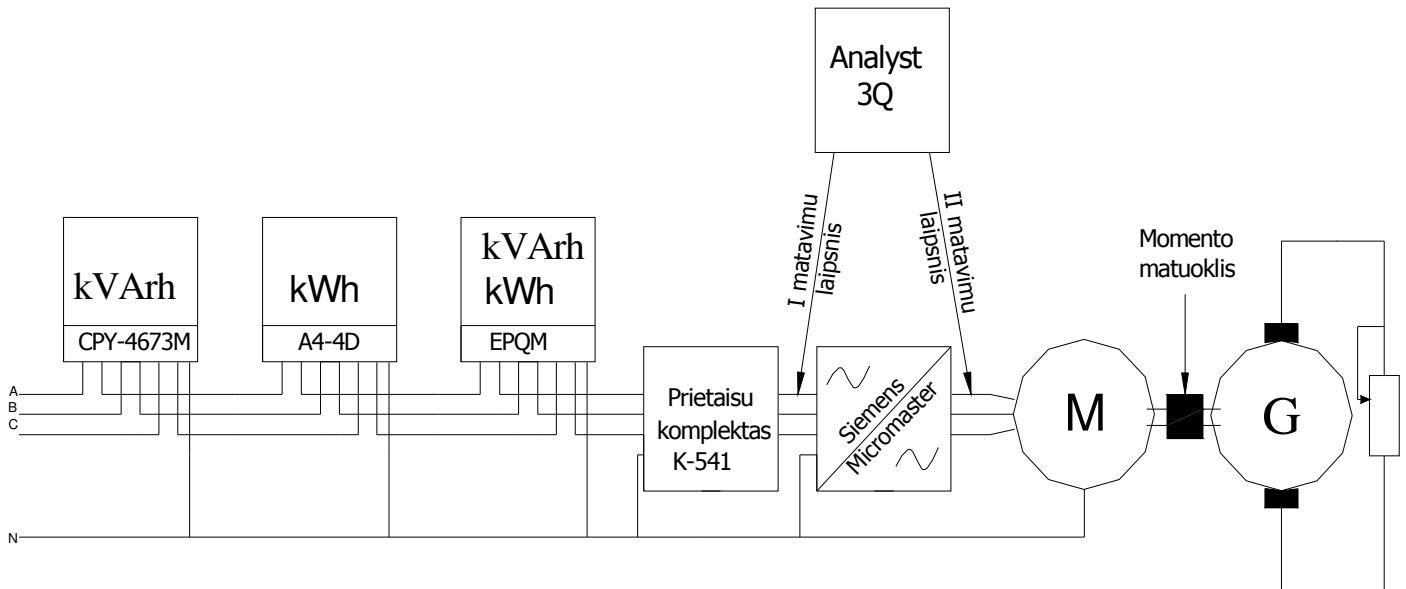
Variklio veleno apsisukimo greitis bus keičiamas puslaidininkiniu dažnio keitikliu Siemens Micromaster Vector, o sūkių dažnis išmatuojamas stroboskopiniu tachometru. Dėl galimos harmonikų įtakos prietaisų parodymams be daugiatarifio elektroninio skaitiklio EPQM šiame stende taip pat bus naudojami indukcinis aktyviosios energijos skaitiklis A4 – 4D, indukcinis reaktyviosios energijos skaitiklis CPY – 4673M bei matavimo kompleksas K – 541. Netiesinių iškreipčių faktoriaus dydis bus nustatomas elektros kokybės analizatoriumi Analyst 3Q, kuris taip pat matuoja aktyviosios, reaktyviosios galios, $\cos \varphi$, galios faktoriaus λ , įtampos, srovės ir kt. parametrų dydžius. Platesnis kiekvieno stende sumontuoto įrenginio bei matavimo prietaiso atliekamų funkcijų ir charakteristikų aprašymas pateiktas 3.1 lentelėje:

3.1 lentelė

Tyrimų stende naudojami prietaisai

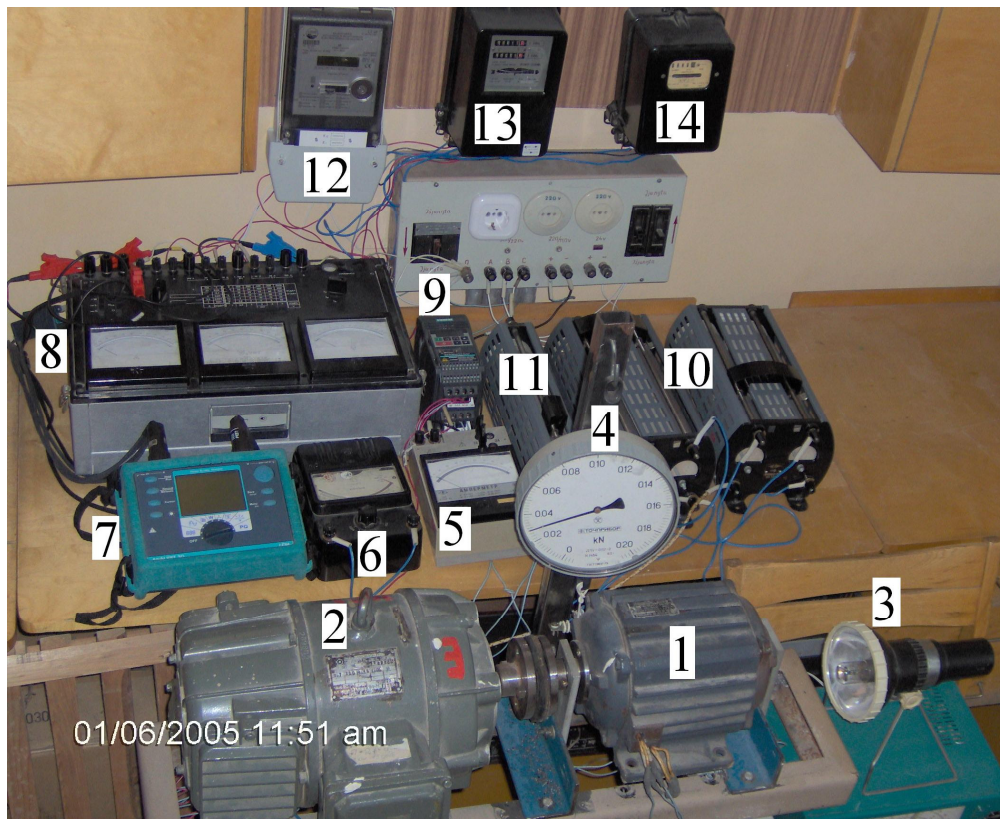
Prietaiso pavadinimas	Tikslumo klasė	Funkcijos, charakteristikos
1. Indukcinis reaktyviosios energijos skaitiklis CPY-4673M	2	Reaktyviosios energijos apskaita
2. Indukcinis aktyviosios energijos skaitiklis A4-4D	2	Aktyviosios energijos apskaita
3. Daugiatarifis elektroninis skaitiklis EPQM 331.01.534	0,5 akt. 1 reakt.	Aktyviosios ir reaktyviosios energijos apskaita, rodo momentines kiekvienos fazės įtampos, srovės vertes, aktyviąją, reaktyviąją ir pilnąją galias, tinklo dažnį ir $\cos\varphi$, gali šių dydžių vertes perduoti per ryšio sąsajas
4. Elektros kokybės analizatorius ANALYST 3Q	-	Aktyviosios ir reaktyviosios energijos apskaita, rodo momentines kiekvienos fazės įtampos, srovės vertes, aktyviąją, reaktyviąją ir pilnąją galias, tinklo dažnį ir $\cos\varphi$, kiekvienos fazės įtampos šuolius, kryčius, pertraukimus, fiksuoja mirgėjimus, įtampos ir srovės harmonikų vertes, fazių kampo nebalansą, įtampos ir srovės oscilogramas. Duomenys gali būti kaupiami atmintyje po to perduoti per ryšio sąsają.
5. Matavimo komplektas K-541	0,5	Įtampos, srovės, aktyviosios ir reaktyviosios galios matavimas
6. Dažnio keitiklis SIEMENS Micromaster Vector 6SE3214-0DA40	-	Trifazių kintamos srovės varilių sukimosi greičio reguliavimas Dažnių reguliavimo diapazonas - 0-650Hz, Galia - 1,5 kW, Apsaugos klasė - IP20
7. Trifazis asinchron. variklis AOJ2-21-2Y3	-	Galia- 1,5 kW Greitis –2890aps/min 50Hz 400V 3,2A $\eta = 0,805$
8. Nuolatinės srovės generator. П-21-94	-	Galia – 0,7kW Greitis -1500 aps/min 4,45A 230V mišraus žadinimo
9. Dinamometras ДПУ-0,02-2	2	Tempimo jėgos matavimas, kN
10. Stroboskopinis tach. 2TCT32-456	0,5	Variklio greičio matavimas

Asinchroninės dažninės pavaros energetinių rodiklių tyrimui sumontuoto stendo supaprastinta schema pateikta 3.2 paveiksle:



3.2 pav. Supaprastinta tyrime naudojamo asinchroninės dažninės pavaros stendo schema .

Tyrime naudojamų įrenginių ir prietaisų nuotrauka pateikta 3.3 paveiksle:



3.3 pav. Tyrime naudojamo stendo nuotrauka

čia: 1 – asinchroninis variklis AOJ12-21-2Y3;

2 – nuolatinės srovės lygiagretoaus žadinimo generatorius II-21-94;

- 3 – stroboskopinis tachometras 2TCT32-456;
- 4 – dinamometras ДПУ-0,02-2;
- 5 – amperimetras, matuojantis nuolatinės srovės generatoriaus žadinimo grandine tekančią srovę;
- 6 – voltmetras, matuojantis įtampos kritimą apkrovos varžose;
- 7 – elektros kokybės analizatorius Analyst 3Q;
- 8 – matavimo komplektas K-541;
- 9 – dažnio keitiklis Siemens Micromaster Vector 6SE3214-0DA40;
- 10 – reostatai, prijungti prie nuolatinės srovės generatoriaus išėjimo gnybtų;
- 11 – reostatas, įjungtas į generatoriaus žadinimo grandinę;
- 12 – daugiatarfisis elektroninis skaitiklis EPQM 331.01.534;
- 13 – indukcinis aktyviosios energijos skaitiklis A4-4D;
- 14 – indukcinis reaktyviosios energijos skaitiklis CPY-4673M.

4. TYRIMO PROGRAMA

Kaip buvo minėta anksčiau, šį tyrimą išprovokavo AB „Šiaulių Vandenys“ atsiradusios problemos, pradėjus naudoti dažnio keitiklius antrojo kėlimo siurblių agregatų reguliavimui. Šioje įmonėje yra naudojama griežta elektros energijos normavimo sistema. Paaiškėjo, kad kai kurių agregatų su dažnio keitikliais elektros energijos naudojimo efektyvumasyra pastebimai mažesnis nei analogiškų agregatų, dirbančių be dažnio keitiklio. Todėl buvo bandyta analizuoti pavaros su keitikliu darbą. Išsamiam tyrimui atlikti eksperimentus su veikiančiu technologiniu agregatu, kuris privalo diktuoti visos vandens tiekimo sistemos darbo režimą, sudėtinga ir beveik neįmanoma, todėl universiteto laboratorijoje buvo atliktas tyrimas panaudojant stendą, aprašytą 3 skyriuje.

