

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Antanas Šiaulytis

ELEKTROS PAVAROS SU DAŽNIO KEITIKLIU  
VALDYMO, MATAVIMŲ IR ANALIZĖS SISTEMA

Magistro baigiamasis darbas

Vadovas  
doc. dr. G. Valiulis

ŠIAULIAI, 2012

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU  
Katedros vedėjas  
doc. dr. G. Valiulis

2012

Antanas Šiaulytis

ELEKTROS PAVAROS SU DAŽNIO KEITIKLIU  
VALDYMO, MATAVIMŲ IR ANALIZĖS SISTEMA

Magistro baigiamasis darbas

Vadovas  
\_\_\_\_\_ doc. dr. G. Valiulis  
2012

Recenzentas  
\_\_\_\_\_ doc.N.Šulčius  
2012

Atliko  
EM-10 gr. stud.  
\_\_\_\_\_ A. Šiaulytis  
2012

ŠIAULIAI, 2012

## SANTRAUKA

Šiaulytis A. Elektros pavaros su dažnio keitikliu valdymo, matavimų ir analizės sistema. Elektros energetikos magistro baigiamasis darbas, vadovas doc. dr. G. Valiulis; Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas, Elektros inžinerijos katedra. – Šiauliai, 2012. – 71 psl.

Baigiamajame magistro darbe išanalizuoti asinchroninio trifazio variklio greičio reguliavimo būdai bei tam skirti įrenginiai. Išanalizavus variklio paleidimo galimybes, pateikti pagrindiniai paleidimo būdų privalumai ir trūkumai. Atlikti pavaros su dažnio keitikliu energetinio efektyvumo tyrimai ir gauti energetinių rodiklių duomenys.

Suprojektuotas elektros pavaros valdymas, aprašytas veikimas, sudaryta sistemos funkcinė schema, sistemos sujungimų schema. Naudojant šią valdymo, matavimų ir analizės sistemą, gali būti pasiektas sklandus pavaros paleidimas, stabdymas ir apsauga.

## SUMMARY

Šiaulytis A. „Variable frequency electrical drive for control, measurement and analysis purposes”. The electrical engineering master's final work, research advisor doc. dr. G. Valiulis; Šiauliai University, Faculty of technology, Electrical Engineering Department. – Šiauliai, 2012. – 71 p.

The final master's work investigate the three-phase asynchronous motor drive control methods and devices characteristic. In this final work is analyzed the main advantages and disadvantages of commissioning variants for asynchronous motors. Perform energy efficiency research in electric drive with frequency converter and gather electrical quality indicators data.

Electrical motor control system is created and described in the operation. System's functional and connections schemes are drawn. Using this control, measurement and analysis system can be achieved a smooth engine commissioning and protection.

## Turinys

ĮVADAS .....	- 5 -
2. Analitinė dalis .....	- 6 -
2.1. Šiuolaikinės elektros pavaros.....	- 6 -
2.2. Asinchroninių variklių greičio reguliavimo sistemų apžvalga .....	- 18 -
2.3 Pagrindiniai elektros pavarų energetiniai rodikliai .....	- 25 -
3. Projektinė - praktinė dalis .....	- 33 -
3.1 Eksperimentinės elektros pavaros su dažnio keitikliu reikalavimų specifikacija.....	- 33 -
3.2. Sistemos funkcinės schemas sudarymas.....	- 35 -
3.3. Sistemos sujungimų schemas sudarymas. ....	- 42 -
3.4. Sistemos montavimas, integravimas, derinimas ir jos bandymai. ....	- 46 -
4. Tiriamoji - taikomoji dalis .....	- 51 -
4.1. Sistemos energetinio efektyvumo tyrimas .....	- 51 -
4.2. Sistemos pritaikymas mokymo tikslams.....	- 65 -
4.3. Sistemos tolimesnio išplėtimo galimybės .....	- 66 -
5. Rezultatai ir išvados.....	- 67 -
LITERATŪRA .....	- 69 -
PRIEDAI.....	- 71 -

## ĮVADAS

Vykdam technologinius procesus dažnai reikia reguliuoti elektros variklių greitį. Norint pakeisti nuolatinės įtampos variklių greitį, užtenka pakeisti maitinimo įtampą. Šiuo metu gamyboje dažniausiai naudojami trifaziai varikliai, kurių maitinimo įtampa yra kintamoji. Ilgą laiką variklių greitis buvo keičiamas naudojant mechaninius greičio reduktorius: iš pradžių diržiniu, vėliau pažangesniu frikciniu variatoriumi. Tačiau šiandien naudoti mechaninį variatorių ne visada yra patogiu, ypač, kad dažnai reikia keisti variklių greitį automatiškai, atsižvelgiant į įrenginio apkrovą ar panašiai.

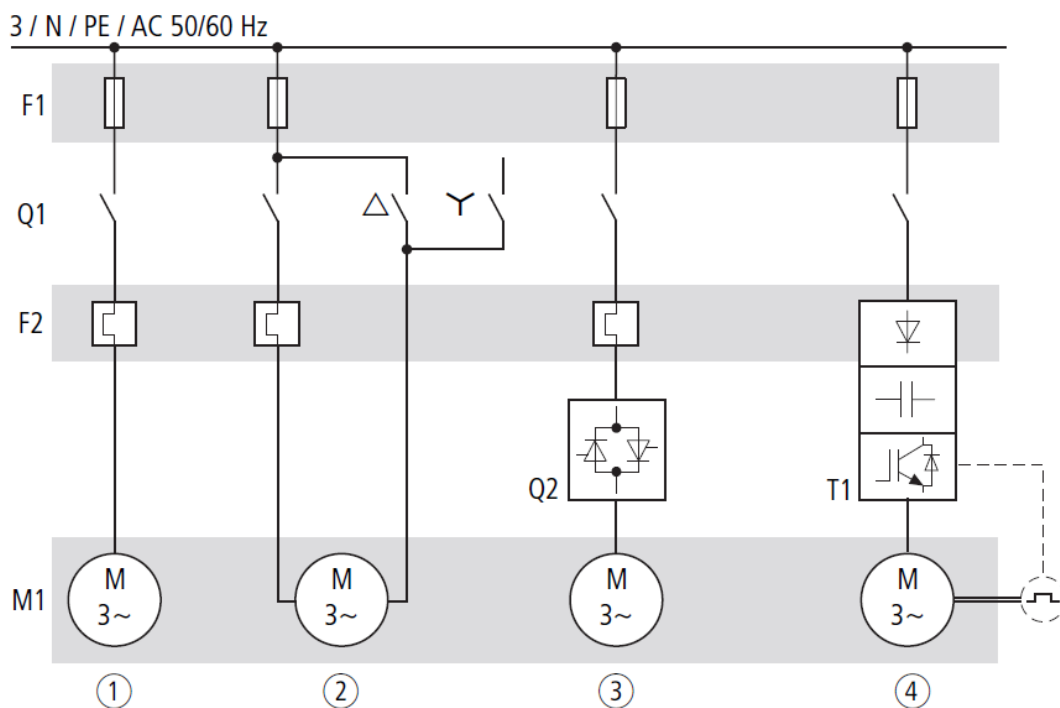
Asinchroninio variklio sukimosi greitį lemia trifazio elektros tinklo dažnis ir variklio polių skaičius, t.y. jei variklis maitinamas iš standartinio elektros tinklo, jis sukasi beveik pastoviu greičiu. Vis dažniau naudojami dažnio keitikliai, kuriais galima ne tik tolydžiai keisti variklių greitį, bet ir programiškai jį valdyti: atsižvelgiant į jutiklių rodmenis, jį lėtai (be smūgio) paleisti bei sustabdyti. Reguliuojamo sukimosi greičio asinchroninės pavaros su dažnio keitikliu leidžia sklandžiai valdyti technologinius procesus bei taupyti elektros energiją.

Pažymėtina, kad iki šiol Elektros inžinerijos katedros laboratorijose nebuvo pilnaverčio laboratorinio stendo, kuris leistų nagrinėti pavarą su dažnio keitikliu. Šiuo darbu siekiama šią spragą užpildyti. Pagrindinis darbo tikslas – suprojektuoti ir pagaminti elektros pavaros su dažnio keitikliu valdymo, matavimų ir analizės sistemą bei parengti dažnio keitiklio parametrizavimo metodikos aprašą. Pagamintas stendas gali būti naudojamas Elektros pavarų, Galios elektronikos, Mechatronikos sistemų valdymo studijų dalykų laboratoriniams darbams ir pramonės įmonių darbuotojams mokytis.

## 2. Analitinė dalis

### 2.1. Šiuolaikinės elektros pavaros

Šiuo metu dažniausiai taikomi asinchroninių trifazių elektros variklių paleidimo būdai (1 pav.): tiesiogiai prijungiant prie tinklo, perjungiant statoriaus apviją žvaigždė-trikampis (Y –  $\Delta$ ), naudojant švelnaus paleidimo įrenginį (angl. *softstarter*), naudojant dažnio keitiklį. Prieš tai minėtų paleidimo būdų charakteristikos pateiktos 2 pav.



1 pav. Asinchroninio trifazio variklio paleidimo būdai [16]

1 paveikslo simbolių paaiškinimai:

F1 - saugiklis (nuo trumpo jungimo, linijos apsaugai)

Q1 - kirtiklis

F2 - variklio apsauga (terminė apsauga nuo perkrovos)


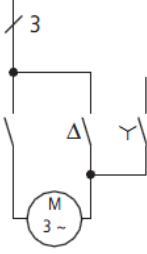
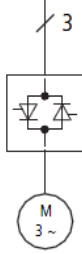
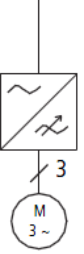

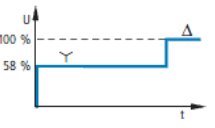
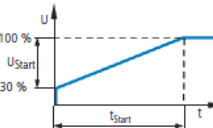
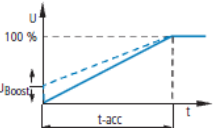
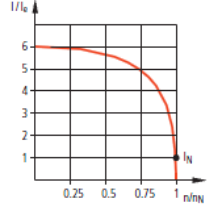
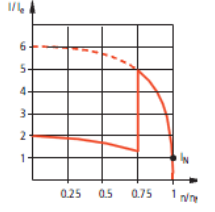
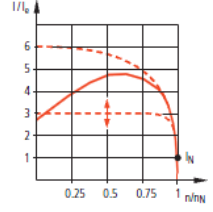
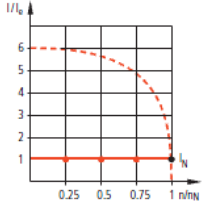
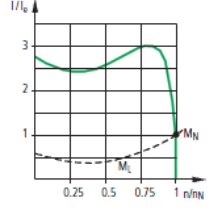
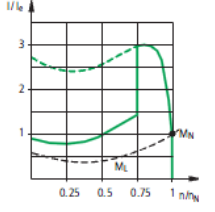
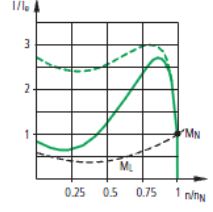
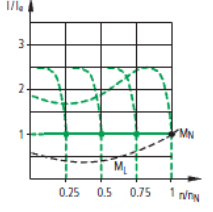
M1 - trifazis asinchroninis variklis

1- Tiesioginis prijungimas prie tinklo.

2 - Prijungimas prie tinklo perjungiant statoriaus apviją.

3 - Prijungimas prie tinklo naudojant švelnaus paleidimo įrenginį (Q2).

#### 4 - Prijungimas prie tinklo naudojant dažnio keitiklį (T1).

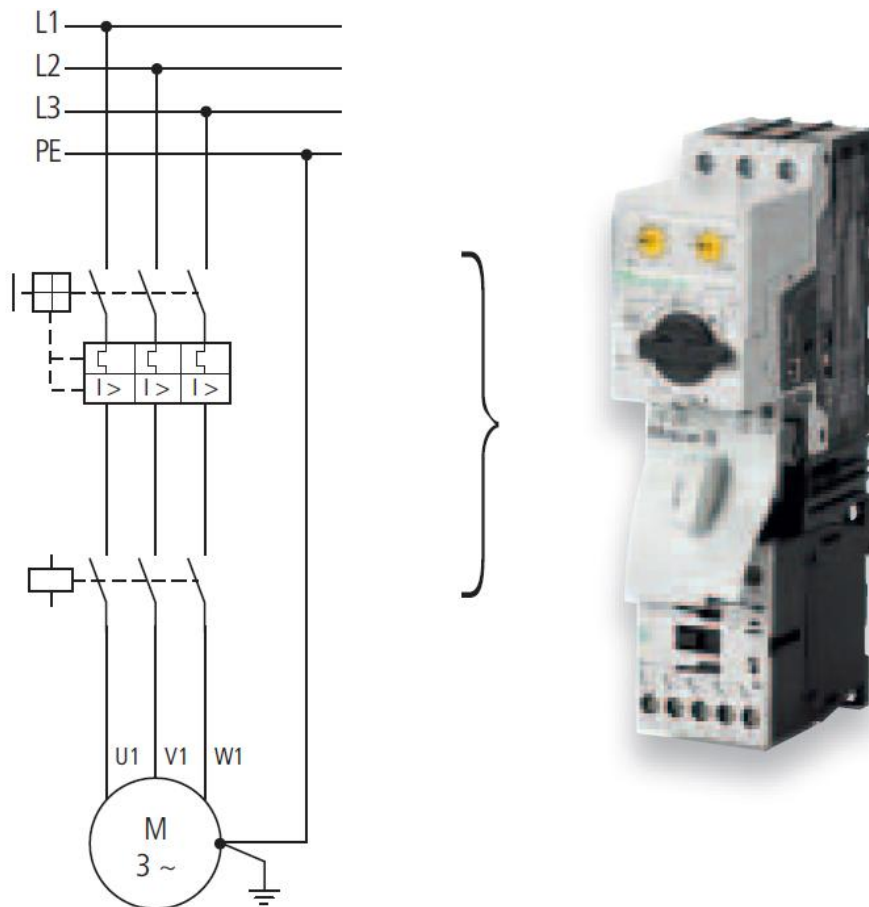
	DOL motor starter	Star-delta starter	Soft starter	Frequency inverter
<b>Block diagram</b>				
<b>Voltage curve</b>				
<b>Load on mains at start-up</b>	high	medium	low to medium	low
<b>Current curve</b>				
<b>Relative starting current</b>	4 ... 8x I <sub>e</sub> (motor-dependent)	1.3 ... 3x I <sub>e</sub> (~ 1/3 compared to direct-on-line-start)	2 ... 6x I <sub>e</sub> (reduced by voltage control)	≤ 1 (... 2x) I <sub>e</sub> (adjustable)
<b>Torque characteristic</b>				
<b>Relative starting torque</b>	1.5 ... 3x M <sub>N</sub> (motor-dependent)	0.5 ... 1x M <sub>N</sub> (~ 1/3 compared to direct-on-line-start)	0.1 ... 1x M <sub>N</sub> (M ~ U <sup>2</sup> , square-law, reduced by voltage control)	~ 0.1 ... 2x M <sub>N</sub> (M ~ U/f, adjustable torque)
<b>Features</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High acceleration with high starting current</li> <li>High mechanical loading</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Start-up with reduced current and torque</li> <li>Current and torque peak at changeover</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adjustable starting characteristic</li> <li>Controller run out possible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High torque at low current</li> <li>Adjustable starting characteristic</li> </ul>
<b>Area of application</b>	Drives on stable supplies that allow high starting currents (torques)	Drives that are only subject to load after acceleration up to speed	Drives that require soft torque progression or current reduction	Drives that require controlled soft start and stepless speed adjustment

2 pav. Asinchroninio trifazio variklio paleidimo būdų palyginimas (anglų kalba) [16]

Asinchroninius trifazius elektros variklius galima taip pat paleisti: į rotoriaus grandinę įjungiant reostatą, naudojant reaktorių ar autotransformatorių. Šie paleidimo būdai šiuo metu nėra dažnai taikomi dėl tam tikrų savo trūkumų.

### Asinchroninio variklio tiesioginis jungimas į tinklą

Dauguma asinchroninių variklių su trumpai sujungtu rotoriumi prie trifazio tinklo prijungiami tiesiogiai (3 pav.). Tam gali būti panaudoti kirtikliai arba automatinio valdymo įranga.



3 pav. Asinchroninio trifazio variklio tiesioginis jungimas į tinklą. [16]

Pradiniu paleidimo laikotarpiu rotoriaus ir statoriaus apvijų srovės yra didžiausios. Tiesioginis paleidimas leistinas, jeigu paleidimo metu tinklo įtampos kritimas neviršija 10 – 15



procentų tinklo vardinės įtampos  $U_f$ . Daugumos variklių paleidimo srovė  $I_k=(4-7)I_N$ . Varikliui įsisukant, mažėja skirtumas tarp magnetinio lauko ir rotoriaus sūkių dažnių  $n_0 - n$ . Mažėjant slydimui, silpnėja rotoriaus, taip pat ir statoriaus apvijų srovės. Toliau variklio darbo režimas nusistovi, ir, jei apkrovos momentas nekinta, variklis suka darbo mašiną pastoviu sūkių dažniu  $n=const$ .

Privalumai:

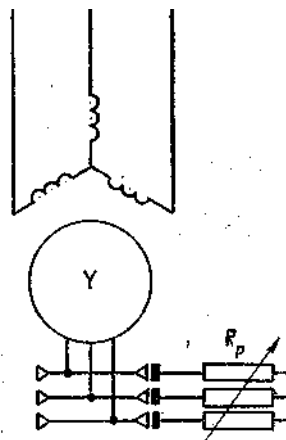
1. Ekonomiška ir paprasta..
2. Didelis pradinis sukimo momentas. Tai naudinga norint paleisti smarkiai apkrovus.

Trūkumai:

1. Paleidimo metu statoriaus ir rotoriaus grandinėse išskiriama daug šilumos.
2. Paleidimo metu smarkiai padidėja paleidimo srovės.
3. Didelis pradinis sukimo momentas. Tai neigiamai paveikia variklio guolius, apvijas, taip pat neigiamai veikia reduktorius ir kitus prijungtus mechanizmus.

### Asinchroninio variklio su faziniu rotorium paleidimas

Variklyje su faziniu rotoriumi į rotoriaus grandinę per žiedų - šepečių kontaktą įjungiamas paleidimo reostatas (4 pav.). Paleidimo metu reostato varža didžiausia. Variklio rotoriumi įsisukant, varža palaipsniui mažinama. Pasiekus vardinį darbo režimą, rotoriaus žiedai trumpai sujungiami.



4 pav. Asinchroninio variklio su faziniu rotoriumi paleidimo schema kai į rotoriaus grandinę įjungtas reostatas [1]

Privalumai:

1. Mažesnė paleidimo srovė.
2. Didesnis paleidimo momentas.

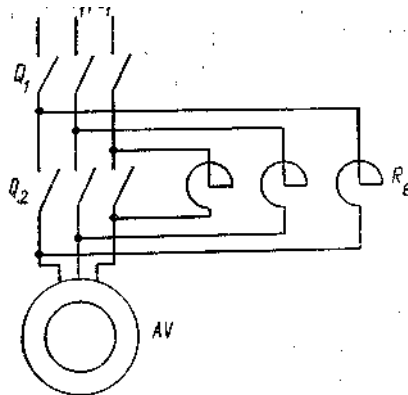
Trūkumai:

1. Reostatas padidina elektrinius galios nuostolius.
2. Paleidimo metu padidėja srovė nors mažiau lyginant su tiesioginiu jungimu.
3. Didelės galios varikliams reikia kelių pakopų reostatų.
4. Reostatai išskiria nereikalingą šilumą.

### Asinchroninio variklio paleidimas naudojant reaktorius

Asinchroniniam varikliui paleisti gali būti naudojami reaktoriai  $R_e$ , kurie įjungiami nuosekliai statoriaus apvijai (5 pav.). Asinchroninis variklis paleidžiamas, įjungiant jungiklį Q1 (jungiklis Q2 išjungtas). Dėl įtampos kritimo reaktoriuose variklis gauna pažemintą įtampą. Paleidimo srovė sumažėja. Reaktoriai parenkami taip, kad paleidimo srovė  $I_{kr}$  būtų ne daugiau kaip 2—2,5 karto didesnė už vardinę srovę  $I_N$ . Naudojant reaktorius, paleidimo srovę galima sumažinti 1,66—3,5 karto palyginti su tiesioginio jungimo paleidimo srove, o paleidimo momentas sumažėja 2,5—12 kartų.

Reikia prisiminti, kad sukimo momentas tiesiog proporcingas įtampos kvadratui, todėl įtampą sumažinus du kartus, sukimo momentas sumažės keturis kartus. Pažeminta įtampa varikliui paleidžiami be apkrovos arba esant nedidelei apkrovai.



5 pav. Asinchroninio variklio paleidimo schema su įjungtais statoriaus grandinėje reaktoriais [1]

Privalumai:

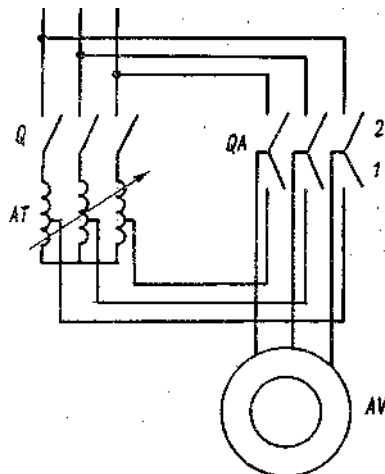
1. Paleidimo srovės sumažėjimas.
2. Mažesnis paleidimo momentas (svarbu, kad jis būtų didesnis už paleidimo metu apkrovos dydį). Tai prailgina pavaros mechanizmo tarnavimo laiką.
3. Mažesni energijos nuostoliai reaktoriuje lyginant su aktyviaisiais rezistoriais.

Trūkumai:

1. Negali būti didelė apkrova paleidimo metu.
2. Mažas paleidimo momentas.

### Asinchroninio variklio paleidimas naudojant autotransformatorių

Įtampai sumažinti ir paleidimo srovei apriboti galima naudoti trifazį autotransformatorių (6 pav.). Įjungus jungiklį  $Q$ , autotransformatorius  $AT$  prijungiamas prie įtampos. Nustačius jungiklį  $QA$  į 1 padėtį, variklis per autotransformatorių prijungiamas prie įtampos. Variklis pradeda sukstis. Įsisukus varikliui, jungiklis  $QA$  perjungiamas į 2 padėtį. Variklis gauna visą tinklo įtampą. Variklį paleidus, autotransformatorius  $AT$  jungikliu  $Q$  atjungiamas nuo įtampos šaltinio.



