



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

**Matricinės kintamo dažnio pavaros, veikiančios reaktyviosios
galios kompensavimo režime, tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Vilius Šerpetauskas

Projekto autorius

Doc. dr. Gytis Petrauskas

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Matricinės kintamo dažnio pavaros, veikiančios reaktyviosios galios kompensavimo režime, tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Valdymo technologijos (6211EX014)

Vilius Šerpetauskas

Projekto autorius

Doc. dr. Gytis Petrauskas

Vadovas

Doc. dr. Arūnas Lipnickas

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Vilius Šerpetauskas

Matricinės kintamo dažnio pavaros, veikiančios reaktyviosios galios kompensavimo režime, tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Vilius Šerpetauskas

Patvirtinta elektroniniu būdu

Šerpetauskas, Vilius. Matricinės pavaros, veikiančios reaktyviosios galios kompensavimo režime, tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Lekt. Gytis Petrauskas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: matricinis, dažnio, keitiklis, reaktyvioji, kompensavimas

Kaunas, 2022. 45p.

SANTRAUKA

Baigiamojo darbo tikslas ištirti tiesioginio matricinio dažnio keitiklio darbą reaktyviosios galios kompensavimo režime, kai valdomi parametrai yra įėjimo srovės fazės poslinkio kampas ir įtampos moduliacijos koeficientas. Matricinis keitiklis valomas erdvės vektorių moduliacijos metodu, korekciją į tinklo apkrovos kitimą atlieka Fuzzy reguliatorius.

Tyrimo pradžioje ištirtos buitinės šviesos diodų lemputės, kurios yra reaktyviosios galios šaltiniai ir nustatytas jų generuojamos galios tipas. Atsižvelgiant į apkrovą sudarytas tiesioginio matricinio keitiklio modelis MATLAB/Simulink aplinkoje. Modelį sudarė trijų fazių kintamos srovės šaltinis, matricinis 3x3 keitiklis, asinchroninio variklio imitavimo blokai, lauko reklamos ekranas, kuris sudarytas iš šviesos diodų, imitavimo blokas.

Atlikus tyrimus nustatyta, kad didžioji dalis šviesos diodus turinčių prietaisų – šviestuvai, lauko ekranai, projektoriai, generuoja reaktyviąją talpinę galią ir esamos tinklo galių kompensavimo įrangos neturi galimybės kompensuoti šio tipo reaktyviosios galios. Taip pat nustatyta, kad matricinė pavarą gali būti naudojama kaip teigiamos arba neigiamos reaktyviosios galios šaltinis. Matricinės pavaros kompensavimas gali būti adaptyvus naudojant Fuzzy reguliatorių.

Šerpetauskas, Vilius. Research of Matrix Drive Operating in Reactive Power Compensation Mode. Master's final degree project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Gytis Petrauskas; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Science.

Keywords: matrix, frequency, converter, reactive, compensation

Kaunas, 2022. 45p.

SUMMARY

The aim of the final work is the analysis of the operation of a direct matrix frequency converter, which is in reactive power compensation mode. Controlled parameters are the phase shift angle of the input current and the voltage modulation coefficient. The matrix converter is controlled by the space vector modulation method, the correction to the variation of the network load is performed by the Fuzzy controller.

At the beginning of the analysis, household LED bulbs, which are sources of reactive power, were investigated and the type of power they generated was determined. A model of a direct matrix converter in MATLAB / Simulink environment was developed depending on the loads. The model consisted of a three-phase AC source, a matrix 3x3 converter, asynchronous motor simulation block, an outdoor advertising display simulation block which consists of LEDs.

After the research it was considered, that most LED devices, such as light bulbs, outdoor advertising screens, projectors, are generating reactive capacitive power, and existing network power compensation equipment does not have the capability to compensate for this type of reactive power. It has also been found that the matrix drive can be used as a source of positive or negative reactive power. Matrix drive compensation can be adaptive by using a Fuzzy controller.