4.1. Nereguliuojamo asinchroninio variklio tyrimas

Atliekami matavimai, kurių metu užfiksuoti prietaisų parodymai pavarą maitinant tiesiogiai iš tinklo, nenaudojant dažnio keitiklio. Apkrovos dydis keičiamas trimis pakopomis: tuščioji veika, tarpinis apkrovos taškas, didžiausia apkrova.

4.2. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis 50Hz

Atliekami matavimai, kurių metu užfiksuoti prietaisų parodymai, kai pavara maitinama ne tiesiogiai iš tinklo, bet per dažnio keitiklį. Apkrovos dydis keičiamas trimis pakopomis tuščioji veika, tarpinis apkrovos taškas, didžiausia apkrova.

4.3. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis padidintas

Asinchroninis variklis maitinamas iš dažnio keitiklio. Maitinimo įtampos dažnis padidinamas iki 55Hz. Apkrovos dydis keičiamas trimis pakopomis: tuščioji veika, tarpinis apkrovos taškas, didžiausia apkrova.

4.4. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis sumažintas

Asinchroninis variklis maitinamas iš dažnio keitiklio. Maitinimo įtampos dažnis sumažinamas iki tokių dydžių: 45, 40, 35Hz. Kiekvieno bandymo metu apkrovos dydis keičiamas trimis pakopomis: tuščioji veika, tarpinis apkrovos taškas, didžiausia apkrova. Užfiksuojami prietaisų parodymai.

4.5. Tinklo varžos įtaka

Visi aukščiau išdėstyti tyrimai buvo atlikti, kai agregatas prijungtas prie tinklo, maitinamo iš transformatorinės, turinčios 2x400 kVA galios transformatorius. Tyrimo vietoje fazė – nulio kilpos varža – 0,23 Ω . Vandentiekio agregatas yra 160 kW galios, maitinamas iš 630 kVA transformatoriaus, apkrauto apie 65%. Turint tikslą tyrimo rezultatus palyginti artimomis pavaros, dirbančios vandentiekyje sąlygomis, buvo padidinta tinklo fazė – nulio kilpos varža iki 5,23 Ω . Tokia varža atitinka vandentiekio agregato apkrovos ir tinklo galios santykį, t.y. priimta, kad laboratorijos maitinimo šaltinis yra 10kVA galios.

Dėl aukščiau išvardytų priežasčių, maitinimo tinklo kilpos fazė-nulio varža padidinama 5 Ω . Atliekami bandymai: nereguliuojamas asinchroninis variklis ir asinchroninis variklis maitinamas iš dažnio keitiklio, kai maitinimo įtampos dažnis keičiamas tokiose ribose: 55, 50, 45, 40, 35Hz. Kiekvienas bandymas atliktas esant didžiausiai apkrovai. Užfiksuojami prietaisų parodymai.

5. PAVAROS ENERGETINIŲ RODIKLIŲ SKAIČIAVIMO METODIKA

1. Apkrovos momentas, Nm:

$$M = F \cdot r \quad ; \quad (5.1)$$

čia: F - dinamometrą veikianti tempimo jėga, N
 r - spindulys, m.

2. Pavaros mechaninė galia, W:

$$P_{mech} = \frac{2\pi n}{60} \cdot M \quad ; \quad (5.2)$$

čia: n - variklio veleno apsisukimo greitis, aps/min.

3. Variklio naudingumo koeficientas:

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P} \quad ; \quad (5.3)$$

čia: P - iš tinklo pareikalaujama aktyvioji galia, W.

4. Indukcinio aktyviosios energijos skaitiklio rodoma galia, W:

$$P = \frac{3600}{t_{1aps.} \cdot 240} \quad (5.4)$$

$t_{1aps.}$ - skaitiklio disko vieno apsisukimo laikas, s;

3600 – vienos valandos laikas, s;

240 – skaitiklio disko apsisukimų skaičius, per kurį sunaudojama 1kWh elektros energijos.

5. Indukcinio reaktyviosios energijos skaitiklio rodoma galia, W:

$$Q = \frac{3600}{t_{1aps.} \cdot 450}; \quad (5.5)$$

6. Nominalusis slydimas:

$$S_N = \frac{P_{AL2N}}{P_{emN}}; \quad (5.6)$$

čia: P_{AL2N} - nominaliojo režimo rotoriaus apvijų elektriniai nuostoliai;

P_{emN} - nominalioji elektromagnetinė galia.

7. Statoriaus magnetiniai nuostoliai, W:

$$P_{Fe1} = P_{1.0/5.0} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot (k_{Da} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{dz} \cdot B_{z1} \cdot m_{z1}); \quad (5.7)$$

čia: $p_{1.0/5.0}$ - santykiniai plieno nuostoliai;

f - tinklo dažnis, Hz;

k_{Da} - koeficientas, įvertinantis nuostolius jungo pliene;

B_a - statoriaus jungo magnetinio srauto tankis;

m_a - statoriaus jungo masė;

k_D - koeficientas, įvertinantis nuostolius danties pliene;

B_{z1} - statoriaus danties magnetinio srauto tankis;

m_z - statoriaus danties masė.

8. Rotoriaus magnetiniai nuostoliai, W:

$$P_{Fe2} = P_{pav2} + P_{pul2}. \quad (5.8)$$

9. Rotoriaus paviršiniai nuostoliai, W:

$$P_{pav2} = p_{pav2} \cdot (t_2 - b_{s2}) \cdot Z_2 \cdot l_\delta; \quad (5.9)$$

čia: p_{pav2} - rotoriaus dantų paviršiniai nuostoliai;

t_2 - rotoriaus griovelio žingsnis;

b_{s2} - rotoriaus griovelio prapjovos plotis;

Z_2 - rotoriaus griovelių skaičius;

l_δ - rotoriaus paketo ilgis.

10. Mechaniniai nuostoliai, W:

$$P_{MS} = K_t \cdot \left(\frac{n_1}{10}\right)^2 \cdot D_a^4; \quad (5.10)$$

čia: D_a - statoriaus išorinis skersmuo;

K_t - koeficientas;

n_1 - statoriaus lauko sukimosi greitis.

6. TYRIMO REZULTATAI

6.1. Prietaisų tikslumo tyrimas

Siekiant įvertinti ar aukštesniosios pavarą maitinančios srovės harmonikos įtakoja į tyrime naudojamų matavimo prietaisų rodmenis, buvo atliktas specialus tyrimas. Jo metu palyginti indukcinio aktyviosios energijos skaitiklio A4-4D (tikslumo klasė 2), daugiatarifio elektroninio skaitiklio EPQM (tikslumo klasė 0,5) ir elektros kokybės analizatoriaus Analyst 3Q (tikslumo klasė 0,5) rodmenys didinant apkrovą, kai pavara nereguliuojama, t.y. variklis dirba standartiniame režime ir, kai variklį maitinančios įtampos dažnis keičiamas tokiose ribose: 55Hz, 50Hz, 45Hz, 40Hz, 35Hz. Pastebėta, kad tiriamųjų prietaisų parodymai didėjant apkrovai bei keičiantis dažniui yra labai panašūs, o skirtumas tarp jų svyruoja tarp 1,25-2,8%. Tokių nesutapimų priežastys gali būti:

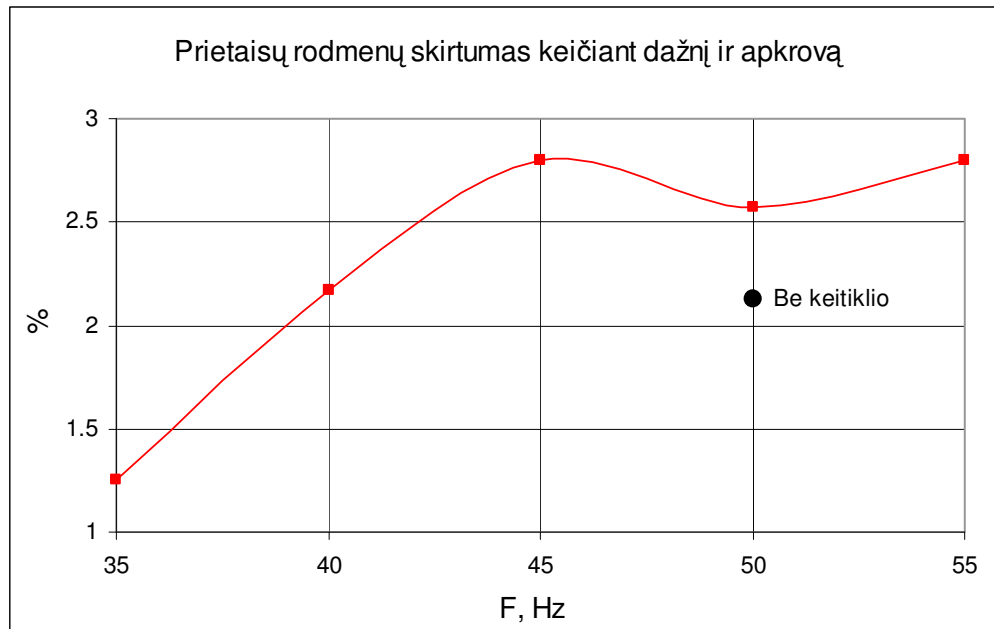
1. Prietaisų rodmenų iškreipis, dėl nevienodos jų reakcijos į srovių aukštesniąsias harmonikas (į srovių kreivės formą).
2. Rodmenų fiksavimo laiko momentu nesutapimas.
3. Prietaisų rodmenų paklaidos, susijusios su jų tikslumo klase.

Žemiau pateiktų grafikų analizė leidžia manyti, kad gautas skirtumas iki 3% gali būti susijęs su visomis išdėstytomis priežastimis. Tačiau, didžiausia tikimybė, kad pagrindinę įtaką turėjo įtampos pokytis rodmenų nuėmimo momentais, todėl, kad įtampa svyruoja nuo 5 iki 12 voltų, o tai jau sudaro 1,25-3%.

Išvada: srovės harmonikų įtakos matavimo prietaisų rodmenims, kurias maitinančiame tinkle sukelia pavaros dažnio keitiklis, galima nevertinti.

Remiantis matavimo patogumu tolimesniuose tyrimo etapuose galima naudoti vieno prietaiso rodmenis.

Gauti prietaisų rodmenų skirtumai pateikti 6.1 paveiksle:



6.1 pav. Prietaisų rodmenų skirtumas, keičiant dažnį ir apkrovą

6.2. Nereguliuojamo asinchroninio variklio tyrimas

Tyrimo tikslas – nustatyti pasirinkto ir įmontuoto į standą asinchroninio variklio natūralius energetinius rodiklius, kurie būtų priimti kaip baziniai ir jų atžvilgiu galima būtų atlikti palyginimą esant kitokiems pavaros darbo režimams.

