



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

**Titas Augustinas**

**MATRICINIS KEITIKLIS IR JO PANAUDOJIMAS**  
**ENERGETIKOJE**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**  
doc. dr. Gytis Svinkūnas

**KAUNAS, 2017**

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

**MATRICINIS KEITIKLIS IR JO PANAUDOJIMAS**  
**ENERGETIKOJE**

Baigiamasis magistro projektas  
Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

**Vadovas**

doc. dr. Gytis Svinkūnas

**Recenzentas**

prof. dr. Alvydas Dosinas

**Projektą atliko**

Titas Augustinas

**KAUNAS, 2017**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Titas Augustinas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Matricinis keitiklis ir jo panaudojimas energetikoje“

### AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 17 m. gegužės 17 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Tito Augustino** baigiamasis projektas tema „Matricinis keitiklis ir jo panaudojimas energetikoje“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

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

\_\_\_\_\_  
(parašas)

Augustinas, Titas. Matricinis keitiklis ir jo panaudojimas energetikoje. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Gytis Svinkūnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros energetikos sistemos, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *matricinis keitiklis, imitacinis modelis, įėjimo ir išėjimo filtrai, NIF reikšmės, filtrų masė, harmonikos.*

Kaunas, 2017. 64 p.

## SANTRAUKA

Šiame baigiamajame magistro projekte nagrinėjamas matricinis keitiklis. Matricinio keitiklio imitacinio modelio be ir su įėjimo bei išėjimo filtrais modeliavimas atliekamas MATLAB/Simulink aplinkoje.

Pagal atliktus skaičiavimus, matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo filtrų komponentams parenkami optimalūs parametrai: induktyvumai, talpos, varžos. Palyginamos matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, priklausomai nuo filtrų buvimo ar nebuvimo ir esant skirtingo tipo bei galios apkrovoms. Taip pat palyginama matricinio keitiklio filtrų masė su įprastinio dažnio keitiklio Altivar 61 filtrų mase.

Be to, matricinis keitiklis praktiškai išbandomas ir laboratorijoje, siekiant nustatyti filtrų tinkamumą, filtruojant įtampos bei srovės harmonikas.

Augustinas, Titas. Matrix Converter and Its Use in the Energy Industry: *Master's thesis in Master's degree* / supervisor assoc. doc. dr. Gytis Svinkūnas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power System.

Research area and field: Electrical Power Systems, Technological Sciences

Key words: *matrix converter, imitation model, input and output filters, THD values, mass of filters, harmonics.*

Kaunas, 2017. 64 p.

## SUMMARY

In this final master's project matrix converter is dealt with. Imitation model of matrix converter without and with input and output filters simulation is done in MATLAB/Simulink environment.

According to the calculations, optimal parameters for matrix converter input and output filters components are chosen: inductances, capacities, resistances. Matrix converter input currents and output voltages THD values are compared, depending on the presence or absence of filters and different type and power loads. Also matrix converter mass of filters are compared with typical frequency converter Altivar 61 mass of filters.

Furthermore, matrix converter practically tested in a laboratory, to determine the suitability of filters, filtering the voltage and current harmonics.

## TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....	6
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	7
SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS.....	9
ĮVADAS .....	10
1. BENDRA INFORMACIJA APIE GALIOS KEITIKLIUS .....	11
2. MATRICINIO KEITIKLIO VEIKIMO PRINCIPAS .....	13
3. MATRICINIO KEITIKLIO TOPOLOGIJOS .....	15
4. IUBT ATGALINIO BLOKAVIMO TECHNOLOGIJA .....	16
5. MATRICINIO KEITIKLIO MODULIACIJOS BŪDAI .....	19
5.1 Tiesioginė erdvinių vektorių moduliacija.....	19
5.2 Netiesioginė erdvinių vektorių moduliacija .....	20
5.3 Venturini moduliacija .....	24
6. MATRICINIO KEITIKLIO ĮĖJIMO SROVĖS MODULIACIJOS STRATEGIJOS .....	25
7. NESTABILUMO FENOMENAS .....	26
8. MATRICINIO KEITIKLIO VIRTUALUS NETIESIOGINIO VALDYMO METODAS .....	28
9. MATRICINIO KEITIKLIO IR TRADICINĖS SISTEMOS Palyginimas .....	29
10. MATRICINIO KEITIKLIO APSAUGINĖ ELEKTROS GRANDINĖ .....	30
11. MATRICINIS KEITIKLIS SU SKIRSTOMOJO TINKLO TRANSFORMATORIUMI.....	32
12. MATRICINIO KEITIKLIO TAIKymo su elektros įrenginiais pavyzdžiai.....	34
13. ELEKTROS TINKLŲ TERŠĖJAI - HARMONIKOS.....	36
13.1 Pasyvus filtras.....	37
13.2 Aktyvus filtras .....	37
13.3 Hibridinis filtras .....	38
14. MATRICINIO KEITIKLIO ĮĖJIMO IR IŠĖJIMO FILTRŲ PARAMETRŲ PARINKIMO KRITERIJAI.....	38
15. MATRICINIO KEITIKLIO BE IR SU ĮĖJIMO BEI IŠĖJIMO FILTRAIS MODELIAVIMAS MATLAB/SIMULINK APLINKOJE .....	41
16. MATRICINIO KEITIKLIO FILTRŲ MASĖ.....	56
17. MATRICINIO KEITIKLIO PRAKTINIS BANDYMAS.....	57
IŠVADOS.....	60
INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS .....	61
PRIEDAI.....	64
Priedas 1. Trifazio matricinio keitiklio jungiklių perjungimo būsenos .....	64

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Galios keitiklis tarp dviejų energijos šaltinių .....	11
2.1 pav. Matricinio keitiklio schema .....	13
2.2 pav. Pagrindinės matricinio keitiklio puslaidininkų jungiklių perjungimo būsenos.....	14
3.1 pav. Tiesioginio matricinio keitiklio schema (a), netiesioginio matricinio keitiklio schema (b) .....	15
3.2 pav. Reto matricinio keitiklio schema (a), labai reto matricinio keitiklio schema (b).....	15
3.3 pav. Ultra reto matricinio keitiklio schema (a), invertuotos jungties matricinio keitiklio schema (b) .....	16
4.1 pav. AB-IUBT struktūra.....	17
4.2 pav. AB-IUBT kolektoriaus srovės $I_K$ priklausomybės nuo kolektoriaus-emiterio įsisotinimo įtampos $U_{KE}$ įsisotinimo, esant skirtingoms užtūros-emiterio įtampoms, $T=25^{\circ}C$ (kairėje) ir $T=125^{\circ}C$ (dešinėje) temperatūrose.....	17
4.3 pav. AB-IUBT kolektoriaus srovės $I_K$ priklausomybės nuo kolektoriaus-emiterio įtampos $U_{KE}$ , esant $T=25^{\circ}C$ ir $T=125^{\circ}C$ temperatūroms.....	18
4.4 pav. Matricinio keitiklio nuostoliai, naudojant skirtingus dvikrypčius jungiklius .....	18
5.2.1 pav. Netiesioginio matricinio keitiklio schema.....	20
5.2.2 pav. Įėjimo srovės erdvės vektorius kompleksinėje plokštumoje .....	22
5.2.3 pav. Išėjimo įtampos erdvės vektorius kompleksinėje plokštumoje .....	23
8.1 pav. Valdymo metodas, kuris paremtas virtualiu netiesioginiu IPM lygintuvo ir IPM inverterio valdymu .....	28
8.2 pav. Virtualaus netiesioginio valdymo metodo principas.....	28
9.1 pav. Tradicinės sistemos ir matricinio keitiklio palyginimas .....	29
10.1 pav. Matricinio keitiklio komutacijos ir apsauginė elektros grandinė .....	30
10.2 pav. Matricinio keitiklio apsauginės elektros grandinės, jungiklio klaidos atveju, srovių tekėjimas .....	31
10.3 pav. Matricinio keitiklio apkrovos srovių tekėjimas, esant išjungtam keitikliui .....	31
11.1 pav. Išsami matricinio keitiklio su skirstomojo tinklo transformatoriumi schema .....	32
12.1 pav. Elektros įrenginiai su kuriais naudojamas matricinis keitiklis .....	35
13.1.1 pav. Pagrindinės matricinio keitiklio įėjimo filtro kombinacijos: kondensatoriai (a), antrosios eilės LC filtras (b), LC filtras su slopinimo rezistoriumi (c).....	37
13.3.1 pav. Pirmosios kombinacijos hibridinio filtro išdėstymas.....	38
13.3.2 pav. Antrosios kombinacijos hibridinio filtro išdėstymas.....	38
14.1 pav. Matricinio keitiklio įėjimo antrosios eilės LC filtro su slopinimo rezistoriumi schema .....	39
14.2 pav. Matricinio keitiklio išėjimo antrosios eilės LC filtro schema su varžine apkrova .....	40
15.1 pav. Trifazio matricinio keitiklio be įėjimo ir išėjimo filtrų, su išėjime prijungta rezistorine apkrova, .....	42
sistemos schema .....	42
15.2 pav. Trifazio įtampos šaltinio fazinės įtampos signalas .....	43
15.2 pav. Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o rezistorinė apkrovos varža lygi $43,2 \Omega$ .....	44
15.3 pav. Matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o rezistorinė apkrovos varža lygi $43,2 \Omega$ .....	44
15.4 pav. Matricinio keitiklio įėjimo srovės (a)) ir išėjimo įtampos (b)) NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, nesant įėjimo ir išėjimo filtrams bei esant rezistorinės apkrovos varžai lygiai $43,2 \Omega$ .....	45
15.5 pav. Trifazio matricinio keitiklio be įėjimo ir išėjimo filtrų, su išėjime prijungta kompleksine apkrovos varža, sistemos schema.....	46

15.6 pav. Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o kompleksinė apkrovos varža lygi $43,2 \Omega$ .....	47
15.7 pav. Matricinio keitiklio išėjimo įtampos signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o kompleksinė apkrovos varža lygi $43,2 \Omega$ .....	48
15.8 pav. Matricinio keitiklio įėjimo srovės (a) ir išėjimo įtampos (b) NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, nesant įėjimo ir išėjimo filtrams bei esant kompleksinei apkrovos varžai lygiai $43,2 \Omega$ .....	49
15.9 pav. Trifazio matricinio keitiklio su pasyviaisiais įėjimo ir išėjimo filtrais bei su išėjime prijungta rezistorine apkrova sistemos schema .....	50
15.10 pav. Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai rezistorinė apkrovos varža lygi $43,2 \Omega$ .....	51
15.11 pav. Matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai rezistorinė apkrovos varža lygi $43,2 \Omega$ .....	52
15.12 pav. Matricinio keitiklio įėjimo srovės (a) ir išėjimo įtampos (b) NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, esant įėjimo ir išėjimo filtrams bei rezistorinei apkrovos varžai lygiai $43,2 \Omega$ .....	53
15.13 pav. Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai kompleksinė apkrovos varža lygi $43,2 \Omega$ .....	54
15.14 pav. Matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai kompleksinė apkrovos varža lygi $43,2 \Omega$ .....	54
15.15 pav. Matricinio keitiklio įėjimo srovės (a) ir išėjimo įtampos (b) NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, esant įėjimo ir išėjimo filtrams bei kompleksinei apkrovos varžai lygiai $43,2 \Omega$ .....	55
17.1 pav. Matricinio keitiklio sistema laboratorijoje .....	58
17.2 pav. Nufiltruota matricinio keitiklio įėjimo srovės oscilograma .....	58
17.3 pav. Nufiltruota matricinio keitiklio išėjimo įtampos oscilograma .....	58

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

4.1 lentelė. Dvikrypčiai jungikliai .....	16
5.2.1 lentelė. Lygintuvo pakopos srovės vektoriai .....	21
5.2.2 lentelė. Inverterio pakopos įtampos vektoriai.....	23
12.1 lentelė. Ženklių paaiškinimai.....	36
15.1 lentelė. Rezistorinės apkrovos varžos $R$ reikšmės.....	43
15.2 lentelė. Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms rezistorinės apkrovos varžoms.....	46
15.3 lentelė. Gautos rezistorinės varžos bei reaktyviosios varžos induktyvumo reikšmės.....	47
15.4 lentelė. Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms kompleksinės apkrovos varžoms.....	49
15.5 lentelė. Matricinio keitiklio įėjimo filtro elementų (ričių, kondensatorių, slopinimo varžų) parametrų reikšmės, esant skirtingoms rezistorinėms apkrovoms .....	50
15.6 lentelė. Matricinio keitiklio išėjimo filtro elementų (ričių, kondensatorių) parametrų reikšmės .....	51
15.7 lentelė. Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms rezistorinės apkrovos varžoms.....	53

15.8 lentelė. Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms kompleksinės apkrovos varžoms.....	55
16.1 lentelė. Matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo filtrams parinktos kondensatorių talpos bei slopinimo rezistorių varžos .....	56
16.2 lentelė. Matricinio keitiklio įėjimo filtro masės palyginimas su dažnio keitiklio Altivar 61 įėjimo filtro mase.....	57



## SANTRUMPŲ IR ŽENKLŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

NS – nuolatinė srovė, angl. DC (*Direct Current*);

KS – kintama srovė, angl. AC (*Alternating Current*);

AB-IUBT – izoliuotosios užtūros bipoliarusis tranzistorius su atgaliniu blokavimu, angl. RB-IGBT (*Reverse Blocking Insulated Gate Bipolar Transistor*);

IPM – impulsų pločio moduliacija, angl. PWM (*Pulse-Width Modulation*);

NIF – netiesinių iškreipimų faktorius, angl. THD (*Total Harmonic Distortion*);

ADF – aukšto dažnio filtras, angl. HPF (*High Pass Filter*);

AV – asinchroninis variklis;

## IVADAS

Su kiekviena diena galios keitikliai susiduria su vis didesniu iššūkiu, užtikrinant patikimumą, platesnius veikimo režius, didesnę naudingumą, kompaktiškumą, kokybiškumą, kad elektros tinklas nebūs užterštas harmonikomis, bei pigumą.

Vienas iš įdomiausių galios keitiklių šeimos atstovų yra matricinis keitiklis. Matricinis keitiklis – tai įtaisas, sugebantis iš vienos kintamos įtampos formuoti reikiamos amplitudės bei dažnio kitą kintamą įtampą ir srovę. Šis keitiklis pasižymi sinusine įėjimo ir išėjimo srove, nenaudoja NS jungties bei generuoja mažiau harmonikų kaip įprastas galios keitiklis, veikia keturiuose kvadrantuose, paprastas ir kompaktiškas. [1]

Tačiau matricinis keitiklis gan jautrus iškreiptai ir/arba nesubalansuotai įėjimo įtampai, todėl apkrova gali būti neigiamai paveikiama, o tai sąlygos prastesnę veikimo našumą. Be to, matricinis keitiklis sudarytas iš puslaidininkių elementų, kurie komutuoja aukštu dažniu, tai reiškia, kad generuojamos aukštesnės eilės įtampos bei srovės harmonikos, dėl to matricinio keitiklio įėjime bei išėjime reikalingas filtras. [1]

Praktikoje matricinis keitiklis dažniausiai naudojamas kartu su vėjo jėgainėmis, siurbliais, liftais, kranais. [2]

Darbo tikslas: Sudaryti matricinio keitiklio imitacinį modelį, parenkant atitinkamą įėjimo, išėjimo filtrą, esant skirtingoms matricinio keitiklio tipo ir galios apkrovoms bei matricinį keitiklį praktiškai išbandyti laboratorijoje.

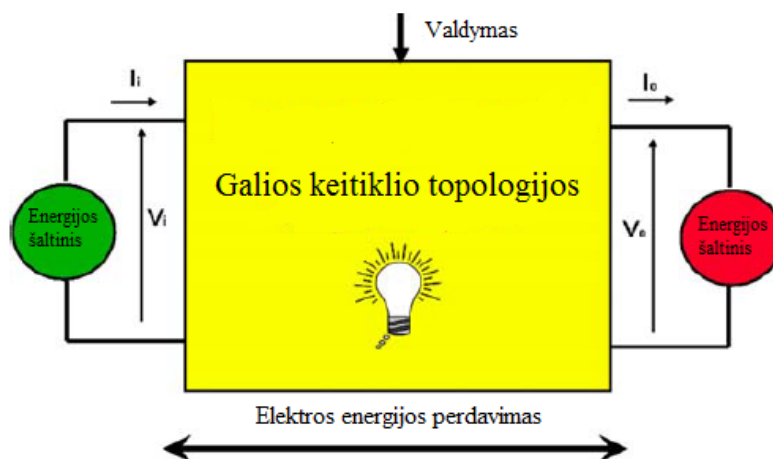
Darbo uždaviniai:

1. Matricinio keitiklio imitaciniam modeliui, esant skirtingo tipo bei galios apkrovoms, parinkti optimaliausių parametru įėjimo ir išėjimo filtras, su kuriais įtampos bei srovės NIF būtų tenkinamas.
2. Palyginti matricinio keitiklio imitacinio modelio generuojamų įtampos bei srovės aukštesniųjų harmonikų lygį, nesant bei esant įėjimo ir išėjimo filtrams.
3. Matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo filtrų mases palyginti su įprastinio dažnio keitiklio filtru mase.

## 1. BENDRA INFORMACIJA APIE GALIOS KEITIKLIUS

Galios keitiklio užduotis yra apdoroti ir kontroliuoti elektros energijos srautus, tiekiant tinkamos formos įtampas ir sroves apkrovoms. [3]

Galios keitiklis elgiasi kaip jungtis ar transformavimo lygis tarp generatoriaus ir apkrovos. Idealus galios keitiklis kontroliuoja galios srautus tarp dviejų energijos šaltinių su šimtaprocentiniu naudingumu. Galios keitiklis tarp dviejų energijos šaltinių iliustruotas 1.1 pav. [3]



1.1 pav. Galios keitiklis tarp dviejų energijos šaltinių

Priklausomai nuo apkrovos tipo, keitiklio išėjimas gali būti:

- NS;
  - a) Pastovios amplitudės,
  - b) Reguliuojamos amplitudės.
- KS;
  - a) Pastovaus dažnio, reguliuojamos amplitudės,
  - b) Reguliuojamo dažnio, reguliuojamos amplitudės. [4]

Pagal galios keitiklių įėjimo ir išėjimo signalų pobūdį jie gali būti suskirstyti taip:

- a) KS/NS (lygintuvas),
- b) NS/KS (inverteris),
- c) NS/NS (įtampos daliklis, impulsinis keitiklis),
- d) KS/KS (ciklokonverteris, transformatorius). [4]

Lygintuvas (angl. *Rectifier*) skirtas kintamosios srovės keitimui pulsuojančia nuolatine srove. Lygintuvai yra viena iš labiausiai paplitusių elektros energijos keitiklių rūšių, nes elektros energija perduodama kintamąją elektros srove, o elektriniai prietaisai dažniausiai maitinami nuolatine. Pagal

kintamosios srovės pusbangių energijos keitimo galimybes lygintuvai skirstomi į vienpusius ir dvipusius, pagal keičiamos kintamosios srovės fazių skaičių – į vienfazius, trifazius ir daugiafazius, o pagal galimumą keisti išlygintos įtampos vertę – į nevaldomus, pusiau valdomus (tiristorinius) ir valdomus. Visų lygintuvų veikimo principas pagrįstas juose panaudotų jungiklių (ventilių) vienpusiu laidumu. [5]

Inverteris (angl. *Inverter*) nuolatinę įtampą arba srovę keičia vienfaze ar trifaze kintamojo dažnio įtampa arba srove. Inverteriai gali būti srovės arba įtampos. [6]

Naudojant įtampos inverterį, lygintuvas turi turėti įtampos šaltinio savybių, o naudojant srovės inverterį – srovės šaltinio savybių. Valdomojo lygintuvo išėjimo įtampos amplitudė reguliuojama keičiant nuolatinės įtampos dydį, o jos dažnis – veikiant autonominio įtampos inverterio valdymo kanalą. [6]

Sukūrus neigiamą išlygintosios srovės grįžtamąjį ryšį, valdomajam lygintuvui galima suteikti srovės šaltinio savybių ir, naudojant srovės inverterį, gauti reguliuojamojo dažnio srovės šaltinį. Kai naudojamas nevaldomas lygintuvas, inverteris dar atlieka išėjimo įtampos dažnio ir jos amplitudės regulatoriaus funkcijas. [6]

Įtampos daliklis (angl. *Voltage divider*) dalį įėjimo įtampos perduoda išėjimui. Įtampos daliklis dažniausiai sudarytas iš dviejų nuosekliai jungtų rezistorių. Šie dalikliai naudojami daugelyje impulsinių įtaisų kaip įėjimo ar ryšio grandinės. [7]

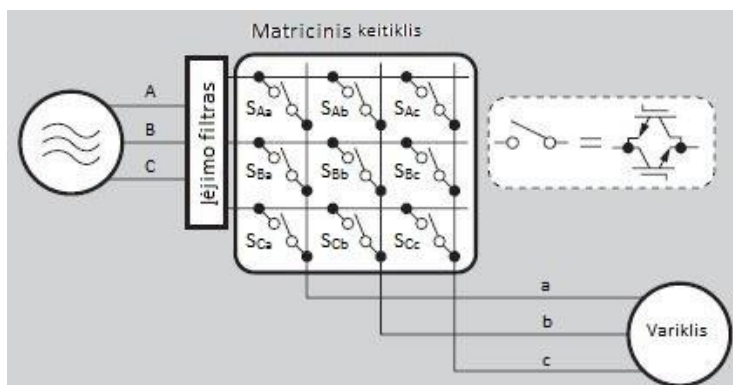
Impulsinis keitiklis (angl. *Switching DC converter*) vieno dydžio nuolatinę įtampą transformuoja į kito dydžio nuolatinę įtampą ir gali pakeisti įtampos poliarumą. Impulsinių keitiklių pagrindiniai du tipai yra: nuolatinę įtampą didinantis impulsinis keitiklis ir nuolatinę įtampą mažinantis impulsinis keitiklis. Šių tipų keitiklius sudaro keturi elementai: galios jungiklis, diodas, ritė ir kondensatorius. [8]

Ciklokonverteris (angl. *Cycloconverter*) vieno dažnio elektros energiją transformuoja į kito dažnio elektros energiją. Ciklokonverteriai dažniausiai naudojami kartu su didelės galios elektros įrenginiais (iki 10 MW) dažnio mažinimui, tokioms elektros mašinoms, kurioms reikalingas mažas greitis: keltuvai, ekskavatoriai, laivasraigtis. Kaip alternatyva ciklokonverteriui su mažesnės galios elektros įrenginiais naudojamas matricinis keitiklis. Ciklokonverteriai gali būti vienfaziai ir trifaziai. [8]

Transformatorius (angl. *Transformer*) – statinis elektrotechninis įrenginys, skirtas keisti kintamosios srovės elektros energijos parametrus (paaukštinti ar pažeminti įtampą, sustiprinti ar susilpninti srovę). Transformatoriaus veikimas pagrįstas elektromagnetinės indukcijos reiškiniu – abipusine indukcija tarp apvijų. [9]

## 2. MATRICINIO KEITIKLIO VEIKIMO PRINCIPAS

Matricinis keitiklis yra sudarytas iš puslaidininkų dvikrypčių jungiklių, kurie išdėstyti į matricią  $m \times n$ . Įtampos šaltinio  $m$  fazė tiesiogiai jungiama su apkrovos  $n$  faze [2]. Praktikoje matriciniai keitikliai naudojami kartu su elektros varikliais. Matricinio keitiklio schema pavaizduota 2.1 pav.



2.1 pav. Matricinio keitiklio schema

Matricinio keitiklio jungiklio perjungimo funkcija išreiškiama taip:

$$S_{io}(t) = \begin{cases} 1, & \text{įjungtas} \\ 0, & \text{išjungtas} \end{cases} ; \quad (1)$$

čia:  $i$  – matricinio keitiklio įėjimo fazė {A, B, C},

$o$  – matricinio keitiklio išėjimo fazė {a, b, c},

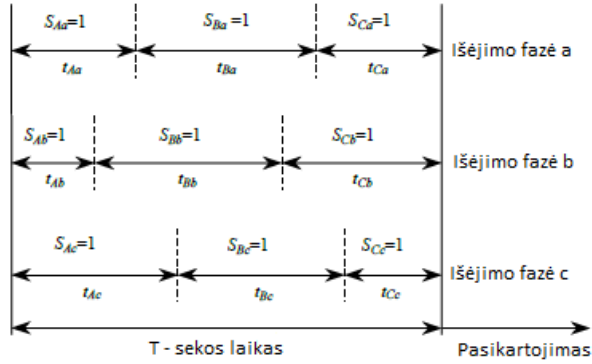
$t$  – laikas.

Normaliomis veikimo sąlygomis matricinių keitiklių įėjimo kontaktai turi būti neužtrumpinti, o prie išėjimo kontaktų turi būti prijungta apkrova, kad nesusidarytų atvira elektros grandinė, o tai reiškia, kad matricinio keitiklio jungiklių komutacija turi tenkinti tokią sąlygą [10]:

$$S_{Ao}(t) + S_{Bo}(t) + S_{Co}(t) = 1. \quad (2)$$

Tenkinant minėtą sąlygą (2), matricinis keitiklis turi 27 galimas perjungimo kombinacijas.