Turinys

Turinys	6
Paveikslų sąrašas	7
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas	10
1. Literatūros apžvalga	11
1.1. LED – šviesos diodai.....	11
1.2. LED valdymas	11
1.2.1. „Buck“ impulsiniai šaltiniai	12
1.2.2. „Boost“ impulsiniai šaltiniai.....	13
1.2.3. „Buck-Boost“ impulsiniai šaltiniai.....	13
1.2.4. PFC – galios faktoriaus korekcija.....	14
1.2.5. Kelių etapų LED valdikliai.....	16
1.3. Matricinis keitiklis.....	17
1.3.1. Erdvės vektoriaus moduliacija skirta tiesioginiam matriciniam keitikliui	18
2. Metodinė dalis	21
2.1. LED lempučių tyrimas	21
2.2. Matlab Simulink modelis	23
2.2.1. Matricinės pavaros modelis Matlab-Simulink aplinkoje.....	23
2.2.2. Erdvinio vektoriaus moduliacijos modelis	24
2.3. Reaktyviosios galios šaltinio modelis Matlab-Simulink aplinkoje	27
2.4. Matricinės pavaros ir reaktyviosios galios šaltinio prijungto prie elektros tiekimo linijų modelis	28
2.5. Sumodeliuotos sistemos duomenų surinkimas atliekant simuliaciją.....	32
3. Modeliavimo rezultatai	33
4. „Fuzzy“ reguliatoriaus pritaikymas modeliuojamai sistemai	37
Išvados	43
Literatūros šaltiniai	44
Priedai	46

Paveikslų sąrašas

1 Pav. Srovės "veidrodis" [4]	11
2 Pav. Paprastasis "Buck" LED valdiklis [4]	12
3 Pav. Supaprastinta induktoriumi parentos įtampos kėlimo grandinė [4]	13
4 Pav. "Boost-Buck (Ćuk) galios grandinė [4].....	14
5 Pav. „Buck-Boost“ su galios faktoriaus korekcijos (PFC) grandinė [3]	15
6 Pav. Philips LED lemputės galios trikampis. $\cos \Phi$ – galios koeficientas.....	15
7 Pav. Matricinio keitiklio sandara, kurią sudaro 9 IGBT poros [20].....	17
8 Pav. Galimi SVM vektoriai. (a) įtampos vektoriai. (b) srovės vektoriai [17].....	20
9 Pav. „Okko“ 15W lemputės srovės ir įtampos priklausomybė nuo laiko	21
10 Pav. „Okko“ LED lemputės srovės ir įtampos vektorinė diagrama	22
11 Pav. Aktyviosios ir reaktyviosios galios duomenys gauti iš 0.4 kV įtampos paskirstymo linijos taško, prie kurio prijungtas LED sieninis ekranas.....	22
12 Pav. Matricinio keitiklio modelio sandara ir S1 bloko posistemė.....	23
13 Pav. IGBT ir diodo blokų parametrai	23
14 Pav. Posistemė atsakinga už erdvinio vektoriaus moduliacijos signalo formavimą (1. Priedas). 24	
15 Pav. Sektoriaus numerio priklausomybė nuo laiko	24
16 Pav. Vektoriaus kampo ir amplitudės priklausomybė nuo laiko (s).....	25
17 Pav. Impulsų pločio apskaičiavimo blokas ir jo schema	25
18 Pav. Erdvinio vektoriaus moduliacijos valdymo algoritmas	26
19 Pav. Žalgirio arenos sieninį LED ekraną imituojantis modelis.....	27
20 Pav. Diodų tiltelio, kondensatoriaus ir „Step“ – apkrovos bloko parametrai.....	27
21 pav. Matlab Simulink modelio fragmentas 0,4kV tinklui imituoti.....	28
22 Pav. Matricinės pavaros, kompensuojančios reaktyviąją galią tinkle, sistema. Išsamus Matlab-Simulink sistemos modelis – 3 priedas.	28
23 Pav. Šalutinių harmonikų filtras	28
24 Pav. Įėjimo ir išėjimo srovių bei įtampų oscilogramos be šalutinių harmonikų filtro	29
25 Pav. Įėjimo ir išėjimo srovių bei įtampų oscilogramos be šalutinių harmonikų filtro	29
26 Pav. Aktyviosios ir reaktyviosios galios matavimo modelis.....	30
27 Pav. 5.5 kW asinchroninio variklio imitacija	30
28 Pav. Matlab Simulink blokas „Three – Phase V-I Measurement“	30
29 Pav. LED ekrano, matricinio dažnio keitiklio, asinchroninio variklio elektros grandinių aktyviosios ir reaktyviosios galios matavimo blokinės sistemos	31
30 Pav. Matlab Simulink duomenų surinkimo sistema ir duomenų perkeltų į Excel failą iškarpa... 32	
32 Pav. Matricinės pavaros reaktyviosios galios generavimo priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio kampo prie skirtingų išėjimo įtampos moduliacijos koeficientų.....	33
31 Pav. Išėjimo įtampos priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio kampo prie skirtingų įtampos moduliacijos koeficientų.....	33
33 Pav. Įtampos ir srovės oscilograma, prie tyrimo metu gautos didžiausios galios faktoriaus reikšmės	34
34 Pav. Fuzzy reguliatorius modeliuojamoje sistemoje	37
35 Pav. Fuzzy bloko konfigūracija	37
36 Pav. Matlab-Simulink Fuzzy reguliatoriaus blokas.....	38
37 Pav. Reaktyviosios galios tinkle priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio kampo ir įtampos moduliacijos koeficientui.	38