Kaip buvo išdėstyta aukščiau, tyrimo metu fiksuojami tokie rodikliai:

- Kiekvienos fazės įtampa variklio išėjime U , V;
- Variklio rotoriaus sūkių dažnis n , aps/min;
- Variklio sukimo momentas M , Nm;
- Aktyvioji trifazė galia P , kW;
- Galios koeficientas $\cos \varphi$;
- Galios faktorius λ ;
- Netiesinių įtampos ir srovės iškreipčių faktoriai [THD(U) ir THD(I)], %;
- Reaktyvioji trifazė galia Q , kVAr.

Pagal išmatuotus duomenis skaičiuojama:

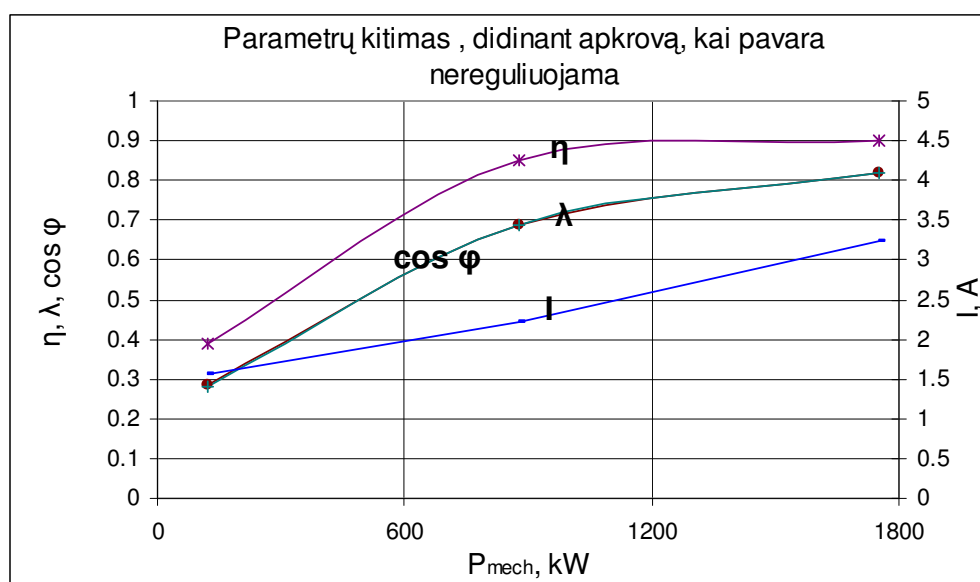
- Variklio mechaninė galia $P_{\text{mech.}}$;
- Elektrinės galios išnaudojimo efektyvumo koeficientas,
- Slydimas s .

Minėti parametrai skaičiuojami pagal 5 skyriuje pateiktas formules. Matavimo ir skaičiavimo rezultatai pateikti 6.1 lentelėje ir 6.2 – 6.4 pav.paveiksluose:

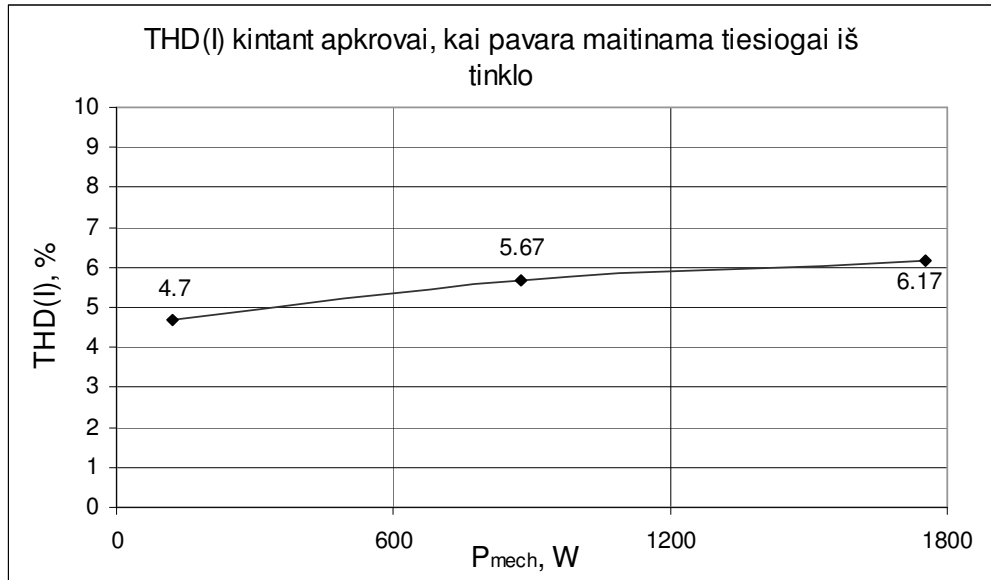
6.1 lentelė

Nereguliuojamo asinchroninio variklio tyrimo rezultatai

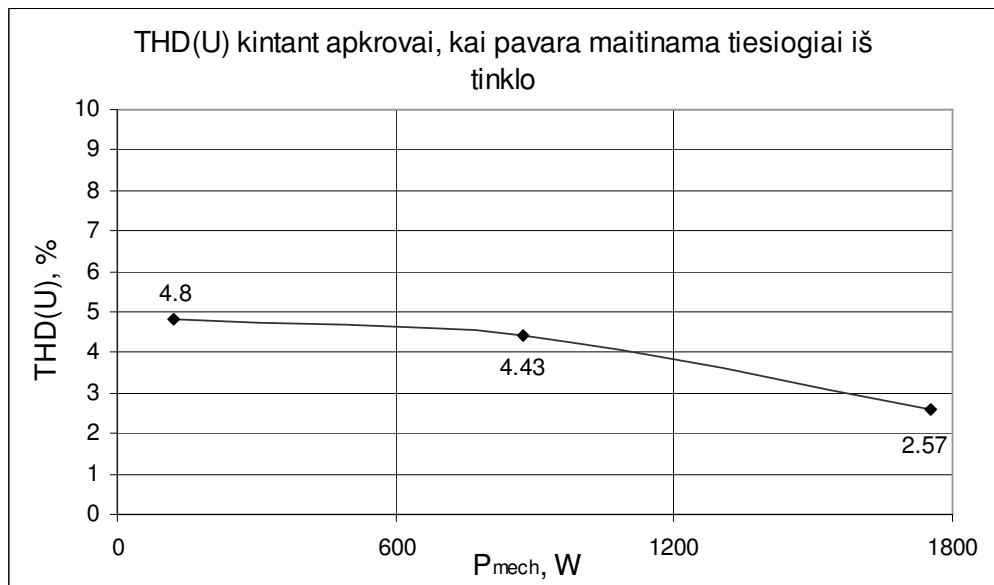
aps/min	S, %	M, Nm	I, A	P, kW	U, V	cos φ	λ	THD(I) %	THD(U) %	P_{mech} , kW	η	Q, kvar
					234							
2965	1.17	3.9	1.57	0,313	235	0.28	0.285	4.7	4.8	0,121	0.387	1,06
					232							
					232							
2930	2.3	25	2.03	0,936	235	0.69	0.689	5.67	4.43	0,767	0.82	1,05
					231							
					235							
2880	4	49	2,8	1,635	238	0.82	0.821	6.17	2.57	1,477	0.903	1,16
					236							



6.2 pav. Parametrų kitimas didinant apkrovą, kai pavara nereguliuojama



6.3 pav. Srovės THD kintant apkrovai nereguliuojamoje pavaroje



6.4 pav. Įtampos THD kintant apkrovai nereguliuojamoje pavaroje

6.3. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis 50Hz

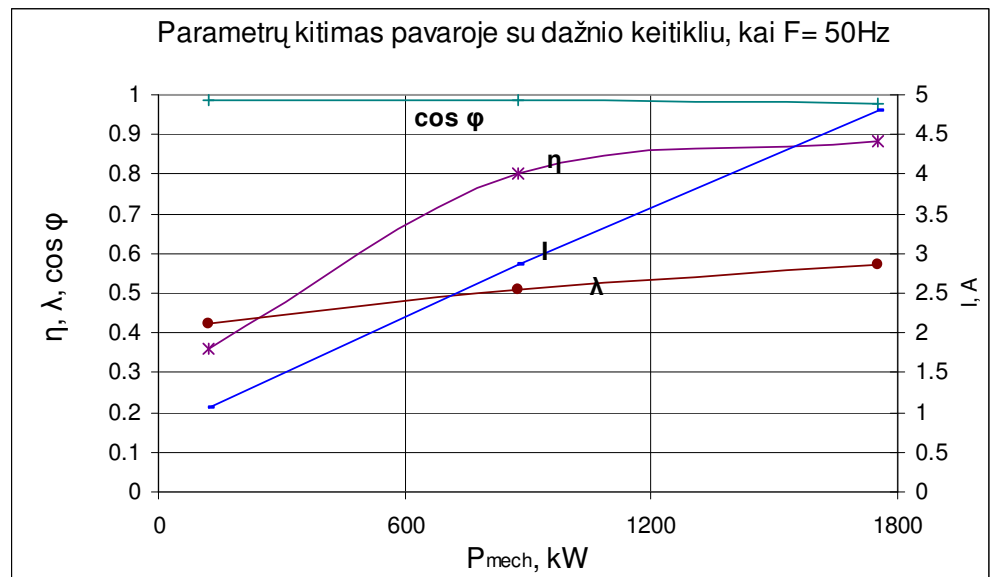
Tyrimo tikslas – nustatyti pasirinkto ir įmontuoto į stendą asinchroninio variklio energetinius rodiklius, kai jis maitinamas iš dažnio keitiklio, maitinimo įtampos dažnį nustatant 50Hz.

Tyrimo metu fiksuojami ir skaičiuojami tokie pat rodikliai, kaip ir aprašyti 6.2. skyriuje.