Pagrindinės matricinio keitiklio puslaidininkų jungiklių perjungimo būsenos pavaizduotos 2.2 pav.



2.2 pav. Pagrindinės matricinio keitiklio puslaidininkių jungiklių perjungimo būsenos

Matricinio keitiklio perdavimo matrica  $[\mathbf{T}]$ :

$$[\mathbf{T}] = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix}; \quad (3)$$

čia:  $S_{Aa}(t)$ ,  $S_{Ab}(t)$ ,  $S_{Ac}(t)$ ,  $S_{Ba}(t)$ ,  $S_{Bb}(t)$ ,  $S_{Bc}(t)$ ,  $S_{Ca}(t)$ ,  $S_{Cb}(t)$ ,  $S_{Cc}(t)$  – matricinio keitiklio jungiklio perjungimo funkcija su atitinkamu įėjimo {A, B, C} ir išėjimo {a, b, c} fazių indeksiniu žymėjimu, laiko momentu  $t$ .

Matricinio keitiklio įėjimo  $[\mathbf{U}_{iN}(t)]$  (4) ir išėjimo  $[\mathbf{U}_{oN}(t)]$  (5) įtampų matricos:

$$[\mathbf{U}_{iN}(t)] = \begin{bmatrix} U_{AN}(t) \\ U_{BN}(t) \\ U_{CN}(t) \end{bmatrix}, \quad (4) \quad [\mathbf{U}_{oN}(t)] = \begin{bmatrix} U_{aN}(t) \\ U_{bN}(t) \\ U_{cN}(t) \end{bmatrix}; \quad (5)$$

čia:  $U_{AN}(t)$ ,  $U_{BN}(t)$ ,  $U_{CN}(t)$ ,  $U_{aN}(t)$ ,  $U_{bN}(t)$ ,  $U_{cN}(t)$  – matricinio keitiklio, tarp atitinkamos įėjimo {A, B, C} arba išėjimo {a, b, c} fazės ir nulinio laidininko (N), įtampų reikšmės, laiko momentu  $t$ .

Matricinio keitiklio įėjimo  $[\mathbf{i}_i(t)]$  (6) ir išėjimo  $[\mathbf{i}_o(t)]$  (7) srovės matricos:

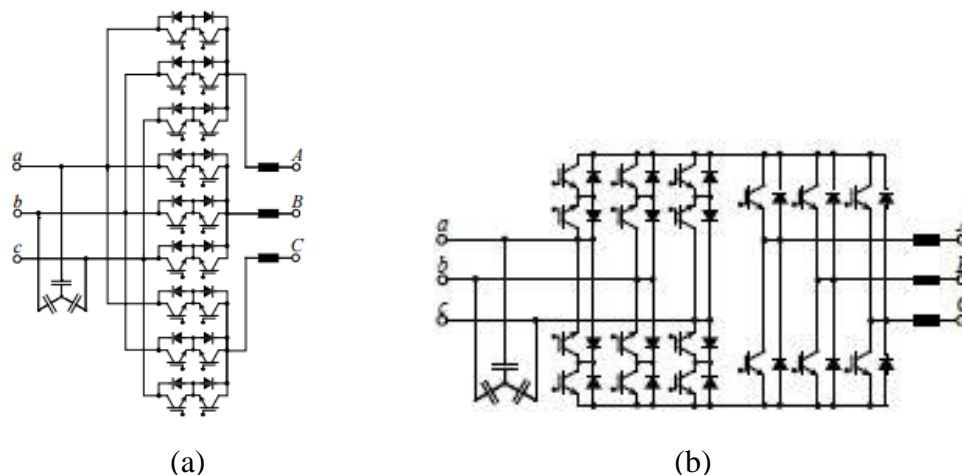
$$[\mathbf{i}_i(t)] = \begin{bmatrix} i_A(t) \\ i_B(t) \\ i_C(t) \end{bmatrix}, \quad (6) \quad [\mathbf{i}_o(t)] = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix}; \quad (7)$$

čia:  $i_A(t)$ ,  $i_B(t)$ ,  $i_C(t)$ ,  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$ ,  $i_c(t)$  – matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo srovių reikšmės, laiko momentu  $t$ . [10]

### 3. MATRICINIO KEITIKLIO TOPOLOGIJOS

Matriciniai keitikliai yra kelių tipų: tiesioginis matricinis keitiklis, netiesioginis matricinis keitiklis, retas matricinis keitiklis, labai retas matricinis keitiklis, ultra retas matricinis keitiklis, invertuotos jungties matricinis keitiklis. [11]

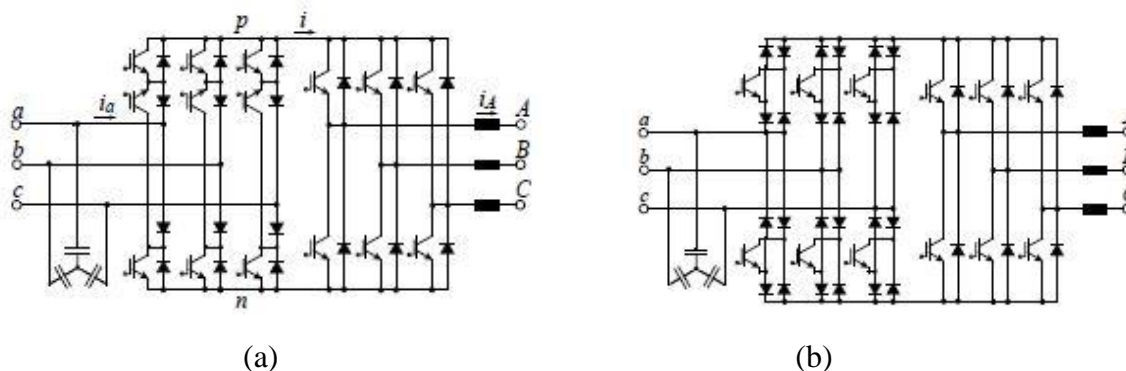
Tiesioginio matricinio keitiklio schema pavaizduota 3.1 pav. a, o netiesioginio matricinio keitiklio schema pavaizduota 3.1 pav. b.



3.1 pav. Tiesioginio matricinio keitiklio schema (a), netiesioginio matricinio keitiklio schema (b)

Tiek tiesioginį, tiek netiesioginį matricinį keitiklį sudaro 18 tranzistorių bei 18 diodų. Tačiau netiesioginis matricinis keitiklis yra sudarytas iš srovės lygintuvo įėjimo pusėje ir iš įtampos inverterio išėjimo pusėje. Šias dvi dalis skiria virtuali NS jungtis.

Reto matricinio keitiklio schema pavaizduota 3.2 pav. a, o labai reto matricinio keitiklio schema pavaizduota 3.2 pav. b.

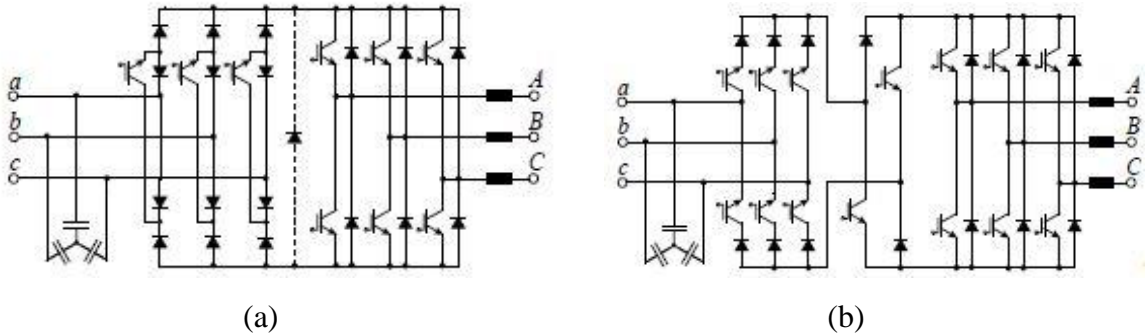


3.2 pav. Reto matricinio keitiklio schema (a), labai reto matricinio keitiklio schema (b)

Retą matricinį keitiklį sudaro 15 tranzistorių bei 18 diodų, labai retą – 12 tranzistorių bei 30 diodų. Retas matricinis keitiklis ir tiesioginis matricinis keitiklis funkcionuoja vienodai, bet retas matricinis

keitiklis turi mažiau galios jungiklių – tranzistorių, pasižymi paprastesniu valdymu, didesniu komutavimo saugumu bei patikimumu. Labai retą matricinį keitiklį, lyginant su retu matriciniu keitikliu, labai retas matricinis keitiklis turi mažiau tranzistorių, tačiau pralaidumo nuostoliai didesni, kadangi turi daugiau diodų.

Ultra reto matricinio keitiklio schema pavaizduota 3.3 pav. a, o invertuotos jungties matricinio keitiklio schema pavaizduota 3.3 pav. b.



3.3 pav. Ultra reto matricinio keitiklio schema (a), invertuotos jungties matricinio keitiklio schema (b)

Ultra retą matricinį keitiklį sudaro 9 tranzistoriai bei 18 diodų, invertuotos jungties – 14 tranzistorių bei 14 diodų. Ultra retas matricinis keitiklis pasižymi mažesniu kiekiu tranzistorių nei retas matricinis keitiklis, bet turi apribojimą susijusiu su maksimaliu fazės poslinkiu tarp įėjimo įtampos ir srovės, kuris yra  $\pm 30^\circ$ . Invertuotos jungties matricinis keitiklis pasižymi dideliais jungiklių būsenos perjungimo nuostoliais bei sudėtingu valdymu, dėl to šios topologijos matricinis keitiklis praktikoje retai kada naudojamas.

## 4. IUBT ATGALINIO BLOKAVIMO TECHNOLOGIJA

4.1 lentelėje pavaizduoti dvikrypčiai jungikliai, kurie naudojami matriciniame keitiklyje. [2]

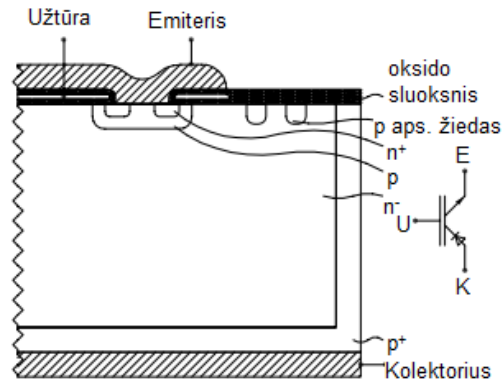
4.1 lentelė. Dvikrypčiai jungikliai

	(a)	(b)
Dvikryptis jungiklis		
Įtaisų skaičius	IUBT x 2, diodai x 2	AB-IUBT x 2
Atsidarymo įtampa	~4 V	~2 V

Dvikrypčiai jungikliai maitinami kintama įtampa ir nesant valdymo impulso, paduotam į užtūrą, srovė per juos neteka. Kadangi įprastinis IUBT neturi atgalinio blokavimo funkcijos, tai prie jo



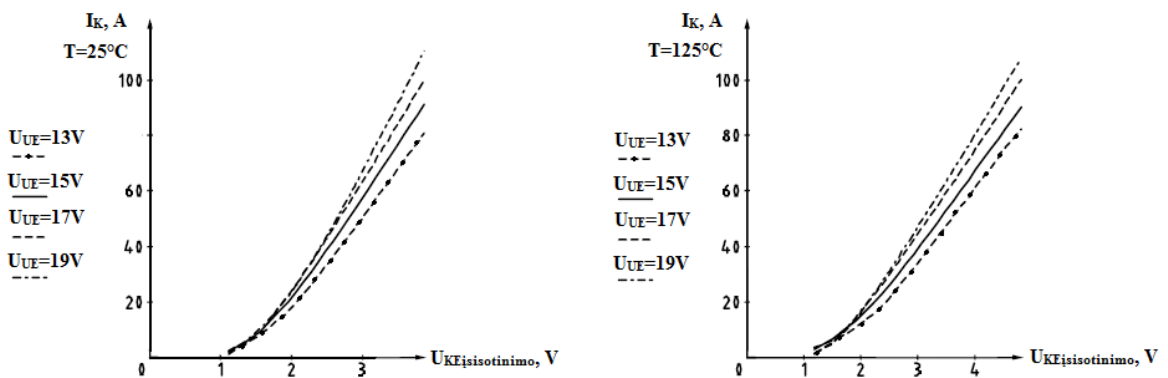
prijungiamas diodas, tai funkcijai atlikti (4.1 lentelė. a). Dėl diodo panaudojimo, padidėja dvikrypčio jungiklio atsidarymo įtampos nuostoliai ir sumažėja efektyvumas. Šių trūkumų pašalinimui, matriciniuose keitikliuose gali būti naudojami AB-IUBT (4.1 lentelė. b), kurie turi simetrinę įtampos blokavimo technologiją, o tai reiškia, kad AB-IUBT gali blokuoti tiek tiesioginę, tiek atgalinę įtampą, tranzistoriui esant „išjungtoje“ būsenoje. AB-IUBT struktūra pavaizduota 4.1 pav. [12]



4.1 pav. AB-IUBT struktūra

AB-IUBT  $p^+$  ir  $n^-$  sandūra ribojasi su izoliaciniu oksido sluoksniu, todėl esant tokiai struktūrai, tranzistorius blokuoja atgalinę įtampą kaip diodas.

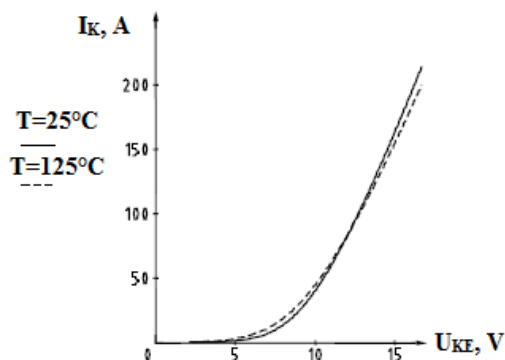
AB-IUBT kolektoriaus srovės  $I_K$  priklausomybės nuo kolektoriaus-emiterio įsisotinimo įtampos  $U_{KE\dot{I}sisotinio}$ , esant skirtingoms užtūros-emiterio įtampoms,  $T=25^\circ\text{C}$  ir  $T=125^\circ\text{C}$  temperatūrose pavaizduotos 4.2 pav. [12]



4.2 pav. AB-IUBT kolektoriaus srovės  $I_K$  priklausomybės nuo kolektoriaus-emiterio įsisotinimo įtampos  $U_{KE\dot{I}sisotinio}$ , esant skirtingoms užtūros-emiterio įtampoms,  $T=25^\circ\text{C}$  (kairėje) ir  $T=125^\circ\text{C}$  (dešinėje) temperatūrose

Iš 4.2 pav. priklausomybių matome, kad kuo didesnė AB-IUBT užtūros-emiterio įtampa, tuo atitinkama kolektoriaus srovės reikšmė pasiekama su mažesne kolektoriaus-emiterio įsisotinimo įtampa.

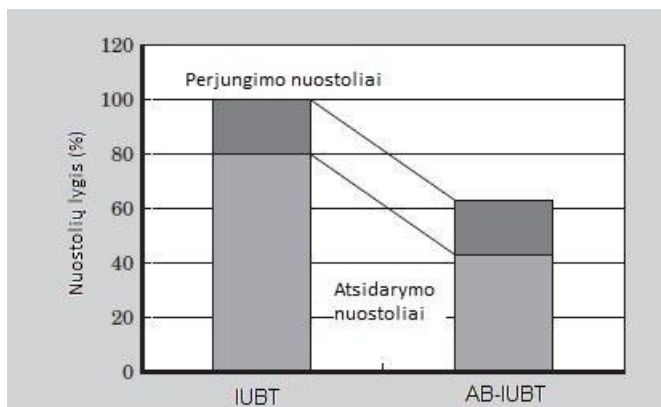
Perdavimo charakteristikos - AB-IUBT kolektoriaus srovės  $I_K$  priklausomybės nuo kolektoriaus-emiterio įtampos  $U_{KE}$ , esant  $T=25^{\circ}\text{C}$  ir  $T=125^{\circ}\text{C}$  temperatūroms pavaizduotos 4.3 pav. [12]



4.3 pav. AB-IUBT kolektoriaus srovės  $I_K$  priklausomybės nuo kolektoriaus-emiterio įtampos  $U_{KE}$ , esant  $T=25^{\circ}\text{C}$  ir  $T=125^{\circ}\text{C}$  temperatūroms

Iš 4.3 pav. priklausomybių matome, kad kai AB-IUBT kolektoriaus-emiterio įtampa lygi  $\sim 12\text{V}$  didesnė AB-IUBT užtūros-emiterio įtampa, tuo atitinkama kolektoriaus srovės reikšmė pasiekama su mažesne kolektoriaus-emiterio įsisotinimo įtampa.

Matricinio keitiklio nuostoliai, naudojant skirtingus dvikrypčius jungiklius (4.1 lentelė), pavaizduoti 4.4 pav. [2]



4.4 pav. Matricinio keitiklio nuostoliai, naudojant skirtingus dvikrypčius jungiklius

Perjungimo nuostoliai AB-IUBT yra panašūs kaip ir IUBT, tačiau atsidarymo nuostoliai apie 30% mažesni.

## 5. MATRICINIO KEITIKLIO MODULIACIJOS BŪDAI

Pagrindiniai matricinio keitiklio moduliacijos būdai, norint pakeisti keitiklio išėjimo įtampos lygi yra [13]:

- Erdvinių vektorių moduliacija, kuri dar skirstoma į: tiesioginę erdvinių vektorių moduliaciją ir netiesioginę erdvinių vektorių moduliaciją. Tiesioginė erdvinių vektorių moduliacija pasižymi tiesiogine transformacija, o netiesioginė erdvinių vektorių moduliacija - virtualios NS jungties pranašumu;
- Venturini moduliacija.

### 5.1 Tiesioginė erdvinių vektorių moduliacija

Erdvinių vektorių moduliacija gali būti naudojama matricinio keitiklio išėjimo įtampos ir įėjimo srovės valdymui. Įtampos erdvės vektorius išreiškiamas taip [13]:

$$\mathbf{U}_o = \frac{2}{3}(U_{ab} + \alpha U_{bc} + \alpha^2 U_{ca}); \quad (8)$$

čia:  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$  – matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos,

$$\alpha = e^{(j2\pi/3)}.$$

Srovės erdvės vektorius išreiškiamas taip:

$$\mathbf{I}_i = \frac{2}{3}(I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c); \quad (9)$$

čia:  $I_a, I_b, I_c$  – matricinio keitiklio įėjimo srovės,

$$\alpha = e^{(j2\pi/3)}.$$

Kompleksinėje plokštumoje  $\mathbf{U}_o$  yra vektorius, kurio ilgis yra pastovus ( $\sqrt{3}qU_{im}$ ) ir sukasi kampiniu dažniu  $\omega_o$ .

Trifazio matricinio keitiklio jungiklių perjungimo būsenos pavaizduotos prieduose (Priedas 1. Trifazio matricinio keitiklio jungiklių perjungimo būsenos).

Trifazio matricinio keitiklio 27 galimi išėjimo vektoriai gali būti klasifikuojami į tris grupes su tokiomis charakteristikomis [13]:

- Pirmoji grupė: Kiekvienas išėjimas yra sujungtas su skirtingu įėjimu. Išėjimo erdvės vektoriai yra pastovios amplitudės, sukasi (į bet kurią pusę) maitinimo šaltinio dažniu.
- Antroji grupė: Du išėjimai yra sujungti su atitinkamu įėjimu. Likę išėjimai yra sujungti su vienu iš likusių įėjimų. Išėjimo erdvės vektoriai turi kintančią amplitudę, fiksuotą kryptį ir

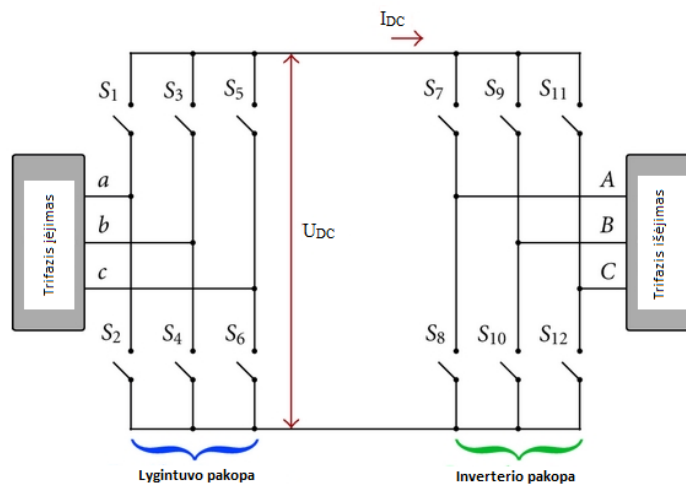
kiekvienas iš jų užima vieną iš šešių pozicijų. Maksimalus šių vektorių ilgis yra  $\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot U_m$ , čia  $U_m$  – momentinė išlygintos įtampos reikšmė.

- Trečioji grupė: Visi išėjimai yra sujungti su atitinkamu įėjimu. Išėjimo erdvės vektoriai turi nulinę amplitudę.

Erdvinių vektorių moduliacijoje pirmoji grupė yra nenaudojama. Norimas išėjimas yra gaunamas, pasinaudojant antrosios grupės aktyviais vektoriais ir trečiosios grupės nulinais vektoriais.

## 5.2 Netiesioginė erdvinių vektorių moduliacija

Pagrindinis netiesioginės erdvinių vektorių moduliacijos principas, tai atskirti įėjimo srovės ir išėjimo įtampos valdymą. Netiesioginio matricinio keitiklio schema pavaizduota 5.2.1 pav. [13]



5.2.1 pav. Netiesioginio matricinio keitiklio schema

Atskiras įėjimo srovės ir išėjimo įtampos valdymas gaunamas, padalinant jungiklių perjungimo funkciją  $S$  į lygintuvo ir inverterio jungiklių perjungimo funkcijas [13]:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} \\ S_{12} & S_{22} & S_{32} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7 & S_8 \\ S_9 & S_{10} \\ S_{11} & S_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 & S_3 & S_5 \\ S_2 & S_4 & S_6 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_7 & S_8 \\ S_9 & S_{10} \\ S_{11} & S_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 & S_3 & S_5 \\ S_2 & S_4 & S_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix};$$

čia:  $U_a, U_b, U_c$  – matricinio keitiklio įėjimo fazių įtampos,

$U_A, U_B, U_C$  – matricinio keitiklio išėjimo fazių įtampos.

Lygintuvo pakopa (5.2.1 pav.) gali būti traktuojama kaip srovės šaltinio lygintuvas su vidutine srovės  $I_{DC}$  reikšme, kuri apskaičiuojama taip:

$$I_{DC} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{out} \cdot m_u \cdot \cos(\theta_{out}); \quad (11)$$

čia:  $I_{out}$  – pikinė išėjimo srovės reikšmė,

$\theta_{out}$  – išėjimo apkrovos poslinkio kampas,

$m_u$  – įtampos moduliacijos indeksas.

Lygintuvo pakopos įtampos moduliacijos indeksas  $m_u$  apskaičiuojamas tokia formule:

$$m_u = \frac{U_{out}}{U_{DC}}; \quad (12)$$

čia:  $U_{out}$  – matricinio keitiklio išėjimo įtampa,

$U_{DC}$  – inverterio vidutinė įtampos reikšmė.

Įėjimo srovės erdvės vektorius apskaičiuojamas pagal 9 formulę.