6 pav. Asinchroninio variklio paleidimo schema, kai paleidimui naudojamas autotransformatorius [1]

Privalumai:

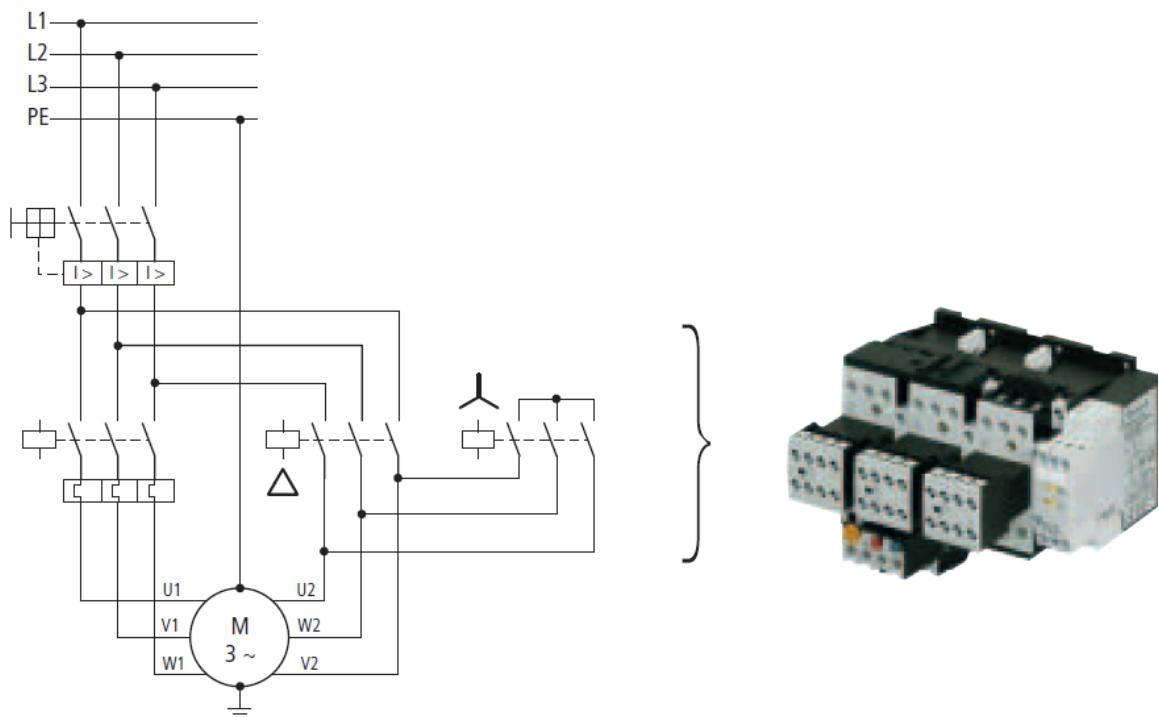
1. Paleidimo srovės sumažėjimas.
2. Mažesnis paleidimo momentas (svarbu, kad jis būtų didesnis už paleidimo metu apkrovos dydį). Tai prailgina pavaros mechanizmo tarnavimo laiką.

Trūkumai:

1. Papildomai reikia autotransformatoriaus, jungiklių.
2. Paleidimo metu padidėja srovė nors mažiau lyginant su tiesioginiu jungimu.
3. Turi būti ribojama apkrova paleidimo metu.

## Asinchroninio variklio prijungimas prie tinklo perjungiant statoriaus apviją

Sujungiant statoriaus apviją žvaigžde, o paskui perjungiant trikampi (7 pav.), galima paleisti tuos variklius, kurių statoriaus apvijos normaliam darbui jungiamos trikampi.



7 pav. Asinchroninio trifazio variklio prijungimas prie tinklo perjungiant statoriaus apviją [

Y – Δ [16]

Jeigu tinklo linijinė įtampa  $U_l$ , tai sujungus paleidimui apvijas žvaigžde, vienai fazei teks įtampa  $U_Y = U_l/\sqrt{3}$ . Jei vienos fazės trumpojo jungimo varža  $Z_k$ , tai srovė  $I_Y = U_l/(\sqrt{3} Z_k)$ . Statoriaus apviją sujungus trikampi, viena fazės apvija gaus tinklo linijinę įtampą  $U_{\Delta}=U_l$ . Statoriaus fazės apvija tekės srovė  $I_{Af}=U_l/Z_k$ . Linijos srovė tokia:  $I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{Af} = \sqrt{3} U_l/Z_k$ . Linijos srovių santykis:  $I_{\Delta}/I_Y = 3$  [2].

Jeigu variklis normaliai dirba trikampi sujungtomis apvijomis, tai perjungus jo apvijas žvaigžde, paleidimo srovė bus tris kartus mažesnė negu paleidžiant variklį su trikampi sujungtomis apvijomis. Perjungiant apvijas žvaigžde, paleidimo momentas sumažėja 3 kartus palyginti su paleidimo momentu, kai statoriaus apvijos sujungtos trikampi. Šis būdas taikomas tik žemos įtampos varikliams paleisti ir palyginti retai, nes paleidimo metu tenka nutraukti variklio statoriaus grandinę, gaunami viršįtampiai dėl pereinamųjų procesų statoriaus apvijoje.

Šitoks paleidimo būdas tinka ventiliatoriams ir siurbliams kuriu sukimo momentas paleidimo metu yra nedidelis. Didėjant apsukoms sukimo momentas didėja kvadratine priklausomybę. Pasiekus 80% greičio, perjungiama į trikampį ir tada pasiekiamas pilnas greitis.

Privalumai:

1. Ne tokios didelės paleidimo stovės lyginant su tiesioginiu jungimu.
2. Gaunamas mažesnis paleidimo metu sukimo momentas. Tai prailgina pavaros mechanizmo tarnavimo laiką.
3. Gan pigu ir paprasta.

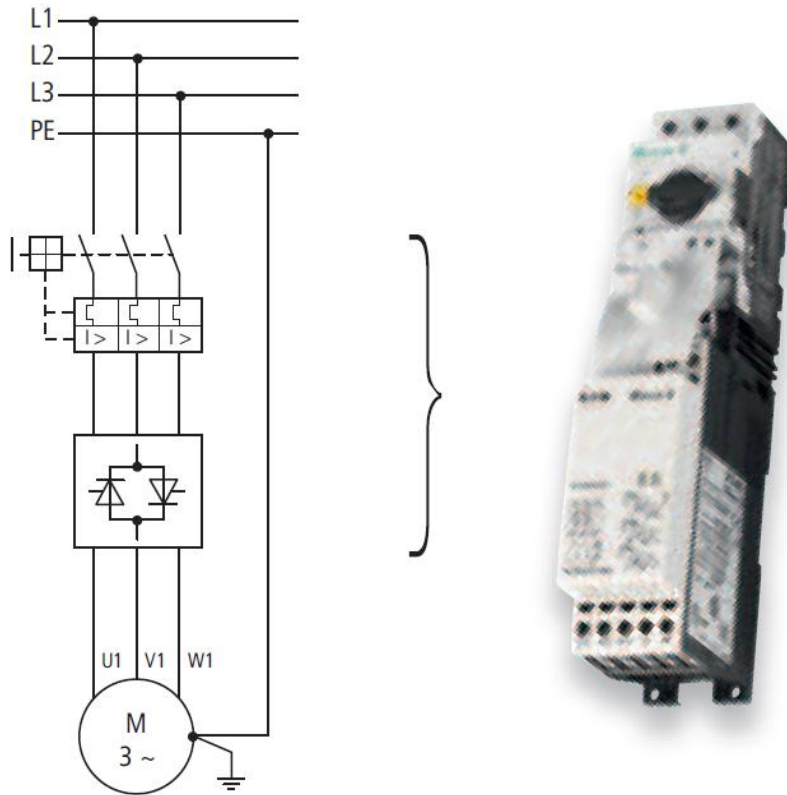
Trūkumai:

1. Paleidimo metu padidėja paleidimo srovė. Nors lyginant su tiesioginiu jungimu ji mažesnė.
2. Paleidimo metu gaunamas mažesnis sukimo momentas. Jei paleidimo metu, variklis apkrautas daugiau nei 50% pilno sukimo momento, variklis gali nepasiekti reikiamo greičio, reikalingo perjungimui į trikampį.
3. Paleidimo metu tenka nutraukti variklio statoriaus grandinę, gaunami viršįtampiai dėl pereinamųjų procesų statoriaus apvijoje.

4. Reikalingas specialus variklis arba papildomas transformatorius, kad būtų galimas perjungimas iš žvaigždės į trikampį. Variklis gali būti elektriškai sugadintas jei jo apvijos bus nepritaikytos maitinti 400V įtampa trikampio jungimo atveju.

### **Asinchroninio variklio prijungimas prie tinklo naudojant švelnaus paleidimo įrenginį**

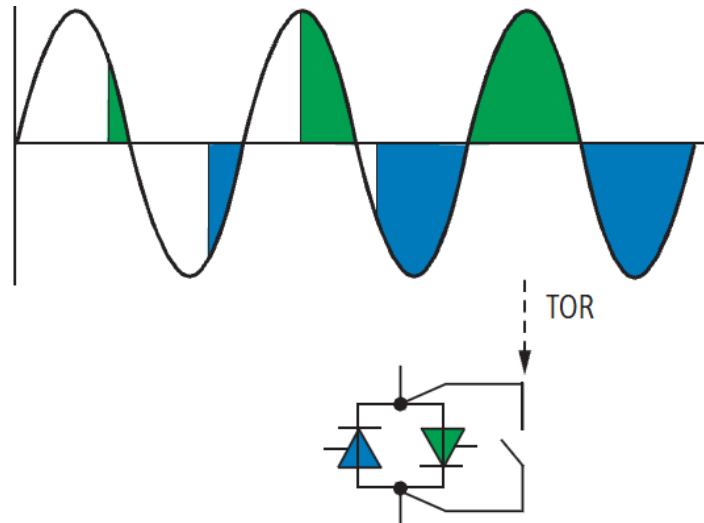
Švelnaus paleidimo įrenginys (8 pav.) mikroprocesoriaus valdomo trifazio įtampos keitiklio pagalba reguliuoja į variklio gnybtus patenkančią įtampą ir valdo minkšto įsibėgėjimo bei lėtėjimo, o taip pat stabdymo nuolatinė srove procesus, bei suteikia galimybę taupyti elektros energiją, esant nepilnai variklio apkrovai. Į kiekvieną fazės (L1, L2 ir L3) grandinę yra įjungti du lygiagrečiai vienas prieš kitą sujungti tiristoriai. Kadangi variklio momentas su įtampa yra susietas kvadratine ( $M = U^2$ ), o variklio srovė – tiesine ( $I=U$ ) priklausomybe, reguliuojant variklio gnybtuose esančios įtampos efektingą reikšmę, yra apribojamas paleidimo momentas ir srovė. Šis variklio gnybtuose esančios įtampos efektingos reikšmės reguliavimas (9 pav.) yra atliekamas keičiant tiristorių įsijungimo fazės kampą.



8 pav. Asinchroninio trifazio variklio prijungimas prie tinklo naudojant minkšto paleidimo įrenginį [16]

Minkšto paleidimo įrenginys atlieka įtampa valdomo paleidimo reguliavimo funkciją, tačiau yra keičiamas tik įtampos dydis, kai tuo tarpu variklio įtampos dažnis yra pastovus, ir priklauso nuo tinklo dažnio. Tai yra principinis skirtumas tarp šio įrenginio ir dažnio keitiklio.

Pats paprasčiausias variklio švelnus paleidimo būdas – įtampos variklio gnybtuose nuoseklaus didinimo metodas, mikroprocesoriaus nustatytą laiko tarpą. Šis didinimo procesas gali prasidėti nuo 20% iki 100% reguliuojamos reikšmės tinklo įtampos dydžio ir prabėgus nustatytam laiko tarpui, baigiasi įtampa, lygia 100% tinklo įtampos reikšmės. Pasibaigus įsibėgėjimo procesui, tiristoriai lieka nuolat įjungti.



9 pav. Fazės kampo reguliavimas [16]

Priklausomai nuo minkšto paleidimo įrenginio sudėtingumo, jame gali būti įdiegti įvairus apsaugų lygiai. Paprasčiausi iš jų neturi apsaugų. Reikalingas variklių apsaugas reikia sudėti atskirai. Sudėtingi turi visas įmanomas apsaugas: fazės dingimas įėjime, fazės į variklį dingimas, tiristoriaus pramušimas, viršyta tiristoriaus temperatūra, variklis perkrautas, momentinis srovės išaugimas, maža srovė, fazių kaita ir kita.

Privalumai:

1. Švelnus paleidimas ir lygus stabdymas.
2. Dinaminio stabdymo galimybė.
3. Srovės šuolių sumažinimas.
4. Nenutrūkstama darbo kontrolė ir apsaugos parametrų sekimas.
5. Paleidimo metu valdomam varikliui sumažėja apkrovos ir atitinkamai mechaninių pavaros dalių susidėvėjimas.
6. Nesudėtingas montavimas ir parengimas.

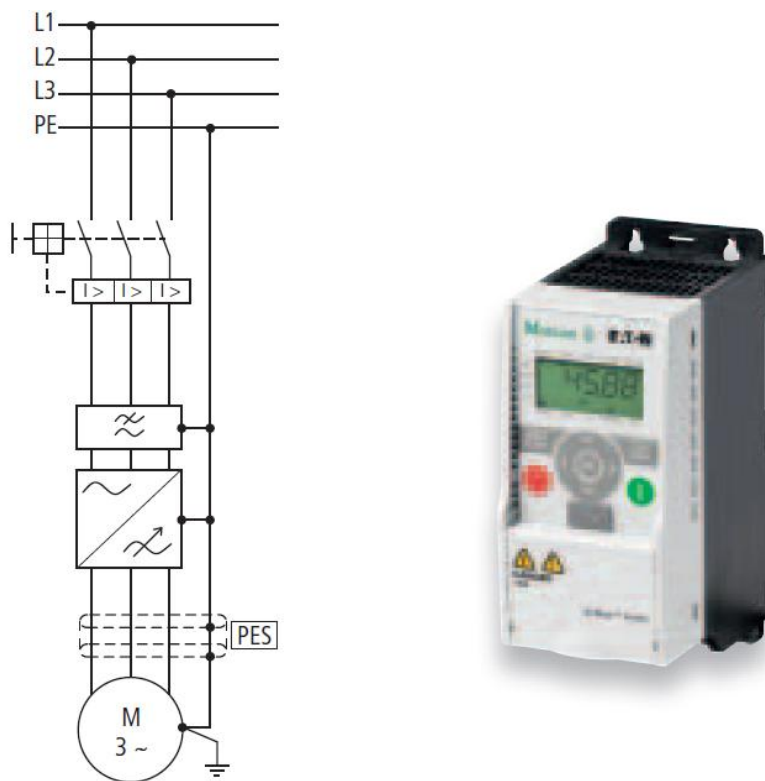
Trūkumai:

1. Gana didelė įrenginio kaina.
2. Negalimas variklio sukimosi greičio reguliavimas.



## Asinchroninio variklio prijungimas prie tinklo naudojant dažnio keitiklį

Variklio valdymo būdas, naudojant dažnio keitiklį (10 pav.) šiai dienai yra geriausias variantas. Jie pritaikomi įvairiuose vandens ir šilumos tiekimo objektuose, gyvenamosiose ir darbo patalpose, technologinių procesų automatizavimo sistemose chemijos, maisto ir kitose pramonės šakose, suvartojamos energijos efektyvumui padidinti, avaringumui sumažinti.



10. pav. Asinchroninio trifazio variklio prijungimas prie tinklo naudojant dažnio keitiklį[16]

Keitikliai dažniausiai naudojami variklio greičiui reguliuoti. Didelis dažnio keitiklio privalumas – esant mažam greičiui pasiekiamas didelis sukimo momentas, o paleidimo srovė siekia 1-1,5  $I_{nom}$  variklio srovės. Kitas dažnio keitiklio privalumas – minkštas stabdymas. Šio privalumo pagrindinis pritaikymas siurbliams stabdyti, išvengiant hidraulinio smūgio, taip pat konvejeriams stabdyti, išvengiant galimo produkcijos sugadinimo. Didelis dažnio keitiklių privalumas – energijos taupymas dirbant kartu su siurbliais ir ventiliatoriais. Dažnio keitiklių darbe nereikalingi kondensatoriai reaktyvinei energijai kompensuoti. Reaktyvios galios kompensacija nereikalinga dėl to, kad dažnio keitiklis įėjime kintamą elektros srovę keičia į nuolatinę, o nuolatinė elektros srovė neturi reaktyviosios galios.

Privalumai:

1. Elektros variklio lengvas paleidimas, stabdymas ir sukimo greičio reguliavimas.
2. Elektros energijos taupymas.
3. Elektros variklių apsauga nuo trumpo jungimo, perkrovų, variklio apvijų perkaitimo.
4. Elektros variklio apsauga nuo fazių sekos ir fazės dingimo.
5. Dažnio keitiklių darbe nereikalingi kondensatoriai reaktyvinės energijos kompensavimui.
6. Nesudėtingas montavimas ir parengimas.

Trūkumai:

1. Gan didelė įrenginio kaina.
2. Skleidžia elektromagnetinį triukšmą į tinklą.

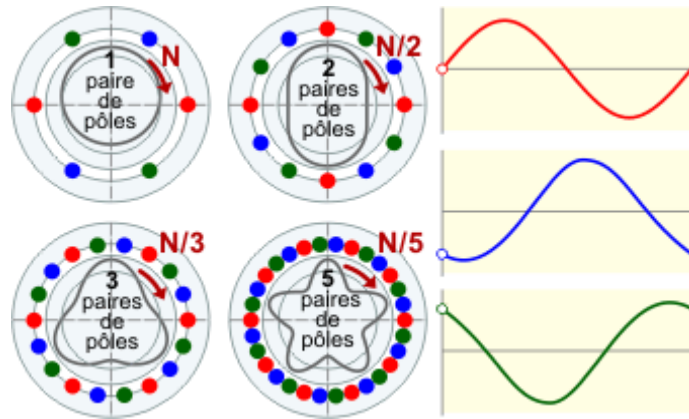
## **2.2. Asinchroninių variklių greičio reguliavimo sistemų apžvalga**

Asinchroninių variklių rotorijų sūkių dažnį galima užrašyti šitaip :

$n = f(1 - s) / p$ . Matome, kad variklio rotoriaus greitį galime reguliuoti keičiant : 1) magnetinio lauko polių porų skaičių; 2) tinklo įtampos dažnį; 3) rotoriaus grandinės varžą. pirmasis būdas taikomas varikliui su trumpai sujungtu rotoriumi, o trečiasis - su faziniu rotoriumi.

### **Asinchroninių variklių greičio reguliavimas keičiant magnetinio lauko polių porų skaičių**

Statoriaus magnetinio lauko polių porų skaičius priklauso nuo apvijų ričių skaičiaus ir jų sujungimo schemas (11 pav.).



11 pav. Statoriaus polių porų išdėstymas [17]

Paprastai viena statoriaus apvijos fazė yra sudaroma iš dviejų ar daugiau dalių, kurias galima sujungti nuosekliai arba lygiagrečiai. Trumpai sujungto rotoriaus magnetinis laukas turi tiek pat polių porų, kiek ir statoriaus, todėl rotoriaus sandaroje jokių pakeitimų daryti nereikia. Varikliui su faziniu rotoriumi šis būdas netaikomas, nes tektų perjunginėti dar ir rotoriaus apviją.

. Magnetinio lauko sūkių (sinchroninis) dažnis  $n_0$ , kai  $f = 50\text{Hz}$  ir polių porų skaičius lygus  $p$

1 lentelė [4]

Polių poros $p$	Poliai	$n_0$ aps/min
1	2	3000
2	4	1500
3	6	1000
4	8	750
5	10	600

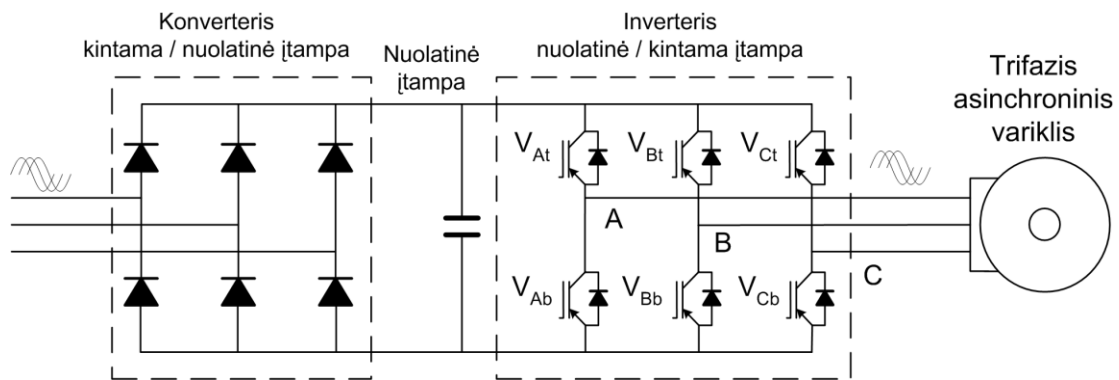
Šis greičio reguliavimo būdas turi tokių trūkumų:

- 1) greitį galima keist tik šuoliais (1 lentelė) ;
- 2) sudėtinga variklio konstrukcija;
- 3) reikalinga komutacijos aparatūra.