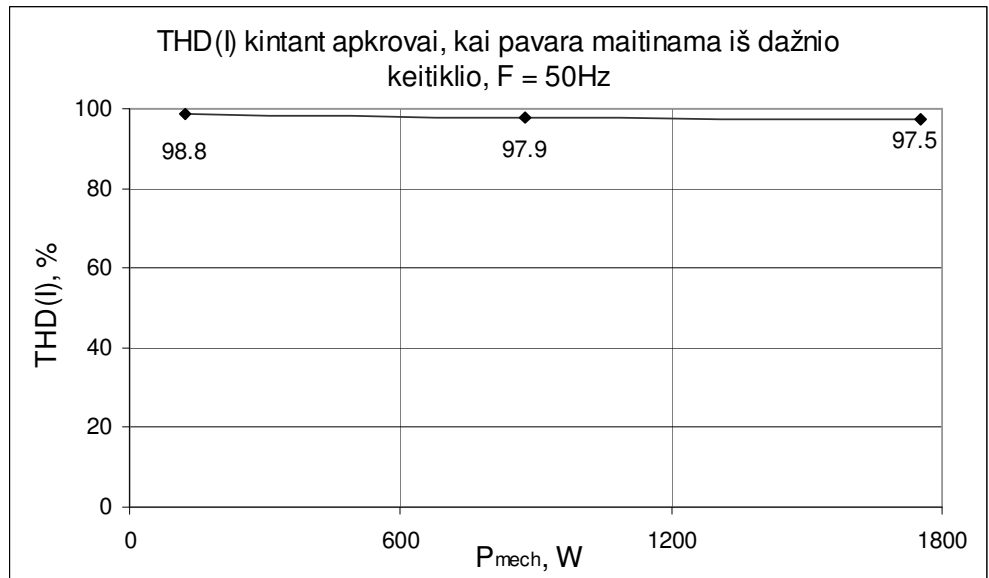
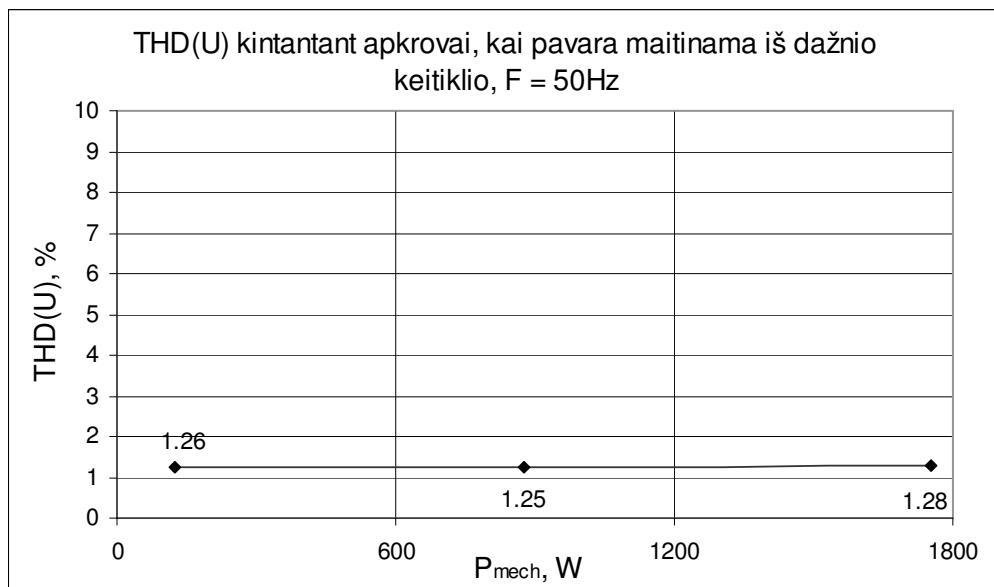
Matavimo ir skaičiavimo rezultatai pateikti 6.2 lentelėje ir 6.5 – 6.7 paveiksluose:

Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu, kai dažnis 50Hz, tyrimo rezultatai

aps/min	S, %	M, Nm	I, A	P, kW	U, V	cos φ	λ	THD(I) %	THD(U) %	P _{mech} , kW	η
					231						
2965	1,17	3,6	1,05	0,309	235	0,99	0,428	98,8	1,23	0,120	0,365
					231						
					232						
2925	2,7	23,5	2,59	0,992	234	0,99	0,509	97,9	1,2	0,720	0,725
					229						
					232						
2890	3,7	50	4,26	1,7	235	0,98	0,57	97,5	1,23	1,512	0,884
					232						



6.5 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai F = 50Hz

6.6 pav. Srovės THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F = 50\text{Hz}$ 6.7 pav. Įtampos THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F = 50\text{Hz}$

6.4. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis padidintas

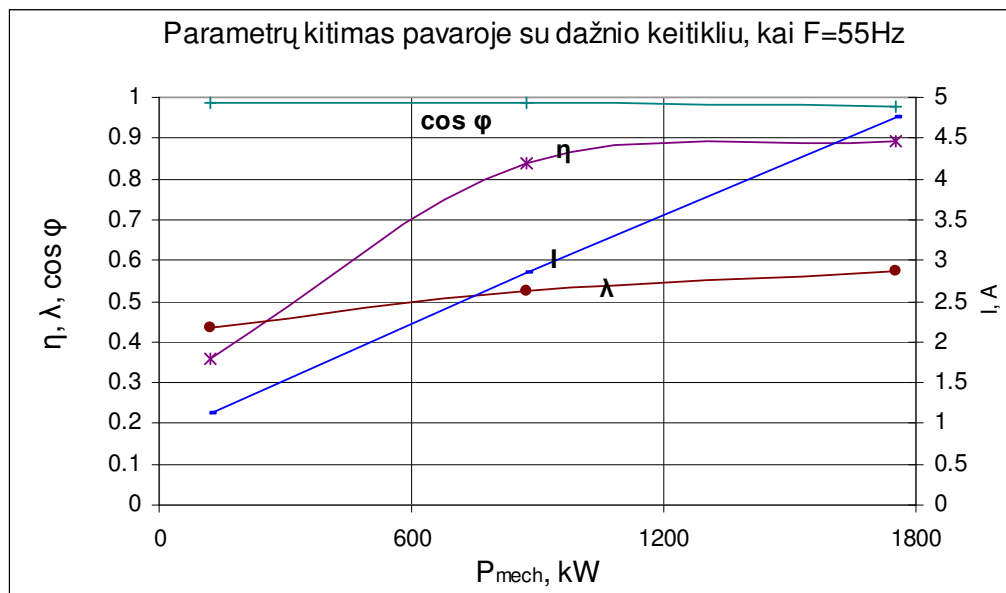
Tyrimo tikslas – nustatyti pasirinkto ir įmontuoto į stendą asinchroninio variklio energetinius rodiklius, kai jis maitinamas iš dažnio keitiklio, maitinimo įtampos dažnį padidinant iki 55Hz.

Tyrimo metu fiksuojami ir skaičiuojami tokie pat rodikliai, kaip ir aprašyti 6.2. skyriuje:

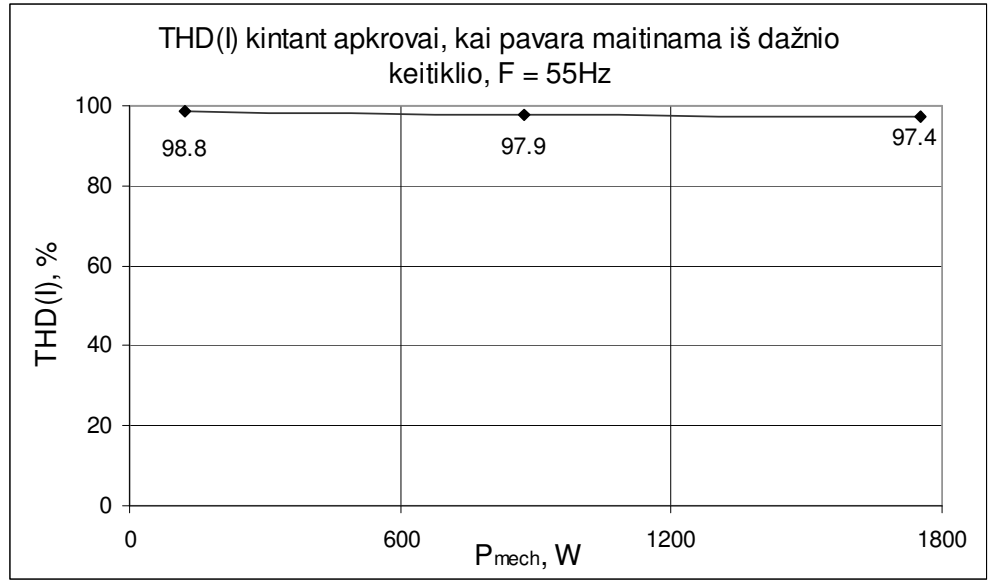
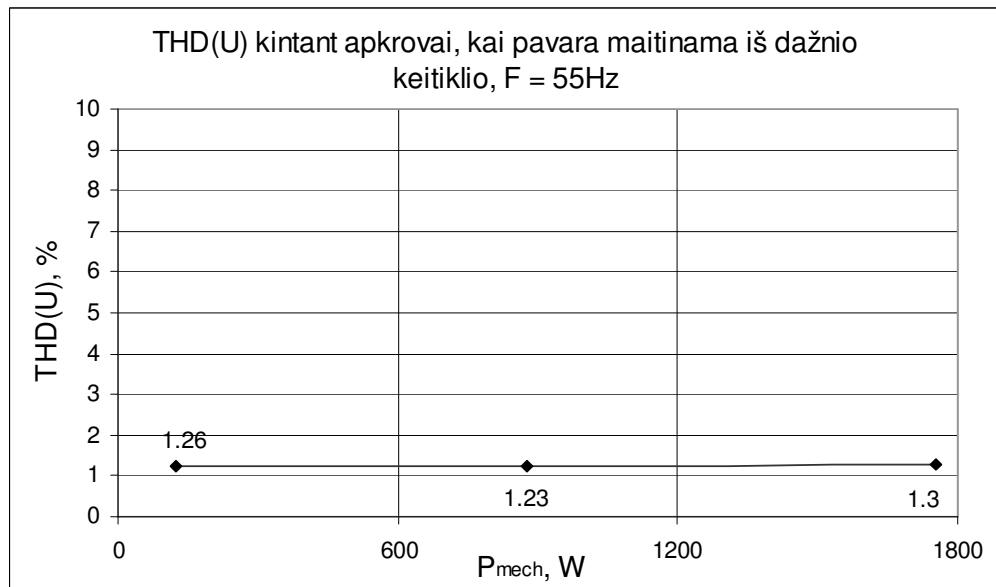
Matavimo ir skaičiavimo rezultatai pateikti 6.3 lentelėje ir 6.8 – 6.10 paveiksluose:

Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo rezultatai, kai dažnis padidintas

aps/min	S, %	M, Nm	I, A	P, kW	U, V	cos φ	λ	THD(I)%	THD(U) %	P _{mech} , kW	η
					232						
3260	1,2	3.6	1,13	0,344	235	0,98	0,437	98,8	1,23	0,123	0,36
					230						
					231						
3220	2,4	29	2,88	1,134	234	0,99	0,526	97,9	1,23	0,977	0,862
					230						
					232						
3160	4,2	53	4,75	1,932	237	0,98	0,574	97,4	1,3	1,753	0,907
					234						



6.8 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai F=55Hz

6.9 pav. Srovės THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F=55\text{Hz}$ 6.10 pav. Įtampos THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F=55\text{Hz}$

6.5. Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis sumažintas

Tyrimo tikslas – nustatyti pasirinkto ir įmontuoto į stendą asinchroninio variklio energetinius rodiklius, kai jis maitinamas iš dažnio keitiklio, maitinimo įtampos dažnis keičiamas tokiose ribose: 45, 40, 35Hz.