Devyni lygintuvo jungikliai turi devynias galimas kombinacijas, norint išvengti atviros grandinės DC jungtyje. Šios kombinacijos susideda iš trijų nulinių ir šešių nenulinių srovės vektorių. Lygintuvo pakopos srovės vektoriai pavaizduoti 5.2.1 lentelėje. [13]

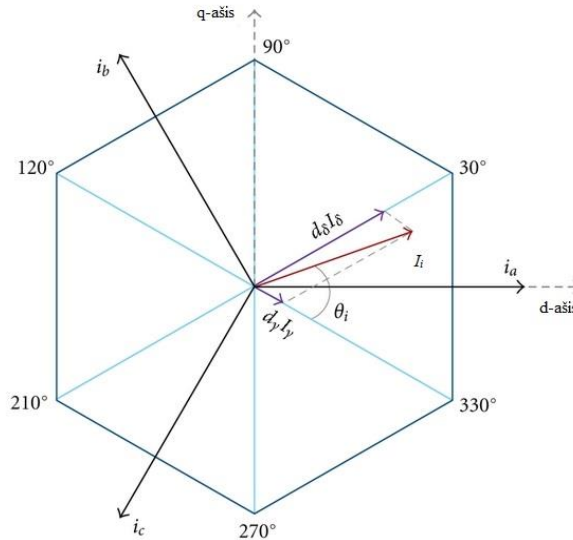
5.2.1 lentelė. Lygintuvo pakopos srovės vektoriai

Tipas	Vektorius	$I_i$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
Aktyvus	$I_1$	$2/(\sqrt{3} I_{DC}) < -\pi/6$	1	0	0	1	0	0
	$I_2$	$2/(\sqrt{3} I_{DC}) < \pi/6$	1	0	0	0	0	1
	$I_3$	$2/(\sqrt{3} I_{DC}) < \pi/2$	0	0	1	0	0	1
	$I_4$	$2/(\sqrt{3} I_{DC}) < 5\pi/6$	0	1	1	0	0	0
	$I_5$	$2/(\sqrt{3} I_{DC}) < -5\pi/6$	0	1	0	0	1	0
	$I_6$	$2/(\sqrt{3} I_{DC}) < -\pi/6$	0	0	0	1	1	0
Nulinis	$I_0$	0	1	1	0	0	0	0
			0	0	1	1	0	0
			0	0	0	0	1	1

Etaloninis įėjimo srovės vektorius  $I_i$  gali būti gaunamas, pasinaudojant gretimais perjungimo vektoriais  $I_\gamma$  ir  $I_\delta$  bei atitinkamais darbo ciklais  $d_\gamma$  ir  $d_\delta$ :

$$I_i = d_\gamma \cdot I_\gamma + d_\delta \cdot I_\delta. \quad (13)$$

Įėjimo srovės erdvės vektorius kompleksinėje plokštumoje pavaizduotas 5.2.2 pav. [13]



5.2.2 pav. Įėjimo srovės erdvės vektorius kompleksinėje plokštumoje

Aktyviųjų vektorių darbo ciklas apskaičiuojamas taip:

$$d_\gamma = \frac{T_\gamma}{T_s} = m_i \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_i\right), d_\delta = \frac{T_\delta}{T_s} = m_i \sin(\theta_i), d_{oc} = \frac{T_{oc}}{T_s} = 1 - d_\delta - d_\gamma; \quad (14)$$

čia:  $\theta_i$  – etaloninės įėjimo srovės kampas,

$m_i$  – srovės moduliacijos indeksas.

Srovės moduliacijos indeksas  $m_i$ , nusako norimos srovės perdavimo koeficientą:

$$m_i = \frac{I_i}{I_{DC}}; 0 \leq m_i \leq 1; \quad (15)$$

čia:  $I_i$  – etaloninis įėjimo srovės vektorius,

$I_{DC}$  – lygintuvo vidutinė srovės reikšmė,

$m_i$  – srovės moduliacijos indeksas.

Inverterio pakopa (5.2.1 pav.) gali būti traktuojama kaip įtampos šaltinio inverteris su vidutine įtampos  $U_{DC}$  reikšme, kuri apskaičiuojama taip:

$$U_{DC} = \frac{3}{2} U_{in} \cdot m_i \cdot \cos(\theta_{in}); \quad (16)$$

čia:  $U_{in}$  – pikinė įėjimo įtampos reikšmė,

$\theta_{in}$  – įėjimo poslinkio kampas,

$m_i$  – srovės moduliacijos indeksas.

Išėjimo įtampos erdvės vektorius apskaičiuojamas analogiškai kaip įėjimo srovės erdvės vektorius (9 formulė), tačiau vietoj srovės reikšmių atitinkamai yra įtampos reikšmės.

Inverterio jungikliai turi aštuonias leidžiamas kombinacijas, kurias naudojant išvengiama trumpojo jungimo. Šios kombinacijos susideda iš dviejų nulinių ir šešių nenulinių įtampos vektorių. Inverterio pakopos įtampos vektoriai pavaizduoti 5.2.2 lentelėje.

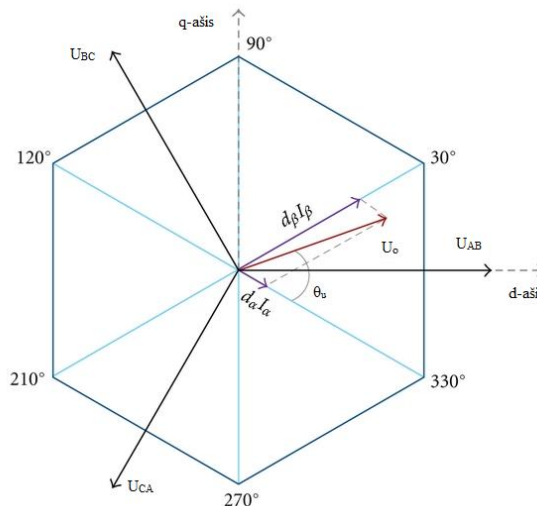
5.2.2 lentelė. Inverterio pakopos įtampos vektoriai

Tipas	Vektorius	$U_o$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
Aktyvus	$U_1$	$2/3 U_{DC} < 0$	1	0	0	1	0	1
	$U_2$	$2/3 U_{DC} < \pi/3$	1	0	1	0	0	1
	$U_3$	$2/3 U_{DC} < 2\pi/3$	0	1	1	0	0	1
	$U_4$	$2/3 U_{DC} < \pi$	0	1	1	0	1	0
	$U_5$	$2/3 U_{DC} < -2\pi/3$	0	1	0	1	1	0
	$U_6$	$2/3 U_{DC} < -\pi/3$	1	0	0	1	1	0
Nulinis	$U_0$	0	1	0	1	0	1	0
			0	1	0	1	0	1

Etaloninis išėjimo įtampos vektorius  $U_o$  gali būti gaunamas, pasinaudojant gretimais perjungimo vektoriais  $U_\gamma$  ir  $U_\delta$  bei atitinkamais darbo ciklais  $d_\gamma$  ir  $d_\delta$ :

$$U_o = d_\alpha \cdot U_\alpha + d_\beta \cdot U_\beta. \quad (17)$$

Išėjimo įtampos erdvės vektorius kompleksinėje plokštumoje pavaizduotas 5.2.3 pav. [13]



5.2.3 pav. Išėjimo įtampos erdvės vektorius kompleksinėje plokštumoje

Aktyviųjų vektorių darbo ciklas apskaičiuojamas taip:

$$d_\alpha = \frac{T_\alpha}{T_s} = m_u \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_u\right), d_\beta = \frac{T_\beta}{T_s} = m_u \sin(\theta_u), d_{ou} = \frac{T_{ou}}{T_s} = 1 - d_\alpha - d_\beta; \quad (18)$$

čia:  $m_u$  – įtampos moduliacijos indeksas,

$\theta_u$  – etaloninės išėjimo įtampos kampas.

Įtampos moduliacijos indeksas  $m_u$ , nusako norimos įtampos perdavimo koeficientą:

$$m_u = \frac{\sqrt{3}U_o}{U_{DC}}; 0 \leq m_u \leq 1; \quad (19)$$

čia:  $U_o$  – etaloninė išėjimo įtampa,

$U_{DC}$  – inverterio vidutinė įtampos reikšmė.

### 5.3 Venturini moduliacija

Venturini valdymo algoritmas kontroliuoja dvikrypčius matricinio keitiklio jungiklius, kurie sujungti su įtampos šaltiniu ir apkrova. Šiame algoritme maksimali įtampos išėjimo reikšmė yra lygi pusei įėjimo įtampos reikšmės arba dar mažesnė. Tačiau, maksimalios įtampos perdavimo koeficientas gali būti padidintas iki 0,866, pridendant trečiąją harmoniką įėjimo ir išėjimo įtampos signaluose. Matricinio keitiklio dvikrypčių jungiklių perjungimo darbo ciklas apskaičiuojamas taip [14]:

$$m_{Kj} = m_s \left[ \frac{1}{3} + \frac{2U_K U_j}{3U_{im}^2} + \frac{2q}{9q_m} \sin(\omega_i t + \Psi_K) \sin(3\omega_i t) \right]; \quad (20)$$

čia:  $K=\{A, B, C\}$  – matricinio keitiklio įėjimo fazės indeksas,

$j=\{a, b, c\}$  – matricinio keitiklio išėjimo fazės indeksas,

$\Psi_K - 0, 2\pi/3, 4\pi/3$  atitinkamai kiekvienai įėjimo fazei,

$q$  – įtampos perdavimo koeficientas,

$q_m$  – maksimalus įtampos perdavimo koeficientas (0,866),

$U_K$  – įėjimo įtampa,

$U_j$  – išėjimo įtampa,

$\mathbf{U}_{im}$  – įėjimo įtampos vektoriaus reikšmė,

$\omega_i$  – įėjimo kampinis dažnis.

$U_K$  – įėjimo įtampa gali būti apskaičiuojama taip [14]:

$$U_K = q \mathbf{U}_{im} \cos(\omega_o t + \Psi_j) - \frac{q}{6} \mathbf{U}_{im} \cos(3\omega_o t) + \frac{q}{4q_m} \mathbf{U}_{im} \cos(3\omega_i t); \quad (21)$$

čia:  $\Psi_j - 0, 2\pi/3, 4\pi/3$  atitinkamai kiekvienai išėjimo fazei,

$\omega_o$  – išėjimo kampinis dažnis.



## 6. MATRICINIO KEITIKLIO ĮĖJIMO SROVĖS MODULIACIJOS STRATEGIJOS

Matricinio keitiklio įėjimo srovės vektoriaus moduliacija iš esmės skiriasi priklausomai nuo moduluojamos srovės vektoriaus krypties. Ši kryptis gali būti atvaizduojama sutartinio dydžio vektoriumi  $\Psi$ , dar kitaip vadinamu moduliacijos vektoriumi. Kiekviena matricinio keitiklio įėjimo srovės moduliacijos strategija turi tenkinti tokią sąlygą [15]:

$$\Psi \cdot j\mathbf{i}_i = 0; \quad (22)$$

čia:  $\Psi$  – moduliacijos vektorius,

$\mathbf{i}_i$  – matricinio keitiklio įėjimo srovės vektorius.

Bet kuri matricinio keitiklio įėjimo srovės moduliacijos strategija yra visiškai apibrėžiama, kai yra žinomas moduliacijos vektorius. Faktiškai, įėjimo srovės vektorius gali būti išreikštas kaip moduliacijos vektoriaus, matricinio keitiklio absorbuojamos galios ir įėjimo įtampos funkcija.

Matricinio keitiklio absorbuojama galia  $p_i$  išreiškiama tokia formule [15]:

$$p_i = \frac{3}{2} \mathbf{u}_i \cdot \mathbf{i}_i = 0; \quad (23)$$

čia:  $\mathbf{u}_i$  – matricinio keitiklio įėjimo įtampos vektorius,

$\mathbf{i}_i$  – matricinio keitiklio įėjimo srovės vektorius.

Pasinaudojant (22) ir (23) formulėmis, gaunama tokia matricinio keitiklio įėjimo srovės vektoriaus išraiška [15]:

$$\mathbf{i}_i = \frac{2}{3} \frac{p_i}{\mathbf{u}_i \cdot \Psi}; \quad (24)$$

čia:  $p_i$  – matricinio keitiklio absorbuojama galia.

Jei matricinio keitiklio jungikliai idealūs ir galios nuostoliai nėra vertinami, tai įėjimo galia yra lygi išėjimo galiai, kuri perduodama apkrovai. Tada matricinio keitiklio įėjimo srovės vektoriaus išraiška gali būti tokia [15]:

$$\mathbf{i}_i = \frac{2}{3} \frac{p_o}{\mathbf{u}_i \cdot \Psi}; \quad (25)$$

čia  $p_o$  – matricinio keitiklio išėjimo galia, kuri perduodama apkrovai.

Kaip matome iš (25) formulės, matricinio keitiklio įėjimo srovės erdvės vektoriaus reikšmė priklauso nuo išėjimo galios  $p_o$ , įėjimo įtampos vektoriaus  $\mathbf{u}_i$  ir moduliacijos vektoriaus  $\Psi$ .

*Strategija A.* Tai pati paprasčiausia įėjimo srovės moduliacijos strategija, kai įėjimo srovės ir įėjimo įtampos fazės sutampa, o tai sąlygoja vienetinį įėjimo galios faktorių.

*Strategija B.* Tai strategija, kuriai būdingos geresnės charakteristikos, negu strategija A. Įėjimo srovės vektorius yra dinamiškai moduluojamas aplink įėjimo įtampos vektorių. Ši strategija dažniausiai naudojama, kai sinusoidinės įėjimo įtampos yra nesubalansuotos, tačiau gaunamos nors ir nesubalansuotos, bet sinusoidinės įėjimo srovės.

*Strategija C.* Įėjimo srovės vektorius moduluojamas taip, kad jo fazė sutaptų su teigiamos sekos įėjimo įtampos vektoriaus pagrindine komponente. Ši strategija yra optimaliausia moduliacijos strategija, kuri sąlygoja mažiausią suminę įėjimo srovės trikdžių efektinę reikšmę. Taip pat strategija C stabilizuoja matricinio keitiklio veikimą. [15]

## 7. NESTABILUMO FENOMENAS

Pati paprasčiausia moduliacijos strategija, norint sinchronizuoti matricinio keitiklio įėjimo srovės moduliaciją, paremta įėjimo įtampos nulinės reikšmės aptikimu [15]. Ši valdymo technika veikia tinkamai, jei naudojamas idealus maitinimo šaltinis (šaltinio įtampos subalansuotos ir sinusoidinės), tačiau dėl trikdžių esančių įėjimo įtampos, išėjime gaunamos žemesnės eilės įtampos harmonikos, nes matricinis keitiklis neturi NS jungties. Jei į matricinio keitiklio įėjimą generuojamos nesubalansuotos ir nesinusinės įėjimo įtampos, tai įėjimo įtampos vektoriaus amplitudė, kampinis greitis nėra pastovūs. Tada paprasčiausia sinchronizacija su įėjimo įtampomis nėra taikoma. Šiuo atveju įėjimo įtampos turi būti matuojamos kiekvieną ciklo laikotarpį, norint apskaičiuoti darbo ciklus, reikalingus generuoti subalansuotą ir sinusoidinę išėjimo įtampą.

Tačiau, įėjimo įtampos trikdžių kompensavimas gali sukelti nestabilumo fenomeną, kai matricinio keitiklio išėjimo galia peržengia ribinę reikšmę. Tarkime, kad laikinai matricinio keitiklio įėjime atsiranda įtampos trikdžiai, o tai sąlygoja įėjimo srovės svyravimus. Verta paminėti, kad šie srovės svyravimai yra proporcingi išėjimo galiai. Srovės harmonikų dažniai yra artimi įėjimo LC filtro rezonansiniam dažniui, o tai sustiprina įėjimo įtampos trikdžius. Vis dėlto, jei matricinio keitiklio išėjimo galia yra maža, šis trikdžių stiprinimas yra nereikšmingas. Kitu atveju, jei išėjimo galia yra pakankamai didelė, trikdžių stiprinimas sąlygoja ilgalaikius virpesius įėjimo įtampos, kurie nedingsta, net ir išnykus pirminiams matricinio keitiklio įėjimo įtampos trikdžiams. Šiuo atveju sistema pasiekia naują pastovią būseną, tačiau matricinis keitiklis veikia netinkamai, nes įėjimo srovės ir įtampos tampa nepaprastai išsibalansavusios.

Matricinio keitiklio stabilaus veikimo galios limitas  $P_{lim}$  apskaičiuojamas tokia formule [15]:

$$P_{lim} = \frac{3}{2} U_i^2 C_f \sqrt{\frac{R_s^2}{L_T^2} + 4\omega_i^2}; \quad (26)$$

čia:  $U_i$  – įėjimo įtampos amplitudinė reikšmė,  
 $C_f$  – filtro kondensatoriaus talpa,  
 $\omega_i$  – įėjimo kampinis dažnis,  
 $R_s$  – linijos varža,  
 $L_T$  – suminis filtro ir linijos induktyvumas.

Iš (26) formulės matome, kad norint padidinti matricinio keitiklio stabilaus veikimo galios limitą  $P_{lim}$ , įėjimo filtro kondensatoriaus talpa  $C_f$  turi būti parinkta kuo didesnė, o induktyvumas  $L_f$ , kuo mažesnis.

Be to, matricinio keitiklio valdymas dažnai vykdomas su skaitmeniniais mikroprocesoriais, kurių skaičiavimai atliekami per baigtinį ciklo laikotarpį. Skaitmeninis valdiklis ciklo laikotarpio pradžioje atrenka įėjimo įtampas, o tik vėlesniame ciklo laikotarpyje taiko naujas konfigūracijas. Tai lemia vieno ciklo laikotarpio vėlavimą, o tai gali sukelti sistemos nestabilumą. Šiuo atveju matricinio keitiklio stabilaus veikimo galios limitas priklauso ne tik nuo linijos bei filtro parametru, bet ir nuo apkrovos varžos ir nuo ciklo laikotarpio  $T_p$ .

Ant filtro ritės lygiagrečiai jungta slopinimo rezistorius gali padidinti matricinio keitiklio išėjimo stabilios galios limitą bei nuslopinti filtro rezonansą. Matricinio keitiklio išėjimo stabilios galios limitas taip pat gali būti padidintas, jei darbo ciklą skaičiavimas būtų atliekamas filtruojant įėjimo įtampas su skaitmeniniu žemo dažnio filtru. Pasinaudojant skaitmeniniu žemo dažnio filtru, filtruotos įėjimo įtampos vektoriaus išvestinė pagal laiką atrodytų taip [15]:

$$\frac{d\mathbf{u}_{if}}{dt} = \frac{\mathbf{u}_i - (1 - j\omega_i\tau)\cdot\mathbf{u}_{if}}{\tau}, \quad (27)$$

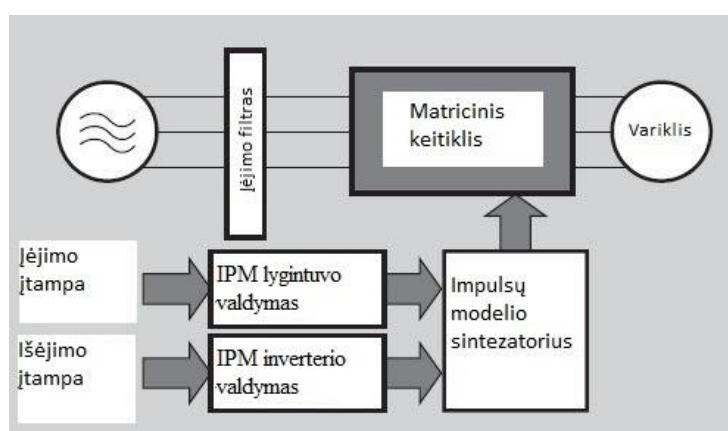
čia:  $\mathbf{u}_{if}$  – filtruotas įėjimo įtampos vektorius,  
 $\tau$  – žemo dažnio filtro laiko konstanta,  
 $\omega_i$  – įėjimo kampinis dažnis,  
 $t$  – laikas.

Didinant žemo dažnio filtro laiko konstantą  $\tau$ , įmanoma padidinti ir įtampos limitą. Vienintelis trūkumas yra tai, kad filtras tam tikru mastu gali paveikti valdymo sistemos veiksnumą, kompensuojant įėjimo įtampos trikdžius, esant apkrovai.

## 8. MATRICINIO KEITIKLIO VIRTUALUS NETIESIOGINIO VALDYMO METODAS

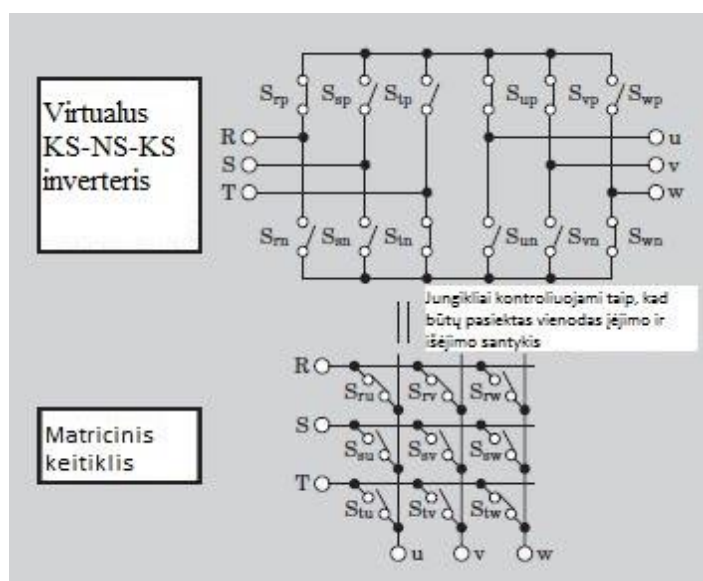
Su matriciniu keitikliu vienalaikis išėjimo įtamos ir įėjimo srovės valdymas yra įmanomas, tačiau vienalaikis ir nepriklausomas valdymas yra nelengvai įgyvendinamas. Valdymas yra kompliktuotas, nes perjunginėjant vieną dvikryptį jungiklį, gaunama atitinkama išėjimo įtampa, tačiau tai sąlygoja įėjimo srovės reikšmę. Matriciniame keitiklyje kiekvieno dvikrypčio jungiklio impulsų modelis apskaičiuojamas tiesiogiai.

Valdymo metodas, kuris paremtas virtualiu netiesioginiu IPM lygintuvo ir IPM inverterio valdymu pavaizduotas 8.1 pav. [2]



**8.1 pav.** Valdymo metodas, kuris paremtas virtualiu netiesioginiu IPM lygintuvo ir IPM inverterio valdymu

Matricinio keitiklio impulsų modelis yra gaunamas, sintezuojant IPM lygintuvo ir IPM inverterio impulsų modelius. Šis valdymo metodas suteikia galimybę valdyti įėjimo srovę ir išėjimo įtampą nepriklausomai. Virtualaus netiesioginio valdymo metodo principas pavaizduotas 8.2 pav. [2]

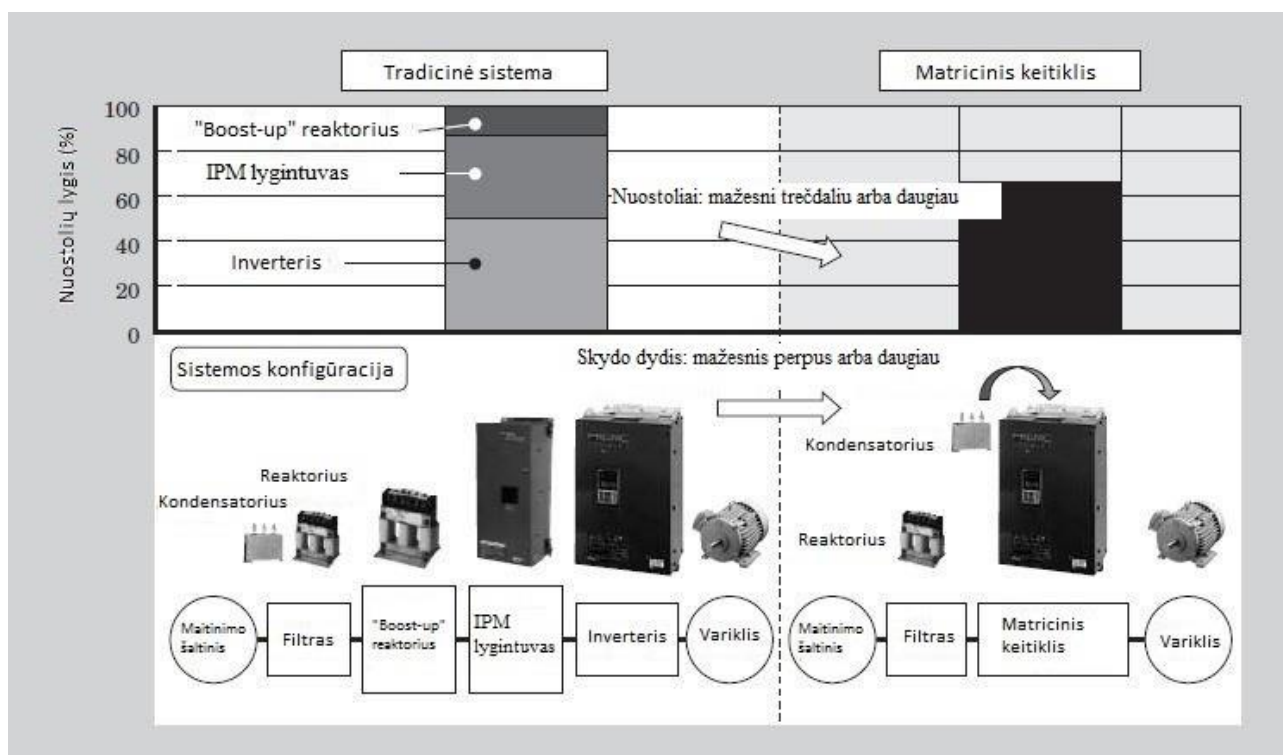


**8.2 pav.** Virtualaus netiesioginio valdymo metodo principas

Jei virtualus lygintuvas įjungia jungiklius  $S_{rp}$  ir  $S_m$ , o virtualus IPM inverteris įjungia jungiklius  $S_{up}$ ,  $S_{vp}$  ir  $S_{wn}$ , tada R fazė bus sujungta su u faze ir v faze, ir T fazė bus sujungta su w faze. Dėl to, matricinis keitiklis įjungs jungiklius  $S_{ru}$ ,  $S_{rv}$  ir  $S_{rw}$ , o tai reiškia, kad R fazė bus sujungta su u faze ir v faze, ir T fazė bus sujungta su w faze. Toks matricinis keitiklis dirba taip pat, kaip ir IPM sistema.