38 Pav. Išėjimo įtampos priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio kampo ir įtampos moduliacijos koeficientui.	38
39 Pav. Įtampos išėjime signalo vertės skaidymas į skyrius	39
40 Pav. Reaktyviosios galios vertės skaidymas į skirsnius	39
41 Pav. Srovės fazės poslinkio kampo signalo vertės skaidymas į skirsnius	39
42 Pav. Įtampos moduliacijos signalo vertės skaidymas į skirsnius	40
43 Pav. Išėjimo įtampos moduliacijos koeficiento signalo (volt_mod) ir srovės fazės poslinkio signalo (curr_mod) priklausomybė nuo reaktyviosios galios dydžio elektros tinkle signalo (Q_Grid)	40
44 Pav. Išėjimo įtampos priklausomybė nuo laiko	41
45 Pav. Reaktyviosios galios priklausomybė nuo laiko	41
46 Pav. Fuzzy reguliatoriaus išduodamas srovės fazės poslinkio kampo signalas	42
47 Pav. Fuzzy reguliatoriaus išduodamas įtampos moduliacijos koeficiento signalas	42

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

LED (angl. Light - emitting diode) - šviesos diodas;

PF (angl. Power factor) - galios faktorius;

EMI (angl. Electromagnetic interference) – elektromagnetiniai trikdžiai

THD (angl. Total harmonic distortion) – bendras harmoninis iškraipymas

IGBT (angl. Insulated-gate bipolar transistor) – izoliuotos uždūros bipoliarinis tranzistorius

EVM – erdvės vektoriaus moduliacija

TMDK – tiesioginis matricinis dažnio keitiklis

Ivadas

Iki 2020 metų Europos sąjunga (EU) turėjo tikslą sumažinti energijos suvartojimą iki 20 % palyginti su kiekiu, kuris šiais metais būtų suvartotas, jei nebūtų imtasi jokių priemonių. Tai reikštų jog per metus būtų sutaupoma 25 TWh energijos. 2020 metų vasario mėnesį „Eurostat“ paskelbė, kad 2018 metais energijos suvartojimas stabilizavosi, bet vis dar atsiliekama nuo tikslo 3,2 % [1]. Energijos suvartojimo mažinimui buvo pateiktas planas ir rekomendacijos, iš kurių viena buvo nukreipta į apšvietimą. „Intelligent Energy Europe“ programa sukūrė „Streetlight-EPC“ projektą, į kurį buvo įtraukti 9 Europos regionai. Investicija į gatvių ir visuomeninių vietovių apšvietimą siekė 29 mln. Eur. Vienas iš šios programos rezultatų matomas viename iš Ispanijos miestų – Santanderyje. Gatvių, parkų ir skverų apšvietimui elektros suvartojimas sumažėjo 17 mln. kWh, kas sudaro 80 %. Po projekto įgyvendinimo gatvių apšvietimui per vienerius metus yra sutaupoma 1,5 mln. Eurų, o į aplinką išmetama 7,8 tonomis mažiau anglies dvideginio[2]. Šviesos diodai suvartoja apie 30 % mažiau energijos lyginant su kitais šviesos šaltiniais, tačiau jų maitinimo šaltiniai yra kliūtis ekonomiškiam energijos vartojimui. Atsižvelgiant į priteisto galią buvo įvesti galios faktoriaus, kas būtų atitinkamo naudingumo koeficientui, ribojimai. Europos komisijos reglamentas nustatė lempų funkcionalumo reikalavimus:

1 Lentelė. Lempoms su integruotu valdymo įtaisu taikomi galios faktoriaus reikalavimai (PF) [2]

$P \leq 2 \text{ W}$	Reikalavimų nėra
$2 \text{ W} < P \leq 5 \text{ W}$	$PF > 0,4$
$5 \text{ W} < P \leq 25 \text{ W}$	$PF > 0,5$
$P > 25 \text{ W}$	$PF > 0,9$

Čia - $PF = \text{Pilnoji galia (VA)} / \text{Aktyvioji galia (W)}$. Kadangi pilnoji galia sudaryta tiek iš naudingosios aktyviosios galios, tiek iš reaktyviosios, išvada ta, kad būtina mažinti reaktyviąją galią norint pasiekti didesnę galios faktorių kas nulemia naudingumą. Dažnu atveju nėra galimybės keisti šviestuvų maitinimo šaltinį, dėl to atliekamas reaktyviosios galios kompensavimas, kai prie tinklo prijungiamas reaktyviosios galios kompensatorius. Prie skirtingo apšvietimo stiprio, spalvos, naudojamų šviestuvų kiekio yra reaktyviosios galios generavimo šuoliai imtuvuose, dėl šios priežasties kompensatoriai turi adaptuotis prie apkrovos dydžio ir pobūdžio.

Darbo tikslas – Ištirti galimybę panaudoti matricinę pavarą, kaip reaktyviosios galios kompensatorių elektros tiekimo linijose išlaikant pagrindinę pavaros funkciją asinchroninio variklio maitinimas ir greičio reguliavimas.

Darbo uždaviniai:

1. Išnagrinėti reaktyviąją galią ir jos šaltinius šiuolaikinėse elektros tiekimo linijose
2. Sudaryti matricinės pavaros modelį Matlab-Simulink aplinkoje
3. Sudaryti reaktyviosios galios šaltinių šiuolaikinėse elektros tiekimo linijose modelį Matlab-Simulink aplinkoje
4. Apjungti šiuos modelius į bendrą sistemą prijungiant prie elektros tiekimo linijų
5. Modeliavimo būdu rasti matricinės pavaros veikiančios reaktyviosios galios kompensavimo režimu kompensavimo ribas
6. Sudaryti uždarą reaktyviosios galios kompensavimo sistemą pritaikant Fuzzy reguliatorių

1. Literatūros apžvalga

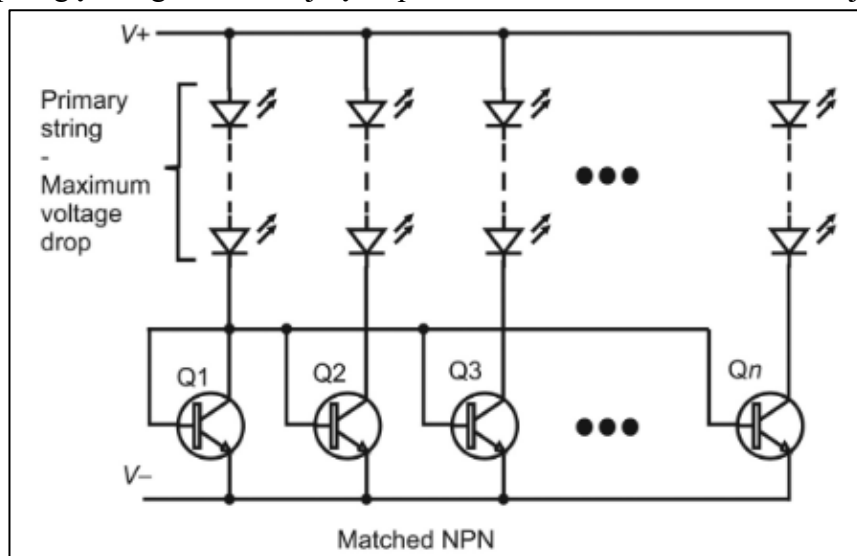
1.1. LED – šviesos diodai

Šviesos diodai (angl. LED; Light – emitting diode) yra puslaidininkiai, kurių sudaro P-N sandara. Dėl priemaišų dedančių į silicį kinta jo elektrinio laidumo savybės ir laidumas tampa nestabilūs. Tekant srovei per tokį puslaidininkį jis pradeda spinduliuoti fotonus ir taip generuojama šviesa. Įtampos kritimas per šiuos diodus yra 2-3,5 V, tai priklauso nuo spalvos, o nominali srovė 20 mA. HP ir Philips pradėjo 1999 metais kurti didesnės galios LED, kurių darbinė srovė siekė nuo 350 mA, šiais laikais gaminamos 1A ir didesnės srovės diodai. Suvarotos galios ir skleidžiamos šviesos santykį turi mažos srovės šviesos diodai, kurių srovės diapazonas 20-100 mA, taip pat jų gamybos kaštai yra daug mažesni už didelės galios LED. Dėl šios priežasties įprasta naudoti mažos galios šviesos diodų grupes ir pasiekti tą patį šviesos srautą.