Tyrimo metu fiksuojami ir skaičiuojami tokie pat rodikliai, kaip ir aprašyti 6.2. skyriuje.
Matavimo ir skaičiavimo rezultatai pateikti 6.4 – 6.6 lentelėse ir 6.11 – 6.13 paveiksluose:

6.4 lentelė

Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo rezultatai, kai dažnis sumažintas iki 45Hz

aps/min	S, %	M, Nm	I, A	P, kW	U, V	cos φ	λ	THD(I)%	THD(U) %	P _{mech} , kW	η
					232						
2670	1,11	3,6	0,93	0,274	236	0,97	0,418	98,9	1,23	0,101	0,367
					231						
					231						
2640	2,2	23,5	2,23	0,824	234	0,98	0,495	98,1	1,23	0,650	0,79
					230						
					233						
2600	3,7	45	3,66	1,415	236	0,98	0,551	97,6	1,2	1,225	0,887
					232						

6.5 lentelė

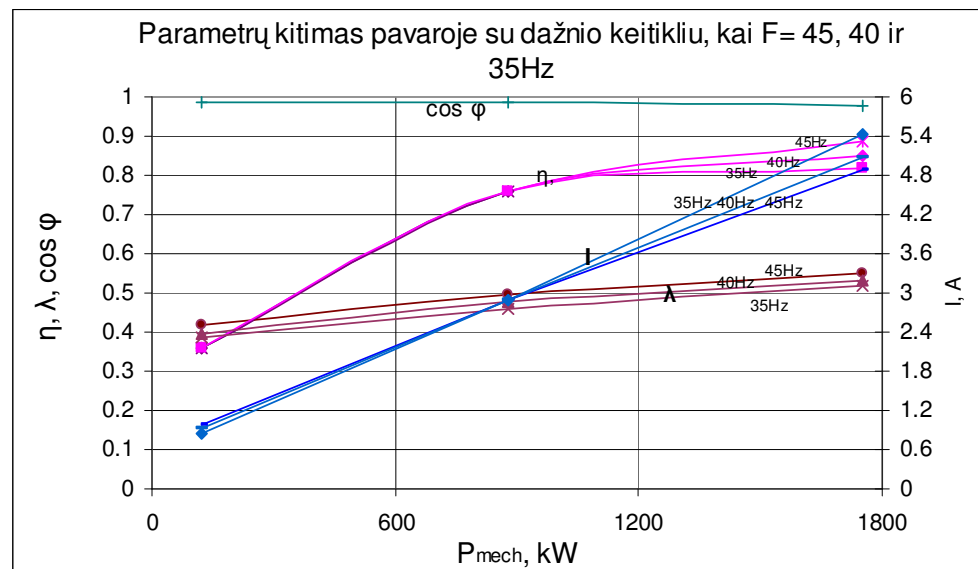
Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo rezultatai, kai dažnis sumažintas iki 40Hz

aps/min	S, %	M, Nm	I, A	P, kW	U, V	cos φ	λ	THD(I)%	THD(U) %	P _{mech} , kW	η
					232						
2380	0,83	3,6	0,85	0,238	236	0,98	0,397	99,2	1,23	0,09	0,367
					231						
					231						
2345	2,3	19,5	1,87	0,628	234	0,98	0,477	98,7	1,23	0,479	0,763
					230						
					233						
2300	4,17	41	3,12	1,168	236	0,98	0,533	98,3	1,3	0,987	0,845
					232						

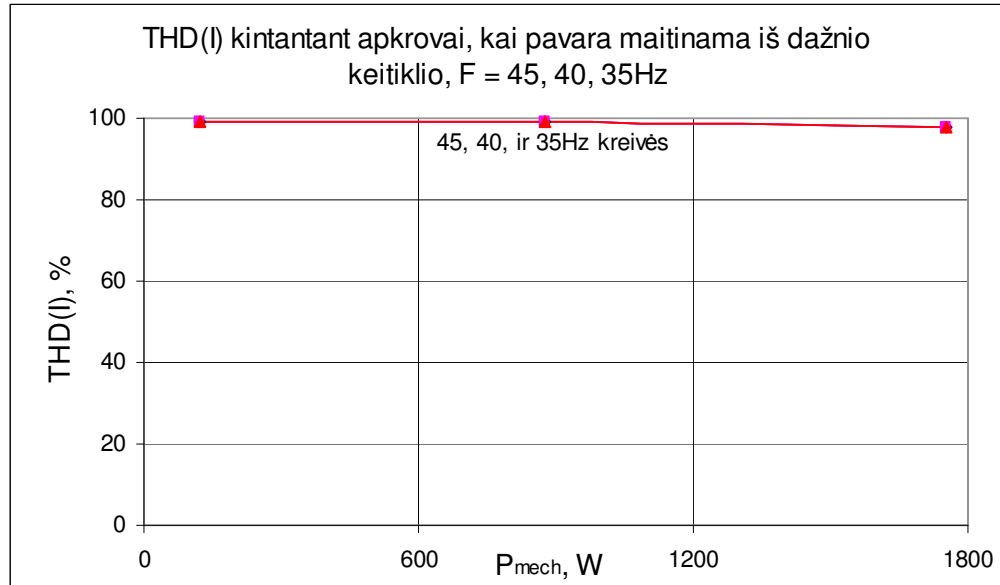
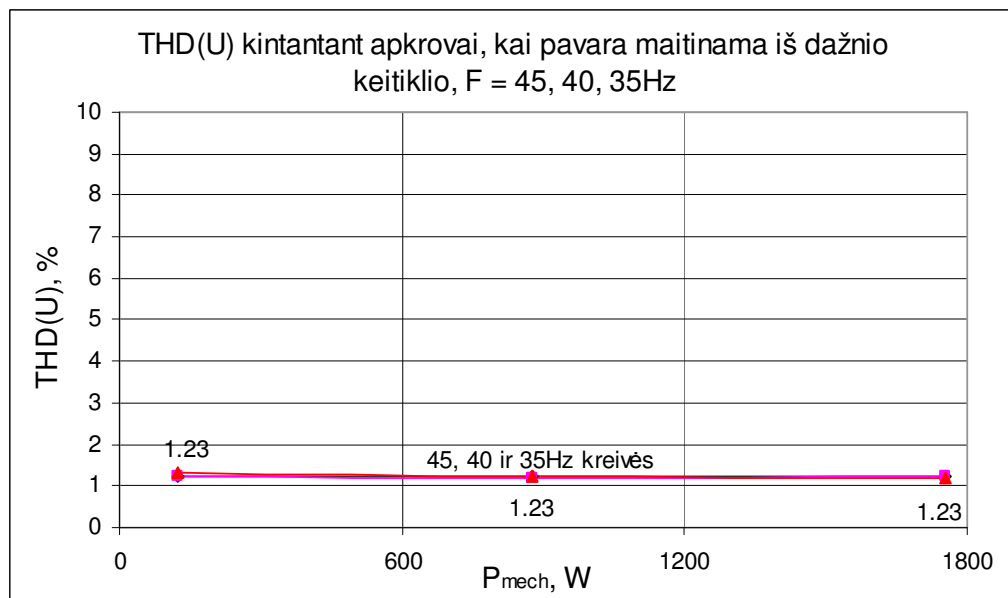
6.6 lentelė

Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo rezultatai, kai dažnis sumažintas iki 35Hz

aps/min	S, %	M, Nm	I, A	P, kW	U, V	cos φ	λ	THD(I)%	THD(U) %	P _{mech} , kW	η
					232						
2070	1,4	3.6	0,77	0,208	236	0,97	0,388	99,2	1,3	0,078	0,367
					231						
					231						
2050	2,4	18	1,57	0,506	234	0,96	0,459	97,8	1,23	0,386	0,763
					230						
					233						
2300	4,5	37	2,61	0,948	236	0,98	0,517	98,9	1,2	0,776	0,819
					232						



6.11 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai F= 45, 40 ir 35Hz

6.12 pav. Srovės THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F = 45, 40$ ir 35Hz 6.13 pav. Įtampos THD pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F = 45, 40$ ir 35Hz

6.6. Tinklo varžos įtaka

Tyrimo tikslas – nustatyti pasirinkto ir įmontuoto į stendą asinchroninio variklio energetinius rodiklius, kai maitinimo šaltinio kilpos fazė – nulius varža padidinta iki $5,3 \Omega$. Atlikti bandymai, kai

pavara nereguliuojama ir, kai asinchroninis variklis maitinamas iš dažnio keitiklio, maitinimo įtampos dažnį keičiant tokiose ribose: 55, 50, 45, 40, 35Hz. Kiekvienas bandymas atliktas esant didžiausiai apkrovai.

Tyrimo metu fiksuojami ir skaičiuojami tokie pat rodikliai, kaip ir aprašyti 6.2. skyriuje:

Matavimo ir skaičiavimo rezultatai pateikti 6.7 lentelėje:

6.7 lentelė

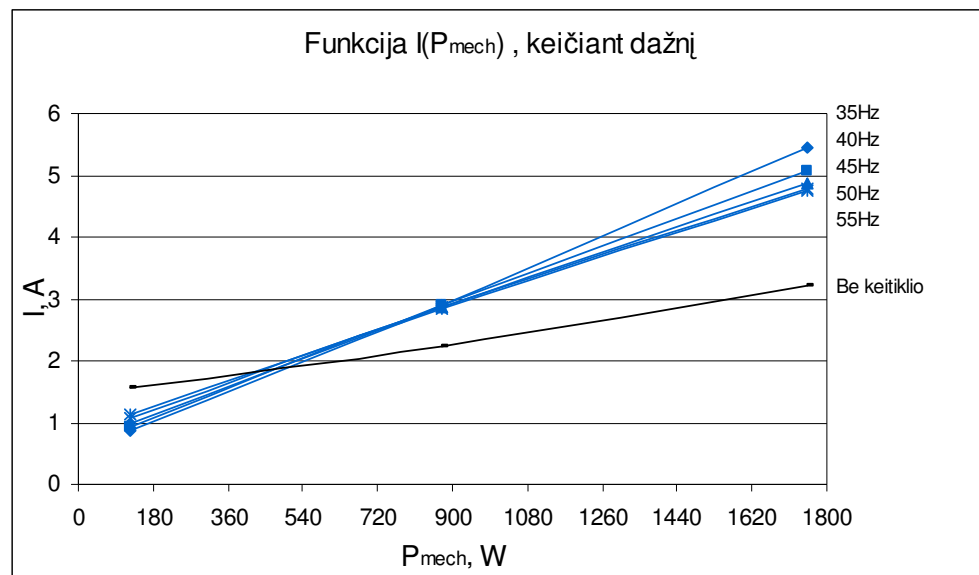
Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo rezultatai, kai kilpos fazė – nulis varža
padidinta

F, Hz	aps/min	S, %	M, Nm	I, A	P, kW	U, V	cos φ	λ	THD(I) %	THD(U) %	P _{mech} , kW	η
						228						
35	2005	4.5	37	1.88	0.936	234	0.99	0.72	92.5	3.23	0.776	0.829
						228						
						226						
40	2295	4.4	41	2.28	1.155	232	0.99	0.742	86.8	3.4	0.985	0.853
						227						
						224						
45	2595	3.9	45	2.68	1.399	229	0.99	0.763	79.3	3.7	1.222	0.87
						226						
						221						
50	2870	4.3	49	3.11	1.64	226	0.99	0.785	73	4.03	1.472	0.898
						224						
						222						
55	3140	4.8	52	3.56	1.907	226	0.99	0.805	69	4.1	1.709	0.896
						222						
						225						
Be keitiklio	2870	4.3	49	2.78	1.616	225	0.853	0.856	5.9	2.73	1.472	0.911
						228						