## 9. MATRICINIO KEITIKLIO IR TRADICINĖS SISTEMOS PALYGINIMAS

Kadangi įėjimo įtampa nėra konvertuojama į nuolatinę įtampą, tai nėra reikalingas energijos kaupiklis, toks kaip elektrolitinis kondensatorius. Lyginant su tradicine inverterine sistema, matricinio keitiklio dydis yra perpus arba net dar mažesnis, eksploatacijos laikotarpis ilgesnis, mažiau srovinių harmonikų, veikia keturiuose kvadrantuose, išėjimo dažnį galima keisti neribotai bei nuostolių dydis trečdaliu mažesnis. Matricinis keitiklis sudarytas tik iš filtro ir pagrindinio įrenginio, kuriame komutuoja dvikrypčiai jungikliai. Tradicinės sistemos ir matricinio keitiklio palyginimas pavaizduotas 9.1 pav. [2]



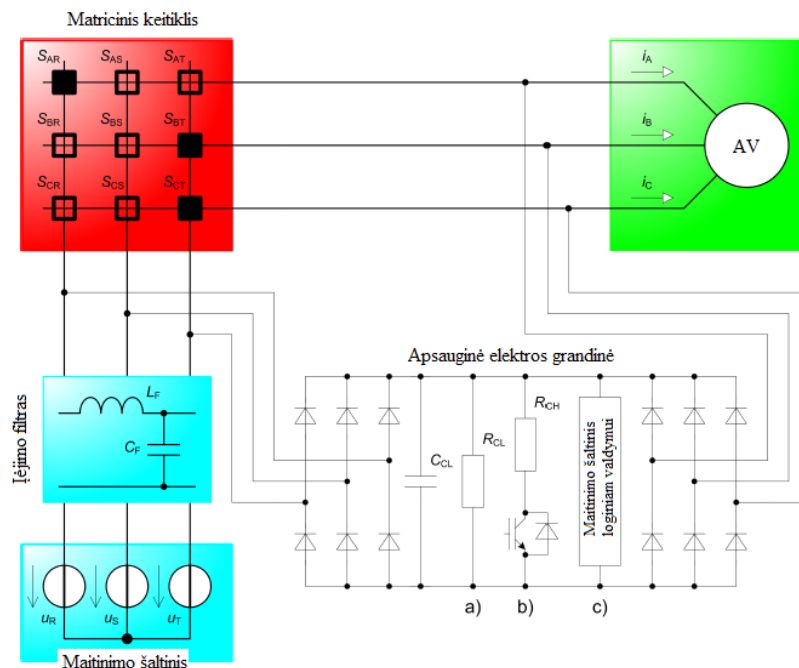
9.1 pav. Tradicinės sistemos ir matricinio keitiklio palyginimas

Tačiau, matricinis keitiklis turi ir keletą trūkumų: maksimalus įtampos perdavimo koeficientas siekia 87%, reikia daugiau puslaidininkinių elementų nei tradiciniame įtampos keitiklyje bei jautrus įėjimo įtampos svyravimams.

## 10. MATRICINIO KEITIKLIO APSAUGINĖ ELEKTROS GRANDINĖ

Matriciniame keitiklyje jungikliai turi būti atitinkamai kontroliuojami, norint išvengti trumpųjų jungimų elektros grandinėje bei srovės nutraukimo apkrovoje. Jei srovė apkrovoje nutrūksta, dideli viršįtampiai krenta ant puslaidininkinių jungiklių ir juos sugadina. Todėl matricinio keitiklio gedimų prevencijai reikalinga apsauginė elektros grandinė, kuri jungiama prie matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo.

Matricinio keitiklio apsauginę grandinę sudaro du diodų tilteliai, o tarp jų NS jungties elementai. Matricinio keitiklio komutacijos ir apsauginė elektros grandinė pavaizduota 10.1 pav. [16]



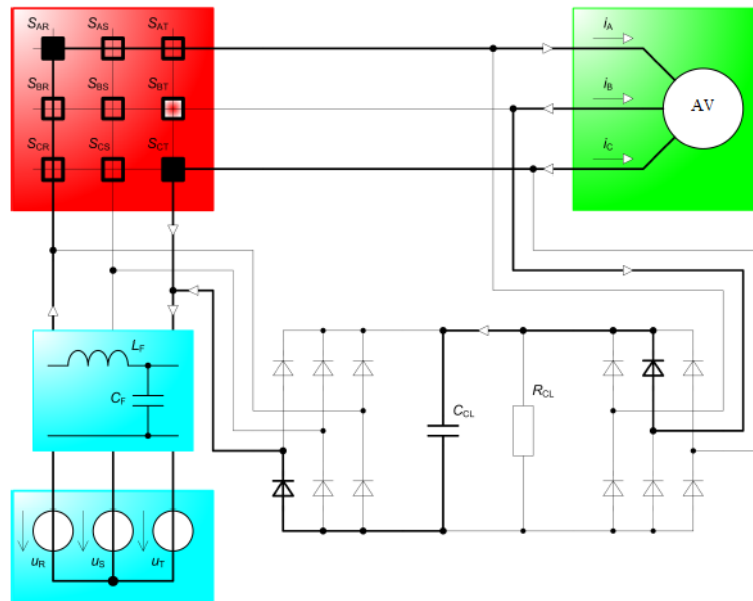
10.1 pav. Matricinio keitiklio komutacijos ir apsauginė elektros grandinė

Apsauginės elektros grandinės NS jungtyje esantis kondensatorius  $C_{CL}$  (10.1 pav.) užsikrauna iki amplitudinės maitinimo šaltinio reikšmės. Ši amplitudinė reikšmė kondensatoriuje  $C_{CL}$  gali didėti priklausomai nuo komutacinių procesų matriciniame keitiklyje. Dėl šios priežasties kondensatoriaus išsikrovimas apsauginėje elektros grandinėje turi būti užtikrintas. Kondensatorius  $C_{CL}$  gali būti iškrautas, pasinaudojus lygiagrečiai jam jungta varža  $R_{CL}$  (10.1 pav. a)). Tačiau ši varža  $R_{CL}$  suteikia papildomų galios nuostolių matriciniame keitiklyje, o tai sąlygoja mažesnę matricinio keitiklio naudingumą. Be to, per maža varžos reikšmė gali sužadinti įėjimo filtro virpesius.

Galios nuostoliai apsauginėje elektros grandinėje gali būti sumažinti, padidinant varžos  $R_{CL}$  reikšmę arba vietoj jos naudojant skeltuvą (angl. *chopper*) (10.1 pav. b)). Apsauginėje elektros grandinėje išsklaidoma energija gali būti panaudota naudingai, su ja užmaitinant loginį matricinio

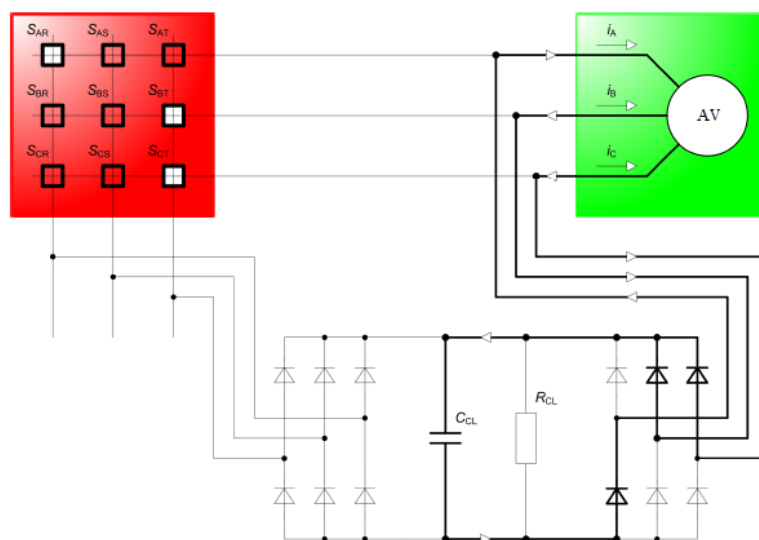
keitiklio valdymą (10.1 pav. c)). Toks sprendimas gera idėja, pavyzdžiui, jei matricinis keitiklis yra ant mechanizmo rotoriaus.

Tarkime, kad matricinio keitiklio jungikliai  $S_{AR}$ ,  $S_{BT}$  ir  $S_{CT}$  yra uždaryti, o kiti jungikliai – atidaryti. Taip pat žinoma, kad  $u_R > u_T$ ,  $i_A > 0$  ir  $i_B < 0$  ir  $i_C < 0$ . Be to, sakykime, kad yra defektas jungiklyje  $S_{BT}$  arba defektas generuojant valdymo signalą šiam jungikliui. Tada apkrovos srovė  $i_B$  tekės per apsauginės elektros grandinės diodų tiltelius. Matricinio keitiklio apsauginės elektros grandinės, jungiklio klaidos atveju, srovių tekėjimas pavaizduotas 10.2 pav. [16]



10.2 pav. Matricinio keitiklio apsauginės elektros grandinės, jungiklio klaidos atveju, srovių tekėjimas

Kai matricinio keitiklio jungiklio klaida yra aptikta ir keitiklis yra išjungtas, apkrovos srovės  $i_A$  ir  $i_C$  teka per apsauginės elektros grandinės diodų tiltelį. Matricinio keitiklio apkrovos srovių tekėjimas, esant išjungtam keitikliui, pavaizduotas 10.3 pav. [16]

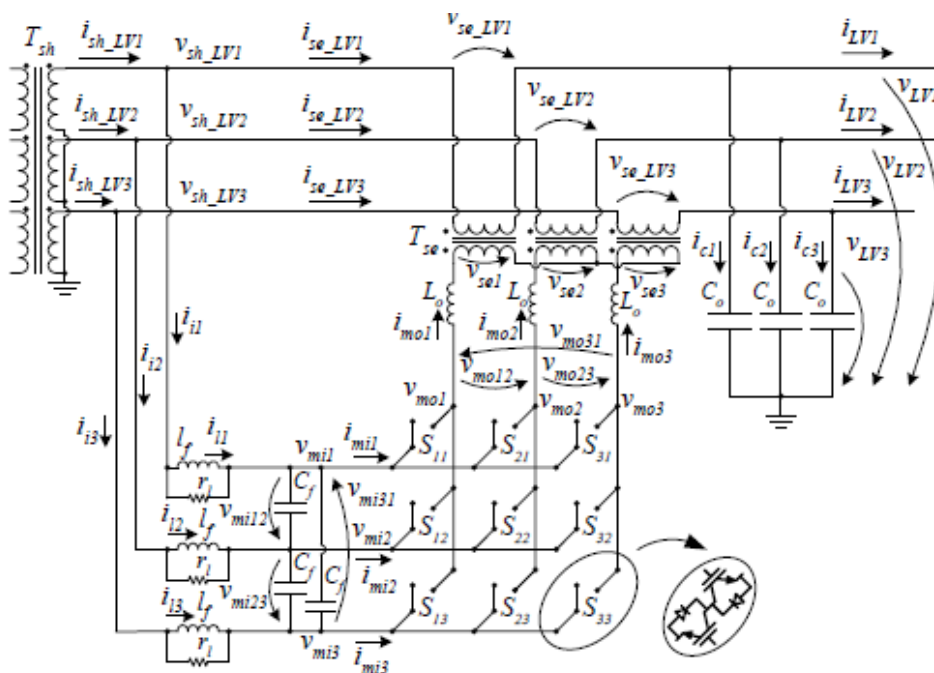


10.3 pav. Matricinio keitiklio apkrovos srovių tekėjimas, esant išjungtam keitikliui

Toks pats apkrovos srovių  $i_A$  ir  $i_C$  tekėjimas per diodų tiltelį būtų, jei nutrūktų elektros grandinė tarp įėjimo filtro ir matricinio keitiklio. Be to, esant staigiam matricinio keitiklio išsijungimui arba maitinimo nutraukimui, matricinio keitiklio įėjimo filtre sukaupta energija turi būti dalinai išsklaidyta apsauginėje elektros grandinėje.

## 11. MATRICINIS KEITIKLIS SU SKIRSTOMOJO TINKLO TRANSFORMATORIUMI

Matricinio keitiklio su skirstomojo tinklo transformatoriumi sistema sudaro: trifazis skirstomojo tinklo transformatorius ( $T_{sh}$ ), trys nuosekliai jungti transformatoriai ( $T_{se}$ ), matricinis keitiklis ir filtrai, kurie naudojami minimizuoti harmonikas. Išsami matricinio keitiklio su skirstomojo tinklo transformatoriumi schema pavaizduota 11.1 pav. [17]



11.1 pav. Išsami matricinio keitiklio su skirstomojo tinklo transformatoriumi schema

Toks matricinis keitiklis, kuris sujungtas su skirstomojo tinklo transformatoriumi leidžia realiu laiku reguliuoti įtampą žemos įtampos (LV) pusėje, kurios reikšmė apibrėžta protingojo tinklo reikalavimuose bei standartinių reikšmių režimuose. Taip pat yra galimybė reguliuoti žemos įtampos tinklo įtampą, esant įtampos sumažėjimams ar padidėjimams vidutinės įtampos (MV) pusėje. Be to, naudojant matricinio keitiklio su skirstomojo tinklo transformatoriumi schemą, prisidedama prie galios koeficiento korekcijų vidutinės įtampos (MV) pusėje.

Harmonikų minimizavimui užtikrinti, prie tinklo jungiami aukšto dažnio filtrai. Pagal 11.1 pav. schemą, įėjimo filtrų dinaminės lygtys gali būti gautos dq koordinatėmis, pasinaudojus Parko



transformaciją, kur  $i_{ld}$  ir  $i_{lq}$  yra matricinio konverterio įėjimo filtro ritės srovės,  $v_{mid}$  ir  $v_{miq}$  yra kondensatoriaus įtampos,  $v_{sh\_LVd}$  ir  $v_{sh\_LVq}$  yra skirstomojo tinklo transformatoriaus įtampos,  $i_{mid}$  ir  $i_{miq}$  yra matricinio keitiklio įėjimo srovės,  $\omega$  yra tinklo kampinis dažnis ( $\omega=2\pi f$ ). Įėjimo filtrų dinaminės lygtys [17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{ld}}{dt} = \omega i_{lq} - \frac{1}{2l_f} v_{mid} - \frac{1}{2\sqrt{3}l_f} v_{miq} + \frac{1}{l_f} v_{sh\_LVd} \\ \frac{di_{lq}}{dt} = -\omega i_{ld} + \frac{1}{2\sqrt{3}l_f} v_{mid} - \frac{1}{2l_f} v_{miq} + \frac{1}{l_f} v_{sh\_LVq} \\ \frac{dv_{mid}}{dt} = \frac{1}{2C_f} i_{ld} - \frac{1}{2\sqrt{3}C_f} i_{lq} - \frac{1}{3C_f r_f} v_{mid} + \omega v_{miq} + \\ + \frac{1}{2C_f r_f} v_{sh\_LVd} - \frac{1}{2\sqrt{3}C_f r_f} v_{sh\_LVq} - \frac{1}{2C_f} i_{mid} + \frac{1}{2\sqrt{3}C_f} i_{miq} \\ \frac{dv_{miq}}{dt} = \frac{1}{2\sqrt{3}C_f} i_{ld} + \frac{1}{2C_f} i_{lq} - \omega v_{mid} - \frac{1}{3C_f r_f} v_{miq} + \\ + \frac{1}{2\sqrt{3}C_f r_f} v_{sh\_LVd} + \frac{1}{2C_f r_f} v_{sh\_LVq} - \frac{1}{2\sqrt{3}C_f} i_{mid} - \frac{1}{2C_f} i_{miq} \end{array} \right. \quad (28)$$

Nuosekliai jungti transformatoriai ( $T_{se}$ ), kurie pavaizduoti 11.1 pav., užtikrina įtampos  $v_{LV}$  apribojimą standartinėmis įtampos reikšmėmis. Įtampos  $v_{LV}$  reikšmė apskaičiuojama tokia formule [17]:

$$v_{LVj} = v_{sh\_LVj} - v_{se\_LVj}; \quad (29)$$

čia:  $j \in \{1, 2, 3\}$ .

Nuosekliai jungti transformatoriai pakeičia santykį  $n_{se}$ , kuris išreiškiamas taip [17]:

$$n_{se} = \frac{V_{se}}{V_{se\_LV}}; \quad (30)$$

čia:  $V_{se}$ ,  $V_{se\_LV}$  - pirminės ir antrinės nuosekliai jungto transformatoriaus grandinės efektinės įtampos reikšmės.

Prenkant nuosekliai jungtą transformatorių, būtina nustatyti maksimalią įtampos sumažėjimo/padidėjimo efektinę kompensacinę įtampos reikšmę, atsižvelgiant į tai, kad matricinio keitiklio maksimalios įtampos perdavimo santykis yra  $\frac{V_{mo}}{V_{mi}} = \frac{\sqrt{3}}{2}$  ir nepaisant įtampos kritimo matricinio keitiklio įėjimo, išėjimo filtruose. Maksimali žemosios įtampos pusėje, esančios įtampos sumažėjimo/padidėjimo efektinė kompensacinė įtampos reikšmė apskaičiuojama tokia formule [17]:

$$V_{se\_LVjmax} = \frac{V_{semax}}{n_{se}} \approx \frac{1}{n_{se}} \frac{\sqrt{3}}{2} V_{sh\_LVj}; \quad (31)$$

čia:  $j \in \{1, 2, 3\}$ .

Matricinio keitiklio su skirstomojo tinklo transformatoriumi sistemos dinaminis modelis, kuris išreiškiamas  $\alpha\beta$  koordinatėmis, gaunamas, pasinaudojant „Concordia“ transformacija. „Concordia“ transformacijos lygtys [17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{mo\alpha}}{dt} = -\frac{r_l}{L_o} i_{mo\alpha} + \frac{1}{2L_o} v_{mo\alpha} + \frac{1}{2\sqrt{3}L_o} v_{mo\beta} - \\ \quad - \frac{n_{se}}{L_o} v_{sh\_LV\alpha} + \frac{n_{se}}{L_o} v_{LV\alpha} \\ \frac{di_{mo\beta}}{dt} = -\frac{r_l}{L_o} i_{mo\beta} + \frac{1}{2\sqrt{3}L_o} v_{mo\alpha} + \frac{1}{2L_o} v_{mo\beta} - \\ \quad - \frac{n_{se}}{L_o} v_{sh\_LV\beta} + \frac{n_{se}}{L_o} v_{LV\beta} \\ \frac{dv_{LV\alpha}}{dt} = -\frac{n_{se}}{C_o} i_{mo\alpha} + \frac{1}{C_o} i_{LV\alpha} \\ \frac{dv_{LV\beta}}{dt} = -\frac{n_{se}}{C_o} i_{mo\beta} + \frac{1}{C_o} i_{LV\beta} \end{array} \right. ; \quad (32)$$

čia:  $r_l$  – išėjimo filtro ričių apvijų varža,

$L_o$  – išėjimo filtro ričių induktyvumas,

$i_{mo\alpha}$  ir  $i_{mo\beta}$  – matricinio keitiklio išėjimo filtro ritės srovės,

$v_{LV\alpha}$  ir  $v_{LV\beta}$  – žemos įtampos tinklo įtampos,

$v_{mo\alpha}$  ir  $v_{mo\beta}$  – matricinio keitiklio išėjimo įtampos,

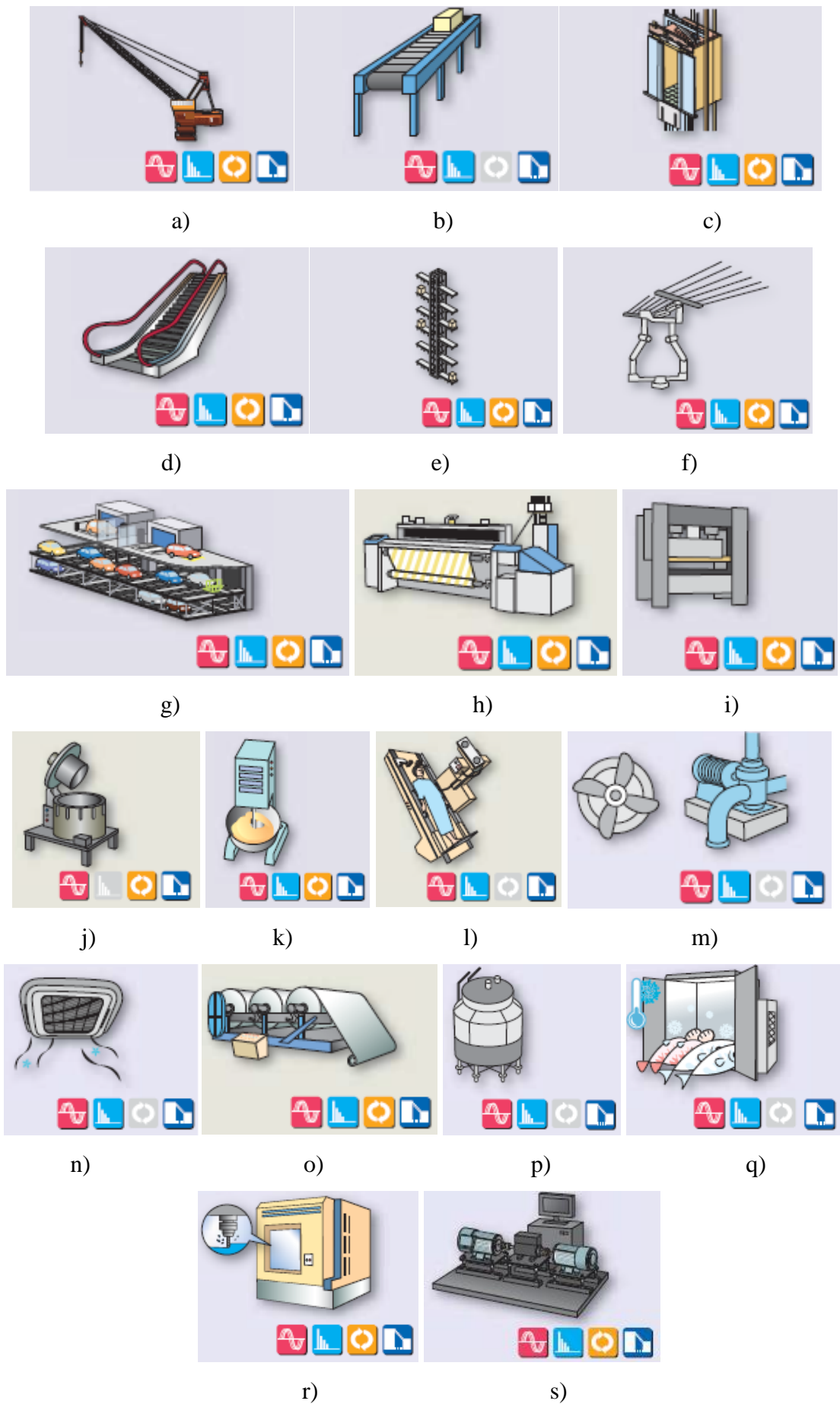
$v_{sh\_LV\alpha}$  ir  $v_{sh\_LV\beta}$  – skirstomojo tinklo transformatoriaus įtampos.

## 12. MATRICINIO KEITIKLIO TAIKYMO SU ELEKTROS ĮRENGINIAIS PAVYZDŽIAI

Matricinis keitiklis naudojamas su įvairiais elektros įrenginiais, su kuriais turi galimybę regeneruoti energiją, pasižymi dideliu galios koeficientu, mažo lygio harmonikomis bei kompaktiškumu. Matricinis keitiklis literatūroje dažniausiai minimas kartu su vėjo jėgainėmis.

Matrciniai keitikliai be vėjo jėgainių dar kartu naudojami su tokiais elektros įrenginiais: kranais (12.1 pav. a)), konvejeriais (12.1 pav. b)), liftais (12.1 pav. c)), eskalatoriais (12.1 pav. d)), automatizuotomis vertikaliomis laikymo sistemomis (12.1 pav. e)), pramoniniais robotais (11.1 pav. f)), automatinėmis parkavimo sistemomis (12.1 pav. g)), audimo mašinomis (12.1 pav. h)), presais (12.1 pav. i)), išcentriniais separatoriais (12.1 pav. j)), maišytuvais (12.1 pav. k)), mediciniais įtaisais (12.1 pav. l)), ventiliatoriais ir siurbliais (12.1 pav. m)), oro kondicionavimo sistemomis (12.1 pav. n)), susukimo įtaisais ir pervyniotojais (12.1 pav. o)), aušinimo bokštais (12.1 pav. p)), kompresoriais (12.1 pav. q)), staklėmis (12.1 pav. r)), apkrovos bandymo mašinomis (12.1 pav. s)).

[18]



**12.1 pav.** Elektros įrenginiai su kuriais naudojamas matricinis keitiklis  
 Ženklų (12.1 pav.) paaiškinimai pateikti 12.1 lentelėje.