## Sinchroninių variklių greičio reguliavimas prijungiant jo statoriaus apviją prie reguliuojamo dažnio $f$ šaltinio.

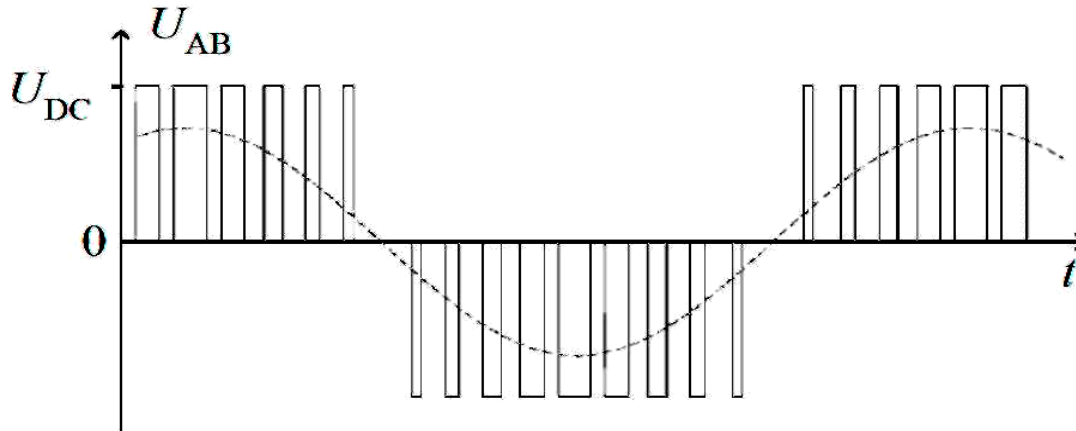
Jei siekiama, kad nesikeistų variklio magnetinis srautas  $\Phi_m \approx U_1 / (4,44 f k_l N_1)$ , reikia palaikyti santykį  $U_1 / f \approx const$ . Tai reiškia, kad keičiant dažnį  $f$ , proporcingai jam reikia keisti statoriaus apvijų įtampą.

Dažnio keitiklio paskirtis – suformuoti keičiamo dažnio ir įtampos tinklą, prie kurio prijungus asinchroninį elektros variklį, jo apvijomis tekėtų sinuso formos srovės ir jos būtų tokio dažnio, fazės ir dydžio, kad variklio rotorius sukėtųsi norimu greičiu, norima kryptimi ir turėtų reikiamą sukimo momentą. Egzistuoja didelė dažnio keitiklių įvairovė, tačiau dauguma jų turi 12 pav. pateiktą lygintuvo-inverterio struktūrą.



1 pav. Struktūrinė dažnio keitiklio schema [8]

Lygintuvas kintamą elektros tinklo įtampą paverčia nuolatinę, o inverteris iš nuolatinės įtampos suformuoja keičiamo dažnio, fazės ir įtampos tinklą. Sudėtingiausias dažnio keitiklio funkcinis mazgas yra inverteris, kurį sudaro tranzistoriniai raktai. Inverterį valdo specialus įrenginys su mikrovaldikliu arba (ir) signaliniu procesoriumi. Norint garantuoti patikimą inverterio darbą, turi būti stebimos tranzistorinių raktų būsenos, t. y. sekamos jų srovė, įtampa, temperatūra. Inverteris suformuoja impulsines įtampas (13 pav.), kuriomis maitinant variklį dėl jo apvijų indukcinės prigimties variklio apvijomis teka sinuso formos srovė.



13 pav. Įtampa tarp dviejų fazių inverterio išėjime [8]

Yra dvi asinchroninio variklio valdymo metodų grupės: skaliariniai ir vektoriniai. Dauguma dažnio keitiklių taikymo atvejų variklio mechaninės apkrovos priklausomybė nuo sukimosi greičio yra iš anksto žinoma, o reikalavimai dinaminėms asinchroninių pavarų savybėms nėra svarbūs. Tokiais atvejais variklio valdymui pakanka skaliarinio valdymo dažnio keitiklio. Populiariausios jų panaudojimo sritys yra siurbLIAI, ventiliatoriai ir dalis konvejerių.

Vektorinio valdymo dažnio keitikliai gali greitai ir tiksliai valdyti variklio sukimosi momentą esant įvairiems sukimosi greičiams, gali dirbti esant dideliame pagreičiui. Jis taip pat gali įsijungti, kai variklis sukasi į bet kurią pusę. Asinchroninių variklių pavaros, valdomos vektorinio valdymo dažnio keitiklių naudojamos didelio greičio liftuose, kranuose bei laidų vyniojimo, popieriaus gamybos, plieno liejimo, plastmasės štam pavimo ir kituose įrenginiuose.

## **Dažnio keitiklio privalumai ir trūkumai**

### **Privalumai [8]:**

- Be energijos taupymo, dažnio keitikliai turi daugiau privalumų, kurie prideda lankstumo ir patikimumo elektros sistemai.
- Dažnio keitikliai neturi paleidimo srovių šuolio (paleidimo srovė nustatoma iki 150% nuo nominalios variklio srovės). Paleidimo srovių šuoliai atsiranda mechaniškai paleidžiant variklį ir tai gali sukelti variklio nesklandumus. Tai taip pat gali sukelti įtampos svyravimus, kurie savo ruožtu gali pakenkti kitoms apkrovoms (kompiuteriai ir t.t.). Dažnio keitikliai švelniai paleidžia variklius per 20 - 30 s.

- Dažnio keitikliai turi aukštą galios koeficientą, todėl nebereikia naudoti reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių (kondensatorių baterijų).

- Dažnio keitikliai išlygina jungimo pikus (trumpalaikius įtampos šuolius), kai išjungiamas variklis. Variklio greitis švelniai mažinamas (pvz. per 20 - 30s). Dažnio keitiklis išsijungia, kai variklio greičio ir srovės reikšmės tampa mažos.

- Dažnio keitikliai turi programuojamas variklio valdymo, apsaugos ir komunikacijų funkcijas, tuo stipriai nutoldami nuo kontaktorių, variklio apsaugų, papildomų kontaktų ir atkabiklių funkcijų. Pavyzdžiui, dažnio keitikliui galima užprogramuoti variklio sukimo kryptį, ir tam nereikia papildomo kontaktoriaus.

- Vienfazėse sistemose, dažnio keitikliai leidžia pakeisti vienfazius variklius trifaziais. Tai yra todėl, kad dažnio keitiklio įėjimas gali būti prijungti prie vienfazio tinklo ir išėjime generuoti trifazį signalą; kitaip tariant vienfazė įtampa keičiama į trifazę įtampą.

### **Trūkumai [8]:**

- Dažnio keitikliai turi ir neigiamo poveikio elektros tinklui ir varikliui. Tai harmonikos ir variklių pavarų suderinamumas tiek mažiems, tiek ir dideliems dažnio keitikliams. Skirtumas tik tas, kad mažiems varikliams ir dažnio keitikliams skiriamas mažesnis dėmesys nei dideliems, brangesniems dažnio keitikliams. Paprastai didelės galios dažnio keitiklio įtaka tinklo parametrų netiesiniams iškraipymams yra didelė, todėl jiems būtini filtrai. Pavyzdžiui, jei lygintume 185 kW ir 4 kW dažnio keitiklius, tai pirmuoju atveju filtrai yra būtini.

- Vienfazėse sistemose, dažnio keitikliai generuoja trečią (150Hz) ir penktą (250Hz) harmonikas. Komerciniuose pastatuose, keturlaidėse (3 fazės + nulis) elektros sistemose, jos susilieja į trečiąją harmoniką prisidedančia prie neutralės, todėl nuliniam laidui patartina naudoti storesnę laidininką negu faziniams laidams. Kadangi mažos galios dažnio keitikliai taip pat generuoja harmonikas, todėl, atliekant bet kokius tinklo matavimus, reikia naudoti tRMS (true - Root Mean Square) matavimo prietaisus tikslesniam matavimui.

- Trifazėse sistemose, dominuoja penktoji (250Hz) harmonika, kurią generuoja dažnio keitikliai. Penktoji (250Hz) harmonika yra neigiamos sekos harmonika: ji sukuria priešingą sukimo momentą, kuris verčia variklius sukti atgal. Penktoji (250Hz) harmonika neturi įtakos varikliams, kurie turi dažnio keitiklius. Ji įtakoja tik variklius, kurie valdomi mechaninėmis variklio apsaugomis. Nors pagrindinė variklio srovė (pirmoji harmonika - 50Hz) vis tiek suks

variklį pirmyn, tačiau penktoji (250Hz) harmonika papildomai kaitins ir po kažkurio laiko gali žymiai pakenkti statoriaus izoliacijai. Pastebėtina, kad ši penktoji harmonika gali neturėti akivaizdžios įtakos aukščiau esančiam tinklui (t.y. gali būti minimalus įtampos iškraipymas) todėl, kad harmonikos srovė yra pakankamai maža lyginant su bendra srove. Tačiau, tame pačiame lygyje kuriame yra prijungta daugiau variklių, mažos galios dažnio keitikliai gali stipriai iškraipyti įtampą.

- Pirmas žingsnis kaip kovoti su harmonikomis: prie dažnio keitiklio turi būti prijungta reaktoriaus ritė. Ši ritė mažina srovės iškraipymus dažnio keitiklio įėjime. Ji taip pat apsaugos dažnio keitiklį nuo viršįtampių šuolių (ypač kondensatorių jungimų pikai), kurie atkeliauja iki nuolatinės srovės sąsajos ir sukelia viršįtampius.

- Kai kuriuose pigesniuose dažnio keitikliuose gamintojai mažina kainą išimdami reaktoriaus ritę, taip padarydami dažnio keitiklį "harmonikų generatoriumi". Tai ypač pavojinga, kai jie montuojami kartu su tiesioginio paleidimo varikliais. Šiuo atveju situaciją galima pataisyti instaliuojant linijinius reaktorių ar izoliuojančius transformatorius.

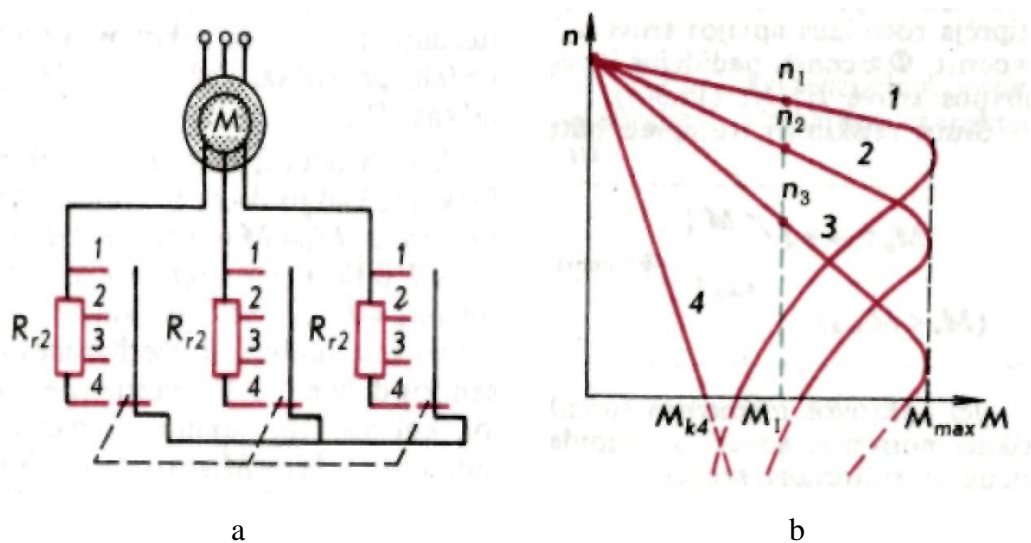
- Dažnio keitiklį su integruota reaktoriaus rite gali neapsaugoti nuo kylančių problemų. Panašios harmonikų problemos gali kilti, kai grandinėje instaliuojama daug mažos galios dažnio keitiklių, kurie bendrai sukelia didelius netiesinius iškraipymus. Esant didelės galios dažnio keitikliui galima montuoti pasyvinį penktosios (250Hz) ir septintosios (350Hz) harmonikų filtrą. Tačiau šiuo atveju tai nebūtų teisinga, nes mažos apkrovos gali būti labai dinamiškos ir pasyvus harmonikų filtras gali nesumažinti harmonikų. Tokiu atveju geriausiai tinka aktyvūs harmonikų filtrai. Šie įrenginiai seka harmonikų sroves ir generuoja tos pačios amplitudės tik priešingas harmonikoms sroves. Tokiu būdu panaikinamos susidarančios harmonikos ir labai efektyvūs dinamiškoms apkrovoms su kintamomis harmonikų srovėmis.

- Dažnio keitikliams gali atsirasti variklio suderinamumo problemos, ypač kai dažnio keitikliai montuojami seniems varikliams. Greitas puslaidininkių junginėjimasis bei ilgas kabelis gali sukelti viršįtampių atspindžius (kitai vadinamus stovinčios bangos įtampa, ar vainikinė įtampa), kai įtampos pikas du - tris kartus didesnė už nuolatinės srovės sąsajos įtampą. Daugelis gamintojų deklaruoja, kad kabelio ilgis iki variklio neturi viršyti 30 m, bet kartais net tai yra per daug. Jie gali pramušti pirmųjų kelių variklio apvijų izoliaciją, galinčios sukelti ankstyvą variklio statoriaus izoliacijos pramušimą. Ši problema aktuali tiek didelės, tiek mažos galios dažnio keitikliams, turintiems impulsų pločio moduliacijos išėjimą. Pigesni, mažos galios varikliai ypač

pažeidžiami; jų statoriaus apvijų dažnai būna netolygiai suvyniotos (pigesnė gamyba), tai reiškia, kad tarp gretimų apvijų gali būti aukštas potencialas, kuris jas daro mažiau atsparesnes viršįtampių atspindžiams. Norint išvengti viršįtampių reikia sumontuoti mažo pralaidumo filtrus keitiklio išėjime.

### Asinchroninių variklių su faziniu rotoriumi greičio reguliavimas, keičiant rotoriaus grandinės varžą

Keičiant variklio su faziniu rotoriumi rotoriaus varžą, keičiasi variklio mechaninė charakteristika: esant tam pačiam sukimo momentui, gaunamas mažesnis rotoriaus sūkių dažnis (14 pav.). Pavyzdžiui, kai variklio sukimo momentas yra  $M_1$ , didinant  $R_{r2}$ , rotoriaus sūkių dažnis mažėja nuo  $n_1$  iki  $n_3$ .



14 pav. Asinchroninio variklio su faziniais rotoriumi schema (a) ir natūralioji (1) bei dirbtinės (2, 3, 4) mechaninės charakteristikos (b) [4]

Šiuo būdu greitį galima reguliuoti sklandžiai. pagrindiniai tokio metodo trūkumai: reguliavimo reostate gaunami dideli energijos nuostoliai, variklio mechaninės charakteristikos, padidinus rotoriaus grandinės varžą, yra minkštos.

Kai kuriais atvejais greitį galima šiek tiek pareguliuoti, keičiant variklio statoriaus apvijų įtampą. Kadangi  $U_1 \leq U_{IN}$ , tai įtampą (ir greitį) galima tik mažinti.



## 2.3 Pagrindiniai elektros pavarų energetiniai rodikliai

Vieni iš svarbiausių elektros pavarų energetiniai rodikliai yra galios, energijos nuostolius, naudingumo koeficientą  $\eta$ , netiesinių iškreipimų faktorių NIF (angl. *Total Harmonic Distortion, THD*), galios koeficientą  $\cos \varphi$  ir galios faktorių  $\lambda$ .

Galios ir energijos nuostoliai pavarose gali būti išmatuoti arba apskaičiuoti. Tokių nuostolių nustatymas matuojant yra gana brangus nes reikia turėti matavimo prietaisus, kurie galią ir energiją matuoja vienu metu keliuose taškuose. Dėl šios priežasties, dažniausiai šie rodikliai apskaičiuojami.

### 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 sukimosi greičio. 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:

$$\Delta P_{el.v} = \Delta P_{past.} + \Delta P_{kint.}; \quad (2.3.1)$$

Pastovieji nuostoliai nepriklauso nuo variklio apvijomis tekančių srovių. Tai magnetolaidžio plieno nuostoliai, nuostoliai kylantys dėl trinties guoliuose bei dėl aušinimo. Pastovieji nuostoliai 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 [14].

### 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 nominalia apkrova ir riboti darbą tuščiosios veikos metu. Jei apkrovos vidurkis yra mažesnis nei 45% variklio nominaliosios galios,

tai jo pakeitimas mažesnės 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.

Siekiant 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 [14].

### **Nuostoliai reguliuojamose elektros pavarose**

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

1. Variklio rotoriaus apsisukimu greičio kitimas, dėl to bendru atveju kinta pastovieji nuostoliai.
2. Papildomi galios nuostoliai pačiame keitiklyje.
3. Yra taikomi įvairūs pavarų reguliavimo būdai. 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 [14].

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

$$\Delta P_{past.} = \Delta P_{mech.} + \Delta P_{st.} + \Delta P_{rot.} + 3\Phi^2 R_1; \quad (2.3.2)$$

čia  $R_1$  - statoriaus apvijų varža,  $\Omega$ .

Tarkim, kad mažėjant variklio rotoriaus apsisukimu greičiui, didėjantis plieno nuostoliai yra kompensuojami mechaniniu nuostoliu sumažėjimu, tai pastovieji galios nuostoliai gali būti laikomi kaip nekintami ir lygus nominaliesiems galios nuostoliams:

$$\Delta P_{past.} = \Delta P_{mech.nom.} + \Delta P_{st.nom.} + \Delta P_{rot.} + 3\Phi^2 R_1 \approx const.; \quad (2.3.3)$$

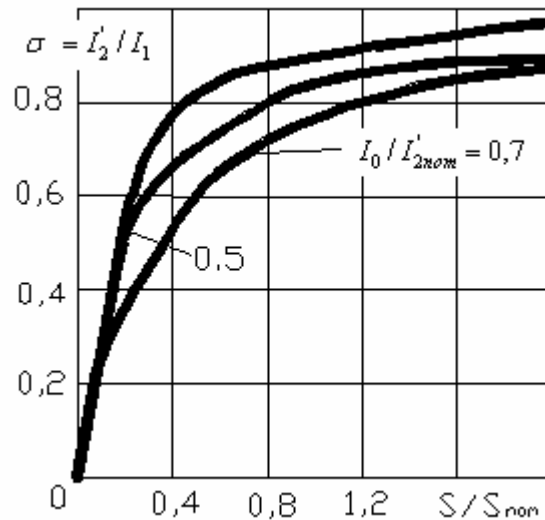
Trifaziams asinchroniniams varikliams kintamieji galios nuostoliai užrašomi formule:

$$\begin{aligned} \Delta P_{kint.} &= 3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2 = 3I_2^2 (R_2' + R_1 / \sigma^2) \approx \\ &\approx 3I_{2nom.}^2 (R_2' + R_1 / \sigma_{nom.}^2) (I_2' / I_{2nom.}')^2 = \\ &= \Delta P_{kint.nom.} (I_2' / I_{2nom.}') \end{aligned} \quad (2.3.4)$$

čia  $\Delta P_{kint.nom.} = I_{2nom.}'^2 (R_2' + R_1 / \sigma_{nom.}^2)$  - 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 statoriaus ir rotoriaus srovės dedamosios.

Apytikslės  $\sigma$  reikšmės gali būti surastos iš 15 pav. kreivių:



15 pav. Asinchroninio variklio rotoriaus ir statoriaus srovės priklausomybė nuo slydimo[3]

## Nuostoliai pavarose pereinamųjų procesų metu

Pereinamųjų procesų metu variklio apvijomis tekančios srovės ženkliai viršija nominaliąsias reikšmes ir sukelia papildomas 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 procesu metu galima užrašyti:

$$\Delta P_{p.p.} = \Delta P_{past.p.} + \Delta P_{k\ int.p.p.}; \quad (2.3.5)$$

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

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

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

$$\Delta P_{past.p.p.} = \int_0^{t_{p.p.}} \Delta P_{past.} dt = \Delta P_{past.} t_{p.p.}; \quad (2.3.6)$$

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

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

$$\Delta P_{k\ int.p.p.} = \int_0^{t_{p.p.}} i^2(t) R dt = \int_0^{t_{p.p.}} \Delta P_{k\ int.} dt; \quad (2.3.7)$$

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

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

1. Elektros pavaros inercijos momento sumažinimas.
2. Variklio tuščiosios eigos greičio reguliavimas pereinamųjų procesu metu.

Inercijos momentą sumažinti galima keliais būdais:

a) Mažainerciniu elektros variklių panaudojimas su sumažintu rotoriaus inercijos momentu. Prie tokiu priskiriami varikliai su prailgintu rotoriaus velenu.

b) Racionali pavaros mechaninės dalies konstrukcija, o taip pat variklio pakeitimas dviem, pusiau mažesnės nominalios galios varikliais.

Tuščiosios veikos greičio reguliavimas asinchroniniams varikliams galimas keičiant maitinimo įtampos dažnį (pavaros su keitikliais) arba polių porų skaičių [14].

### **Naudingumo koeficientas**

Pavaros naudingumo koeficientas  $\eta$  yra nusakomas santykiu tarp variklio veleno atiduodamos mechaninės galios ir variklio iš tinklo pareikalaujamos elektrinės galios.

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P} \quad (2.3.8)$$

*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 rotoriaus apsisukimų greitį:

$$P_{mech} = \frac{2\pi n}{60} \cdot M \quad (2.3.9)$$

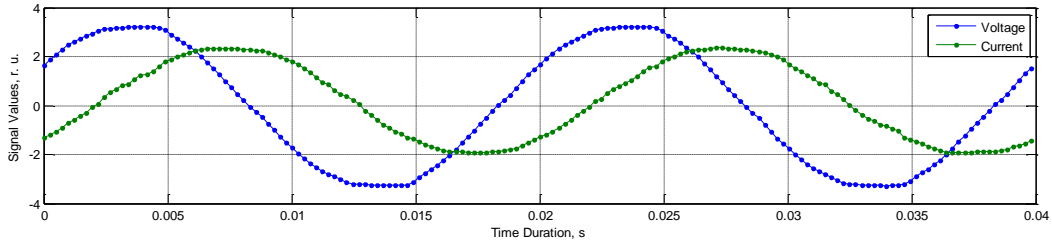
*čia  $n$  - variklio rotoriaus apsisukimų greitis,  $aps / min$ .*

*$M$  - apkrovos momentas,  $Nm$ .*

Didesnis pavaros naudingumo koeficientas reiškia efektyvesnį iš tinklo imamos galios išnaudojimą [14].