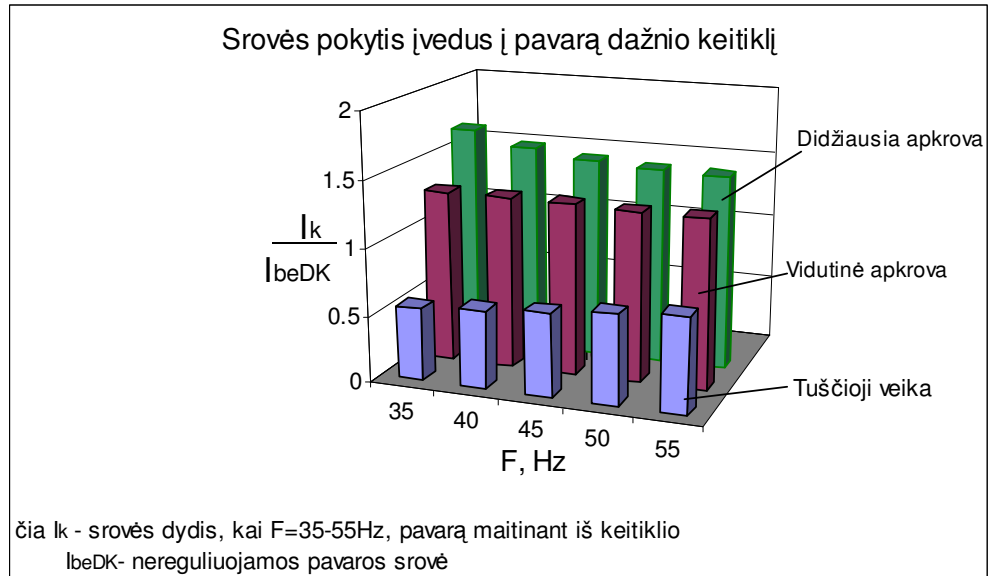
7. TYRIMO REZULTATŲ ANALIZĖ

7.1. Srovių analizė

Lyginant 6 skyriuje pateiktus tyrimo rezultatus matyti, kad esant nereguliuojamai pavarai tuščiosios veikos režime srovė yra didesnė už tapataus režimo srovės, kai variklis maitinamas iš dažnio keitiklio. Tačiau atsiradus apkrovai, ir jai didėjant, reguliuojama pavara tekančios srovės išauga labiau ir kuo mažesnis maitinimo įtampos dažnis, tuo srovės padidėjimas ženklėsnis, pvz.: esant 35Hz srovė didžiausios apkrovos taške išauga 1,7 karto, kuomet dažnis artimesnis nominaliajam, srovės skirtumas yra mažesnis (55Hz – 1,5 karto). Srovės kitimas didėjant apkrovai įvairiuose režimuose pateiktas 7.1 ir 7.2 paveiksluose:



7.1 pav. Srovės kitimas didinant apkrovą ir keičiant darbo režimą

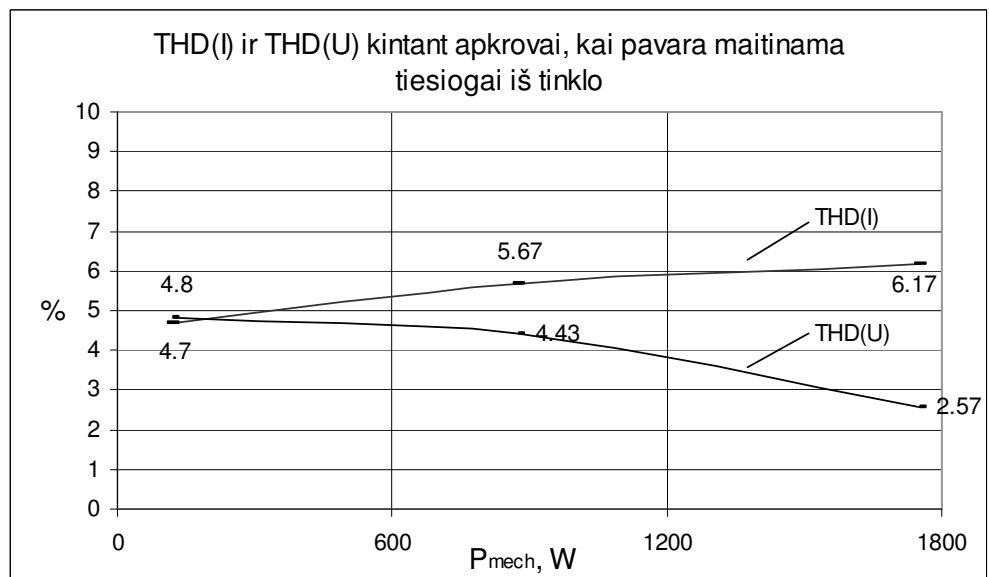


7.2 pav. Srovės pokytis įvedus į pavarą dažnio keitiklį

Norint atsakyti į klausimą, kas įtakoja į tokį srovės kitimo pobūdį, reikia atlikti srovės kreivės priklausomybės nuo apkrovos ir dažnio keitiklio analizę.

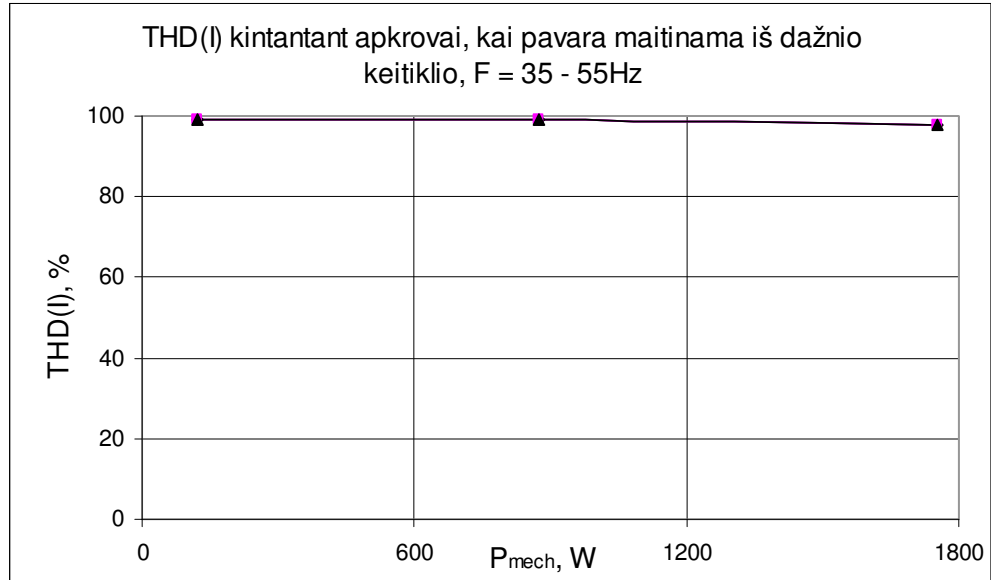
7.2. Netiesinių iškreipimų faktoriaus analizė

Nereguliuojamos pavaros įtampos ir srovės netiesinių iškreipimų faktoriaus dydis kinta siaurose ribose (apie 2%) ir priklauso nuo apkrovos (7.3 pav.):

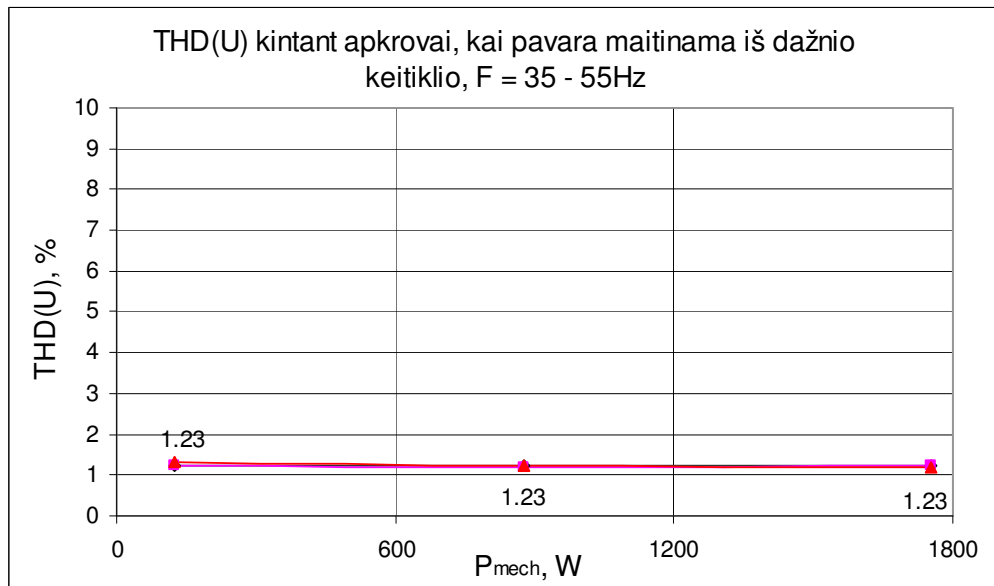


7.3 pav. Srovės ir įtampos THD kitimas nereguliuojamoje pavaroje

Įvedus į pavarą dažnio keitiklį, pastebimas ženklaus srovės netiesinių iškreipių faktoriaus padidėjimas (~20 kartų), kuris visuose darbo režimuose beveik nekito ir jo dydis buvo ~98%, tuo tarpu įtampos THD dydis visais darbo režimais buvo apie 1,23%, o keičiantis apkrovai bei dažniui kito labai neženkliai: (7.4 ir 7.5 pav.):

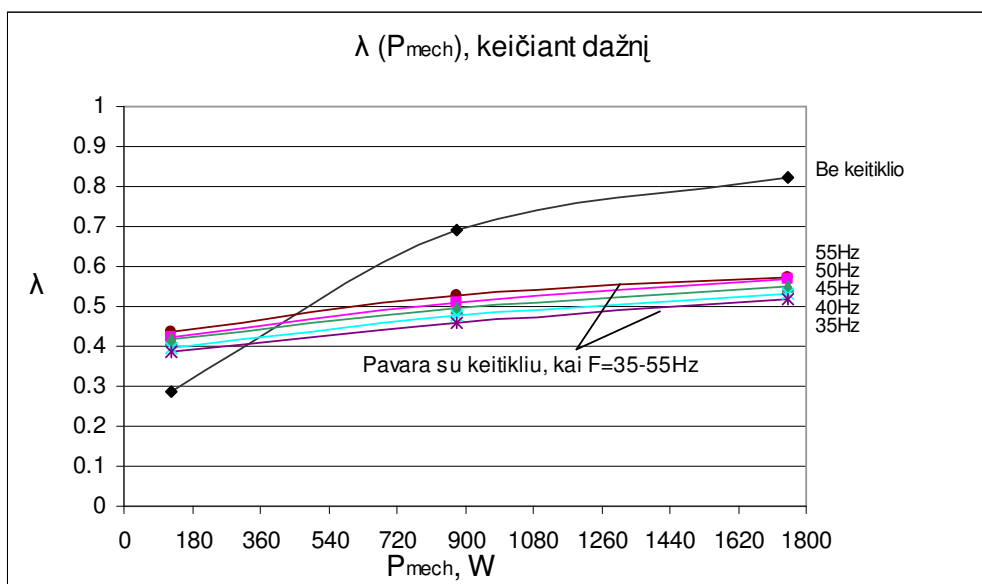


7.4 pav. Srovės THD kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F=35-55\text{Hz}$