12.1 lentelė. Ženklų paaiškinimai

Ženklas	Paaiškinimas
	Didelis galios koeficientas
	Mažas harmonikų lygis
	Energijos regeneravimas
	Kompaktiškumas

### 13. ELEKTROS TINKLŲ TERŠĖJAI - HARMONIKOS

Harmonikos – tai dažniai, kurie yra pagrindinio dažnio (50 Hz) sveikieji kartotiniai. Tarkim, pirmoji harmonika yra lygi 50 Hz, tai antroji bus lygi – 100 Hz ir taip toliau. Harmoninis iškraipymas gali būti apibūdinamas kaip elektros tinklo teršėjas, kuris sukelia problemas, jei suminės harmonikų srovės viršija nustatytas ribas. Pagrindinis elektros energijos sistemų harmonikų šaltinis yra netiesinės apkrovos. NIF parodo santykį tarp tiriamojo signalo aukštesniųjų harmonikų vidutinės kvadratinės įtampos vertės ir pirmosios harmonikos įtampos vertės  $U_1$ . NIF apskaičiuojamas pagal tokią formulę [19]:

$$NIF = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_N^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (33)$$

ES standartas riboja NIF, kuris neturi viršyti 8%. [20]

Galios elektronikos elementai matriciniame keitiklyje yra tipiniai aukštesniųjų srovės harmonikų šaltiniai. Srovės signalo iškraipymai atsiranda dėl perjungimo operacijų. Kadangi srovės harmonikų charakteristikos mažai priklauso nuo kintamos įtampos pusės, tai šio tipo harmonikų šaltinis elgiasi kaip srovės šaltinis.

Kitas tipinis harmonikų šaltinis yra matricinio keitiklio išėjimas, kuriame generuojamos aukštesnės įtampos ir srovės harmonikos. Šiuo atveju harmonikų amplitudė labai priklauso nuo kintamos įtampos pusės impedanso. Matricinio keitiklio išėjimas apibūdinamas kaip įtampos šaltinis.

Įtampos ir srovės harmonikų padariniai skirstomi į trumpalaikius ir ilgalaikius padarinius. Trumpalaikiai padariniai apibūdinami kaip sutrikimai ar netinkami valdymo, elektronikos, informacinių technologijų įrangos veikimai. Ilgalaikiai padariniai susiję su šiluminiu pobūdžiu. Šiluminis efektas sąlygoja pagreitintą izoliacijos senėjimą. [19]

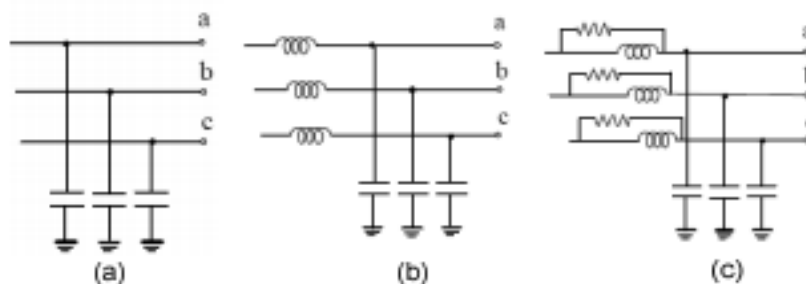
Srovės bei įtampos harmonikų nufiltravimui gali būti naudojami pasyvūs, aktyvūs bei hibridiniai filtrai.

### 13.1 Pasyvus filtras

Pasyviųjų filtrų naudojimas, kuriuos sudaro keliolika ričių (L), varžų (R), kondensatorių (C), padidina galios kokybę, kompensuojant reaktyviąją galią bei eliminuojant tam tikros eilės harmonikas. Kuo filtro impedansas yra mažesnis, lyginant su sistemos, tuo pasyvusis filtras turi geresnes charakteristikas. Šių filtrų kaina nedidelė, tačiau dėl nekintančių RLC parametrų, jie nėra pakankamai efektyvus, didinant galios kokybę, kai yra prijungtos dinaminės netiesinės apkrovos. Kita problema, naudojant pasyviuosius filtrus yra ta, kad galimas rezonansas tarp pasyviojo filtro ir sistemos, kuris įtakoja aukštesniųjų harmonikų išaugimą [21]. Pasyvieji filtrai skirstomi į juostinius ir aukšto dažnio pasyviuosius filtrus. Juostiniai pasyvieji filtrai yra naudojami nufiltruoti žemesnės eilės harmonikas (5, 7, 11, 13 ir t.t.), tai su matriciniais keitikliais nenaudojami, kadangi matriciniai keitikliai generuoja aukštesnės eilės harmonikas.

Aukšto dažnio pasyvieji filtrai skirti nufiltruoti aukštesniąsias harmonikas ir aprėpti plataus diapazono dažnius. [22]

Pagrindinės matricinio keitiklio įėjimo filtro kombinacijos: kondensatoriai (a), antrosios eilės LC filtras (b), LC filtras su slopinimo rezistoriumi (c), pavaizduotos 13.1.1 pav. [23]



13.1.1 pav. Pagrindinės matricinio keitiklio įėjimo filtro kombinacijos: kondensatoriai (a), antrosios eilės LC filtras (b), LC filtras su slopinimo rezistoriumi (c)

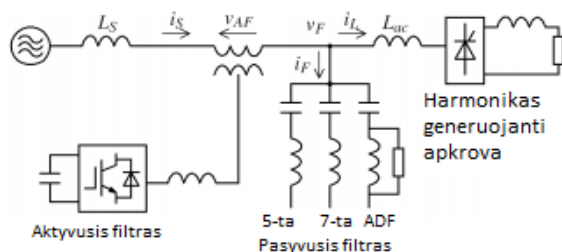
### 13.2 Aktyvus filtras

Aktyvieji filtrai gali filtruoti harmonikas plačiame dažnių diapazone. Taip pat šie filtrai gali būti naudojami tiek su tiesinėmis, tiek su netiesinėmis apkrovomis, tačiau apsaugos nuo harmonikų galia yra ribota. Aktyvieji filtrai gali būti nuoseklieji arba lygiagretieji. Lygiagretieji aktyvieji filtrai montuojami prie matricinio keitiklio įėjimo, kadangi matricinio keitiklio įėjimas yra laikomas srovės šaltiniu. Nuoseklieji aktyvieji filtrai yra statomi matricinio keitiklio išėjime, nes matricinio keitiklio

išėjimas yra laikomas įtampos šaltiniu. Aktyviuosius filtras sudaro IUBT, kurie kartu jungiami su diodais, ir pasyvieji elementai. [22]

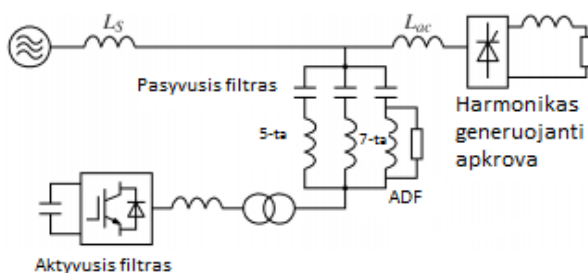
### 13.3 Hibridinis filtras

Hibridinis filtras apjungia pasyvaus ir aktyvaus filtro privalumus. Hibridinis filtras susideda iš: aktyviojo filtro, trifazio transformatoriaus (arba trijų vienfazių transformatorių) ir pasyvaus filtro, kurį sudaro du vienadažniai filtrai nufiltruoti penktai ir septintai harmonikai bei aukšto dažnio antrosios eilės filtras nufiltruoti aukštesnės eilės harmonikas. Šis filtras eliminuoja harmonikų rezonansą ir srovių harmonikas, kurios teka į maitinimo šaltinį. Naudojamos dvi hibridinių filtrų išdėstymo kombinacijos. Pirmosios kombinacijos hibridinio filtro išdėstymas pavaizduotas 13.3.1 pav. [22]



13.3.1 pav. Pirmosios kombinacijos hibridinio filtro išdėstymas

Antrosios kombinacijos hibridinio filtro išdėstymas pavaizduotas 13.3.2 pav. [22]



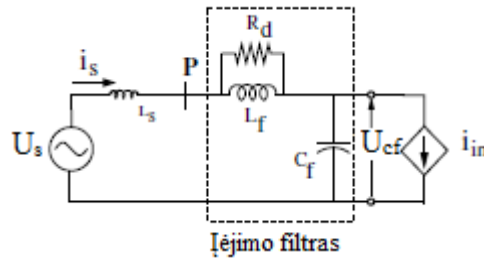
13.3.2 pav. Antrosios kombinacijos hibridinio filtro išdėstymas

Matricinį keitiklį schemose (13.3.1 ir 13.3.2 pav.) atitinka harmonikas generuojanti apkrova.

## 14. MATRICINIO KEITIKLIO ĮJĖJIMO IR IŠJĖJIMO FILTRŲ PARAMETRŲ PARINKIMO KRITERIJAI

Praktikoje dažniausiai naudojamas matricinio keitiklio įėjimo filtras yra antrosios eilės LC filtras su slopinimo rezistoriumi, todėl šiame darbe visi tolimesni skaičiavimai bei modeliavimas atliekamas

būtent su šiuo filtru. Matricinio keitiklio įėjimo antrosios eilės LC filtro su slopinimo rezistoriumi schema pavaizduota 14.1 pav. [24]



**14.1 pav.** Matricinio keitiklio įėjimo antrosios eilės LC filtro su slopinimo rezistoriumi schema

Schemoje (14.1 pav.) P raide žymimas bendrojo jungimo taškas.

Įėjimo filtro stiprinimo perdavimo funkcija, kai linijos induktyvumas  $L_s$  yra lygus nuliui išreiškiama taip:

$$G_{fu}(s) = \frac{u_{cf}(s)}{u_s(s)} \Big|_{i_{in}(s)=0} = \frac{i_s(s)}{i_{in}(s)} \Big|_{u_s(s)=0} = \frac{\frac{L_f}{R_d} + 1}{s^2 L_f C_f + s \frac{L_f}{R_d} + 1}; \quad (34)$$

čia:  $u_{cf}$  – matricinio keitiklio įėjimo filtro išėjimo įtampa,

$u_s$  – matricinio keitiklio maitinimo šaltinio įtampa,

$L_f$  – matricinio keitiklio įėjimo filtro ritės induktyvumas,

$C_f$  – matricinio keitiklio įėjimo filtro kondensatoriaus talpa,

$R_d$  – slopinimo rezistorius,

$s$  – Laplaso operatorius.

Įėjimo filtro stiprinimo koeficientas gaunamas tokia formule:

$$|G_{fu}(j\omega)| = \sqrt{(1 + \frac{r_\omega^2}{Q^2}) / (1 - r_\omega^2)^2 + \frac{r_\omega^2}{Q^2}}; \quad (35)$$

čia:  $r_\omega = \frac{\omega}{\omega_c}$ ,  $\omega$  – harmonikos kampinis dažnis,  $\omega_c$  – atkirtos kampinis dažnis,

$Q$  – filtro kokybės faktorius.

Filtro kokybės faktorius  $Q$  apskaičiuojamas tokia formule:

$$Q = R_d \sqrt{\frac{C_f}{L_f}}; \quad (36)$$

čia:  $L_f$  – matricinio keitiklio įėjimo filtro ritės induktyvumas,

$C_f$  – matricinio keitiklio įėjimo filtro kondensatoriaus talpa,

$R_d$  – slopinimo rezistorius.

Matricinio keitiklio įėjimo filtras turi atitikti tokius kriterijus [24]:

- Jungiklių perjungimo pulsacijų slopinimas,  $|G_{fu}(j2\pi f_s)| \leq -26$  dB.
- Tinklo įtampos reikšmingiausios eilės  $k$ -tosios harmonikos slopinimas,  $|G_{fu}(j2\pi k f_b)| \leq 2$  dB,  
čia:  $f_b$  – pagrindinis dažnis (50 Hz).
- Parenkant ritės induktyvumą  $L_f$ , įtampos kritimas ant ritės, esant pagrindiniam dažniui  $f_b$ , turi būti  $\leq 3\%$  maitinimo šaltinio  $U_s$  įtampos reikšmės.
- Parenkant kondensatoriaus talpą  $C_f$ , reaktyvioji srovė  $I_{cf}$  turi būti  $\leq 20\%$  įėjimo srovės  $I_{in}$ .

Kuo didesnis kokybės faktorius  $Q$ , tuo didesnis filtro bendras naudingumas, tačiau žemesnio lygio harmonikos padidėja.

Maksimalios filtro ritės induktyvumo  $L_f$  ir kondensatoriaus talpos  $C_f$  reikšmės apskaičiuojamos tokiomis formulėmis:

$$L_f \leq \frac{0,03 \cdot U_s}{\omega_b \cdot \sqrt{(I_{in}^2 + I_{cf}^2)}}; \quad (37)$$

čia:  $U_s$  – maitinimo šaltinio įtampa,

$\omega_b$  – pagrindinės harmonikos kampinis dažnis,

$I_{in}$  – matricinio keitiklio įėjimo srovė,

$I_{cf}$  – įėjimo filtro kondensatoriaus srovė,  $I_{cf} \approx \omega_b \cdot C_f \cdot U_s$ .

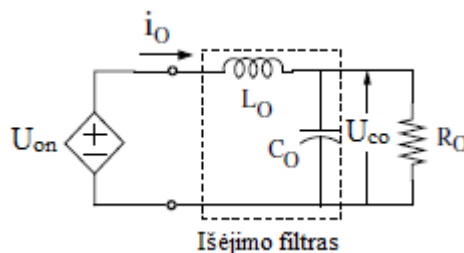
$$C_f \leq \frac{0,2 \cdot 0,866 \cdot I_o}{\omega_b \cdot U_s}; \quad (38)$$

čia:  $I_o$  – matricinio keitiklio išėjimo srovė,

$\omega_b$  – pagrindinės harmonikos kampinis dažnis,

$U_s$  – maitinimo šaltinio įtampa.

Kadangi matricinis keitiklis apkrovai tiekia reguliuojamą įtampą, antrosios eilės LC filtras yra reikalingas matricinio keitiklio išėjime. Matricinio keitiklio išėjimo antrosios eilės LC filtro schema su varžine apkrova pavaizduota 14.2 pav. [24]



14.2 pav. Matricinio keitiklio išėjimo antrosios eilės LC filtro schema su varžine apkrova



Išėjimo filtro stiprinimo  $G_{voj}(s)$  ir tariamo laidumo  $Y_{mo}(s)$  perdavimo funkcijos išreiškiamos taip:

$$G_{voj}(s) = \frac{u_{co}(s)}{u_{on}(s)} = \frac{1}{(s/\omega_{co})^2 + (s/Q_o\omega_{co}) + 1}, \quad (39) \quad Y_{mo}(s) = \frac{i_o(s)}{u_{on}(s)} = \frac{1 + s(Q_o\omega_{co})}{(s/\omega_{co})^2 + (s/Q_o\omega_{co}) + 1}; \quad (40)$$

čia:  $u_{co}$  – išėjimo filtro kondensatoriaus  $C_o$  įtampa,

$u_{on}$  – matricinio keitiklio išėjimo įtampa,

$\omega_{co}$  – rezonansinis išėjimo filtro kampinis dažnis,

$Q_o$  – išėjimo filtro kokybės faktorius,

$s$  – Laplaso operatorius,

$i_o$  – matricinio keitiklio išėjimo srovė.

Išėjimo filtro kokybės faktorius  $Q_o$  apskaičiuojamas taip:

$$Q_o = R_o \sqrt{\frac{C_o}{L_o}}; \quad (41)$$

čia:  $L_o$  – matricinio keitiklio išėjimo filtro ritės induktyvumas,

$C_o$  – matricinio keitiklio išėjimo filtro kondensatoriaus talpa,

$R_o$  – varžinė apkrova.

Maksimalios išėjimo filtro ritės induktyvumo  $L_o$  ir kondensatoriaus talpos  $C_o$  reikšmės apskaičiuojamos tokiomis formulėmis:

$$L_o \leq \frac{0,03 \cdot U_{on}}{\omega_b \cdot I_o}; \quad (42)$$

čia:  $U_{on}$  – matricinio keitiklio išėjimo įtampa,

$\omega_b$  – pagrindinės harmonikos kampinis dažnis,

$I_o$  – matricinio keitiklio išėjimo srovė.

$$C_o \leq \frac{0,2 \cdot I_{in}}{\omega_b \cdot U_{on}}; \quad (43)$$

čia:  $I_{in}$  – matricinio keitiklio įėjimo srovė,

$\omega_b$  – pagrindinės harmonikos kampinis dažnis,

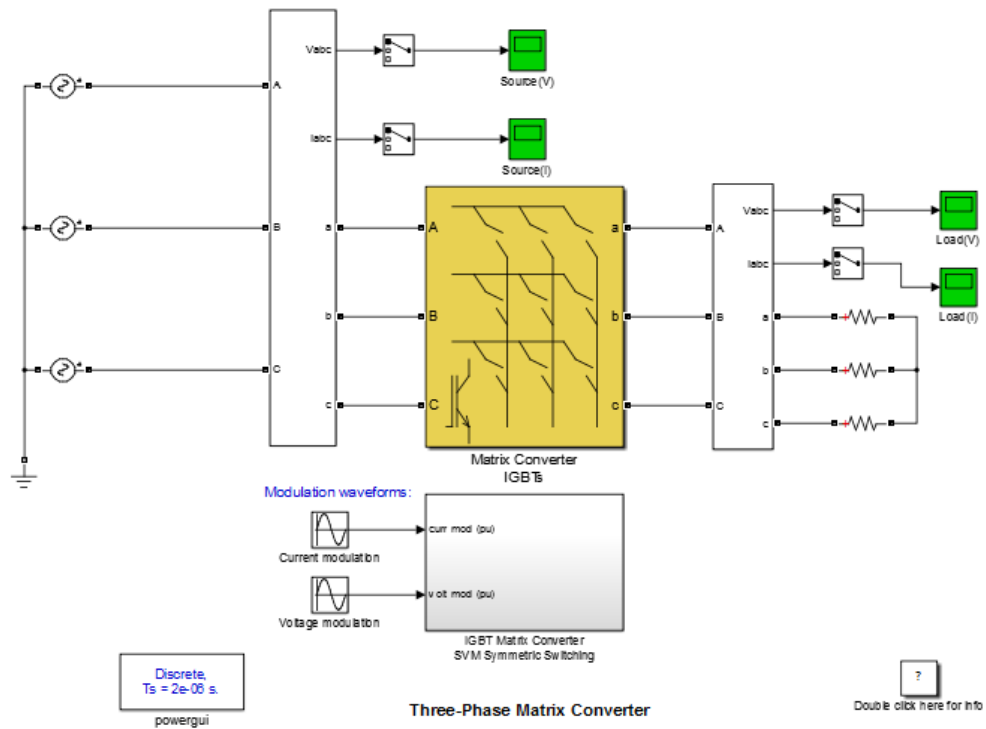
$U_{on}$  – matricinio keitiklio išėjimo įtampa.

## **15. MATRICINIO KEITIKLIO BE IR SU ĮĖJIMO BEI IŠĖJIMO FILTRAIS MODELIAVIMAS MATLAB/SIMULINK APLINKOJE**

Trifazio matricinio keitiklio be įėjimo ir išėjimo filtrų sistemos aprašymas:

Sistema susideda iš trifazio matricinio keitiklio, kurį sudaro 9 dvigubi IUBT. Matricinis keitiklis yra maitinamas idealiuoju trifaziu įtampos šaltiniu, kurio dažnis – 50 Hz. Prie matricinio keitiklio

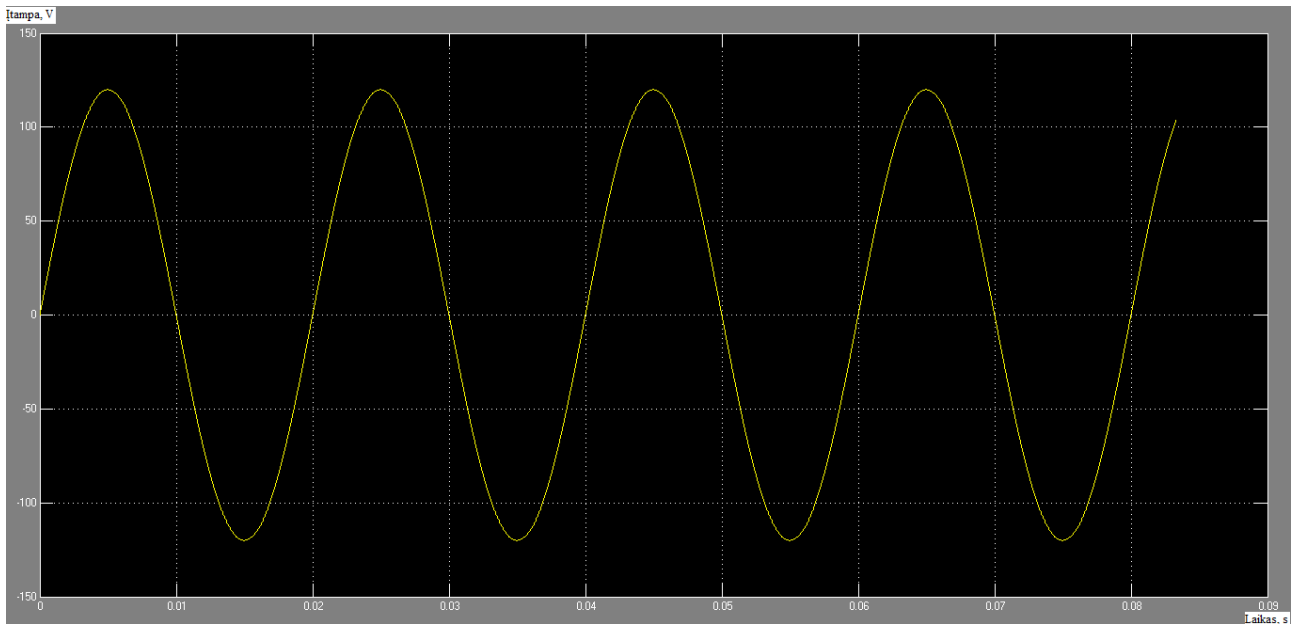
išėjimo prijungta rezistorinė apkrova. Perjungimų algoritmas yra paremtas netiesiogine erdvinių vektorių moduliacija. Netiesioginė erdvinių vektorių moduliacija leidžia tiesiogiai kontroliuoti įėjimo sroves ir išėjimo įtampas, o tai reiškia, kad įtamos šaltinio galios koeficientas ( $\cos\varphi$ ) gali būti taip pat kontroliuojamas. Kiti sistemos parametrai: kintamos įtamos šaltinio fazinė amplitudinė reikšmė – 120 V, perjungimų dažnis – 10 kHz. Trifazio matricinio keitiklio be įėjimo ir išėjimo filtrų, su išėjime prijungta aktyvine apkrovos varža, sistemos schema MATLAB/Simulink aplinkoje pavaizduota 15.1 pav. [25]



**15.1 pav.** Trifazio matricinio keitiklio be įėjimo ir išėjimo filtrų, su išėjime prijungta rezistorine apkrova, sistemos schema

Simuliacijos laikas pasirinktas „numatytasis“ – 5/60 s.

Trifazio įtamos šaltinio fazinės įtamos signalas pavaizduotas 15.2 pav.



**15.2 pav.** Trifazio įtampos šaltinio fazinės įtampos signalas

Kadangi trifazis įtampos šaltinis yra idealus, gaunamas sinusoidinis įtampos signalas be jokių iškreipymų.

Rezistorinės apkrovos varža  $R$  kiekvienai fazei pagal galią, gali būti apskaičiuojama taip [26]:

$$R = \frac{3 \cdot U^2}{P}; \quad (44)$$

čia:  $U$  – kintamos įtampos šaltinio fazinė amplitudinė reikšmė (120 V),

$P$  – matricinio keitiklio galia.

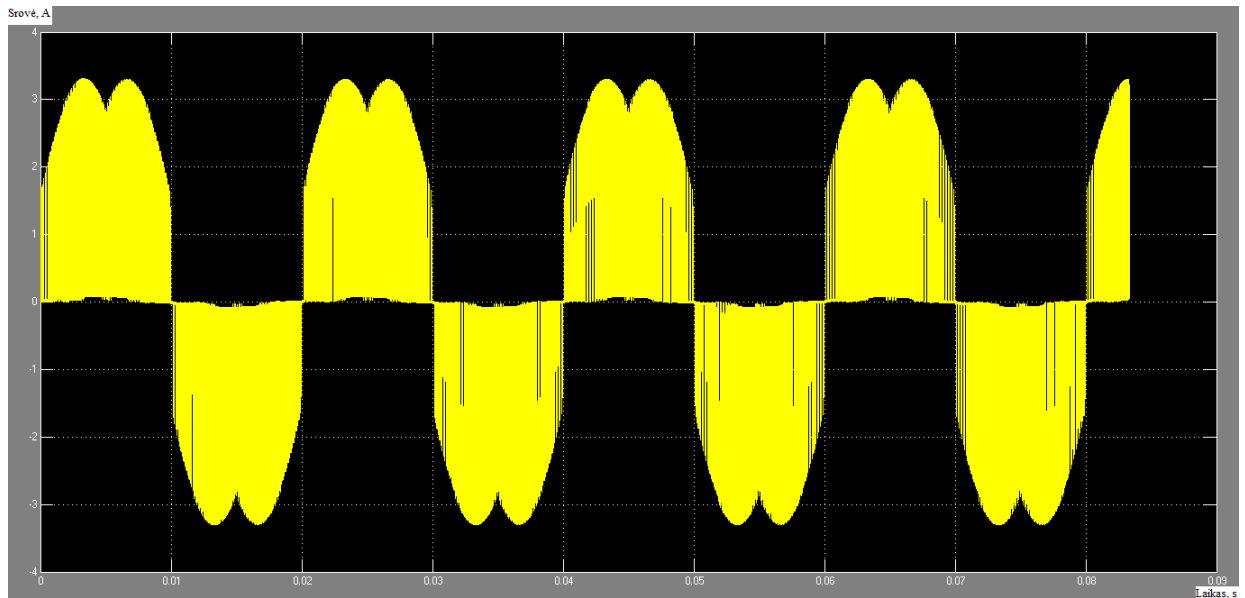
Matricinio keitiklio galios spektras pasirinktas: 1, 5, 10, 20, 40, 100 kW.