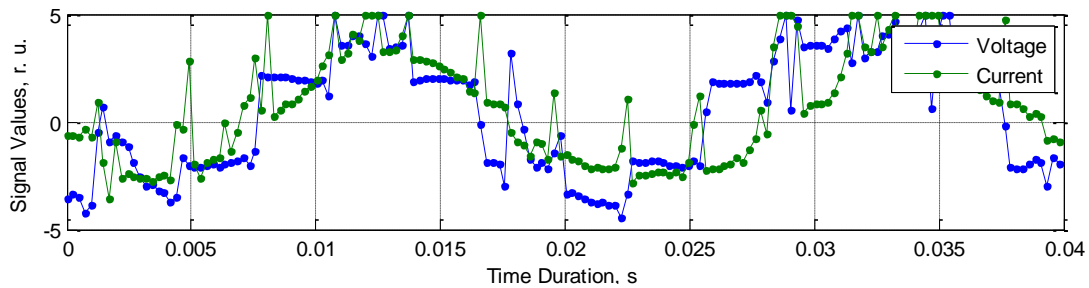
## Netiesinių iškreipčių faktorius

Kai kintamos srovės variklis yra tiesiogiai prijungtas prie maitinimo tinklo, jo įtampos ir srovės kreivės forma yra artima sinusinei (16 pav.).



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

Asinchroninio variklio, kuris įtampa gauna ne tiesiogiai iš tinklo, bet per dažnio keitiklį, pagrindinės kreivės forma būna iškraipyta (17 pav.).



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

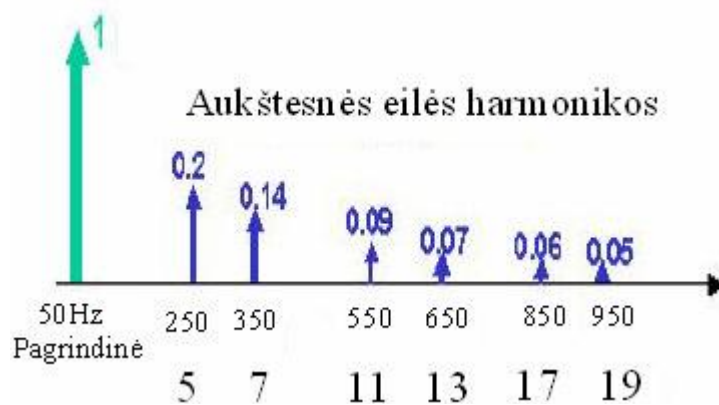
Įtampos ar srovės kreivės formos iškreipimai kintamoje elektros energijos grandinėje atsiranda dėl aukštesniųjų harmonikų įtakos. Aukštesnės srovės harmonikos tekėdamos tinklo elementais sukelia įtampos kritimus šių elementų varžose, kurie sumuojasi prie pagrindinės įtampos sinusoidės, tokiu būdu iškraipydami jos formą. Tinklo įtampos ar srovės nukrypimą nuo sinusinės kreivės formos priimta apibūdinti netiesinių iškreipčių faktoriumi NIF, (anglų kalboje Total Harmonic Distortion THD). NIF išreiškiamas procentais %:

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (M_n)^2}}{M_{pagr.}} \times 100\% \quad (2.3.10)$$

čia:  $M_{\text{pagr.}}$  - 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 (18 pav.). Penktosios kintamo 50Hz dažnio sistemos harmonikos dažnis bus 250Hz, septintosios – 350Hz, vienuoliktosios – 550Hz ir t.t.



18 pav. Aukštesnės eilės harmonikų diagrama [14]

Aukštesnės eilės harmonikos elektros tiekimo sistemoje sukelia šiuos neigiamus veiksnius:

1. Papildomi aktyviosios galios ir elektros energijos nuostoliai tinklo elementuose.
2. Galios faktoriaus  $\lambda$  sumažėjimas.
3. Ribotas kondensatorių baterijų panaudojimas, dėl galimų rezonansinių režimų atsiradimo.
4. Greitesnis elektros įrangos izoliacijos senėjimas, dėl papildomo šilimo.
5. Padidėja indukcinės aktyviosios ir reaktyviosios energijos skaitiklių paklaidos, atsiranda netikslumų įtampos ir srovės matavimo prietaisų parodymuose.
6. Kai kuriu relinių apsaugų klaidingas suveikimas; valdymo, automatikos, telemechanikos ir ryšių sistemų darbo kokybės prastėjimas, kai kada jų sugedimas.

Dėl to elektros energijos tiekėjai reikalauja vartotojų slopinti aukštesniųjų harmonikų lygį, t.y. NIF pagal standartų rekomendacijas reikia riboti 8% verte. Trifaziai lygintuviniai imtuvai (kaip ir puslaidininkinis dažnio keitiklis) negeneruoja arba generuoja labai mažą 3-iają aukštesniąją harmoniką, o taip pat ir aukštesniasias jos kartotines – 3, 9, 15, 21-ąją..., kurios yra vadinamos trilypėmis harmonikomis. Jų nebūna daugumoje dažninių pavarų.

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 [14].

### **Galios koeficientas ir galios faktorius**

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

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{[kW]}{[kVA]} \quad (2.3.11)$$

$\cos\varphi$  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 kampas, kai tuo tarpu rezultuojanti įtampa ar srovė bus visų aukštesniųjų harmonikų suma. Tada galios koeficiento sąvoka tampa klaidinga ir įvedamas naujas terminas – galios faktorius  $\lambda$ , kuris įvertina visų harmonikų įtaka pavaros darbo efektyvumui.  $\cos\varphi$  ir  $\lambda$  yra ekvivalentus tik tuomet, kai maitinančiosios įtampos ir srovės kreivės yra sinusinės arba labai panašios į ją formos ir harmonikų įtaka yra labai maža [14].



### 3. Projektinė - praktinė dalis

Projektinę - praktinę dalį apima elektros pavara su dažnio keitikliu, jo valdymo ir analizės sistema (18 pav.). Šioje dalyje glaustai aprašomi pagrindinius pavaros elementai, supažindinama su jų paskirtimi ir veikimu.



18 pav. Sumontuota elektros pavara su dažnio keitikliu

#### 3.1 Eksperimentinės elektros pavaros su dažnio keitikliu reikalavimų specifikacija

Elektros pavarai valdyti naudojami įvairūs elektromechaniniai aparatai, turintys judamuosius kontaktus elektros grandinei sujungti, ir bekontaktiniai aparatai, kurie neturi judamųjų kontaktų, o elektrinei grandinei sudaryti panaudojami galvaniniai ryšiai ir puslaidininkinių ir elektroninių elementų elektroninis bei joninis laidumas.

Šio darbo tikslas - suprojektuoti elektros pavaros su dažnio keitikliu valdymo, matavimų ir analizės sistemą, kurią būtų galima taikyti mokymo tikslams.

## Reikalavimai sistemai

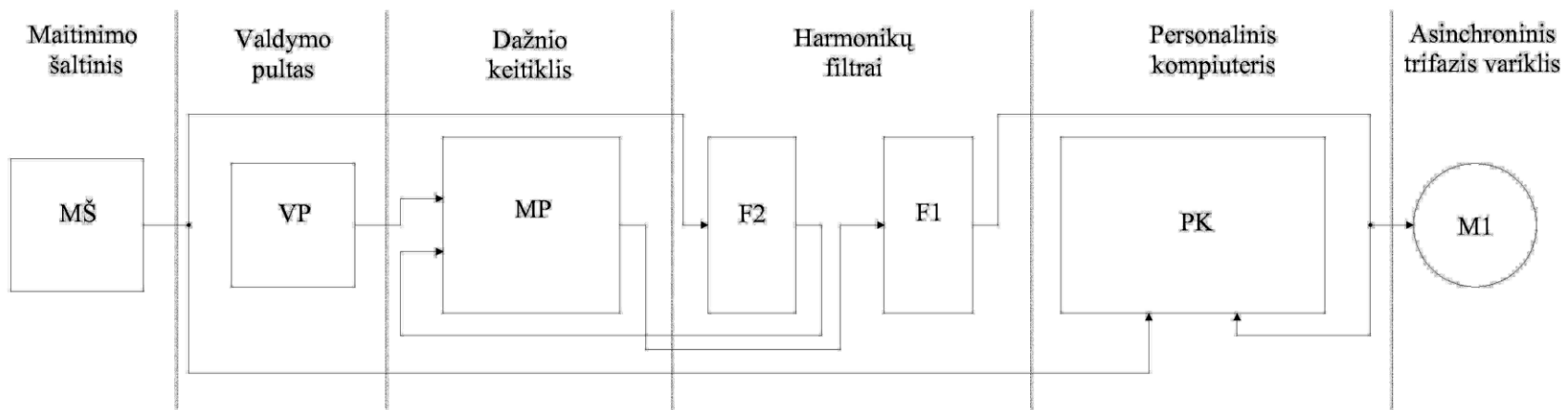
Reikalavimai į kuriuos buvo atsižvelgta projektuojant šią sistemą:

1. Visi sistemos elementai, jungtys turi būti parinkti pagal dažnio keitiklio (išsamesnė informacija pateikta priede) ir variklio pateiktus parametrus. Variklio pase, kuris yra pritvirtintas prie jo korpuso, pateikti duomenys:
  - a) Vardinė variklio aktyvioji galia  $P_N - 370W$ .
  - b) Linijinė tinklo įtampa ir variklio statoriaus apvijos jungimo būdas į nurodytos įtampos tinklą  $U_N - 220 / 380 V \Delta / Y$ .
  - c) Vardinė linijinė statoriaus apvijos srovė  $I_N$  (priklausomai nuo jungimo būdo) –  $2,08 / 1,2 A \Delta / Y$ .
  - d) Galios koeficientas  $\cos\varphi - 0,69$ .
  - e) Vardinis dažnis  $f_N - 50 Hz$ .
  - f) Vardinis sūkių dažnis ( $n_N$ ) – 1360 aps./min.
  - g) Valdomas variklis yra asinchroninis trifazis su trumpai jungtu rotoriumi.
- Dažnio keitiklio Siemens SINAMICS CU240S PNF duomenys:
  - a) Maitinimo įtampa  $U_N - 3AC \ 380V-480V$ .
  - b) Vardinė srovė  $I_N - 2.0 A$ .
  - c) Vardinė galia  $P_N - 0.55 kW$ .
  - d) Vardinis dažnis  $f_N - 50/60 Hz$ .
2. Kiekvienas funkcinis blokas, turi būti sumontuotas atskirai.
3. Kiekviename bloke esantys aparatai turi būti tvirtai mechaniškai sujungti su jais laikančiu pagrindu.
4. Kiekvieno bloko pagrindas prie kurio tvirtinami aparatai turi būti mechaniškai tvirtas.
5. Blokų dizainas ar spalva neturi blaškyti dėmesio.
6. Kiekviename bloke esantys aparatai turi būti taip išdėstyti, kad būtų galima lengvai juos matyti.

7. Kiekviename bloke esantys aparatai turi turėti išvestas jungtis laikančiosios konstrukcijos šonuose.
8. Pageidautina, kad kiekvienas blokas kairėje pusėje turėtų įėjimus, o dešinėje išėjimus.
9. Visi blokai, aparatai ir jų išvestos jungtys turi turėti aiškiai matomus žymėjimus.
10. Jungtys turi būti apsaugotos nuo tiesioginio sąlyčio.
11. Blokuose turi būti PE laidininkui skirta jungtis (jei tame bloke ant esančio aparato yra PE laidininkui skirta jungtis).
12. Prijungus kabelį prie maitinimo tinklo apie tai turi būti informuojama panaudojant indikacinę lemputę
13. Turi būti numatytas avarinio išjungimo aparatas.
14. Tiriamoji pavara (elektros variklis) turi turėti įtaisą, kurį paveikus atsirastų stabdymo momentas orientuotas į variklio rotorį.
15. Turi būti sudarytos galimybės prie dažnio keitiklio lengvai ir greitai prijungti ar atjungti tinklo ir variklio harmonikų filtrus.
16. Prie variklio turi būti primontuotas realaus variklio rotoriaus sūkių dažnio skaičiuotuvas.
17. Turi būti numatyta galimybė, nesugadinant sistemos komponentų, pakeisti ją sudarančius elementus.
18. Visa sistema turi būti kompaktiška, lengvai pernešama į kitą patalpą.

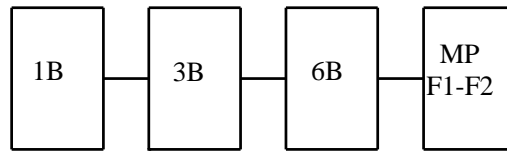
### **3.2. Sistemos funkcinės schemos sudarymas**

Funkcinė schema – schema, kurioje geometrinėmis figūromis (blokais) pavaizduotos svarbiausios sistemos dalys bei funkcijos, o tas figūras jungiančiomis linijomis - tų dalių bei funkcijų tarpusavio ryšiai. Funkcinės schemos paprastai naudojamos apibrėžiant aukšto lygio mažiau detalias principines schemas ir yra skirtos ne detaliam aprašymui, o bendram aprašomojo objekto suvokimui, skirtingai nuo elektrinių schemų, kurios naudojamos detaliam aprašant elektros prietaisus bei jų sudėtinės dalis, arba įrenginio planų, kuriame parodomas visos sudėtinės įrenginio detalės. Suprojektuotos asinchroninio variklio valdymo ir apsaugos sistemos funkcinė schema pateikta 19 pav.



19 pav. Sistemos funkcinė schema

Funkcinėje schemoje pavaizduoti elementai yra išdėstyti keturiuose blokuose (20 pav.).



20 pav. Blokai kuriuose sumontuoti elektros aparatai.

Bloke 1B (21 pav.) yra sumontuoti aparatai paženklinėti simboliais - S1, S2, S3, S4, S5 (funkcinėje schemoje šis blokas pažymėtas kaip VP).



21 pav. Blokas 1B

Bloko 1B elementų paženklintų S1, S2, S3, S4, S5 funkcijos:

S1 – normaliai atviro kontakto, turintis indikuojantį šviesos diodą, nefiksuojantis, vienpolis jungiklis, skirtas komutuoti grandinę, išėjime duoti atitinkamą loginį išėjimą, priklausomai nuo sujungimo schemos.

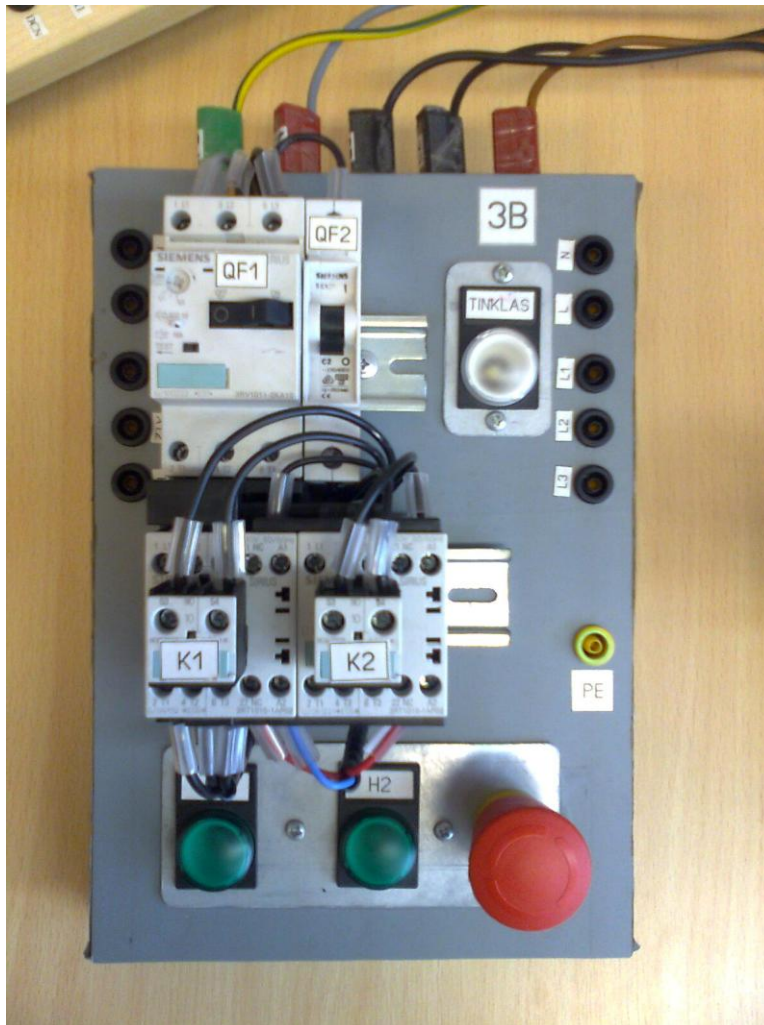
S2 – normaliai uždaro kontakto, nefiksuojantis, vienpolis jungiklis, skirtas komutuoti grandinę, išėjime duoti atitinkamą loginį išėjimą, priklausomai nuo sujungimo schemos.

S3 – normaliai atviro kontakto, turintis indikuojantį šviesos diodą, nefiksuojantis, vienpolis jungiklis, skirtas komutuoti grandinę, išėjime duoti atitinkamą loginį išėjimą, priklausomai nuo sujungimo schemos.

S4 – normaliai uždaro kontakto, nefiksuojantis, vienpolis jungiklis, skirtas komutuoti grandinę, išėjime duoti atitinkamą loginį išėjimą, priklausomai nuo sujungimo schemos.

S5 – normaliai atvirų kontaktų, trijų fiksuojančių padėčių, dvipolis jungiklis skirtas komutuoti grandinę, išėjimuose duoti atitinkamą loginį išėjimą priklausomai nuo sujungimo schemos.

Bloke 3B (22 pav.) sumontuoti aparatai – H1, H2, H3, S6, QF1, QF2, K1, K2 (funkcinėje schemoje šis blokas pažymėtas kaip MŠ).



22 pav. Blokas 3B

Funkcinėje schemoje bloko 3B elementų paženklintų H1, H2, H3, S6, QF1, QF2, K1, K2 funkcijos:

H1 – indikacinė lemputė, parodanti jog suveikė K1 kontaktorius.

H2 – indikacinė lemputė, parodanti jog suveikė K2 kontaktorius.

H3 – indikacinė lemputė, parodanti jog 3B bloko maitinimo kabelis įjungtas į maitinimo tinklą ir jis turi skirtingą potencialą.

S6 – avarinio išjungimo jungiklis. Jis skirtas valdymo ir galios grandinėse įtampos atjungimui.

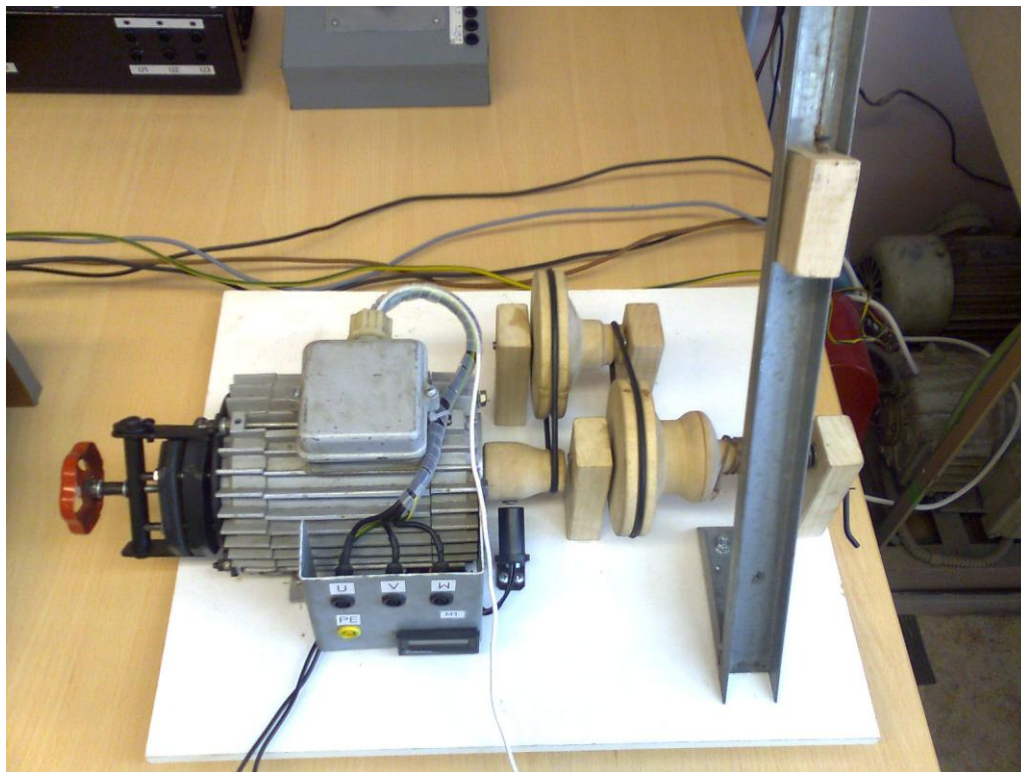
QF1 – tripolis variklinis automatinis jungiklis. Jis skirtas variklio ir jį maitinančių kabelių apsaugai nuo perkrovos ir trumpo jungimo.

QF2 – vienpolis automatinis jungiklis. Jis skirtas valdymo grandinėje esančių aparatų ir kabelių apsaugai.

K1 – tripolis kontaktorius su papildomais kontaktais. Jis skirtas galios grandinei komutuoti.

K2 – tripolis kontaktorius su papildomais kontaktais. Jis skirtas galios grandinei komutuoti.

Bloke 6B (23 pav.) sumontuotas aparatas funkcinėje schemoje paženklintas simboliu – M1.



23 pav. Blokas 6B

Funkcinėje schemoje bloko 6B elemento paženklinto M1 funkcija:

M1 – asinchroninis trifazis variklis. Jis skirtas pademonstruoti kokią įtaką jam daro dažnio keitiklis.



Ant variklio (iš kairės pusės) papildomai sumontuotas mechanizmas, kurį paveikus fiziškai, atsiranda papildomas stabdymo momentas orientuotas į variklio rotoriaus ašį.

Variklio jungčių laikiklio karkase įmontuotas rotoriaus sūkių dažnio matuoklis, displėjuje jis parodo apsisukimo skaičių per sekundę. Prie veleno įtaisytas induktyvinis jutiklis siunčia impulsus į mikrovaldiklį, kuris apdoroja šį signalą ir pateikia displėjuje.

Prie variklio (iš dešinės pusės) sukonstruota mechaninė pavara. Ji labai nesunkiai gali būti automatizuota, papildomai sumontavus jutiklius, bei signalus padavus į dažnio keitiklį ar valdiklį.

Bloke MP-F1-F2 (24 pav.) sumontuoti aparatai funkcinėje schemoje atitinkamai pažymėti MP, F1 ir F2 simboliais.