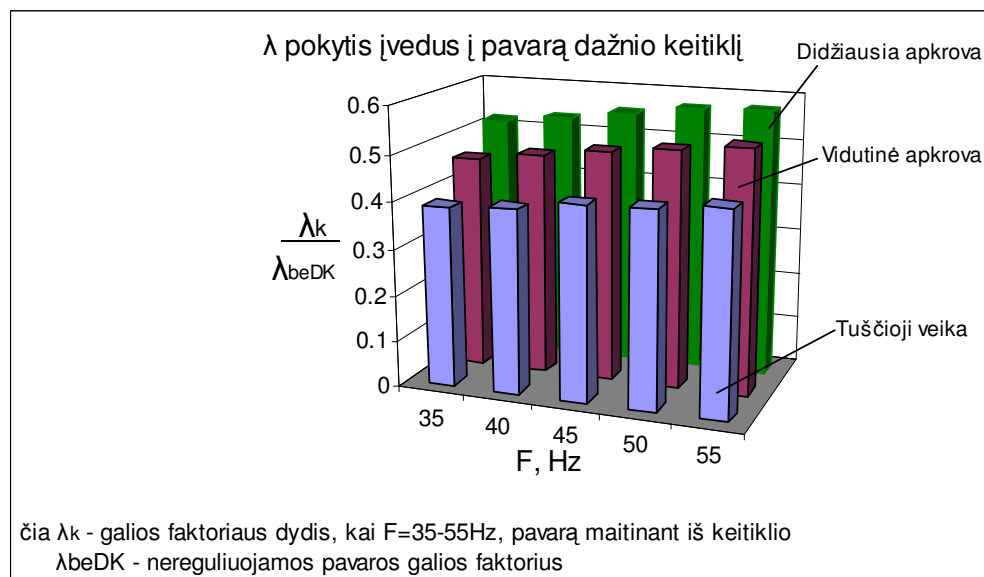
7.5 pav. Įtampos THD kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F=35-55\text{Hz}$

7.3. Galios faktoriaus analizė



7.6 pav. Galios faktoriaus kitimas įvedus į pavarą dažnio keitiklį

Kaip matyti 7.3 paveiksle, kintant apkrovai 350 ÷ 400W diapazone, galios faktorius λ nereguliuojamoje pavaroje yra mažesnis ir labiau priklauso nuo apkrovos. Didėjant apkrovai pavaroje su dažnio keitikliu galios faktorius tampa mažesnis ir didžiausios apkrovos režime skirtumas tarp λ siekia ~ 1,4 karto (7.4 pav.):

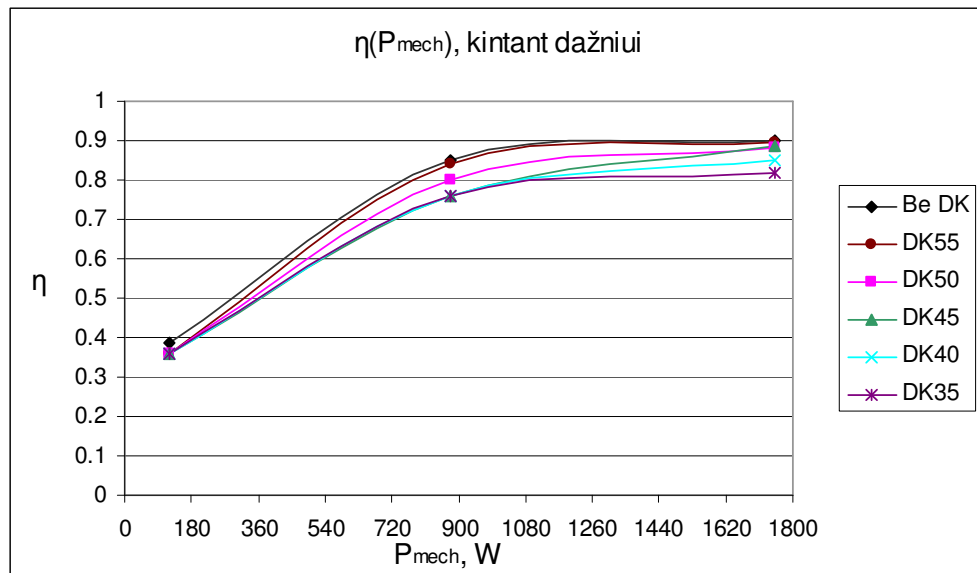


7.6 pav. Galios faktoriaus pokytis įvedus į pavarą dažnio keitiklį

Galios faktoriaus λ didėjimas gali būti paaiškinamas tuo, kad kai kurios aukštesniosios harmonikos laiko ir erdvės atžvilgiu kuria sukimo momentą, didinantį mechaninę galią P_{mech} .

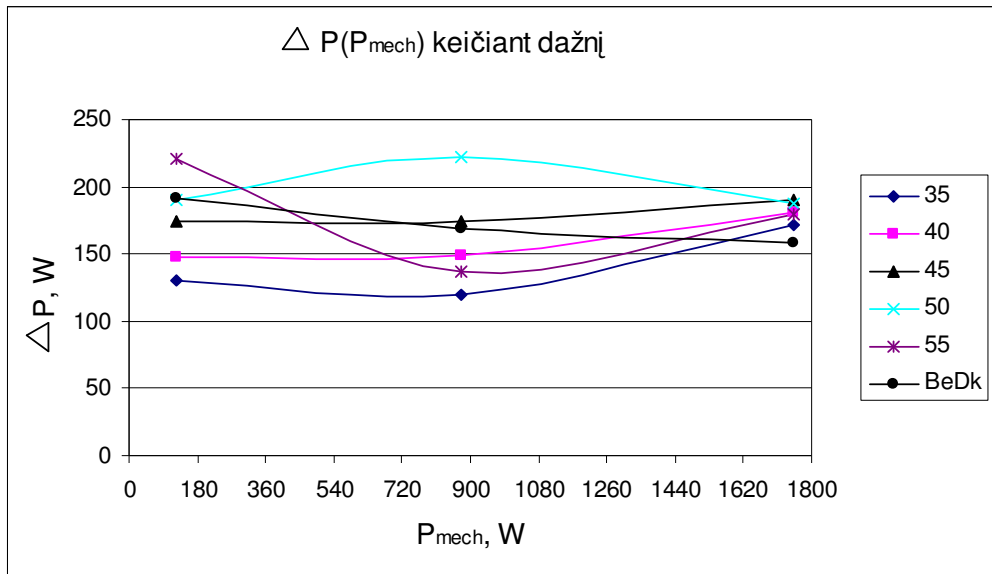
7.4. Naudingumo koeficiento analizė

Naudingumo koeficientas yra didesnis visuose apkrovos taškuose, kai pavara maitinama tiesiogiai iš tinklo. Pavara maitinant iš dažnio keitiklio, η labiausiai sumažėja vidutinių ir didžiausių apkrovų režimuose, esant mažiems dažniams, tuo tarpu, kai maitinimo įtampos dažnis padidintas iki 55Hz, šis parametras yra beveik toks pat kaip ir nereguliuojamoje pavaroje ir tai aiškiai matyti 7.8 paveiksle:



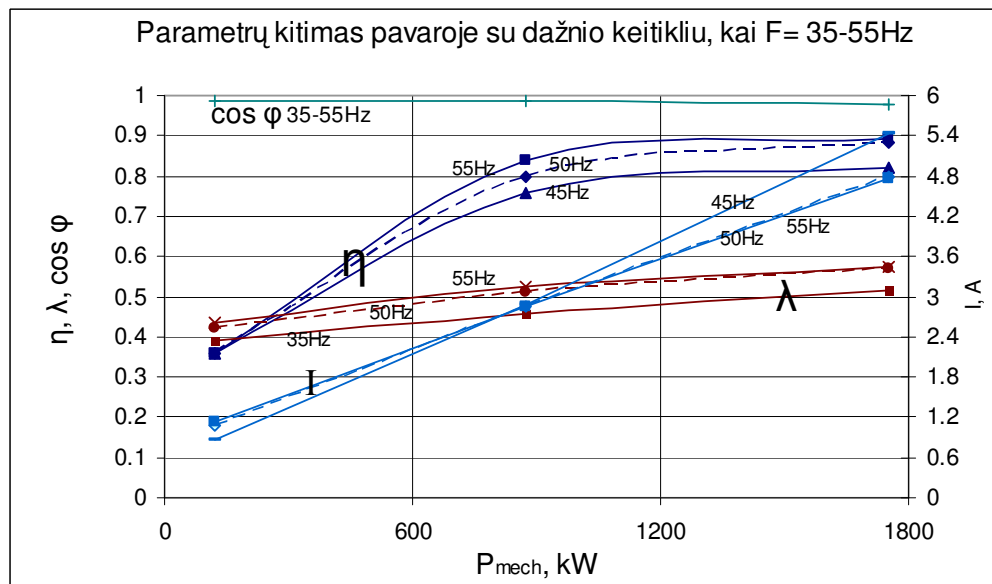
7.8 pav. Naudingumo koeficiento kitimas įvedus į pavara dažnio keitiklį

Nuostoliai pavaroje susideda iš nuostolių variklyje ir dažnio keitiklyje. Nuostoliai variklyje yra elektriniai, magnetiniai ir mechaniniai. Atliekant tyrimą buvo bandoma skaičiavimo metodais analizuoti nuostolius pagal jų prigimtį, tačiau susidūrus su srovės kreivės formos iškreipimais teko šio kelio atsisakyti ir naudingumo koeficiento pokytį vertinti pagal bendrus nuostolius, kurie gaunami kaip skirtumas tarp elektrinės ir mechaninės galios. Kaip matyti 7.7 paveiksle, šie nuostoliai yra 200W eilės ir nuo apkrovos mažai priklauso. Nuodugnesnė nuostolių, o tuo pačiu ir naudingumo koeficiento analizė gali būti atlikta, darant išsamesnius tyrimus ateityje.