Gautos rezistorinės apkrovos varžos  $R$  reikšmės pavaizduotos 15.1 lentelėje.

**15.1 lentelė.** Rezistorinės apkrovos varžos  $R$  reikšmės

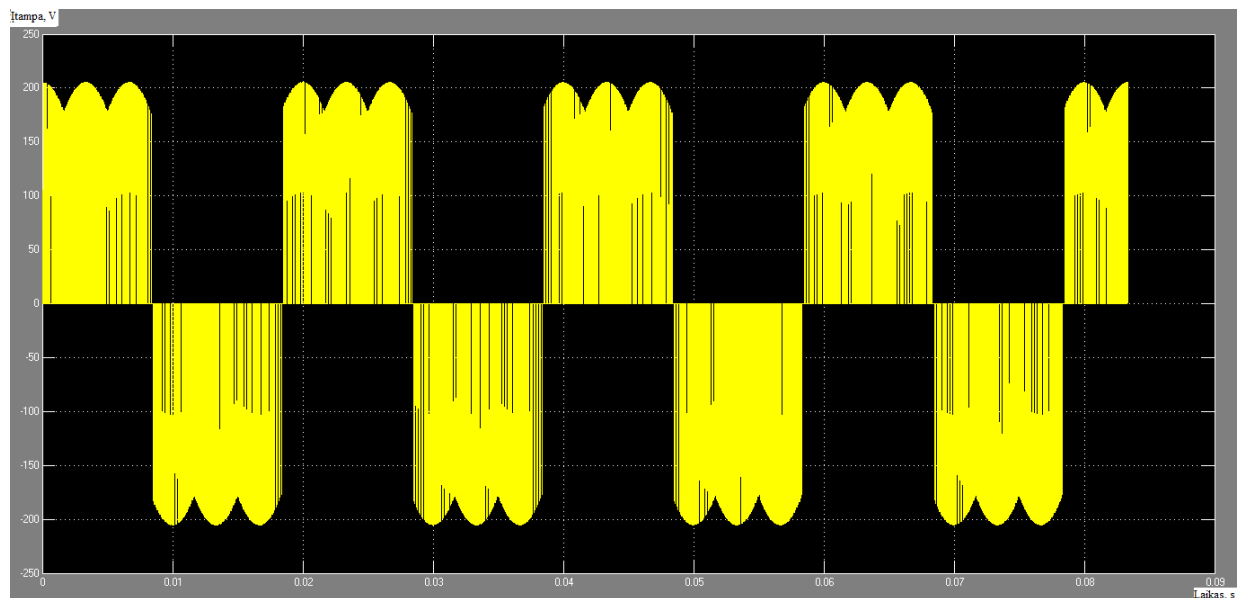
Matricinio keitiklio galia $P$ , kW	Rezistorinės apkrovos varža $R$ , $\Omega$
1	43,2
5	8,64
10	4,32
20	2,16
40	1,08
100	0,432

Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o rezistorinė apkrovos varža lygi 43,2  $\Omega$ , pavaizduotas 15.2 pav.



**15.2 pav.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o rezistorinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$

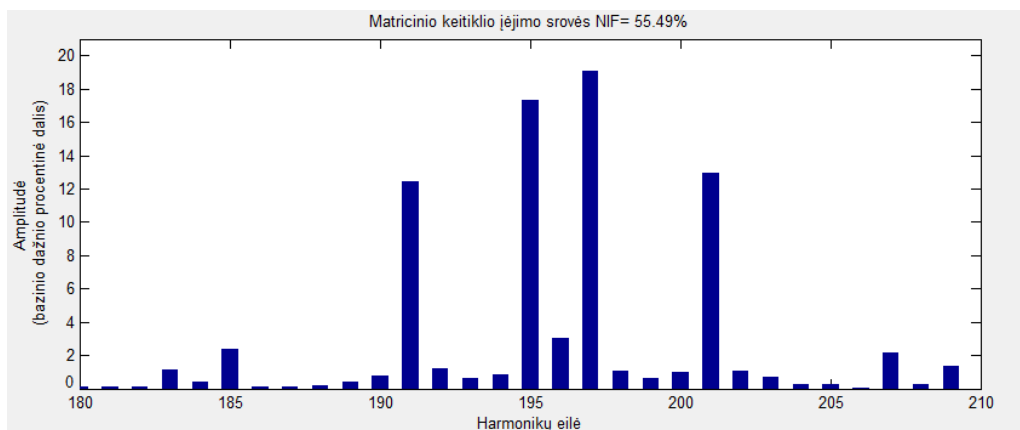
Matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o rezistorinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$ , pavaizduotas 15.3 pav.



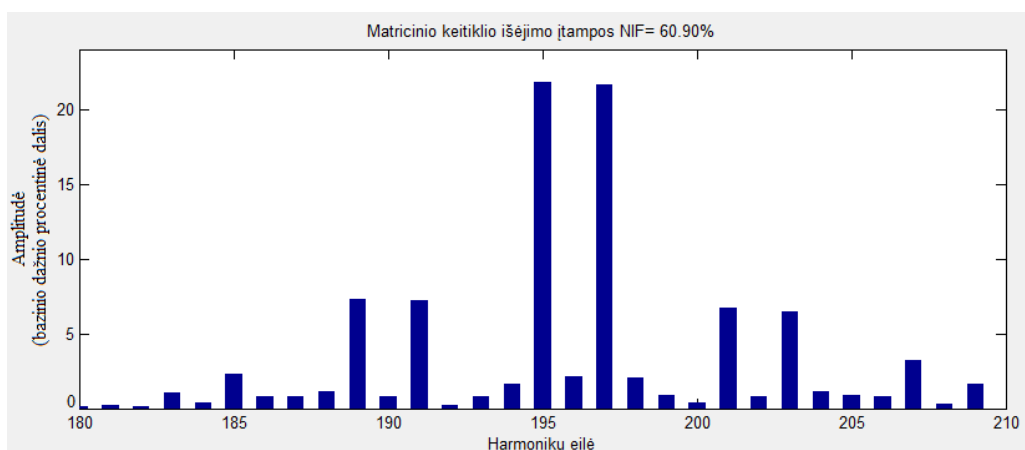
**15.3 pav.** Matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o rezistorinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$

Nors ir matricinio keitiklio įėjimo srovės amplitudė kinta, kintant rezistorinės apkrovos varžai, tačiau signalo forma lieka panaši, dėl to kiti matricinio keitiklio įėjimo srovės signalai, esant skirtingoms apkrovos varžoms nėra vaizduojami. Taip pat daugiau nevaizduojamas ir matricinio keitiklio išėjimo įtampos signalas, esant kitoms rezistorinės apkrovos reikšmėms, dėl signalo formos nepasikeitimo.

Pasinaudojus MATLAB/Simulink aplinkoje esančia Greitosios Furjė transformacijos (angl. *Fast Fourje transformation*) analizės funkcija, buvo gautos matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės bei harmonikų spektrai, nesant įėjimo ir išėjimo filtrams bei esant rezistorinės apkrovos varžai lygiai  $43,2 \Omega$ . Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, nesant įėjimo ir išėjimo filtrams bei esant rezistorinės apkrovos varžai lygiai  $43,2 \Omega$ , pavaizduoti 15.4 pav. a) ir 15.4 pav. b)



a)



b)

**15.4 pav.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės (a) ir išėjimo įtampos (b) NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, nesant įėjimo ir išėjimo filtrams bei esant rezistorinės apkrovos varžai lygiai  $43,2 \Omega$

Harmonikų eilė aukšta, nes matricinio keitiklio jungiklių perjungimo dažnis – 10 kHz.

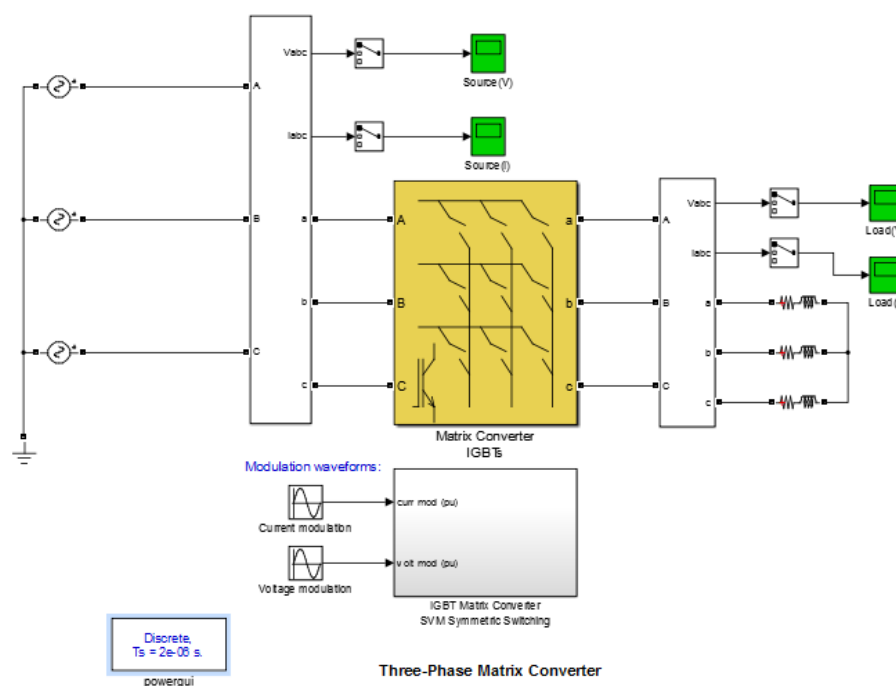
Kitos matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms rezistorinės apkrovos varžoms, pavaizduotos 15.2 lentelėje.

**15.2 lentelė.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms rezistorinės apkrovos varžoms

Rezistorinės apkrovos varža, $\Omega$	Įėjimo srovės NIF, %	Išėjimo įtampos NIF, %
8,64	56,07	60,90
4,32	55,68	59,96
2,16	55,72	59,96
1,08	55,74	59,96
0,432	55,95	60,33

Kaip matome iš 15.2 lentelės įėjimo matricinio keitiklio srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms rezistorinės apkrovos varžoms, mažai kito.

Toliau trifazio matricinio keitiklio be įėjimo ir išėjimo filtrų išėjime prijungiama kompleksinė apkrovos varža. Trifazio matricinio keitiklio be įėjimo ir išėjimo filtrų, su išėjime prijungta kompleksine apkrovos varža, sistemos schema pavaizduota 15.5 pav.



**15.5 pav.** Trifazio matricinio keitiklio be įėjimo ir išėjimo filtrų, su išėjime prijungta kompleksine apkrovos varža, sistemos schema

Kompleksinę apkrovos varžą ( $Z$ ) sudaro rezistorinė varža ( $R$ ) bei reaktyvioji varža ( $X_L$ ). Kompleksinės apkrovos varžos buvo pasirinktos tokios, kad reikšmėmis atitiktų rezistorinės apkrovos varžas (15.1 lentelė). Kompleksinė apkrovos varža apskaičiuojama pagal tokią formulę [27]:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2}; \quad (45)$$

čia:  $R$  – rezistorinė varža,

$X_L$  – reaktyvioji varža.

Reaktyvioji varža apskaičiuojama taip [27]:

$$X_L = 2\pi fL; \quad (46)$$

čia:  $f$  – tinklo dažnis (50 Hz);

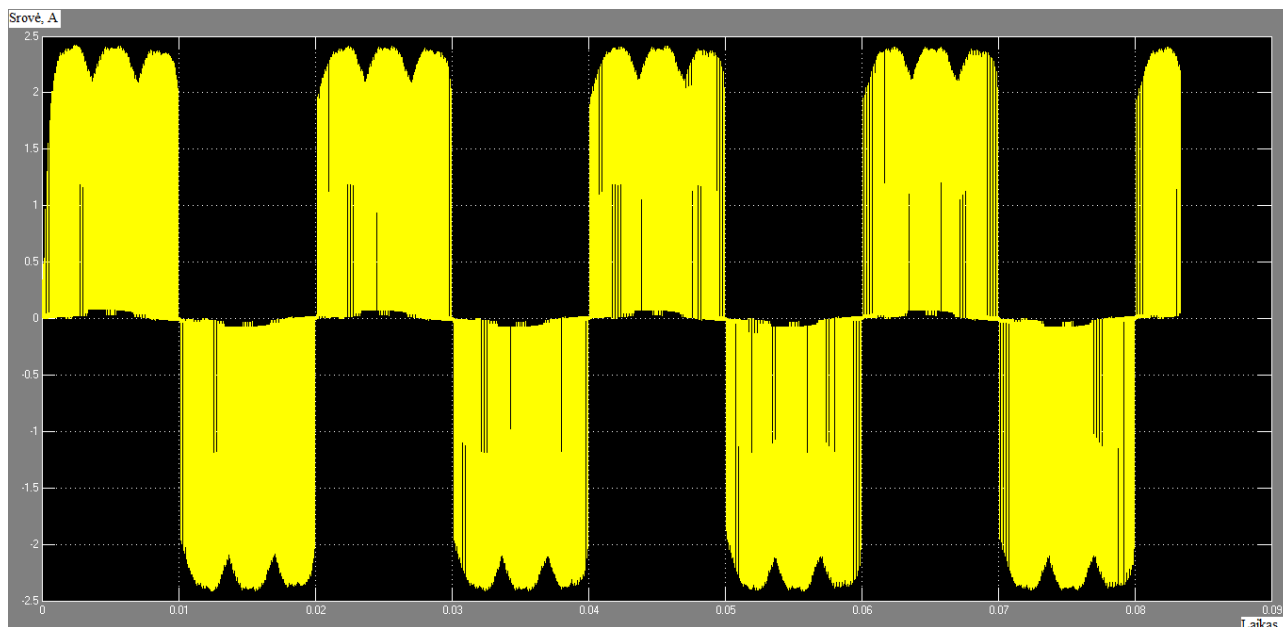
$L$  – induktyvumas.

Gautos rezistorių varžos bei ričių induktyvumo reikšmės pavaizduotos 15.3 lentelėje.

**15.3 lentelė.** Gautos rezistorinės varžos bei reaktyviosios varžos induktyvumo reikšmės

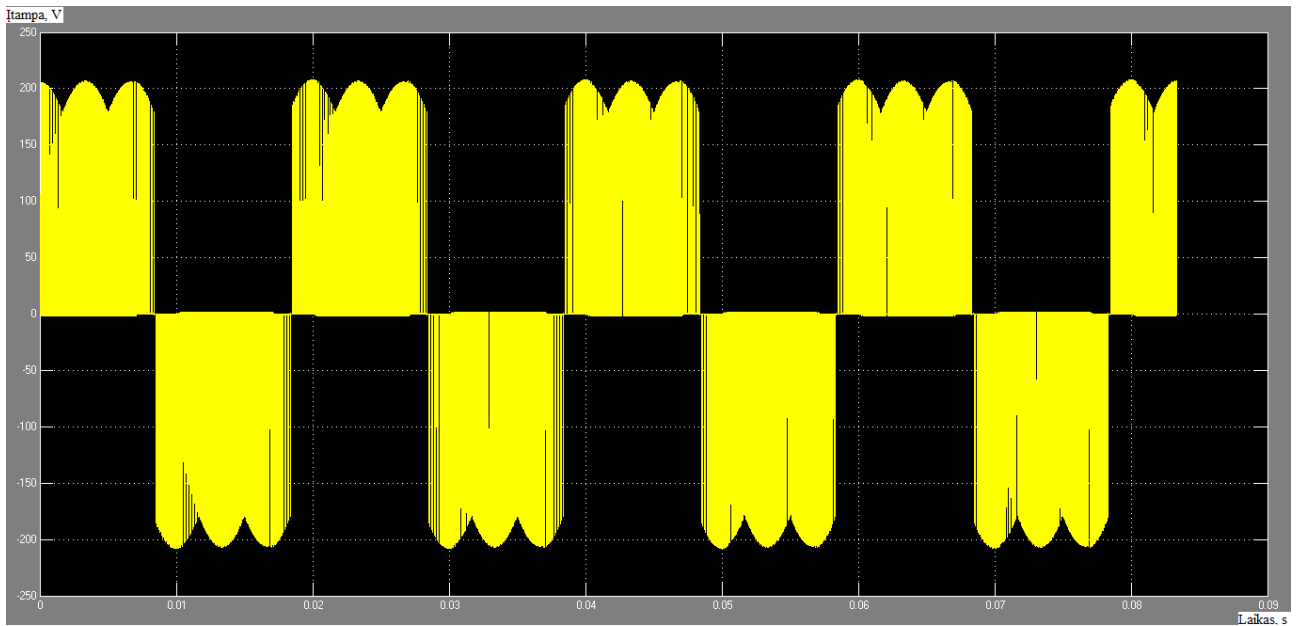
Kompleksinė apkrovos varža ( $Z$ ), $\Omega$	Rezistorinė varža ( $R$ ), $\Omega$	Induktyvumas ( $L$ ), mH
43,2	43	13,2
8,64	8,44	5,9
4,32	4,12	4,1
2,16	1,96	2,9
1,08	0,88	2
0,432	0,232	1,2

Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o kompleksinė apkrovos varža lygi 43,2  $\Omega$ , pavaizduotas 15.6 pav.



**15.6 pav.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o kompleksinė apkrovos varža lygi 43,2  $\Omega$

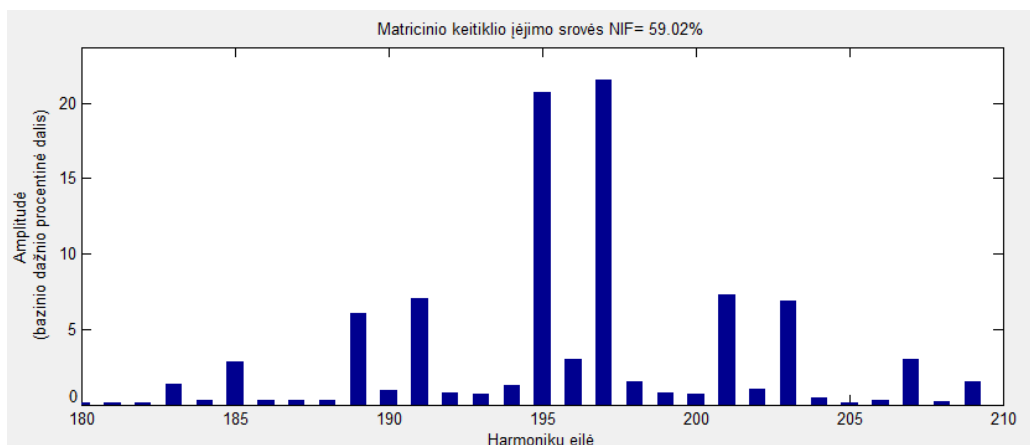
Matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o kompleksinė apkrovos varža lygi 43,2  $\Omega$ , pavaizduotas 15.7 pav.



**15.7 pav.** Matricinio keitiklio išėjimo įtampos signalas, kai nėra įėjimo bei išėjimo filtrų, o kompleksinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$

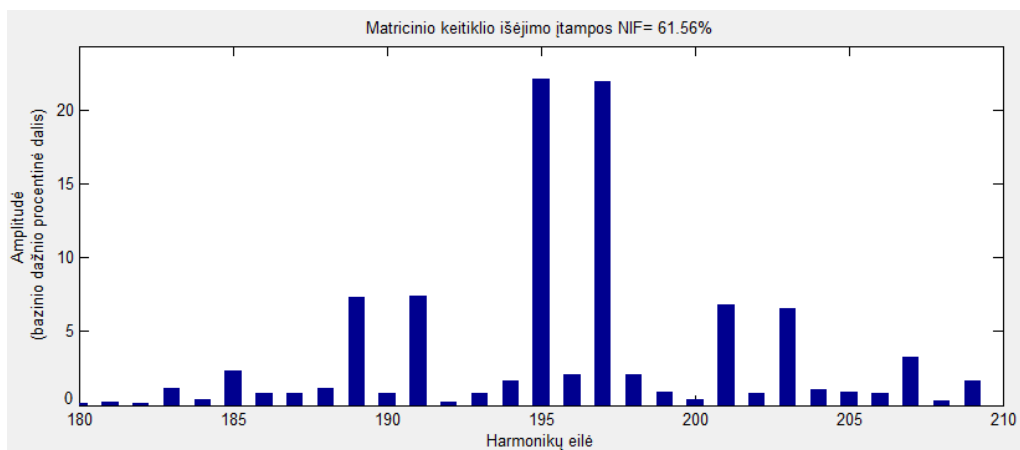
Prie matricinio keitiklio prijungus kompleksinę apkrovos varžą, jo įėjimo srovės (15.6 pav.) ir išėjimo įtampos (15.7 pav.) signalų formos pakito, lyginant su gautais signalais (15.2 pav. ir 15.3 pav.), kai buvo prijungta rezistorinė apkrovos varža.

Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, nesant įėjimo ir išėjimo filtrams bei esant kompleksinės apkrovos varžai lygiai  $43,2 \Omega$ , pavaizduoti 15.8 pav. a) ir 15.8 pav. b)



a)





b)

**15.8 pav.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės (a) ir išėjimo įtampos (b)) NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, nesant įėjimo ir išėjimo filtrams bei esant kompleksinei apkrovos varžai lygiai  $43,2 \Omega$

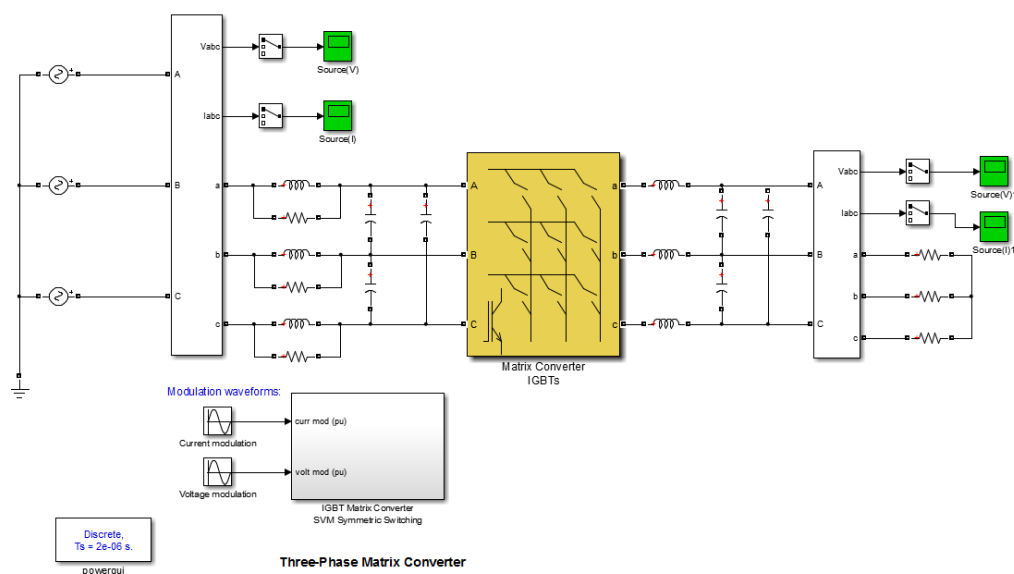
Kitos matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms kompleksinės apkrovos varžoms, pavaizduotos 15.4 lentelėje.

**15.4 lentelė.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms kompleksinės apkrovos varžoms

Kompleksinės apkrovos varža, $\Omega$	Įėjimo srovės NIF, %	Išėjimo įtampos NIF, %
8,64	60,85	61,57
4,32	62,02	61,56
2,16	64,46	61,55
1,08	69,93	61,53
0,432	99,75	61,39

Iš 15.4 lentelės rezultatų matome, kad kai prie matricinio keitiklio prijungiama mažiausia kompleksinė apkrovos varža, tai įėjimo srovės NIF būna didžiausias. Be to, kompleksinės apkrovos varžos pokytis didelio poveikio išėjimo įtampos NIF nesuteikia.