24 pav. Blokas MP-F1-F2

Šiame bloke sumontuoti: F1 (variklio filtras), F2 (tinklo filtras) ir MP (dažnio keitiklis). Variklio filtro įėjimai paženklinėti L1, L2 ir L3, o išėjimai T1, T2 ir T3. Tinklo filtro įėjimai

paženklinti L11, L21 ir L31, o išėjimai T11, T21 ir T31. Dažnio keitiklio įėjimai paženklinėti U1, V1 ir W1, o U2, V2 ir W2.

### **3.3. Sistemos sujungimų schemos sudarymas.**

Automatizavimo schemas smulkiai ir vaizdžiai parodo automatikos sistemų, prietaisų, automatizavimo priemonių ir pagalbinės aparatūros sudėtį, jų tarpusavio ryšius, leidžia nustatyti jų darbo nuoseklumą ir veikimo principą.

Schemas veikimas aprašomas, analizuojant kiekvieno energijos imtuvo grandines, valdymo organizavimą, apsaugas, signalizaciją ir kitas principinės elektrinės schemas ypatybes.

Principinės elektrinės automatizavimo (valdymo, signalizacijos, apsaugos) schemas dažniausiai sudaromos relinių - kontaktinių elementų bazėje, nes daug ir įvairios relinės kontaktinės aparatūros išleidžiama serijiniu būdu.

Schemas braižomos nesilaikant mastelio, ir atskiru įrenginio daliu erdvini išdėstymą neatsižvelgiama ar atsižvelgiama tik iš dalies.

Grafiniai elementų ženklai ir ryšio linijos išdėstomos taip, kad geriausiai rodytų įrenginio struktūrą k jo sudedamųjų dalių ryšius. Atstumas taip gretimų lygiagrečių ryšio linijų turi būti ne mažesnis kaip 2 mm

Ryšio linijos turi būti parodytos visos. Linijas leidžiama nutraukti, jei jos sunkina schemas skaitymą. Nutrauktos linijos žymimos rodyklėmis. Šalia jų nurodoma prijungimo vieta arba grandiniu charakteristika.

Braižant schemas vartojami tokie grafiniai ženklai:

- standartuose numatyti ar jų pagrindu sudaryti sutartiniai grafiniai ženklai;
- suprastinti įrenginių kontūrai (taip pat ir aksonometriniai);
- stačiakampiai ir kitos paprasčiausios geometrinės figūros.

Kokius grafinius ženklus vartoti, priklauso nuo schemas rūšies ir tipo.

Sutartiniu grafiniu ženklu matmenys nurodomi atitinkamuose standartuose. Leidžiama visus ženklus proporcingai didinti ar mažinti, tik tarpas taip dviejų gretimų sutartinio ženklo linijų turi būti ne mažesnis kaip 1 mm Grafinio ženklo ir ryšio linijų storis turi būti vienodas. Jei grafinio ženklo linijos numatytos pastorintos, jos braižomos dvigubai storesnės už ryšio linijas. Ryšio linijų

storis gali būti 0.2-1.0 mm. priklausomai nuo schemos formato ir grafiniu ženklų matmenų. Rekomenduojamas storis 0.3+0.4 mm.

Sutartiniai grafiniai elementų ženklai schemose braižomi taip, kaip parodyta atitinkamuose standartuose arba pasukti  $90^\circ$  kartotiniu kampu, jei standarte nėra specialių nurodymų. Sutartinį grafinį ženklą galima braižyti pasuktą  $45^\circ$  kampu. Galima braižyti ir veidrodinį jo atvaizdą, jei tai neiškreips ženklo prasmės.

Jei sutartiniame grafiniame ženkle vartojamos raidės arba skaitmenys, tai jį galima pasukti  $90^\circ$  kampu prieš laikrodžio rodyklę. Spinduliavimo kvalifikaciniai simboliai negali keisti padėties lapo rėmų atžvilgiu.

Schemose leidžiama pateikti įvairius techninius duomenis, priklausomai nuo schemos paskirties. Tokia informacija rodoma šalia grafinių ženklų, paprastų geometrinių figūrų viduje, laisvoje schemos lapo vietoje, šalia linijų, linijų nutraukimo vietose ar jų galuose, virš ir (arba) po išskeltinės linijos.

Schemose gali būti rašomi raidžių ir skaitmenų žymėjimai (pvz.. elementų), lentelės (pvz.. būdingų duomenų), pavadinimai (pvz.. funkcinių grupių), žodiniai nurodymai ir pastabos, taip pat diagramos, ciklogramos. komutavimo įtaisų kontaktų uždarymo lentelės ir pan.

*Elektrinių schemų sudarymas.* Principinių elektrinių schemų sutartiniai ženklai sudaromi pagal tam tikrą sistemą: didesnės informacijos ženklai gaunami, pridėdant prie bazinių papildomus ženklus pagal elemento specifiką.

Jei schemose vartojami nestandartiniai grafiniai ženklai, juos reikia paaiškinti.

Schemoje vaizduojami visi elektriniai elementai - naudojami įrenginyje tam tikriems elektriniams procesams vykdyti ir kontroliuoti, taip pat visi elektriniai ryšiai tarp jų bei elektriniai gnybtai, gnybtų; rinklės ir panašiai, kuriais užbaigiamos įeities ir išeities grandinės. Grandinės schemose rekomenduojama braižyti horizontaliai.

Aparatai schemose paprastai vaizduojami išeities padėtyje, t.y. kol jų neveikia valdymo signalai. Jei aparato padėtis nėra apibrėžta (perjungiklis ar pan.). jis vaizduojamas bet kurioje padėtyje su atitinkama pastaba. Matavimo ir reguliavimo prietaisu kontaktų rodoma tokia padėtis, kuri būna esant optimaliai matuojamojo ar reguliuojamojo parametro reikšmei.

Schemos elementu sutartiniu grafiniu ženklu matmenys nurodyti atitinkamuose standartuose. Visus ženklus schemose leidžiama proporcingai padidinti arba sumažinti, tačiau

tarpas taip dviejų gretimų ženklo linijų neturi būti mažesnis kaip 1.0 mm. Elementų sutartinių grafinių ženklų linijų storiai parenkami pagal standartus (paprastai būna 0.3 - 0.4 mm).

Sutartiniai grafiniai elementų ženklai išdėstomi taip, kad schemą būtų patogų nagrinėti, kai ryšio linijos būtų trumpiausios ir turėtų kuo mažiau posūkių bei susikirtimų. Jėgos grandinės (vienfazės ir trifazės) brėžiamos horizontaliomis 1.5 - 2.0 mm storio linijomis. Atstumas tarp linijų - 10 - 15 mm. Nulinis laidas brėžiamas horizontalia punktyrine truputi plonesne linija.

Kiekvienas elementas, įeinantis į įrenginio sudėtį ir atvaizduotas schemoje, turi turėti raidžių ir skaitmenų pozicijos užrašą. Užrašas raidėmis atitinka sutrumpintą aparato pavadinimą ir jo paskirtį įrenginyje. Sutartiniam raidžių ir skaitmenų užrašui vartojamos lotynų alfabeto raidės bei arabiški skaitmenys - kurie rašomi ženklų eile be tarpų. Raidžių ir skaitmenų aukštis turi būti vienodas. Dažniausiai vartojamu elementu rūšių raidžių kodus galima rasti įvairiuose schemotechnikos knygose.

Duomenys apie elektros aparatūrą surašoma į medžiagų ir įrenginių poreikių žiniaraštį. Kuris yra pateiktas šio projekto 2-me priede. Į lentelę įtraukiami visi aparatai, kurių pagrindinis elementas (energijos imtuvas) atvaizduotas brėžinyje, taip pat ir tie prietaisai, kurie naudojami pilnai automatizuoti įrenginį.

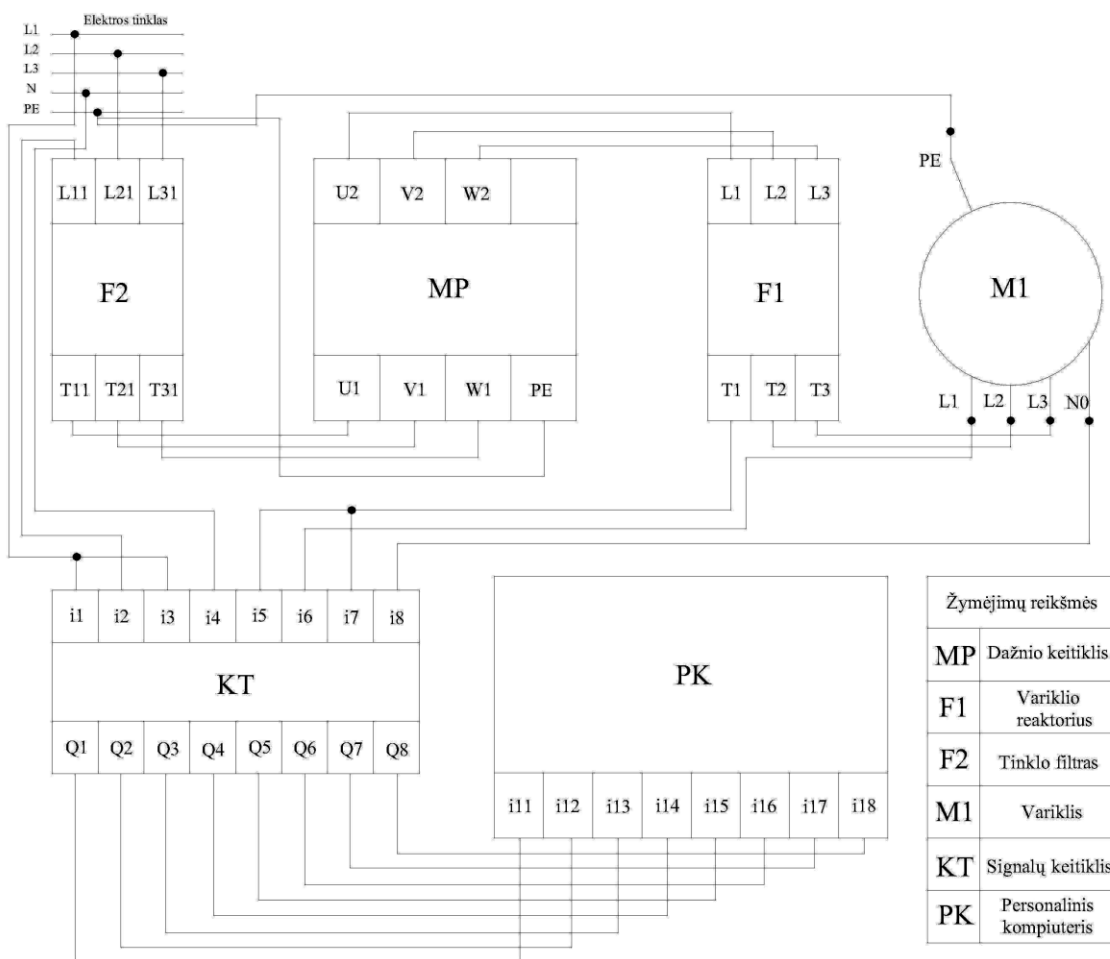
Duomenų lentelės grafos užpildomos tokia tvarka:

- grafoje „Įrenginio pavadinimas“ rašoma konkrečios grupės įrenginių techninis pavadinimas;
- grafoje "Žymėjimas" rašomi schemos elementų sutartiniai raidiniai žymėjimai. Vienu eilės numeriu žymimi visi vienodo tipo ir vienodų techninių charakteristikų aparatai;
- grafoje "Markė" rašomas visas aparato pavadinimas, tipas pagal katalogą ir techniniai duomenys;
- grafoje „Matas“ rašomas kokiais vienetais matuojamas įrenginių kiekis;
- grafoje "Kiekis" rašomas kiekis vieno tipo aparatūros, parodytos visuose schemos brėžiniuose;
- grafoje "Pastaba" rašomi jei reikalinga papildoma informacija apie įrenginį.

Asinchroninio variklio valdymo ir apsaugos sistemai užmaitinti parenkamas kabelis iš TN-S tinklo. TN-S tinklas, tai penkialaidis (vienfaziu vartotojų atveju - trilaidis) tinklas su tiesiogiai

įžeminta šaltinio neutrėle. Visoje sistemoje darbinio nulio (N) ir apsauginio nulio (PE) laidai yra vienas nuo kito izoliuoti ir montuojami ant atskirų, viena nuo kitos izoliuotų šynų. Trys fazės užmaitins švelnaus paleidimo įrenginį, variklį. Vienfaze (fazine) įtampa bus užmaitinta visa valdymo įranga.

Sistemą galima konfigūruoti pagal poreikį (su ar be filtrų). Vienas iš galimų sujungimų pateiktas žemiau 25 pav.



25 pav. Sistemos sujungimų schema

Šioje schemoje pajungtas dažnio keitiklis MP su filtrais F1 ir F2, bei variklis. Signalų keitiklis KT keičia matuojamų signalų reikšmes į kompiuteriui tinkamas ir suprantamas.

### **3.4. Sistemos montavimas, integravimas, derinimas ir jos bandymai.**

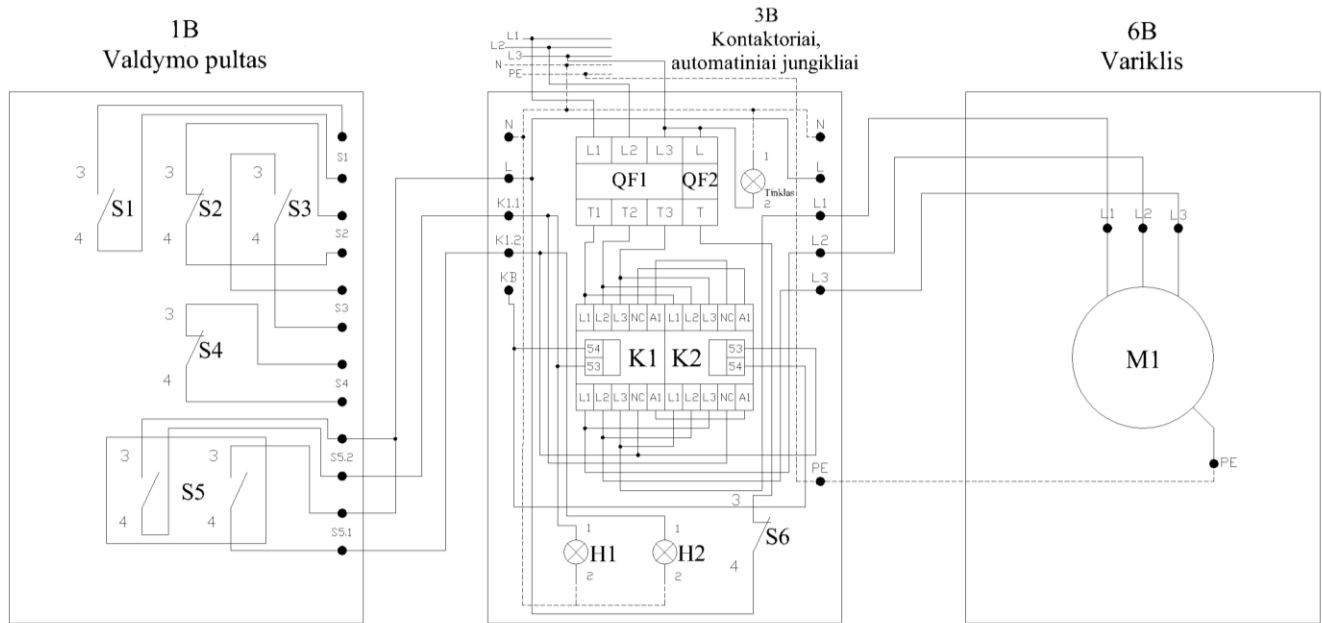
Visą pagrindinę sistemą sudaro keturi blokai (nepriskaičiuojant signalų matavimo įrenginių), su sumontuotais valdymo ir apsaugos aparatais juose. Visi sistemos aparatai yra pilnai integruoti ir suderinti sklandžiam bei patikimam sistemos darbui užtikrinti. Prireikus, prie šios sistemos, nesunku prijungti papildomus aparatus bei matavimo įrenginius.

Montuojant įrangą buvo kuriamos kiek įmanoma lengvesnės, kompaktiškesnės mechaninės konstrukcijos. Visi aparatai buvo išskaidyti į atskirus blokus. Tai svarbu visos sistemos lengvesniam pernešimui bei atskirų blokų pritaikymui kitose sistemose. Kiekviename bloke visos aparatų jungtys yra išvestos ir įtvirtintos laikančiosiose konstrukcijose. Dėl šios priežasties gali būti panaudotas, pavyzdžiui tik vienas aparatas esantis bloke. Visa tai suteikia sistemai lankstumą ir plačias pritaikymo galimybes.

Kiekvienas blokas vykdo tam tikras funkcijas. Blokuose aparatai išdėstyti taip, kad būtų galima lengvai juos apžiūrėti bei sujungti su kitais blokais.

Suprojektuotoje sistemoje, sujungimų schemose, galima išskirti dvi grandines: galios ir valdymo. Galios grandinės paskirtis tiekti elektros energiją valdomajam objektui, šiuo atveju jis yra asinchroninis trifazis variklis. Valdymo grandinės paskirtis sujungti valdymo įrenginius bei perduoti jų signalus reikiamam aparatui.

Žemiau pateikta sistemos sujungimų schema, pagal kurią atitinkamai sujungus blokus, galima atlikti pati paprasčiausią variklio valdymą (26 pav.). Šio bandymo metu galime ištirti pavaros energetinius rodiklius nesant harmoninių iškreipčių šaltiniui.



26 pav. Sistemos sujungimų schema

Sujungus blokus 1B, 3B, 6B pagal pateiktą sujungimų schemą, yra atliekamas pats paprasčiausias suprojektuotos sistemos variklio valdymo variantas. Šiuo atveju fiksuojančio jungiklio S5 rankenėlės pasukimu yra valdomi kontaktoriai K1 ir K2. Pasukus rankenėlę į kairę, maitinimą gauna kontaktoriaus K1 elektromagnetinė ritė, kuri sukuria magnetinį lauką ir per elektromagnetinę pavarą komutuoja kontaktoriaus galios kontaktus. Pasukus rankenėlę į dešinę, tokiu pačiu principu, suveikia K2 kontaktorius.

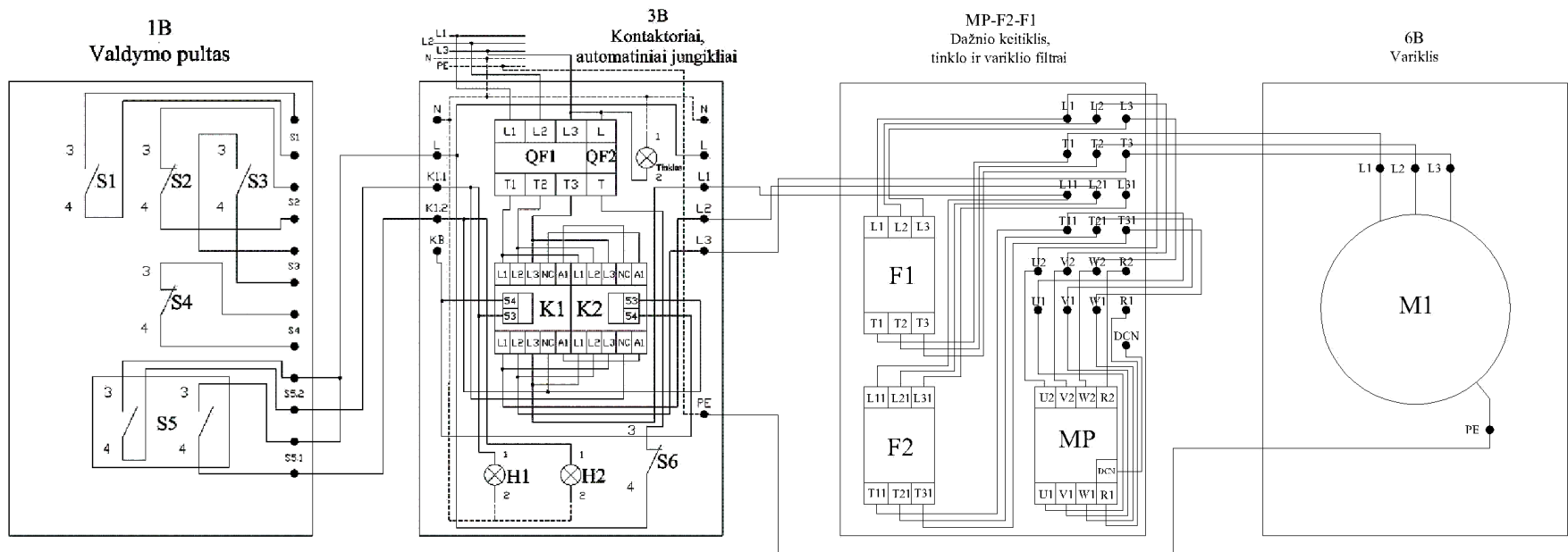
Kontaktoriai tarpusavyje turi mechaninę ir elektrinę blokuotę. Tai reiškia, kad vienu metu negalimas abiejų kontaktorių darbas, nes tai sukeltų trumpą jungimą tarp fazių. Mechaninė blokuotė yra įvykdoma, mechaniškai neleidžiant pritraukti kontaktų. Kontaktorius kuris suveikia pirmas, užkerta mechaniškai kitam kontaktoriui kelią suveikti, jei jis bus jungiamas neatjungus suveikusiojo kontaktoriaus. Elektrinė blokuotė veikia panašiai kaip ir mechaninė, tik šiuo atveju pirmas suveikęs kontaktorius nutraukia, papildomų kontaktų pagalba, kito kontaktoriaus maitinimo grandinę. Kitas kontaktorius negalės būti paleistas tol kol veiks prieš tai įjungtas kontaktorius.

Lemputės H1 ir H2 nurodo kuris kontaktorius yra suveikęs. Lemputė „Įtampa“ informuoja jog į blokas 3B gauna maitinimą iš tinklo. Jungiklis S6 atlieka avarinio išjungimo funkciją.

Nuspaudus jungiklį yra nutraukiamas maitinimas kontaktoriams bei visam vienfazio maitinimo tinklui. Tai garantuoja sklandų ir saugų sistemos išjungimą nelaimės atveju.