7.9 pav. Pavaros galios nuostoliai esant skirtingiems darbo režimams

Visų šiame skyriuje analizuotų parametų priklausomybė nuo P_{mech} pavaizduota 7.10 paveiksle:

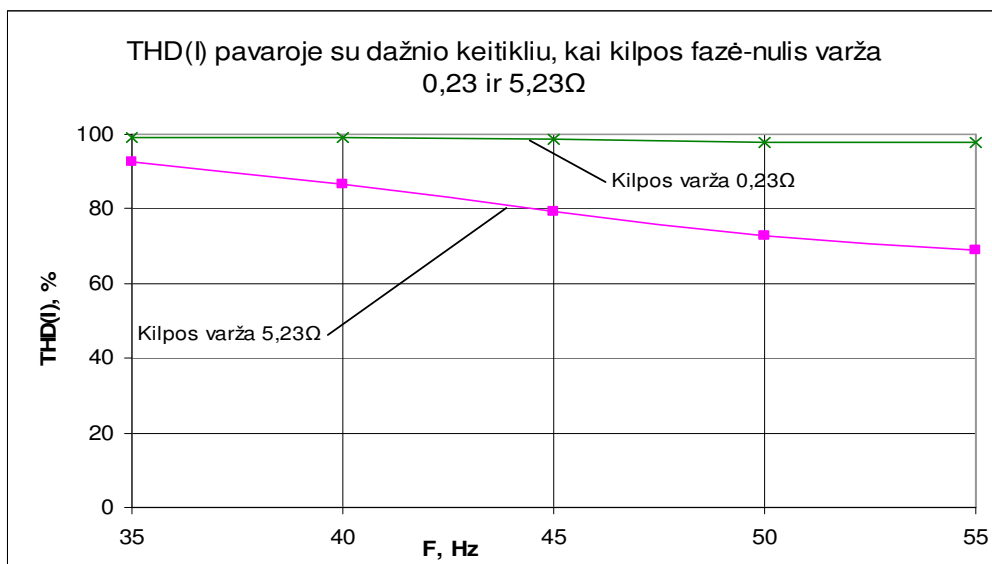
7.10 pav. Parametų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai $F = 35-55\text{Hz}$

Atliekant tyrimą pastebėta, kad daugiatarafis elektroninis skaitiklis EPQM pateikia informaciją apie didelę $\cos \phi$ reikšmę, bet tai nesiderina su to paties prietaiso rodoma srove, t.y. gaunama klaidinga informacija apie galimus energijos nuostolius maitinančiame tinkle. Keitiklius gaminančių firmų

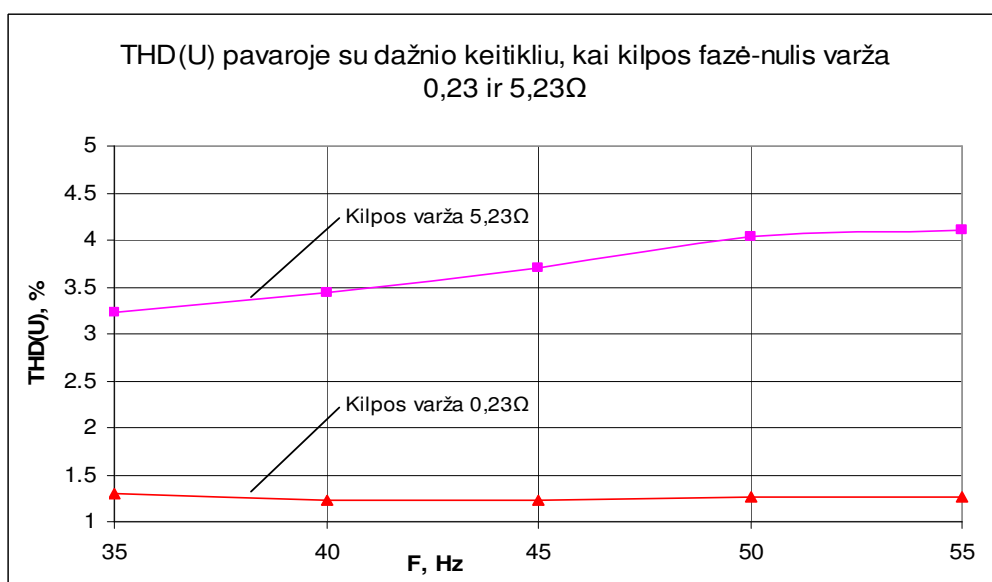
informacija apie tai, kad gaminys turi $\cos \varphi$ kompensavimo įrenginį (palaiko $\cos \varphi$ apie 0,96-0,98), turi būti teisingai suprasta.

7.5. Tinklo varžos įtakos analizė

Padidinus maitinimo šaltinio kilpos fazė – nulius varžą pastebimas ženklus įtampos ir srovės netiesinių iškreipčių faktorius pokytis (7.11 ir 7.12 pav.):



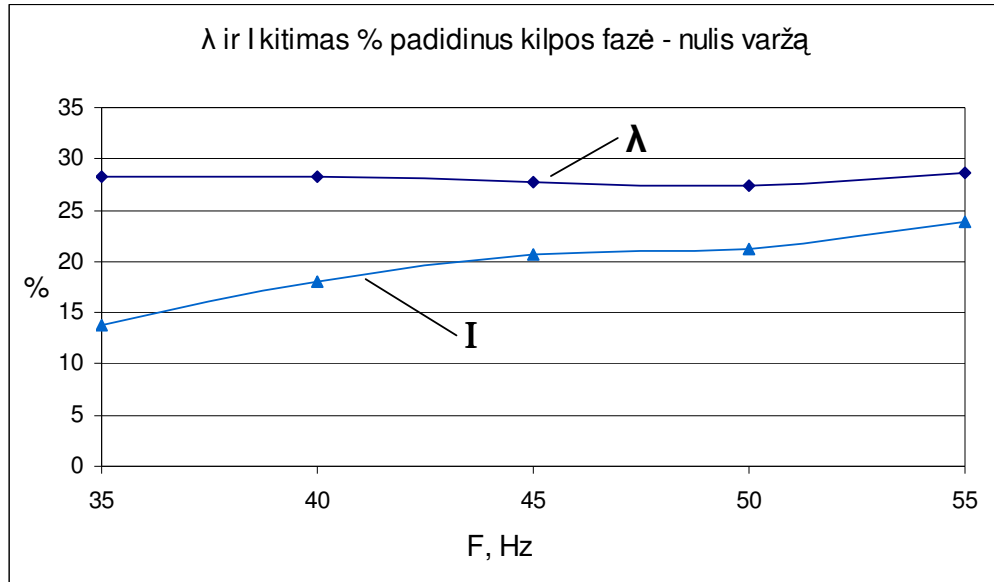
7.11 pav. Srovės THD kitimas padidinus kilpos fazė – nulius varžą



7.12 pav. Įtampos THD kitimas padidinus kilpos fazė – nulius varžą

Absoliutinėmis reikšmėmis įtampos THD padidėjo nuo 1,3 iki 4%, o srovės THD sumažėjo nuo 98 iki 69%, kai pavaros maitinimo įtampos dažnis 55Hz. Didesnis srovės THD sumažėjimas yra prie aukštesnių dažnių, tuo tarpu prie 30Hz šis sumažėjimas mažesnis (nuo 98 iki 93%).

Analizuojant padidintos kilpos varžos įtaką į kitus parametrus, pastebimas galios faktorius λ padidėjimas iki 30% visų dažnių diapazone, kai tuo tarpu srovė kintant sumažėjo ~15-25% (7.13 pav.):



7.13 pav. Srovės bei galios pokytis pavaroje su dažnio keitikliu, kai kilpos fazė – nulis varža padidinta

IŠVADOS IR SIŪLYMAI

Pagrindinės šio tiriamojo darbo išvados gali būti suformuluotos taip:

1. Pavaros naudingumo koeficientas priklauso nuo apkrovos ir nuo dažnio diapazono. Apkrovoje nuo 50 iki 100% šis rodiklis telpa 0,8 – 0,9 ribose. Atsižvelgiant į tai, kad tirtas eilinis, senas asinchroninis variklis, kurio vardinis naudingumo koeficientas pagal paso duomenis yra 0,805 galima teigti, kad dažnio keitiklio keitiklis panaudoto variklio naudingumo koeficiento nesumažino.
2. Suminiai galios nuostoliai pavaroje turi pastoviųjų nuostolių charakterį, nuo vardinės galios sudaro apie 13% ir nuo apkrovos beveik nepriklauso.
3. Pavara su dažnio keitikliu reikalauja iš tinklo didesnės srovės, nors elektros skaitiklio ir kitų matavimo prietaisų nurodomas $\cos \varphi$ yra artimas vienetui. Norint įvertinti pavaros keliamus nuostolius tinkle ir maitinimo šaltinyje, reikia naudoti ne $\cos \varphi$, bet galios faktorių λ .
4. Galios koeficientą $\cos \varphi$ dažnio keitiklis palaiko 0,98 – 0,96 ribose visame tirtų apkrovų diapazone.
5. Galios faktorius λ yra nedidelis, jo didumas siekia 0,4 – 0,6. Didėjant apkrovai λ didėja.
6. Netiesiniai iškreipiai nuo apkrovos nepriklauso, nuo dažnio taip pat. Įtampos THD yra apie 1,3%, o srovės – 98%.
7. Maitinančio tinklo varža ir šaltinio galia įtakoja į pavaros energetinius rodiklius. Pastebimas ženklus srovės sumažėjimas ir galios faktoriaus padidėjimas (apie 30%). Įtampos THD padidėja apie 3 kartus, srovės THD sumažėja apie 30%, o tai ir yra pagrindinė srovės sumažėjimo ir galios faktoriaus λ padidėjimo priežastis.

Elektrinės pavaros tyrimas yra sudėtingas procesas, reikalaujantis šiuolaikiškų matavimo priemonių ir įrangos. Bandytas eilinėje fakulteto laboratorijoje, naudojant keletą modernesnių matavimo prietaisų, neleidžia atlikti nuodugnesnio tyrimo, o gauti matavimo rezultatai nėra pakankamai patikimi. Todėl, kai kuriais atvejais daromos išvados gali būti klaidingos ir jas reikėtų patikrinti atliekant keletos skirtingų galių variklių tyrimus su skirtingais dažnio keitikliais. Labai svarbu, kad laboratorija turėtų stabilizuotos sinusinės įtampos trifazį šaltinį.

Tyrimai parodė, kad maitinančio tinklo varža ir šaltinio galia turi didelę įtaką į tyrimo metu gaunamus rezultatus. Norint atsakyti į darbo pradžioje minėtą „Šiaulių Vandenu“ klausimą, reikėtų tirti visą elektros tiekimo sistemą su reaktyviosios galios kompensavimo įrenginiais ir pavara, bei aukštesniųjų harmonikų filtrais.

LITERATŪRA

1. Geleževičius V. Elektros pavarų valdymo sistemos / V.Geleževičius, K.Kriščiūnas, V.Kubilius. Vilnius, 1990. 358p. ISBN 5-420-00288-4
2. Kostrauskas P. Asinchroninės elektros mašinos. Kaunas, 2004. 115p. ISBN 9986-13-425-0
3. Marazas S. Elektros mašinos. Vilnius, 1989. 303p. ISBN 7548-51-452-3
4. Ключев В.И. Теория электропривода. Москва, 1998. 697p. ISBN 5-283-00642-5
5. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода / М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. Москва, 1992. 532p. ISBN 5-187-000412-1
6. Булгаков А. А. Частотное управление асинхронными двигателями. Москва, 1989. 216p. ISBN 3-701-00122-8
7. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Москва, 1984. 240p. ISBN 1-958-00011-21
8. Mauri Peltola. Improving poer factor with variable speed AC drives. 2003, liepa [žiūrėta 2005-02-05]. Prieiga per Internetą: <http://www.ecmweb.com/powerquality/>
9. Rockwell Automation Mequon. Straight talk about PWM AC Drive harmonic problems and solutions. 2004, spalio [žiūrėta 2005-01-23]. Prieiga per Internetą: <http://www.ab.com/drives/techpapers/Harmonicsbasics.pdf>
10. Francis J. Martino. Elusive Energy Savings: Centrifugal Pumps and Variable Speed Drives - Part I. 2002, lapkritis [Žiūrėta 2004-09-28]. Prieiga per Internetą: http://www.powerqualityanddrives.com/energy_savings_pump_vfd_part_1/
11. <http://search.epnet.com/>
12. Ian C Evans. Reducing harmonic distortion. 2003, rugsėjis [Žiūrėta 2004-09-28]. Prieiga per Internetą: <http://www.mirusinternational.com/downloads/>