Susiduriama su problemomis, kai reikia parinkti šių šviesos diodų maitinimo šaltinį. Šie puslaidininkiai yra jautrūs temperatūros, įtampos ir srovės pokyčiams. Netinkamai parinktas maitinimo šaltinis, jungimo būdas ar neužtikrintos kitos veikimo sąlygos gali pakeisti šviesos stiprį, spalvą ar net negrįžtamai pakenti šviestuvui. Nuosekliame jungime susiduriama su problema, kai temperatūriniai pokyčiai viename diode gali turėti įtakos visai grandinei, nes šiame diode krenta varža, atsidarymo įtampa ir kyla srovė. Šis reiškinys dar vadinamas (angl. thermal runaway). Vienas iš tokių atvejų būna blogas diodų grupės parinkimas, kai skirtingos atsidarymo įtampos pvz. raudono šviesos diodo ties 2 V, o mėlyno – 3,5V.

1.2. LED valdymas

Valdymui galima rinktis įtampos arba srovės šaltinį. Įtampos šaltinis palaiko pastovią įtampą, tai žinant įtampos kritimą visoje grandinėje parenkamas atitinkamos įtampos šaltinis, kad srovė tenkanti diodui neviršytų leistinos. Kitas būdas yra naudoti srovę ribojantį rezistorių. Jei diodai jungiami nuosekliai, reikia atsižvelgti, kad kritimas įtampos būtų paskirtas visoje grandinėje. Galimas ir aktyvus srovės reguliavimas, kai naudojamas grįžtamasis ryšys ir fiksuojama srovė. Tam tikslui naudojami bipoliniai tranzistoriai, lauko tranzistoriai „MOSFET“. Linijiniai įtampos reguliatoriai naudojami kaip srovės reguliatoriai, kai naudojami srovės matavimo rezistoriai. Per juos tekanti srovė proporcinga įtampos reguliatoriaus srovės išėjimui. Trumpojo jungimo atveju tokios grandinės turi temperatūrinę apsaugą, nes gedimo atveju įtampos šuolis krenta ant rezistoriaus ir jis kaista.



1 Pav. Srovės "veidrodis" [4]

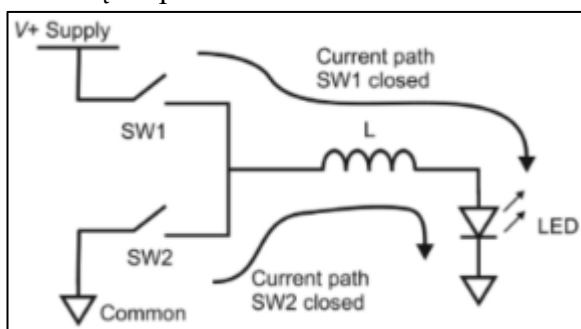
Naudojant srovės šaltinį patogiausia būtų išdalinti srovę atskiroms grandinių šakoms, žiūrėti 1 Pav. Kadangi tranzistorių bazės ir kolektoriai sujungti, tai jie bus atverti pilnai iki tol kol kolektoriaus įtampa nenukris pakankamai žemai, kad būtų apribota bazė – emiterio srovė.

Pagal poreikį parenkamas šaltinis, pavyzdžiui, daug LED modulių jungiami paraleliai, tai vertėtų rinktis nuolatinės įtampos šaltinį, kur kiekvienas modulis turi linijinį ar impulsinį srovės reguliatorių. Jei diodai jungiami nuosekliai, tai pasirinkimas būtų nuolatinės srovės šaltinio. Jei naudojama žemos galios diodams, kurių įtampa žemesnė už šaltinio, tai linijinio srovės reguliatoriaus pakanka, jei įtampa didesnė, tai tokiu atveju pasirinkimas būtų impulsinio. Pastarieji siekia 90% naudingumo koeficientą.