Kaip buvo minėta, aukščiau pateikta sujungimų schema yra pati paprasčiausia kuria galima sujungti panaudojus mažiausiai funkcijų turinčius blokus. Prijungus papildomai kitus blokus (27 pav.) galima atlikti įvairesnius variklio paleidimo variantus, bei įvykdyti platesnius tyrimus.





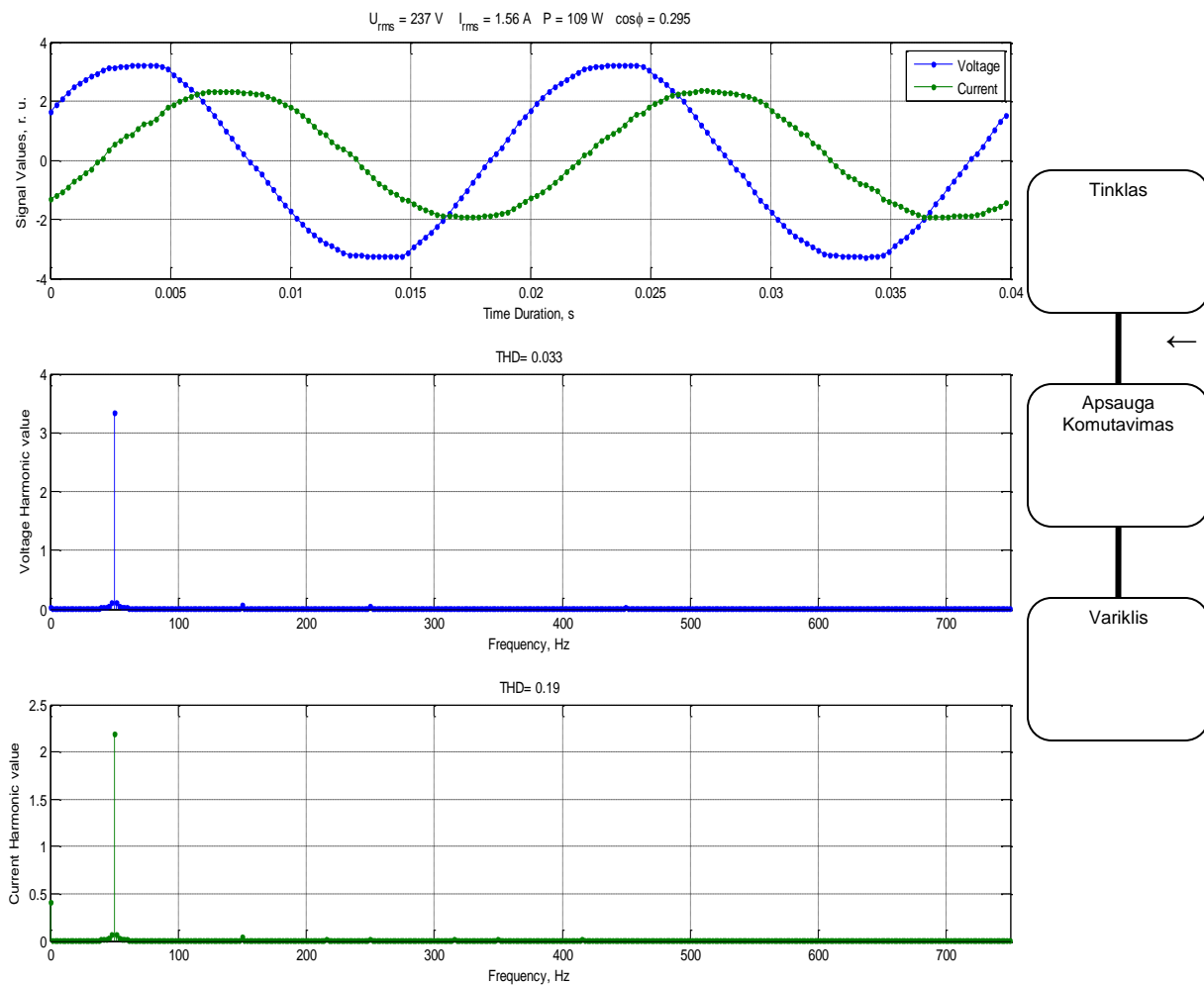
27 pav. Sistemos sujungimų schema

Aukščiau pateiktoje schemoje prie sistemos papildomai prijungtas dažnio keitiklis MP, tinklo filtras F2 ir variklio filtras F1. Šitaip sujungta sistema nėra pilnai išnaudota. Pasinaudojus šia schema dažnio keitiklis valdomas naudojant BOP valdymo panelę esančią ant dažnio keitiklio. Šiek tiek pakeitus sujungimų schemą, dažnio keitiklis galėtų būti valdomas su 1B bloke esančiais mygtukais. Pasinaudojus RS232 jungtimi, keitiklis gali būti valdomas per kompiuterį, prieš tai į jį įdiegus "Driver ES - starter V4.1.3.0" programą ir ją suderinus.

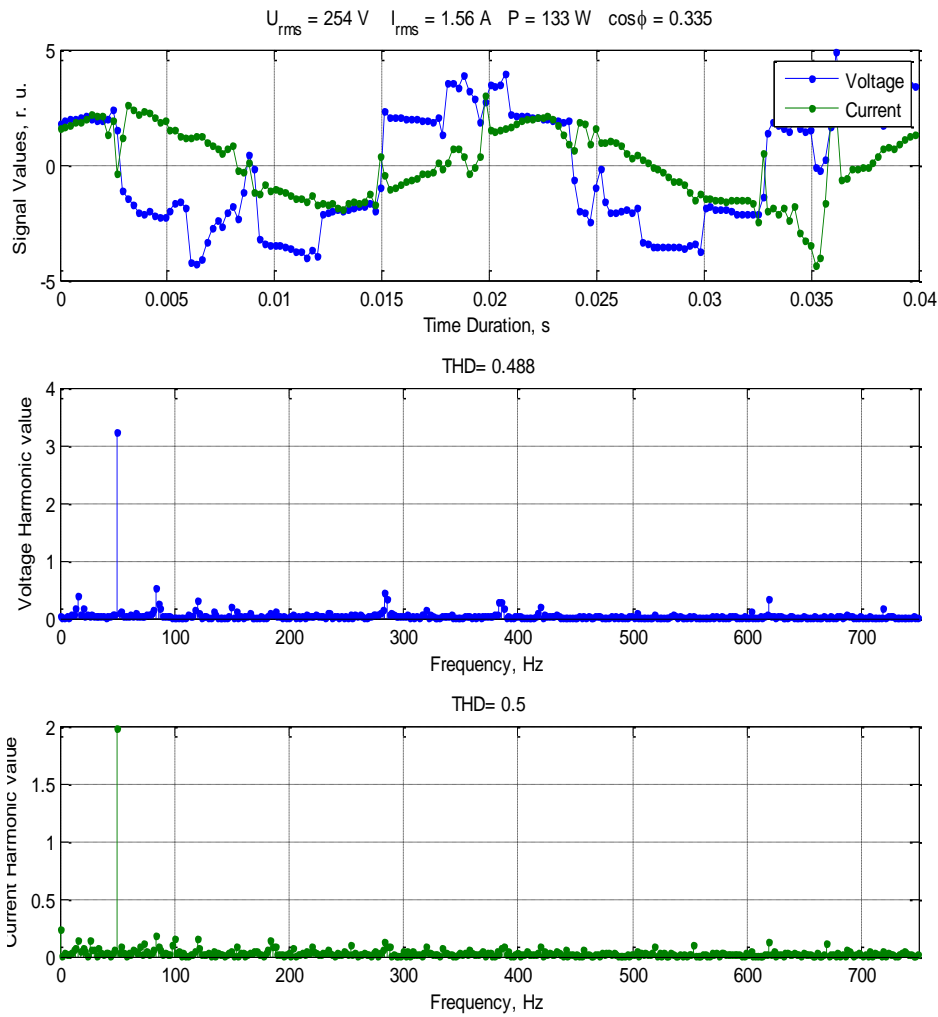
## 4. Tiriamoji - taikomoji dalis

### 4.1. Sistemos energetinio efektyvumo tyrimas

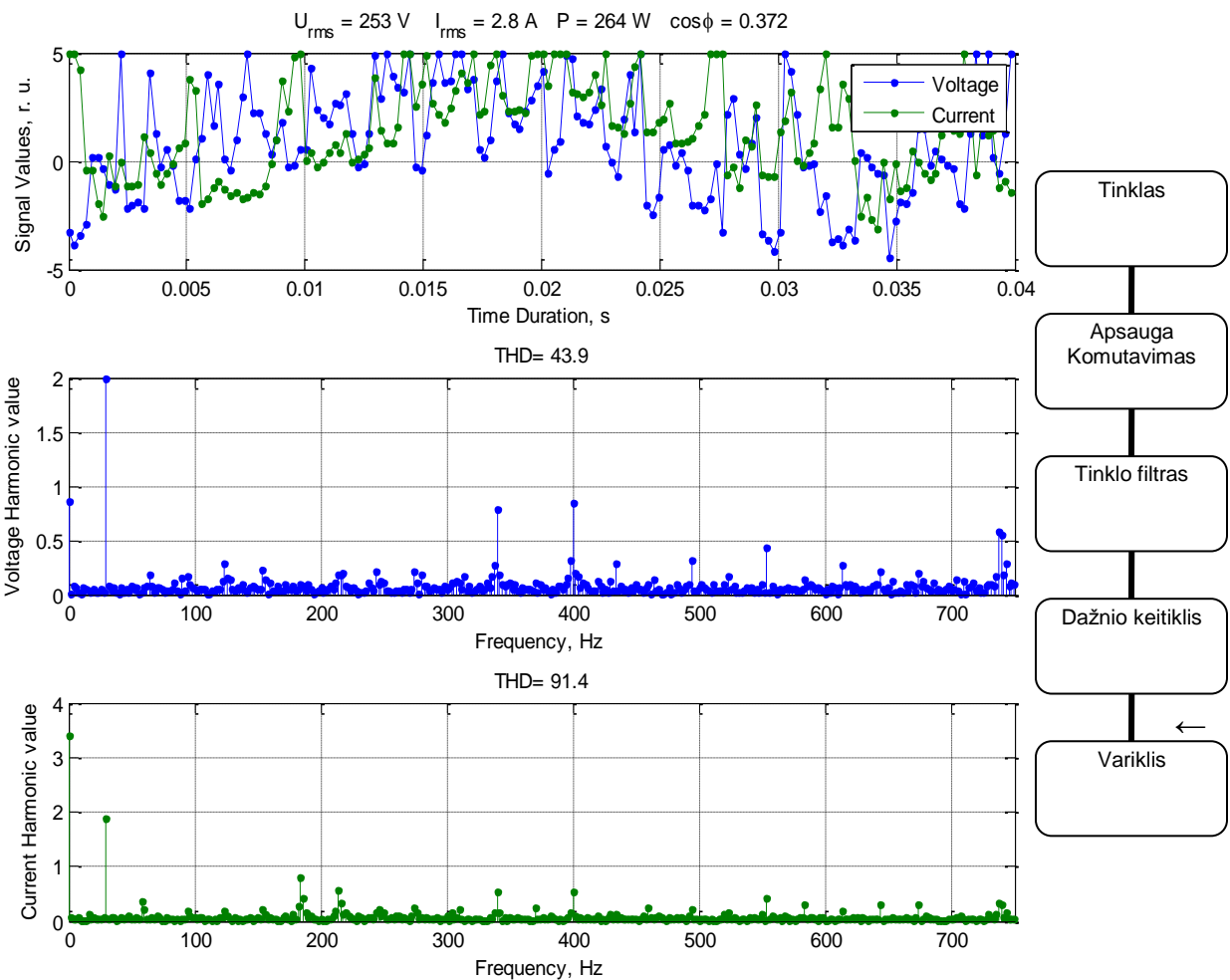
Sistemos efektyvumo tyrimas buvo atliekamas tam, kad nustatyti įmontuoto į stendą dažnio keitiklio daromą įtaką varikliui ir tinklui, bei iširti energetinius rodiklius. Atlikti pradiniai bandymai ir gauti duomenys. Duomenų gavimui buvo naudojamas personalinis kompiuteris su MatLab programiniu paketu. MatLab aplinkoje naudota programa kuri iš gaunamų realių įtampos ir srovės signalų pateikė oscilogramas (28 - 30 pav.) ir  $U_{ef}(V)$ ,  $I_{ef}(A)$ ,  $P_{vid}(W)$ ,  $\cos\varphi$ ,  $NIF(U)$ ,  $NIF(I)$  (apskaičiuojamus pagal 2.3.10 formulę). Variklio rotoriaus sukimosi greitis buvo nuskaitomas, nuo specialiai tam tikslui sumontuoto veleno sūkių dažnio matuoklio. 28 - 30 paveiksluose pateiktos tipinės variklio, dažnio keitiklio ir filtrų konfigūracijas atitinkančių vienos fazės srovės ir įtampos oscilogramos.



28 pav. Srovės, įtampos kreivė ir harmonikų diagramos, kai pavara jungiama tiesiai į tinklą, be dažnio keitiklio (šone esančioje diagramoje rodyklė parodo signalo nuskaitymo vietą)



29 pav. Srovės, įtampos kreivė ir harmonikų diagramos, kai pavara paleista su dažnio keitikliu ir jo filtrais (šone esančioje diagramoje rodyklė parodo signalo nuskaitymo vietą)



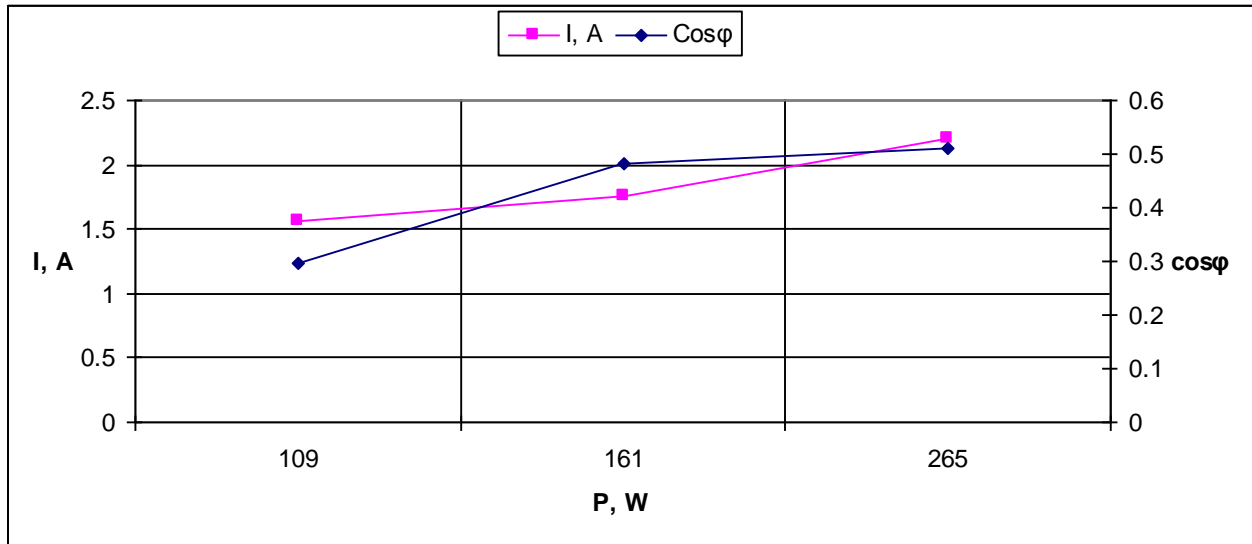
30 pav. Srovės, įtampos kreivė ir harmonikų diagramos, kai prie dažnio keitiklio nėra prijungti jo filtrai (šone esančioje diagramoje rodyklė parodo signalo nuskaitymo vietą)

Matavimo rezultatai pateikti 4 lentelėje. ir 31 - 32 pav.

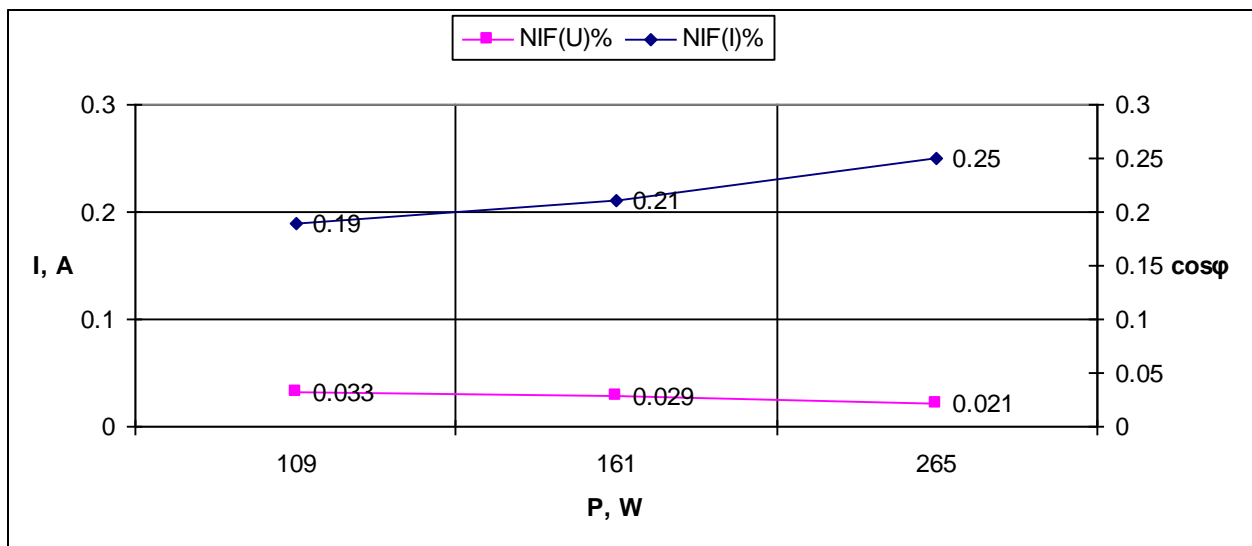
Asinchroninio variklio energetinio efektyvumo tyrimo rezultatai nesant pajungtam dažnio keitikliui.

**4 lentelė.**

aps/min	I, A	P, W	U, V	cosφ	NIF(U)%	NIF(I)%
1470	1.56	109	237	0.295	0.033	0.19
1440	1.75	198	236	0.482	0.029	0.21
1390	2.2	259	236	0.511	0.021	0.25



31 pav. Parametrų kitimas didinant apkrovą, kai pavara be dažnio keitiklio



32 pav. Įtampos ir srovės NIF kintant apkrovai, kai pavara be dažnio keitiklio

### Dažnio keitikliu reguliuojamo asinchroninio variklio tyrimo rezultatai

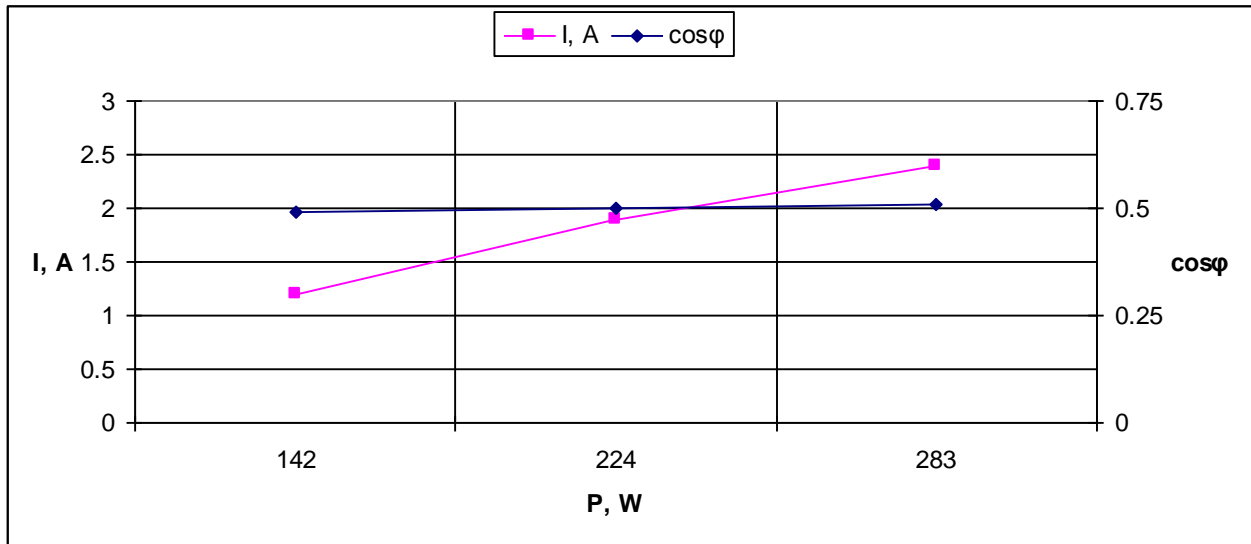
Tyrimo tikslas - nustatyti variklio energetinius rodiklius, kai jis maitinamas iš dažnio keitiklio 50Hz įtampos dažniu. Tyrimo metu fiksuojami tie patys rodikliai, kaip ir prieš tai atliktame tyrime.

Matavimo rezultatai pateikti 5 lentelėje. ir 33 - 34 pav.