Toliau matricinio keitiklio įėjimo srovės bei išėjimo įtampos NIF reikšmės buvo gautos, prijungiant prie matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo pasyvųjį filtrą, kuris susideda iš ričių ir kondensatorių. Lygiagrečiai įėjimo filtro ritėms papildomai buvo prijungti slopinimo rezistoriai, kurie slopina filtro rezonansą. Trifazio matricinio keitiklio su pasyviaisiais įėjimo ir išėjimo filtrais bei su išėjime prijungta rezistorinė apkrovos varža sistemos schema MATLAB/Simulink aplinkoje pavaizduota 15.9 pav.



**15.9 pav.** Trifazio matricinio keitiklio su pasyviaisiais įėjimo ir išėjimo filtrais bei su išėjime prijungta rezistorine apkrova sistemos schema

Matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo filtrų elementų parametų reikšmės, priklausomai nuo matricinio keitiklio galios, pasirenkamos, pasinaudojant šiame darbe minėtomis formulėmis ((37), (38), (42), (43)).

Apskaičiuotos matricinio keitiklio įėjimo filtro elementų (ričių, kondensatorių, rezistorių) parametų reikšmės, esant skirtingoms rezistorinėms apkrovoms, pavaizduotos 15.5 lentelėje.

**15.5 lentelė.** Matricinio keitiklio įėjimo filtro elementų (ričių, kondensatorių, slopinimo varžų) parametų reikšmės, esant skirtingoms rezistorinėms apkrovoms

Matricinio keitiklio įėjimo filtro elementų parametrai, esant skirtingoms rezistorinėms apkrovoms			
Rezistorinė apkrova, $\Omega$	Ričių induktyvumas, mH	Kondensatorių talpa, $\mu\text{F}$	Slopinimo rezistorių varža, $\Omega$
43,2	2,337	25,54	25
8,64	0,467	127,7	5
4,32	0,233	255,4	2,5
2,16	0,116	510,7	1,25
1,08	0,058	1021	0,625
0,432	0,023	2554	0,25

Apskaičiuotos matricinio keitiklio įėjimo filtro elementų (ričių, kondensatorių) parametų reikšmės, esant skirtingoms rezistorinėms apkrovoms, pavaizduotos 15.6 lentelėje.

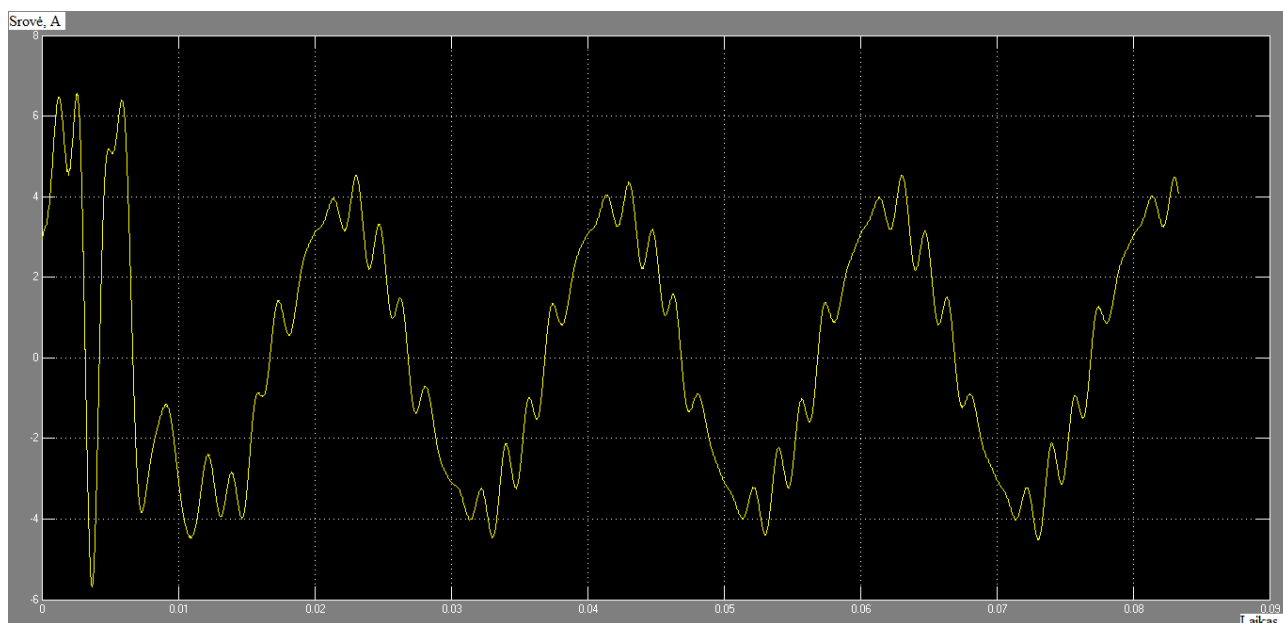
15.6 lentelė. Matricinio keitiklio išėjimo filtro elementų (ričių, kondensatorių) parametrų reikšmės

Matricinio keitiklio išėjimo filtro elementų parametrai, esant skirtingoms rezistorinėms apkrovoms		
Rezistorinė apkrova, $\Omega$	Ričių induktyvumas, mH	Kondensatorių talpa, $\mu\text{F}$
43,2	1,787	29,49
8,64	0,357	147,4
4,32	0,178	294,9
2,16	0,089	589,8
1,08	0,044	1180
0,432	0,017	2949

Pagal tai, jog įėjimo filtras turi slopinti matricinio keitiklio jungiklių pulsacijas  $\leq -26$  dB, tai atkirtos dažnis  $f_c$  pasirenkamas 1 kHz bei įėjimo filtro kokybės faktorius  $Q$  apskaičiuojamas pagal formulę (36) ir su vizomis rezistorinėmis apkrovomis lygus 2,614. Pagal (35) formulę decibelinėje skalėje gaunama, kad įėjimo filtras matricinio keitiklio jungiklių pulsacijas slopina  $-27,977$  dB.

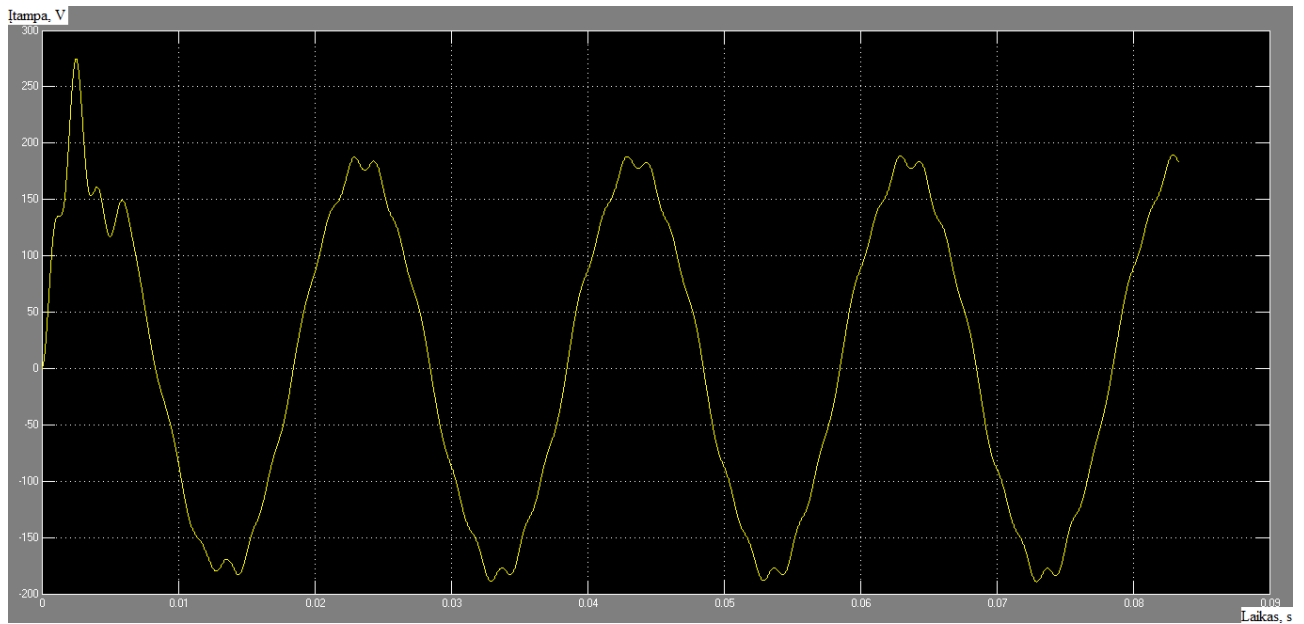
Išėjimo filtro kokybės faktorius  $Q_o$  reikšmė kinta, priklausomai nuo apkrovos dydžio bei tipo.

Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai rezistorinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$ , pavaizduotas 15.10 pav.



15.10 pav. Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai rezistorinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$

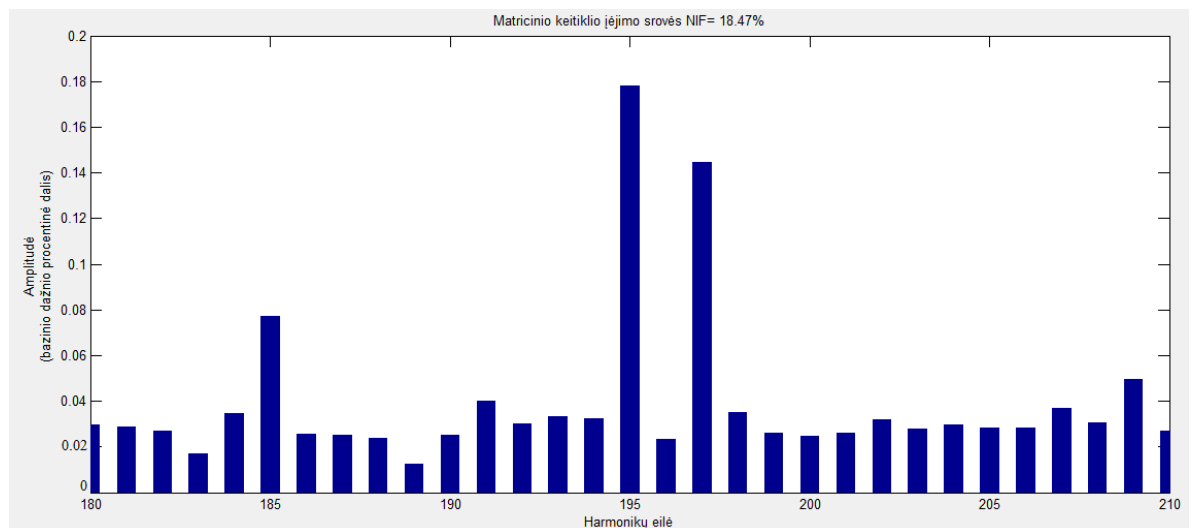
Matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai rezistorinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$ , pavaizduotas 15.11 pav.



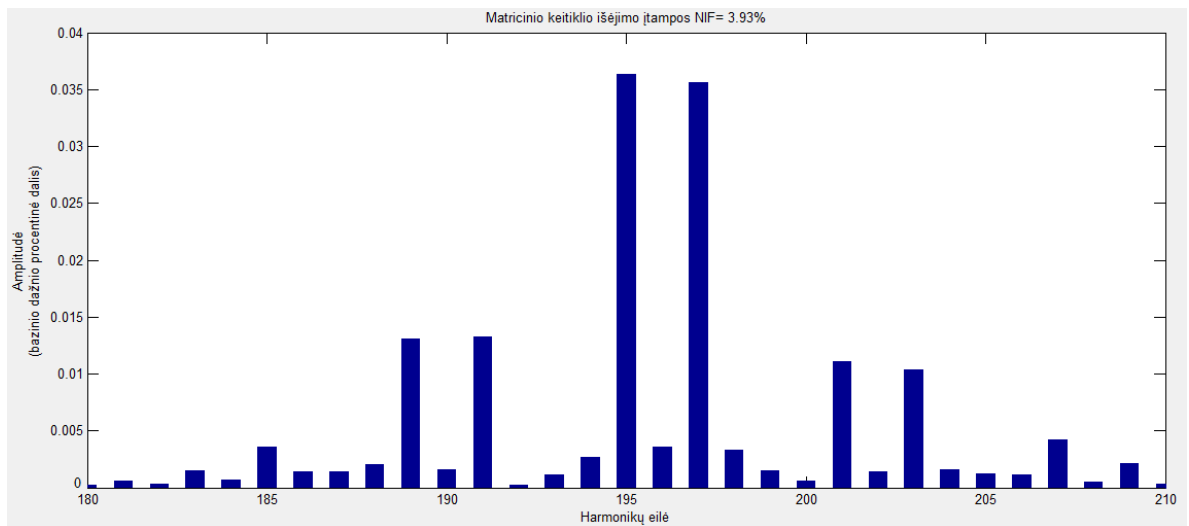
**15.11 pav.** Matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai rezistorinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$

Iš 15.10 pav. ir 15.11 pav. pastebime, kad sinusoidiniai įėjimo ir išėjimo signalai, kai prie matricinio keitiklio yra prijungti įėjimo ir išėjimo filtrai, vaizduojami taisyklingesnės formos nei be filtrų (15.2 pav., 15.3 pav.).

Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, esant įėjimo ir išėjimo filtrams bei rezistorinės apkrovos varžai lygiai  $43,2 \Omega$ , pavaizduoti 15.12 pav. a) ir 15.12 pav. b)



a)



b)

**15.12 pav.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės (a) ir išėjimo įtampos (b)) NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, esant įėjimo ir išėjimo filtrams bei rezistorinei apkrovos varžai lygiai 43,2  $\Omega$

Matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo filtrai beveik visiškai nufiltravo aukštesnės eilės harmonikas, tačiau žemesnių eilių (iki 15 eilės) harmonikos lieka išaugusios.

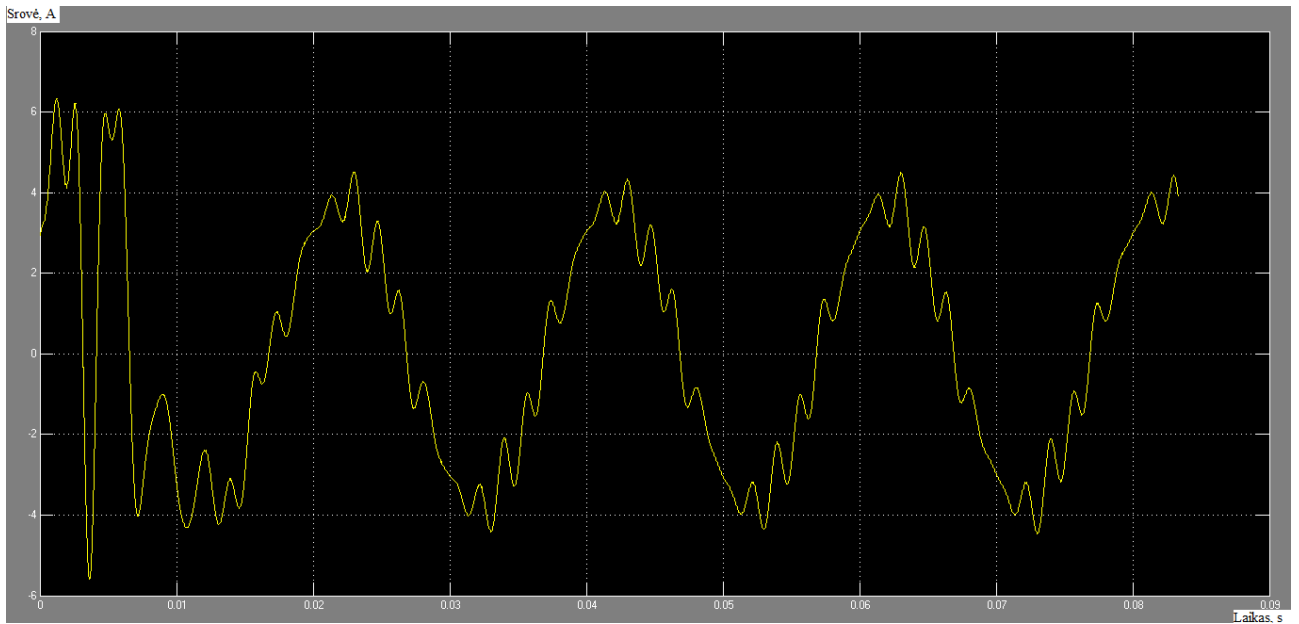
Kitos matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms rezistorinės apkrovos varžoms, pavaizduotos 15.7 lentelėje.

**15.7 lentelė.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms rezistorinės apkrovos varžoms

Rezistorinės apkrovos varža, $\Omega$	Įėjimo srovės NIF, %	Išėjimo įtampos NIF, %
8,64	18,60	3,93
4,32	15,50	3,01
2,16	18,27	3,89
1,08	17,6	3,81
0,432	15,78	3,62

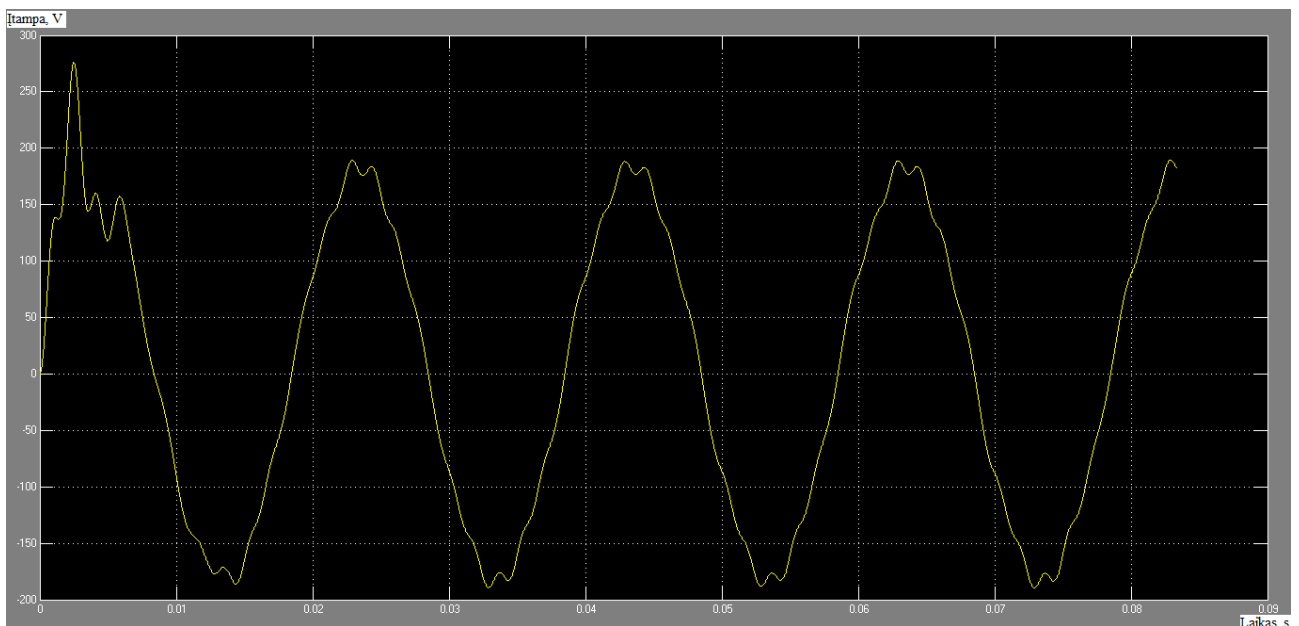
Pagal 15.7 lentelę matome, kad matricinio keitiklio įėjimo srovė bei išėjimo įtampa geriausiai filtruota, kai rezistorinės apkrovos varža lygi 4,32  $\Omega$ .

Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai kompleksinė apkrovos varža lygi 43,2  $\Omega$ , pavaizduotas 15.13 pav.



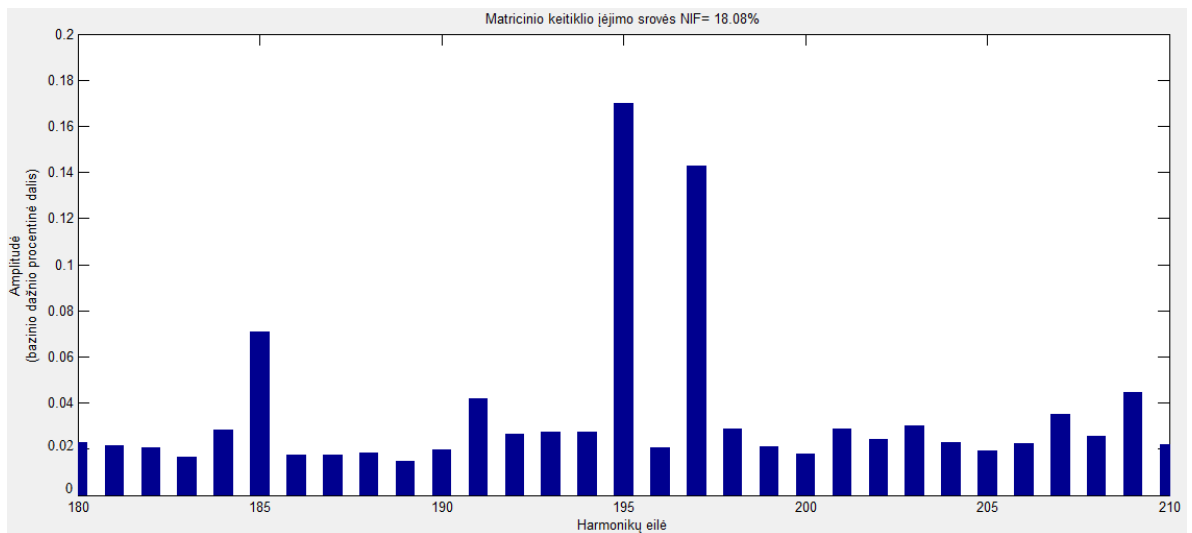
**15.13 pav.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai kompleksinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$

Matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai kompleksinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$ , pavaizduotas 15.14 pav.

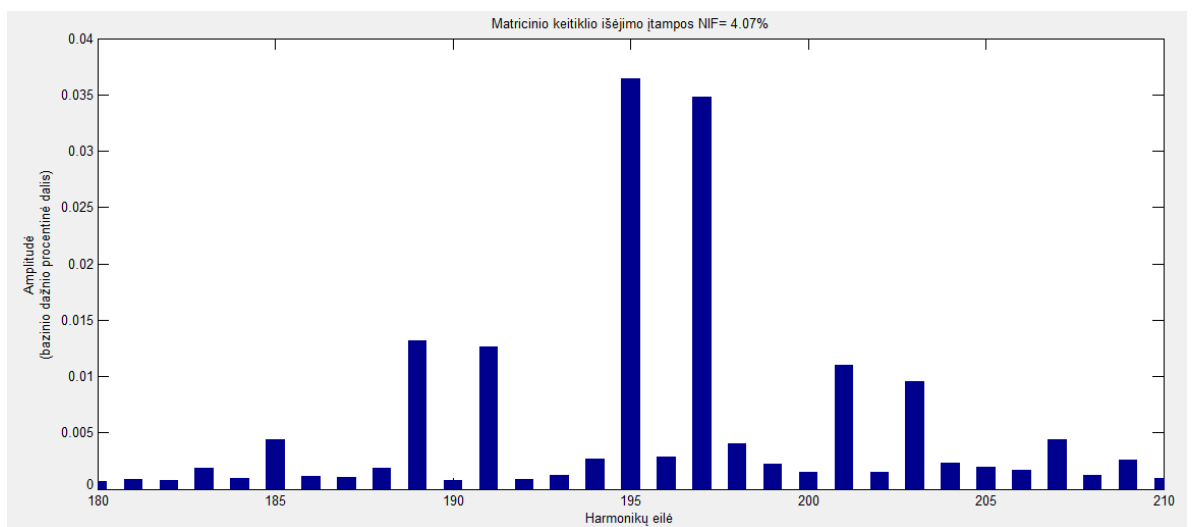


**15.14 pav.** Matricinio keitiklio išėjimo linijinės įtampos signalas, su įėjimo bei išėjimo filtrais, kai kompleksinė apkrovos varža lygi  $43,2 \Omega$

Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, esant įėjimo ir išėjimo filtrams bei kompleksinės apkrovos varžai lygiai  $43,2 \Omega$ , pavaizduoti 15.15 pav. a) ir 15.15 pav. b)



a)



b)

**15.15 pav.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės (a) ir išėjimo įtampos (b) NIF reikšmės ir aukštesniųjų eilių harmonikų spektrai, esant įėjimo ir išėjimo filtrams bei kompleksinei apkrovos varžai lygiai  $43,2 \Omega$

15.15 pav. a) ir 15.15 pav. b) kaip ir 15.12 pav. a) ir 15.12 pav. b) pastebimas aukštesniųjų eilių harmonikų nufiltravimas.

Kitos matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms kompleksinės apkrovos varžoms, pavaizduotos 15.8 lentelėje.

**15.8 lentelė.** Matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės, esant skirtingoms kompleksinės apkrovos varžoms

Kompleksinės apkrovos varža, $\Omega$	Įėjimo srovės NIF, %	Išėjimo įtampos NIF, %
8,64	19,85	4,33
4,32	21,25	4,48

2,16	23,28	4,66
1,08	23,83	4,71
0,432	20,69	4,22

Gautų rezultatų (15.8 lentelė) reikšmės didesnės, lyginant su rezultatais, kai naudojama rezistorinė apkrova (15.7 lentelė), tačiau labai didelis pokytis nepastebimas.