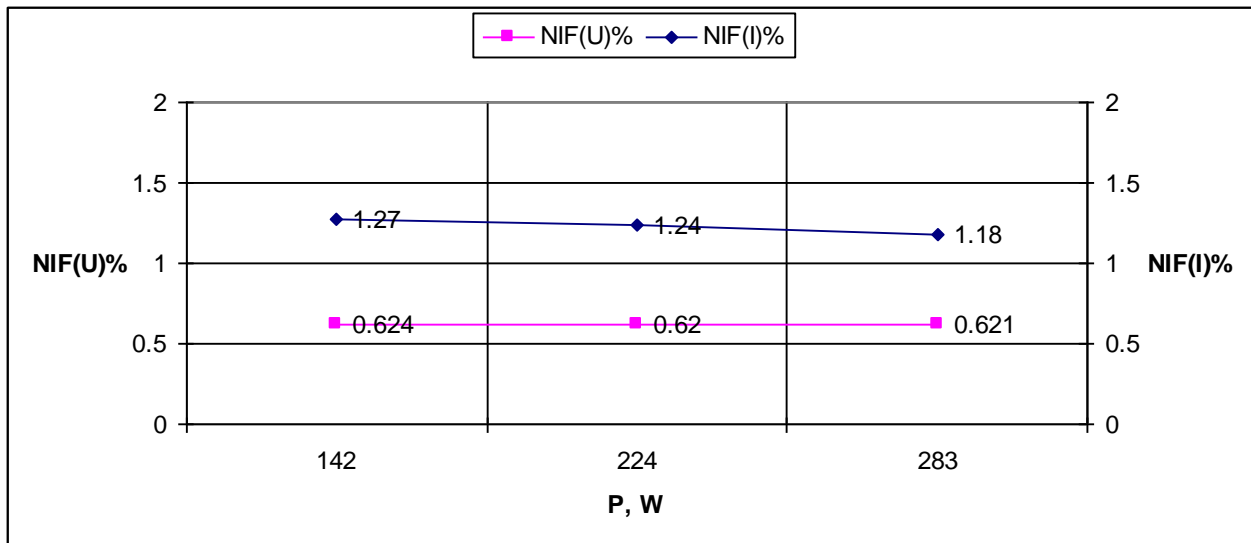
Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu, kai dažnis 50Hz, tyrimo rezultatai

5 lentelė

aps/min	I, A	P, W	U, V	cosφ	NIF(U)%	NIF(I)%
1468	1.20	142	240	0.493	0.624	1.27
1445	1.90	224	241	0.501	0.620	1.24
1389	2.40	283	240	0.511	0.621	1.18



33 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 50\text{Hz}$



34 pav. Įtampos ir srovės NIF pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 50\text{Hz}$



### Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis padidintas

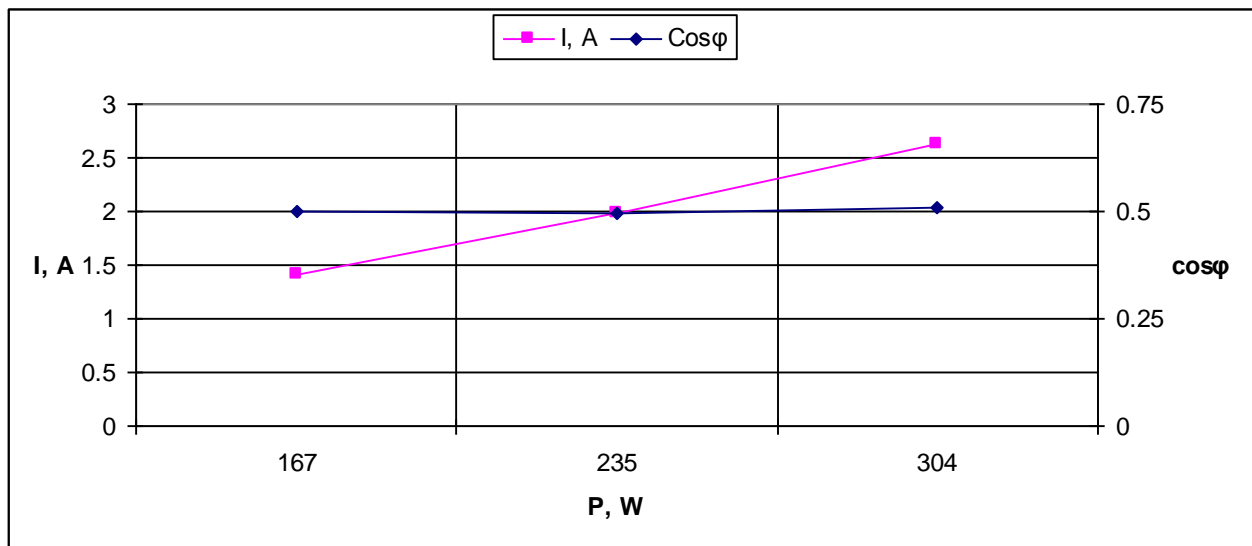
Tyrimo tikslas - nustatyti variklio energetinius rodiklius, kai jis maitinamas iš dažnio keitiklio 55Hz įtampos dažniu. Tyrimo metu fiksuojami tie patys rodikliai, kaip ir prieš tai atliktame tyrime.

Matavimo rezultatai pateikti 6 lentelėje. ir 35 - 36 paveiksluose.

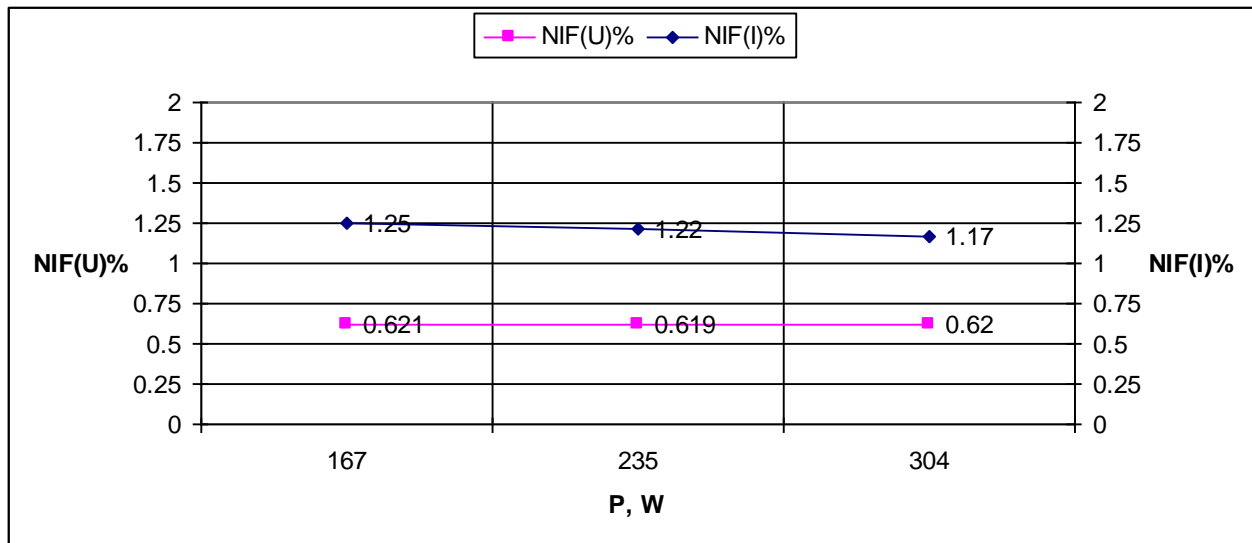
### Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu, kai dažnis 55Hz, tyrimo rezultatai

6 lentelė

aps/min	I, A	P, W	U, V	cosφ	NIF(U)%	NIF(I)%
1620	1.41	180	264	0.501	0.621	1.25
1605	1.98	245	263	0.495	0.619	1.22
1572	2.63	334	263	0.511	0.620	1.17



35 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 55\text{Hz}$



36 pav. Įtampos ir srovės NIF pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 55\text{Hz}$

### Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis sumažintas

Tyrimo tikslas - nustatyti variklio energetinius rodiklius, kai jis maitinamas iš dažnio keitiklio 45, 35, 25 Hz dažnio įtampa. Tyrimo metu fiksuojami tie patys rodikliai, kaip ir prieš tai atliktuose matavimuose.

Matavimo rezultatai pateikti 7 - 9 lentelėse. ir 37 - 39 paveiksluose.

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

7 lentelė

aps/min	I, A	P, W	U, V	cosφ	NIF(U)%	NIF(I)%
1330	1.11	116	216	0.491	0.731	1.492
1300	1.86	191	217	0.490	0.753	1.574
1285	2.13	222	216	0.487	0.790	1.582

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

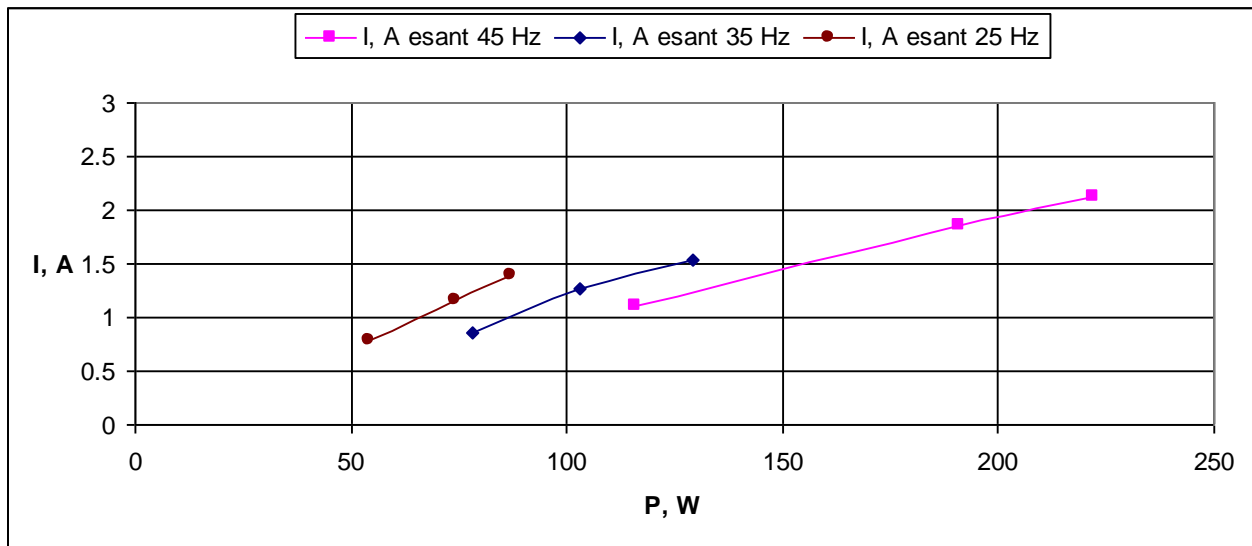
8 lentelė

aps/min	I, A	P, W	U, V	cosφ	NIF(U)%	NIF(I)%
1044	0.85	78	176	0.491	0.822	1.742
1035	1.26	103	176	0.489	0.843	1.833
1026	1.53	129	176	0.486	0.857	1.945

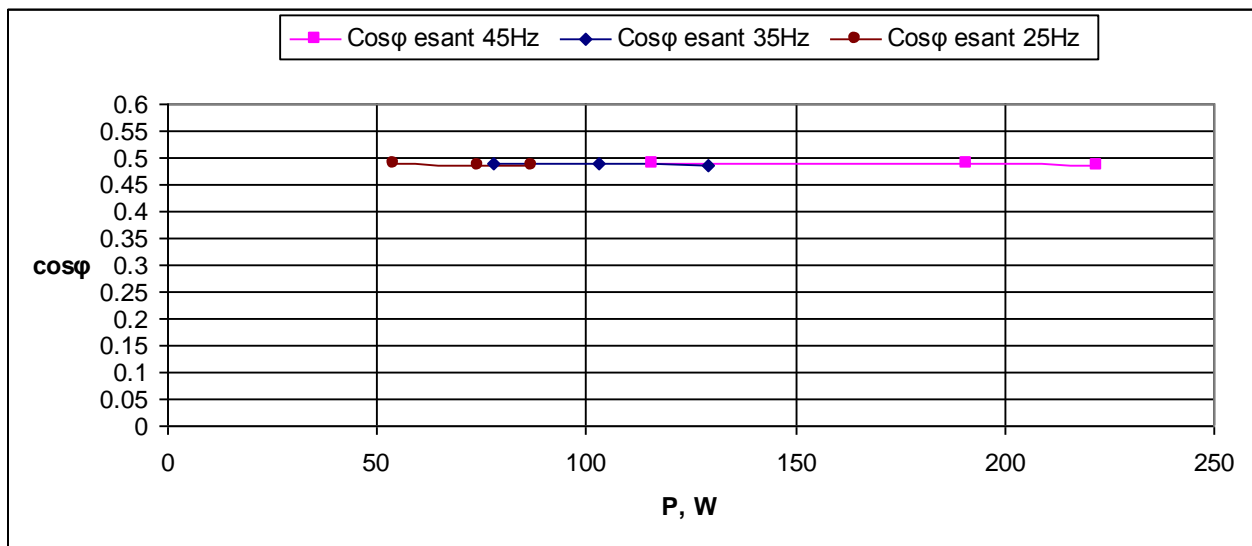
Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu, kai dažnis 25Hz, tyrimo rezultatai

9 lentelė

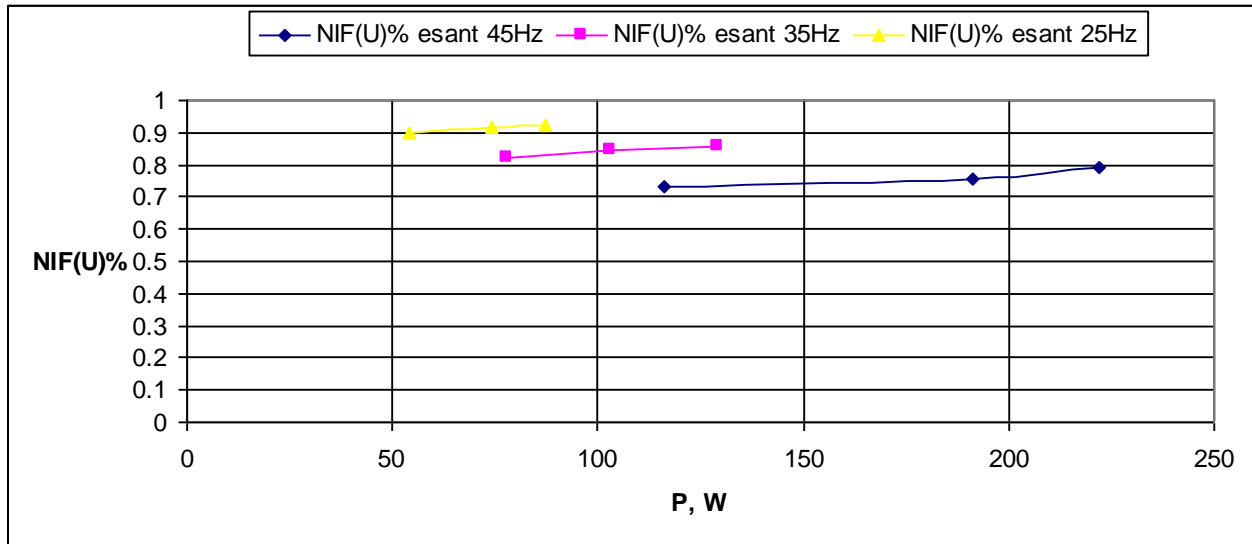
aps/min	I, A	P, W	U, V	cosφ	NIF(U)%	NIF(I)%
734	0.78	54	137	0.489	0.901	1.991
720	1.16	74	136	0.487	0.915	2.013
700	1.39	87	136	0.486	0.920	2.075



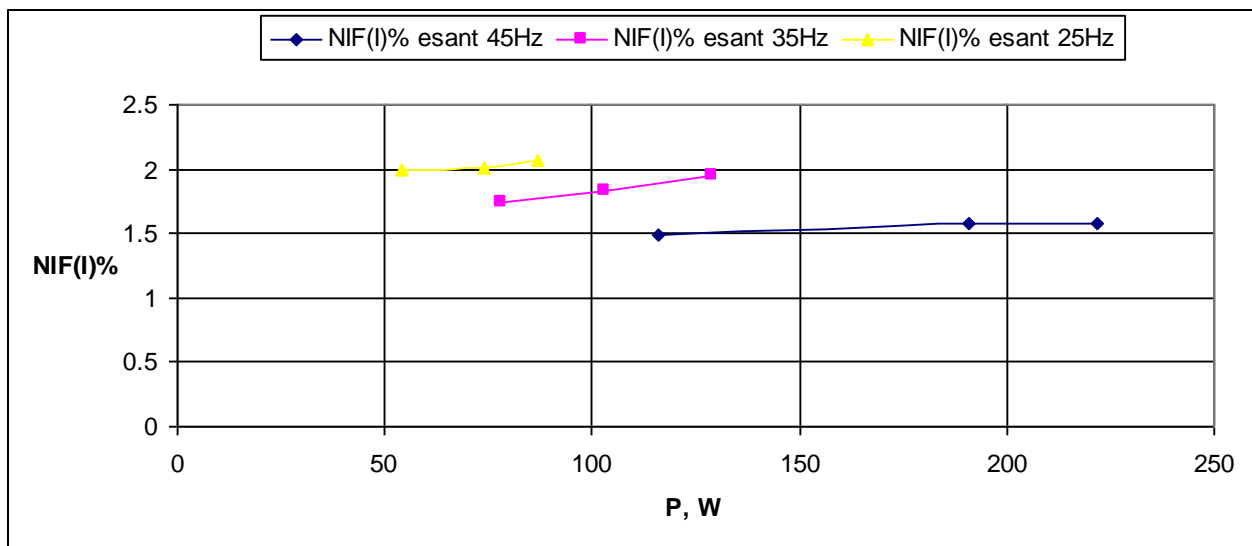
37 pav. Parametų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 45, 35, 25\text{Hz}$



37a pav. Parametų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 45, 35, 25\text{Hz}$



38 pav. Įtampos NIF pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 45, 35, 25\text{Hz}$



39 pav. Srovės NIF pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 45, 35, 25\text{Hz}$

### Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimas kai dažnis 50Hz. Atjungti dažnio keitiklio filtrai

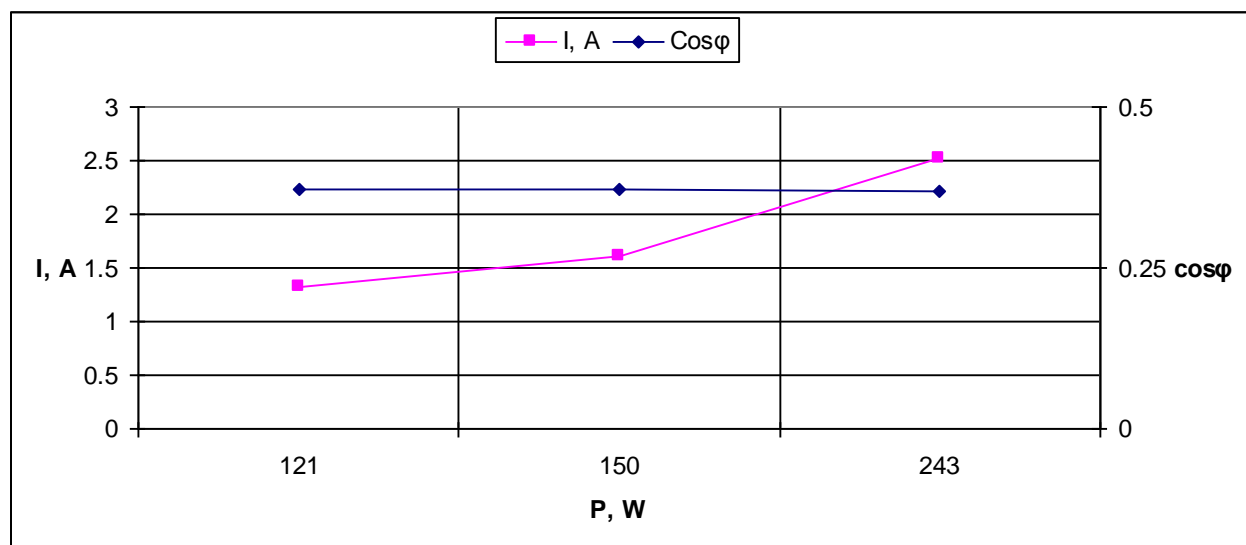
Tyrimo tikslas - nustatyti variklio energetinius rodiklius, kai jis maitinamas iš dažnio keitiklio (be filtrų) 50Hz įtampos dažniu. Tyrimo metu fiksuojami tie patys rodikliai, kaip ir prieš tai atliktuose matavimuose.

Matavimo rezultatai pateikti 9 lentelėje. ir 40 - 41 paveiksluose.