## 16. MATRICINIO KEITIKLIO FILTRŲ MASĖ

Pagal gautą matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo filtrų ričių induktyvumą, kondensatorių talpumą (15.5 lentelė) bei matricinio keitiklio galią buvo parinkti panašių techninių parametrų realūs filtrai. Atsižvelgiant į tai, kad modeliuojant matricinio keitiklio sistemą MATLAB/Simulink programa gautos didelės įėjimo ir išėjimo filtrų kondensatorių talpų reikšmės, kurios realiomis sąlygomis sunkiai išpildomos, buvo parinkti mažesnės talpos kondensatoriai su didesnėmis slopinimo rezistorių varžų reikšmėmis, su sąlyga, kad įėjimo filtro kokybės faktorius  $Q$  bus išlaikomas apie 3, o išėjimo apie 1, taip pat įėjimo filtras matricinio keitiklio jungiklių pulsacijas slopins  $\leq -26$  dB bei įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF reikšmės smarkiai neišaugs. Matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo filtrams parinktos kondensatorių talpos bei slopinimo rezistorių varžos pavaizduotos 16.1 lentelėje.

**16.1 lentelė.** Matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo filtrams parinktos kondensatorių talpos bei slopinimo rezistorių varžos

Apkrova, $\Omega$	Matricinio keitiklio įėjimo filtras		Matricinio keitiklio išėjimo filtras
	Kondensatorių talpa, $\mu\text{F}$	Slopinimo rezistorių varža, $\Omega$	Kondensatorių talpa, $\mu\text{F}$
43,2	1	150	1
8,64	3	37	3
4,32	6	19	6
2,16	10	11	10
1,08	15	7	15
0,432	20	3	20



Toliau palygintos matriciniui keitikliui reikalingų filtrų masės [28] su įprastinio dažnio keitiklio Altivar 61 filtrų mase [29]. Dėl matriciniui keitikliui realiai parinktų mažų įėjimo ir išėjimo filtrų kondensatorių, rezistorių masių (16.1 lentelė), šie filtrų elementai nėra vertinami.

Matricinio keitiklio įėjimo filtro masės palyginimas su dažnio keitiklio Altivar 61 įėjimo filtro mase pavaizduotas 16.2 lentelėje.

**16.2 lentelė.** Matricinio keitiklio įėjimo filtro masės palyginimas su dažnio keitiklio Altivar 61 įėjimo filtro mase

Matricinio keitiklio įėjimo filtro parametrai			Dažnio keitiklio Altivar 61 įėjimo filtro parametrai		
Apkrovos galia, kW	Nominali srovė $I_n$ , A	Masė, kg	Apkrovos galia, kW	Nominali srovė $I_n$ , A	Masė, kg
1,5	5	2,48	1,5	6	15
5,5	15	3,45	5,5	10	19
11	30	4,05	11	19	21
22	60	5,32	22	43	38
37	90	7,55	37	72	56
75	200	19,2	75	144	97

Lyginant matricinio keitiklio išėjimo filtro masę su įprastinio dažnio keitiklio mase, tendencija išlieka panaši kaip ir pavaizduota 16.2 lentelėje. Matricinio keitiklio filtrų masė daug mažesnė nei įprastinio dažnio keitiklio.

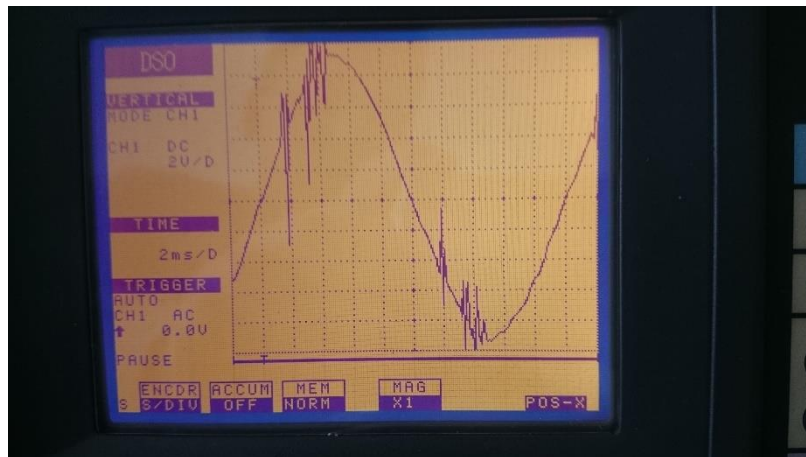
## 17. MATRICINIO KEITIKLIO PRAKTINIS BANDYMAS

Matricinio keitiklio sistema buvo išbandyta ir praktiškai laboratorijoje. Kaip ir modeliuojant MATLAB/Simulink programa (15 skyrius), trifazį matricinį keitiklį sudarė 9 dvigubi IUBT. Matricinis keitiklis buvo maitinamas trifaziu įtampos šaltiniu, kurio dažnis 50 Hz, o fazinė amplitudinė reikšmė – 120 V. Jungiklių perjungimų dažnis buvo pasirinktas 10 kHz, o pats valdymas paremtas erdvinių vektorių moduliacija. Matricinio keitiklio įėjimo filteriui naudotos 10 mH induktyvumo ritės ir 4  $\mu$ F talpos kondensatoriai, o išėjimo filteriui naudotos 5 mH induktyvumo ritės ir 2  $\mu$ F talpos kondensatoriai. Maksimali rezistorinės apkrovos galia siekė 0,5 kW. Matricinio keitiklio sistema laboratorijoje pavaizduota 17.1 pav.



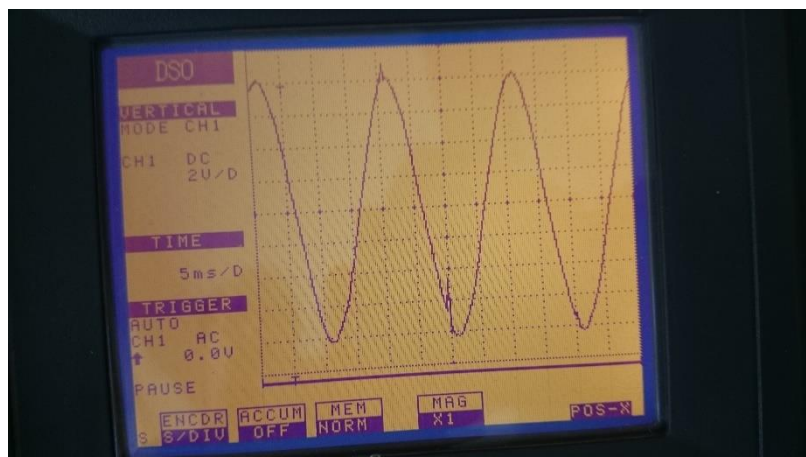
17.1 pav. Matricinio keitiklio sistema laboratorijoje

Nufiltruota matricinio keitiklio įėjimo srovės oscilograma pavaizduota 17.2 pav.



17.2 pav. Nufiltruota matricinio keitiklio įėjimo srovės oscilograma

Nufiltruota matricinio keitiklio išėjimo įtampos oscilograma pavaizduota 17.3 pav.



17.3 pav. Nufiltruota matricinio keitiklio išėjimo įtampos oscilograma

Dėl sunkiai numontuojamų matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo filtrų, tik nufiltruotos įėjimo ir išėjimo kreivės yra pateikiamos.

Iš 17.2 pav. ir 17.3 pav. oscilogramų matome, kad matricinio keitiklio įėjimo ir išėjimo filtrai nufiltruoja nepageidaujamas jungiklių sukeltas didesnes pulsacijas ir sinusoidės forma yra lengvai pastebima.

## IŠVADOS

1. Pasinaudojant MATLAB/Simulink kompiuterine programa, buvo modeliuojamas matricinio keitiklio imitacinis modelis.

2. Matricinis keitiklis pirmiausiai buvo modeliuojamas be įėjimo ir išėjimo filtrų, keičiant rezistorinės apkrovos varžų reikšmes ( $43,2 \Omega$ ,  $8,64 \Omega$ ,  $4,32 \Omega$ ,  $2,16 \Omega$ ,  $1,08 \Omega$ ,  $0,432 \Omega$ ), siekiant nustatyti matricinio keitiklio įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF. Matricinio keitiklio be įėjimo, išėjimo filtrų įėjimo srovės ir išėjimo įtampos NIF, kintant rezistorinės apkrovos varžų reikšmėms, mažai kito ir atitinkamai buvo lygūs  $\sim 56\%$  bei  $\sim 60\%$ .

3. Matricinį keitiklį modeliuojant be įėjimo ir išėjimo filtrų, keičiant kompleksinės apkrovos varžų reikšmes, įėjimo srovės NIF didėjo ( $59,02\%$ ,  $60,85\%$ ,  $62,02\%$ ,  $64,46\%$ ,  $69,93\%$ ,  $99,75\%$ ), mažėjant kompleksinės apkrovos varžų reikšmei ( $43,2 \Omega$ ,  $8,64 \Omega$ ,  $4,32 \Omega$ ,  $2,16 \Omega$ ,  $1,08 \Omega$ ,  $0,432 \Omega$ ), o išėjimo įtampos NIF buvo lygūs  $\sim 61\%$ .

4. Matriciniui keitikliui, esant atitinkamai apkrovos varžos reikšmei, buvo parinkti įėjimo ir išėjimo filtrai, kurie atitiko tokius pagrindinius kriterijus: jungiklių perjungimo pulsacijų slopinimas  $\leq -26$  dB; įtampos kritimas ant filtrų ričių, esant pagrindiniam dažniui,  $\leq 3\%$  maitinimo šaltinio įtampos reikšmės; filtrų kondensatorių reaktyviosios srovės reikšmė  $\leq 20\%$  matricinio keitiklio įėjimo srovės.

5. Matricinį keitiklį modeliuojant su įėjimo ir išėjimo filtrais, keičiant rezistorinės apkrovos varžų reikšmes ( $43,2 \Omega$ ,  $8,64 \Omega$ ,  $4,32 \Omega$ ,  $2,16 \Omega$ ,  $1,08 \Omega$ ,  $0,432 \Omega$ ), gauti tokie įėjimo srovės NIF:  $18,47\%$ ,  $18,60\%$ ,  $15,50\%$ ,  $18,27\%$ ,  $17,6\%$ ,  $15,78\%$ . Išėjimo įtampos NIF:  $3,93\%$ ,  $3,93\%$ ,  $3,01\%$ ,  $3,89\%$ ,  $3,81\%$ ,  $3,62\%$ . Iš rezultatų galime teigti, kad matriciniui keitikliui parinkti filtrai, esant rezistorinei apkrovai, srovės ir įtampos harmonikas filtruoja tinkamai.

6. Matricinį keitiklį modeliuojant su įėjimo ir išėjimo filtrais, keičiant kompleksinės apkrovos varžų reikšmes ( $43,2 \Omega$ ,  $8,64 \Omega$ ,  $4,32 \Omega$ ,  $2,16 \Omega$ ,  $1,08 \Omega$ ,  $0,432 \Omega$ ), gauti tokie įėjimo srovės NIF:  $18,10\%$ ,  $19,85\%$ ,  $21,25\%$ ,  $23,28\%$ ,  $23,83\%$ ,  $20,69\%$ . Išėjimo įtampos NIF:  $4,06\%$ ,  $4,33\%$ ,  $4,48\%$ ,  $4,66\%$ ,  $4,71\%$ ,  $4,22\%$ . Iš rezultatų galime teigti, kad matriciniui keitikliui parinkti filtrai, esant kompleksinei apkrovai, srovės ir įtampos harmonikas filtruoja tinkamai.

7. Matricinio keitiklio filtrų masė daug mažesnė (apie 5 kartus) nei įprastinio dažnio keitiklio ir atitinka kompaktiškumo kriterijų.

## INFORMACIJOS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

1. RAMESHKUMAR, M, Y. SREENIVASA RAO ir A. JAYA LAXMI. *Modulation and Control Techniques of Matrix Converter* [interaktyvus]. Department of Electrical and Electronics Engineering, DVR & Dr. HS MIC College of Engineering, JNTU Kakinada, India [žiūrėta 2017-04-26]. ISSN: 2231-1963. Prieiga per: <http://www.e-ijaet.org/media/2319-MODULATION-AND-CONTROL.pdf>
2. ITOH, Jun-ichi, Akihiro ODAKA, Ikuya SATO. *High Efficiency Power Conversion Using a Matrix Converter* [interaktyvus]. Fuji Electric Review, Vol 50 No. 3 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <https://pdfs.semanticscholar.org/9d23/ee1ef9da74168b2cd5ca009dbd6b0265e5b8.pdf>
3. BORDRY F. *Power Converters: Definitions, Classification and Converter Topologies* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <https://cds.cern.ch/record/987498/files/p13.pdf>
4. VALIULIS, G. *1 paskaita. Galios elektronikos sistemų įvadas* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: [http://techno.su.lt/~valiulis/dokai/Galios\\_elektronika\\_1paskaita.pdf](http://techno.su.lt/~valiulis/dokai/Galios_elektronika_1paskaita.pdf)
5. UDRIS, Dainius. *Elektroniniai galios keitikliai* [interaktyvus]. Vilniaus pedagoginio universiteto leidykla, 2008 [žiūrėta 2017-04-26]. ISBN 9955-25-20-288-2. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/435/elektroniniai-galios-keitikliai/>
6. LISAUSKAS, Saulius. *Šiuolaikinės elektros pavaros* [interaktyvus]. UAB TEV, 2012 [žiūrėta 2017-04-26]. e-ISBN 978-609-433-097-1. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/450/siuolaikines-elektros-pavaros/>
7. DZENKAUSKAS, Vaidotas Arnoldas ir Andrius CHAZIACHMETOVAS. *Skaitmeniniai įtaisai* [interaktyvus]. Kaunas: Technologija, 2010 [žiūrėta 2017-04-26]. ISBN 978-9955-25-900-8. Prieiga per internetą: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/85/skaitmeniniai-itaisai/>
8. VODOVOZOV, V. ir R. JANSIKENE. *Power Electronic Converters* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <http://www.edrive.narod.ru/PE.pdf>
9. GEČYS, Steponas, Artūras KALVAITIS, Pranas SMOLSKAS. *Elektromechanika* [interaktyvus]. Kaunas: Technologija, 2011 Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt/eb/1208/elektromechanika/>
10. WHEELER, P. W., J. RODRIGUEZ, J. CLARE, L. EMPRINGHAM ir A. WEINSTEIN. *Matrix Converters: a Technology Review* [interaktyvus]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, May 2002 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/3217962\\_Matrix\\_converter\\_A\\_technology\\_review](https://www.researchgate.net/publication/3217962_Matrix_converter_A_technology_review)
11. KOLAR, J. W., M. BAUMANN, F. STÖGERER, F. SCHAFMEISTER, H. ERTL. *Novel Three-Phase AC-DC-AC Sparse Matrix Converter, Part I - Derivation, Basic Principle of Operation, Space Vector Modulation, Dimensioning* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: [https://www.pes.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/kolar\\_APEC02.pdf](https://www.pes.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/kolar_APEC02.pdf)

12. LINDEMANN, A. *A New IGBT with Reverse Blocking Capability* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <http://www.ixys.com/Documents/AppNotes/IXAN0049.pdf>
13. SHABANPOUR, Amin, Sasan GHOLAMI ir Ali REZA SEIFI. *Comparative Studies of Different Switching Patterns for Direct and Indirect Space Vector Modulated Matrix Converter* [interaktyvus]. Hindawi Publishing Corporation Advances in Power Electronics Volume 2012, Article ID 852024, 8 pages [žiūrėta 2017-04-26]. DOI:10.1155/2012/852024. Prieiga per: <https://www.hindawi.com/journals/ape/2012/852024/>
14. KARACA, Hulusi, Ramazan AKKAYA. *Control of Venturini Method Based Matrix Converter in Input Voltage Variations* [interaktyvus]. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009 Vol II IMECS 2009, March 18 - 20, 2009, Hong Kong [žiūrėta 2017-04-26]. ISBN: 978-988-17012-7-5. Prieiga per: [http://www.iaeng.org/publication/IMECS2009/IMECS2009\\_pp1412-1416.pdf](http://www.iaeng.org/publication/IMECS2009/IMECS2009_pp1412-1416.pdf)
15. ZARRI, Luca. *Control of Matrix Converters* [interaktyvus]. Ph. D. in Electrical Engineering XIX year Power Electronics, Machines and Drives (ING-IND/32), Final Dissertation in 2007 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: [http://www.die.ing.unibo.it/dottorato\\_it/Zarri/PhdTesisZarri.pdf](http://www.die.ing.unibo.it/dottorato_it/Zarri/PhdTesisZarri.pdf)
16. BAUER, Jan, Stanislav FLÍGL, Andreas STEIMEL. *Design and Dimensioning of Essential Passive Components for the Matrix Converter Prototype* [interaktyvus]. ISSN 1848-3380 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <http://hrcak.srce.hr/file/132185>
17. PINTO, S. F., P. ALCARIA, J. MONTEIRO, J. F. SILVA. *Matrix Converter Based Active Distribution Transformer* [interaktyvus]. DOI 10.1109/TPWRD.2016.2530635 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7407393/>
18. YASKAWA ELECTRIC CORPORATION. *Low Harmonics Regenerative Matrix Converter U1000* [interaktyvus]. Published in Japan September 2014 14-06 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <http://www.pillar.com.mx/Varios/CATALOGO%20TECNICO%20U1000.pdf>
19. GOEL, Shubra, Devender TIWARI, Mohit Kumar PANDEY, Saurabh BAJPAI. *Power Quality Conditioners for Matrix Converter Using Shunt and Series Active Filters* [interaktyvus]. International Journal of Electronic and Electrical Engineering. ISSN 0974-2174 Volume 6, Number 3 (2013), pp. 119-130 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <https://ijset.com/ijset/publication/v1s5/P%20209-2017%20Shunt%20and%20Series%20Active%20Filters%20Based%20Power%20Quality%20Conditioners%20for%20Matrix.pdf>
20. MARKIEWICZ, Henryk ir Antoni KLAJN. *Voltage Disturbances Standard EN 50160 - Voltage Characteristics in Public Distribution Systems* [interaktyvus]. Wroclaw University of Technology July 2004 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <http://www.cdtechnics.be/542-standard-en-50160-voltage-characteristics-in.pdf>

21. PHASATE, Rashmi S. ir Archana BAWANKAR. *Power Quality Improvement in Matrix Converter Using Hybrid Filter* [interaktyvus]. International Journal of Power System Operation and Energy Management ISSN: 2231 – 4407, Volume-2, Issue-1,2 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: [https://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electrical\\_engineering/POWER%20QUALITY%20IMPROV.pdf](https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/POWER%20QUALITY%20IMPROV.pdf)
22. AKAGI, H. *Modern Active Filters and Traditional Passive Filters* [interaktyvus]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences Vol. 54, No. 3, 2006 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: [http://bluebox.ippt.pan.pl/~bulletin/\(54-3\)255.pdf](http://bluebox.ippt.pan.pl/~bulletin/(54-3)255.pdf)
23. ERDEM, Ebubekir, Yetkin TATAR, Sedat SÜNTER. *Effects of Input Filter on Stability of Matrix* [interaktyvus]. Conference Paper July 2010. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2010.5544904 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/224165849\\_Effects\\_of\\_input\\_filter\\_on\\_stability\\_of\\_matrix\\_converter\\_using\\_venturini\\_modulation\\_algorithm](https://www.researchgate.net/publication/224165849_Effects_of_input_filter_on_stability_of_matrix_converter_using_venturini_modulation_algorithm)
24. DASGUPTA, Anindya ir Parthasarathi SENSARMA. *An integrated filter and controller design for direct matrix converter* [interaktyvus]. Conference Paper September 2011. DOI: 10.1109/ECCE.2011.6063854 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6063854/>
25. DUDGEON, Graham. *Three-Phase Matrix Converter* [interaktyvus]. The MathWorks, Inc. [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <https://se.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/three-phase-matrix-converter.html>
26. SCHERZ, Paul. *Practical Electronics for Inventors* [interaktyvus]. The McGraw-Hill Companies, Inc, 2000. DOI: 10.1036/0071389903 [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: [http://www1.appstate.edu/~curtin/cm/sculpture/suppliers/gizmos/Practical\\_Electronics\\_for\\_Inventors.pdf](http://www1.appstate.edu/~curtin/cm/sculpture/suppliers/gizmos/Practical_Electronics_for_Inventors.pdf)
27. BHATIA, A. *Inductive and Capacitive Reactance* [interaktyvus]. Continuing Education and Development, Inc. [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Inductive%20and%20Capacitive%20Reactance.pdf>
28. *Chokes* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: <https://www.sourcetronic.com/shop/en/chokes>
29. *Variable speed drives Altivar 61* [interaktyvus] [žiūrėta 2017-04-26]. Prieiga per: [http://www.altivar.be/pdf/Cat\\_ATV61\\_Ang.pdf](http://www.altivar.be/pdf/Cat_ATV61_Ang.pdf)

## PRIEDAI

**Priedas 1. Trifazio matricinio keitiklio jungiklių perjungimo būsenos**

Grupė	A	B	C	$u_{AB}$	$u_{BC}$	$u_{CA}$	$i_a$	$i_b$	$i_c$	$S_{Aa}$	$S_{Ab}$	$S_{Ac}$	$S_{Ba}$	$S_{Bb}$	$S_{Bc}$	$S_{Ca}$	$S_{Cb}$	$S_{Cc}$
I	a	b	c	$u_{ab}$	$u_{ab}$	$u_{ca}$	$i_A$	$i_B$	$i_c$	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	a	c	b	$-u_{ca}$	$-u_{bc}$	$-u_{ab}$	$i_A$	$i_c$	$i_B$	1	0	0	0	0	1	0	1	0
	b	a	c	$-u_{ab}$	$-u_{ca}$	$-u_{bc}$	$i_B$	$i_A$	$i_c$	0	1	0	1	0	0	0	0	1
	b	c	a	$u_{bc}$	$u_{ca}$	$u_{ab}$	$i_c$	$i_A$	$i_B$	0	1	0	0	0	1	1	0	0
	c	a	b	$u_{ca}$	$u_{ab}$	$u_{bc}$	$i_B$	$i_c$	$i_A$	0	0	1	1	0	0	0	1	0
	c	b	a	$-u_{bc}$	$-u_{ab}$	$-u_{ca}$	$i_c$	$i_B$	$i_A$	0	0	1	0	1	0	1	0	0
II-A	a	c	c	$-u_{ca}$	0	$u_{ca}$	$i_A$	0	$-i_A$	1	0	0	0	0	1	0	0	1
	b	c	c	$u_{bc}$	0	$-u_{bc}$	0	$i_A$	$-i_A$	0	1	0	0	0	1	0	0	1
	b	a	a	$-u_{ab}$	0	$u_{ab}$	$-i_A$	$i_A$	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
	c	a	a	$u_{ca}$	0	$-u_{ca}$	$-i_A$	0	$i_A$	0	0	1	1	0	0	1	0	0
	c	b	b	$-u_{bc}$	0	$u_{bc}$	0	$-i_A$	$i_A$	0	0	1	0	1	0	0	1	0
	a	b	b	$u_{ab}$	0	$-u_{ab}$	$i_A$	$-i_A$	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
II-B	c	a	c	$u_{ca}$	$-u_{ca}$	0	$i_B$	0	$-i_B$	0	0	1	1	0	0	0	0	1
	c	b	c	$-u_{bc}$	$u_{bc}$	0	0	$i_B$	$-i_B$	0	0	1	0	1	0	0	0	1
	a	b	a	$u_{ab}$	$-u_{ab}$	0	$-i_B$	$i_B$	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
	a	c	a	$-u_{ca}$	$u_{ca}$	0	$-i_B$	0	$i_B$	1	0	0	0	0	1	1	0	0
	b	c	b	$u_{bc}$	$-u_{bc}$	0	0	$-i_B$	$i_B$	0	1	0	0	0	1	0	1	0
	b	a	b	$-u_{ab}$	$u_{ab}$	0	$i_B$	$-i_B$	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
II-C	c	c	a	0	$u_{ca}$	$-u_{ca}$	$i_c$	0	$-i_c$	0	0	1	0	0	1	1	0	0
	c	c	b	0	$-u_{bc}$	$u_{bc}$	0	$i_c$	$-i_c$	0	0	1	0	0	1	0	1	0
	a	a	b	0	$u_{ab}$	$-u_{ab}$	$-i_c$	$i_c$	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0
	a	a	c	0	$-u_{ca}$	$u_{ca}$	$-i_c$	0	$i_c$	1	0	0	1	0	0	0	0	1
	b	b	c	0	$u_{bc}$	$-u_{bc}$	0	$-i_c$	$i_c$	0	1	0	0	1	0	0	0	1
	b	b	a	0	$-u_{ab}$	$u_{ab}$	$i_c$	$-i_c$	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
III	a	a	a	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
	b	b	b	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
	c	c	c	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1