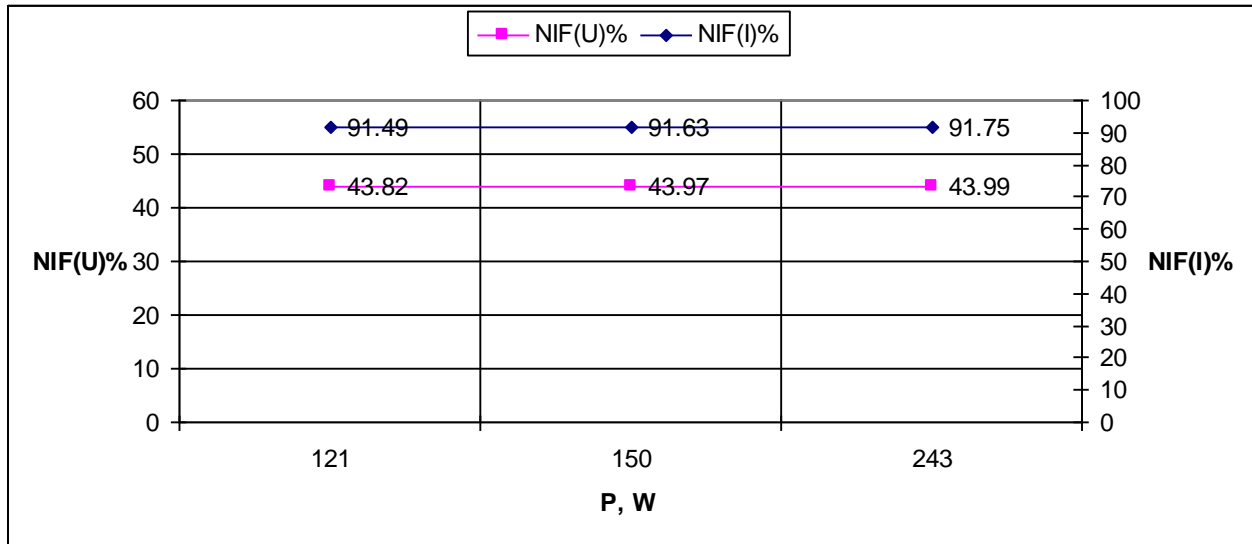
Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu (be filtrų), kai dažnis 50Hz, tyrimo rezultatai

9 lentelė

aps/min	I, A	P, W	U, V	cosφ	NIF(U)%	NIF(I)%
1470	1.32	121	253	0.372	43.82	91.49
1445	1.61	150	252	0.371	43.97	91.63
1390	2.52	243	252	0.370	43.99	91.75



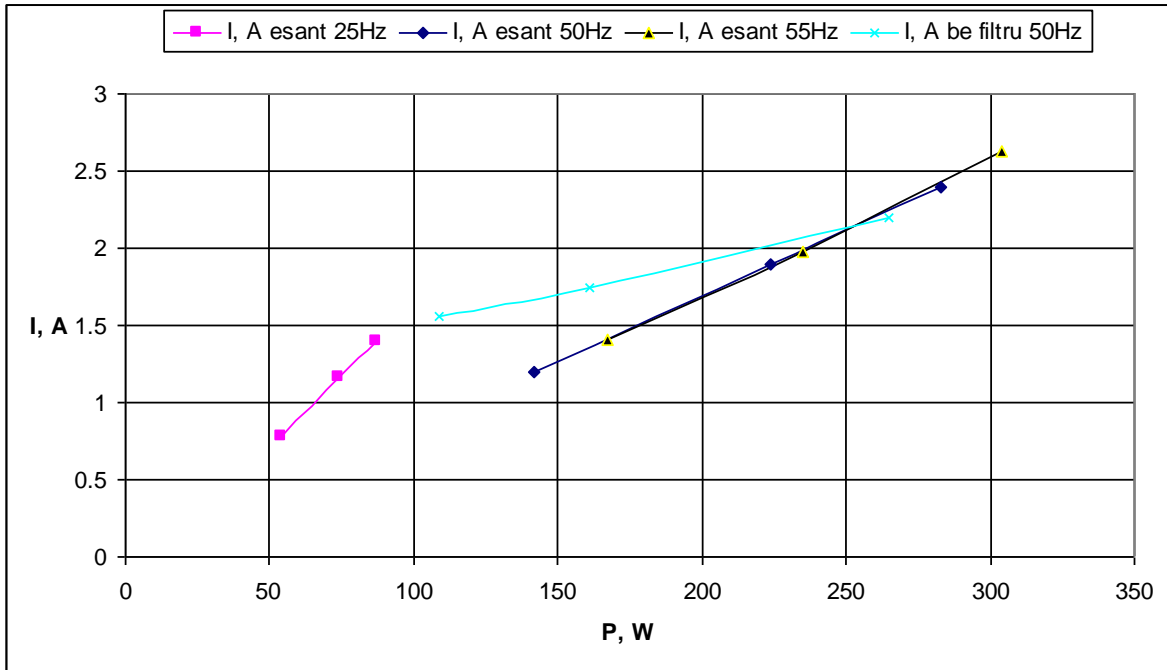
40 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 50\text{Hz}$  be dažnio keitiklio filtrų



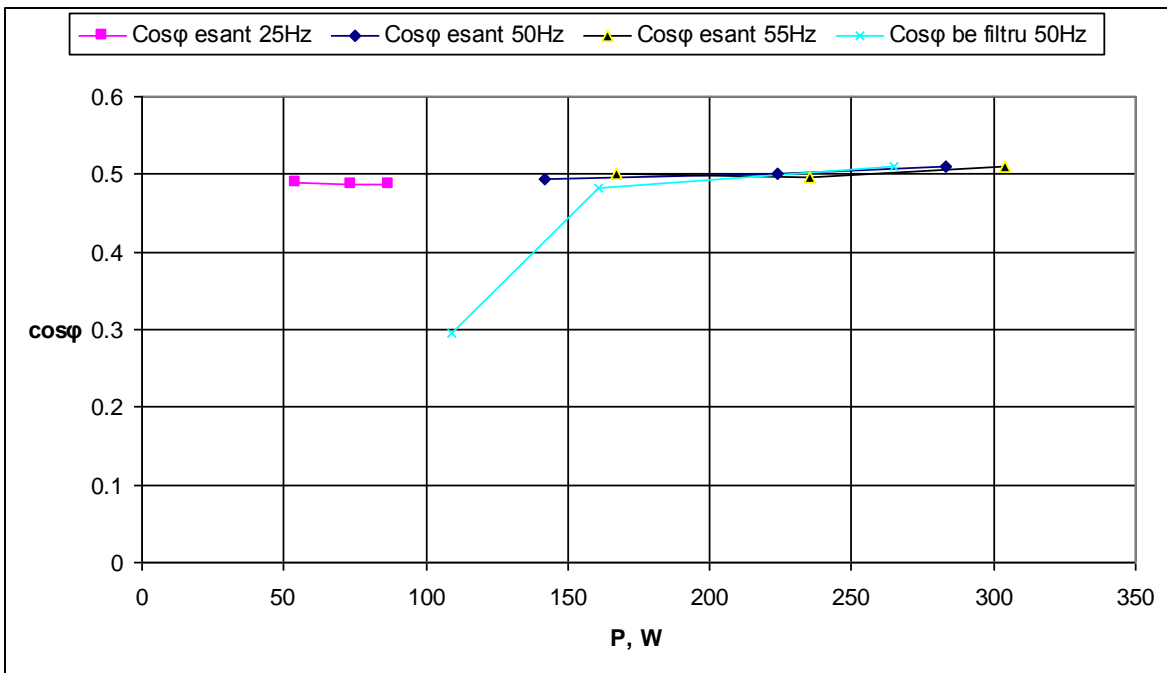
41 pav. Įtampos ir srovės NIF pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 50\text{Hz}$ . Atjungti dažnio keitiklio filtrai

**Asinchroninio variklio su dažnio keitikliu tyrimo metu gautų duomenų pateikimas viename grafike**

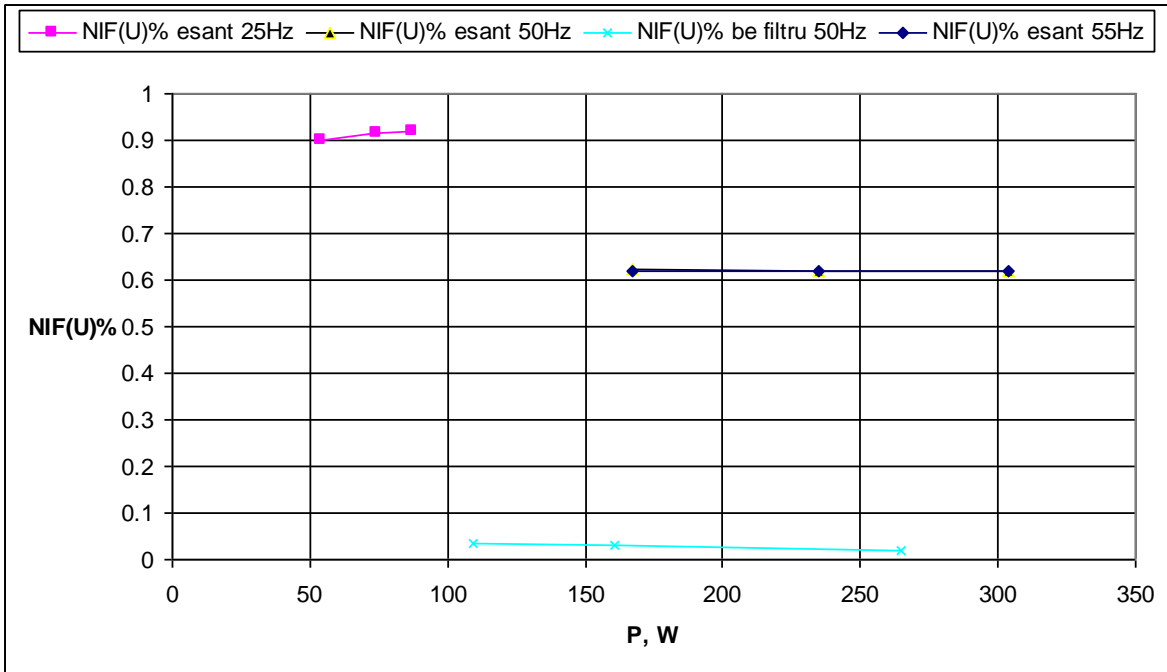
Aukščiau pateiktų duomenų  $I, A, \cos\phi, NIF(U)\%, NIF(I)\%$ , esant 25, 50, 55Hz ir 50Hz be dažnio keitiklio filtrų grafinis duomenų pateikimas bendrame grafike (42 - 45 pav.).



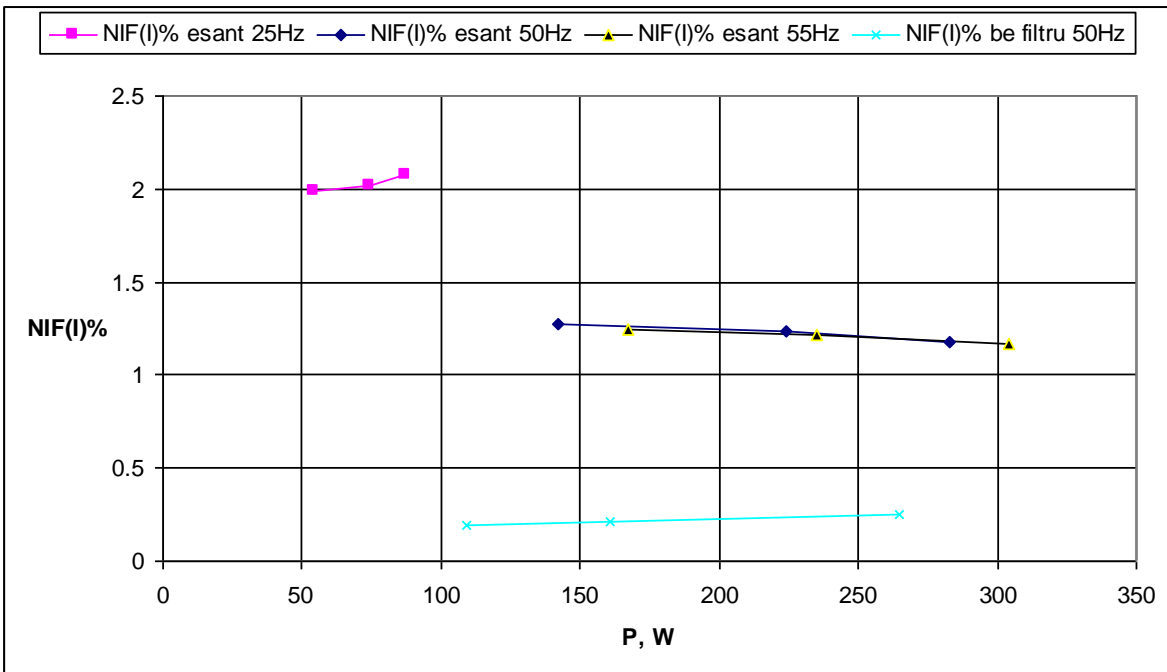
42 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 25, 50, 55\text{Hz}$  ir esant 50Hz be dažnio keitiklio filtrų



43 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 25, 50, 55\text{Hz}$  ir esant 50Hz be dažnio keitiklio filtrų



44 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 25, 50, 55\text{Hz}$  ir esant 50Hz be dažnio keitiklio filtrų



45 pav. Parametrų kitimas pavaroje su dažnio keitikliu, kai  $f = 25, 50, 55\text{Hz}$  ir esant 50Hz be dažnio keitiklio filtrų



## **Tyrimo rezultatų apibendrinimas**

Lyginant surinktus tyrimo rezultatus matyti, kad pavarai esant tuščiojoje veikoje ir be dažnio keitiklio srovė yra didesnė nei pavarai esant tuščiojoje veikoje su dažnio keitikliu. Tačiau atsiradus apkrovai, bei jai didėjant, reguliuojamoje pavaroje srovė išauga labiau, ir kuo mažesnis dažnis tuo srovės padidėjimas ryškesnis.

Kai pavara nereguliuojama, srovės ir įtampos netiesinių iškreiptų faktorių dydžiai kinta mažose ribose (vidutiniškai ~ 1%), bei priklauso nuo apkrovos. Kai pavaros valdymui įjungiamo dažnio keitiklį, akivaizdžiai iškreiptų faktorių padidėja (~ 10 kartų). Įvairiuose darbo režimuose jis bemaž nekito. Atjungus dažnio keitiklio filtrus THD(U) ir THD(I) drastiškai padidėjo, ir siekė THD(I) - 91% THD(U) - 43%.

Kaip matyti iš kreivių, kintant apkrovai, galios koeficientas nevaldomoje pavaroje yra mažesnis ir labiau priklauso nuo apkrovos. Esant pavarai su dažnio keitikliu, galios koeficiento reikšmė didinant apkrovą kinta žymiai siauresnėse ribose.

## **4.2. Sistemos pritaikymas mokymo tikslams**

Kuriant šią sistemą nuo pat pradžių buvo galvojama kaip būtų galima kuo efektyviau pritaikyti ją mokymo tikslams. Buvo norima sumontuoti esančią įrangą taip, kad ja ateityje besinaudojantys studentai galėtų sujungti aparatus pagal įvairiausias schemas. Dėl to buvo nuspręsta visą įrangą nesudėti į vieną konstrukciją. Visi projektuojamos sistemos elementai buvo suskirstyti į atskirus blokus. Kiekviename bloke esantys prietaisai yra atvirai pritvirtinti prie laikančiųjų konstrukcijų. Dažnai sumontuota ir veikianti įrangą pramonės objektuose būna paslėpta. Todėl sumontuota sistema atvirai, be apdangalų, leidžia besimokantiejiems lengvai apžiūrėti joje esančią įrangą. Kiekviename atskirame bloke esantys įtaisai turi išvestus sujungimo kontaktus. Tai leidžia netik tuos aparatus apžiūrėti iš arti, bet ir išbandyti juos atskirai sujungus į paprastą schemą. Visą įrangą suskaidytą į atskiras dalis nesunku kaitaliooti pritaikant norimoms schemoms.

Sumontuotoje sistemoje pats sudėtingiausias ir naujausias įrenginys yra dažnio keitiklis. Jį atitinkamai parametrizavus galima gauti įvairius pavaros darbo režimus. Būtent dėl šios priežasties yra sudarytas dažnio keitiklio parametrizavimo aprašas, kuris įdėtas į priedus.

### **4.3. Sistemos tolimesnio išplėtimo galimybės**

Sumontuota sistema nesudėtingai gali būti išplėsta. Tai leidžia padaryti įrenginių išdėstymas atskiruose blokuose. Kiekvienas įrenginys turi išvestus išorinius kontaktus, kurie yra įtvirtinti laikančiojoje konstrukcijoje. Tų jungčių pagalba, naudojant sujungimų laidus, visi blokai sujungiami į bendrą sistemą. Norint išplėsti aparatūrą tereikia papildomus įtaisus atitinkamai prijungti prie sistemos.

Esamą sistemą ateityje būtų galima gerokai praplėsti prijungiant pavyzdžiui: modernesnę pavarą, visus procesus kontroliuojantį programuojamąjį loginį valdiklį (PLV), esamame variklio bloke papildomai sumontavus jautrius ir panaudojus jį automatiniam dažnio keitiklio valdymui, prijungiant pažangesnius signalų analizatorius, paleidinėjant keletą variklių ir t.t.

## 5. Rezultatai ir išvados

1. Baigiamajame darbe apžvelgti asinchroninių elektros variklių greičio reguliavimo būdai. Iš analizės galima daryti išvadą, kad šiuo metu pačios moderniausios ir daugiausia privalumų (pvz., didelis energetinis efektyvumas, greičio reguliavimo sklandumas, galimybė integruoti į bendrą automatizavimo sistemą) turinčios kintamosios srovės elektros pavaros yra valdomos panaudojant dažnio keitiklį. Jų galimybės reguliuojant asinchroninio variklio greitį yra daug geresnės negu keičiant statoriaus polių porų skaičių, rotorius varžos dydį, statoriaus apvijas perjungiant iš žvaigždės į trikampį. Tačiau dažnio keitiklis į tinklą generuoja aukštesniąsias harmonikas, kurios privalo būti nuslopintos siekiant išvengti neigiamos įtakos elektros tinklo energetiniams parametrams.

2. Aptarti pagrindiniai elektros pavarų energetiniai rodikliai: galios ir energijos nuostoliai, naudingumo koeficientas  $\eta$ , netiesinių iškreipimų faktorius NIF (angl *Total Harmonic Distortion THD*), galios koeficientas  $\cos \varphi$  ir galios faktorius  $\lambda$ . Pažymėtina, kad pavaroje su dažnio keitikliu smarkiai padidėja NIF reikšmė, atsiranda skirtumas tarp galios koeficiento  $\cos \varphi$  ir galios faktoriaus  $\lambda$ .

3. Pagal reikalavimų sąrašą buvo suprojektuota, pagaminta ir išbandyta eksperimentinė elektros pavaros su dažnio keitikliu valdymo, matavimų ir analizės sistema. Atlikti jos elementų funkcionalumo bandymai keičiant tinklo dažnį, variklio apkrovos momentą.

4. Pasinaudojus programiniu paketu „MATLAB“ ir papildoma technine įranga, galima atlikti išmaniuosius matavimus ir vykdyti jų analizę. Programinė ir techninė įranga leidžia vykdyti išmaniojo oscilografo funkcijas: kompiuterio ekrane matomos srovės ir įtampos kreivės, signalų efektinės vertės, apskaičiuojama vidutinė galia, galios koeficientas. Be to, taikant greitosios *Fourier* transformacijos algoritmą turima informacijos apie signalo harmoninę sudėtį, nustatomas netiesinių iškreipimų faktorius.

5. Naudojant sukurtą sistemą, buvo įvykdyti pirminiai eksperimentai. Vienas iš jų susijęs su dažnio keitiklio ir tinklo filtrų įtaka srovės ir įtampos netiesiniams iškraipymams. Iš gautų kreivių galima teigti, kad dažnio keitiklio filtrai turi didelę įtaką netiesinių iškreipimų faktoriui NIF. Naudojant keitiklio filtrus NIF(U) ir NIF(I) yra gana

nedideli (apytikriai 2%). Atjungus juos nuo keitiklio NIF padidėjo ir siekė: NIF(I) - 91% NIF(U) - 43%. Tokiu būdu įrodyta, kad siekiant sumažinti netiesinius tinklo parametrų iškreipimus filtrai yra būtini.

6. Iki šiol Elektros inžinerijos katedros laboratorijose nebuvo pilnaverčio laboratorinio stendo, kuris leistų nagrinėti pavarą su dažnio keitikliu. Parengtu magistro darbu šią spragą pavyko užpildyti. Pagamintas stendas gali būti naudojamas Elektros pavarų, Galios elektronikos, Mechatronikos sistemų valdymo studijų dalykų laboratoriniams darbams atlikti ir pramonės įmonių darbuotojams mokytį. Be to, galima vykdyti tolimesnius mokslinius tyrimus, susijusius su elektros pavarų energetika.

## LITERATŪRA

1. Geleževičius V. Kriščiūnas K. Kubilius V. „Elektros pavarų valdymo sistemos“. Vilnius „Mokslas“ 1990 – 357p.
2. Kostrauskas P. „Asinchroninės elektros mašinos“. Kaunas „Technologija“ 2004 – 115p.
3. Marazas S. „Elektros mašinos“. Vilnius „Mokslas“ 1989 – 302p.
4. S. Masiokas. „Elektrotechnika“. Kaunas „Candela“ 1994 - 432p.
5. Mauri Peltola. Improving poer factor with variable speed AC drives. 2003, liepa [žiūrėta 2010-09-29]. Prieiga per Internetą: <http://www.ecmweb.com/powerquality/>
6. Techninis katalogas „Siemens catalog D 11.1 2007“. Prieiga per internetą [žiūrėta 2011-10-15]: [http://www.siemens.no/ccmi/bu/ad/pdf/f/Sinamics\\_katalog\\_G110\\_G120\\_D11\\_1\\_2007.pdf](http://www.siemens.no/ccmi/bu/ad/pdf/f/Sinamics_katalog_G110_G120_D11_1_2007.pdf)
7. Techninis katalogas „SINAMICS G120“ Prieiga per internetą [žiūrėta 2011-10-05]: [http://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/SINAMICS\\_1008\\_E/G120\\_BA.pdf?p=1](http://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/SINAMICS_1008_E/G120_BA.pdf?p=1)
8. Algirdas Baškys „Dažnio keitikliai elektros variklių valdymas“ Prieiga per internetą [Žiūrėta 2010-10-05] [http://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CGIQFjAE&url=http%3A%2F%2Fneris.mii.lt%2Fmt%2Fstraipsniai%2F200611%2Fdaz.doc&ei=CqvKT4\\_SD8n34QSlvs1G&usg=AFQjCNFIOFE4cw5tGkqmQWU-Nrc1jDRHRA&sig2=3WlkycimRBvo\\_ZEN6TwtsA.](http://www.google.lt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=0CGIQFjAE&url=http%3A%2F%2Fneris.mii.lt%2Fmt%2Fstraipsniai%2F200611%2Fdaz.doc&ei=CqvKT4_SD8n34QSlvs1G&usg=AFQjCNFIOFE4cw5tGkqmQWU-Nrc1jDRHRA&sig2=3WlkycimRBvo_ZEN6TwtsA.)
9. Ian C Evans. Reducing harmonic distortion. 2003, rugsėjis [žiūrėta 2011-11-28]. Prieiga per Internetą: <http://www.mirusinternational.com/downloads/>
10. Automatika ir elektrotechnika [žiūrėta 2010-09-25]. Prieiga per internetą: <http://www.siemens.lt>
11. Bolton W. Mechatronics. Electronic control systems in mechanical and electrical engineering (3rd edition). England, 2003. 567p.
12. Elektrotechnikos terminų žodynas. – Kaunas.: Technologija, 1999. – 871 p.
13. Įvairūs pavyzdžiai ir kita informacija dirbant su „MATLAB“ programiniu paketu [žiūrėta 2010-12-03]. Prieiga per internetą: <http://www.mathworks.com/>
14. Astrauskas T. Asinchroninio variklio ir dažnio keitiklio pavaros energetiniu rodikliu tyrimas. Magistro baigiamasis darbas. Šiauliai, 2005.
15. Rudinskij V. Dažnio keitiklio tyrimas. Baigiamasis magistro darbas. Vilnius, 2008.

16. Jörg Randermann. Starting and control of three - phase asynchronous motors [žiūrėta 2010-10-21]. Prieiga per internetą:  
<http://www.moeller.es/documentacion/catalogos.html>
17. Le moteur asynchrone [žiūrėta 2012-12-11]. Prieiga per internetą:  
[http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page\\_11529.htm?reload](http://www.energieplus-lesite.be/energieplus/page_11529.htm?reload)

## **PRIEDAI**