Privalumai linijinių maitinimo šaltinių, kad jie negeneruoja elektromagnetinės spinduliacijos (EMI), priešingai nei impulsiniai maitinimo šaltiniai, kurių dalį kainos sudaro EMI filtrai. Iš trūkumų galima paminėti naudingumo koeficiento drastišką kritimą jei maitinimo šaltinio įtampa didesnė už diodų, tokiu atveju energija virsta į šilumą ir reikalingas aušinimas, o tai taip pat didina gamybos kaštus. Jei LED valdymui naudojama linijinė įtampa, tai reikalingi ir kondensatoriai įtampos išlyginimui. Įtampa maitinimo šaltinio negali būti žemesnė nei LED įtampa, dėl to atsiranda ribotas galios diapazonas.[4]

1.2.1. „Buck“ impulsiniai šaltiniai

„Buck“, dar kitaip vadinamas žeminantysis keitiklis yra vienas iš paprasčiausių impulsinių LED valdiklių. Jie naudojami, kai imtuvo įtampa žemesnė už šaltinio.



2 Pav. Paprastas "Buck" LED valdiklis [4]

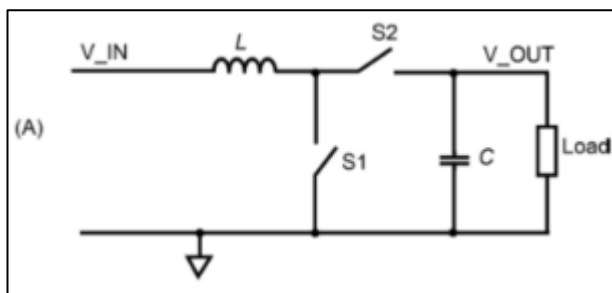
LED diodas nuosekliai sujungtas su rite ir jungtukas SW1 atidaro grandinę, kad srovė tekėtų per diodą. Srovės stiprį riboja ritė, kuri vėliau išlaiko savyje energiją. Išjungus SW1 ir įjungus SW2, srovės tekėjimas nenutrūksta iki kol ritė neišleikvoja indukuotos energijos. Induktyvusis elementas šiuo atveju veikia kaip talpa ir kaip žemų dažnių filtras. Jungtukų funkciją atlieka puslaidininkiai lauko tranzistoriai. Jų perjungimo dažnis būna 25 kHz – 2MHz, galima naudoti ir žemesnę dažnį, tik tokiu atveju gali būti girdimas jų veikimas. Šiose grandinėse įprastas impulso plotis apie 85% - SW1 įjungtas 85% laiko, o išjungtas 15%. Esant mažesniai plotui atsiranda didelis įtampos kritimas per srovės matavimo varžą, ritę ir diodą, dėl to atsiranda perjungimo triukšmai. Rekomenduojamas įtampos kritimas per srovės matavimo varžą yra 250 mV.

Galimi du perjungimo būdai: sinchroninis ir asinchroninis. Esant asinchroniniam perjungimui, jungiklis SW2 pakeičiamas diodu, kuris įsijungia automatiškai, nes SW1 yra įjungtas, SW2 bus atvirkštinis - išjungtas. Kai SW1 yra išjungtas, induktoriaus (ritės) srovė nori toliau tekėti, naudoti sukauptą induktoriaus energiją. Dabar induktorius veikia kaip įtampos šaltinis ir srovė teka nukreipta į diodą SW2. Šis diodas bus atidarytas kol energija induktoriuje bus išnaudota (srovė sumažėja iki nulio) arba tol, kol jungiklis SW1 vėl įsijungs. SW2 diodas paprastai vadinamas „angl. flywheel diode - smagračio diodu“, nes jis elgiasi kaip smagratis variklyje, cirkuliuojantis energijai.[4]

1.2.2. „Boost“ impulsiniai šaltiniai

„Boost“ keitikliai sukelti įtampą, kai šaltinio išduodama įtampa yra žemesnė nei reikiama imtuvui pvz. populiarios žemos įtampos baterijos CR2032 (3V) maitina kelių diodų žibintuvėlį. Yra kelių tipų įtampos didinimo grandinės, viena jų veikia pompos principu. Į kondensatorius tiekama srovė iki kol jie užpildomi ir perjungimo būdu visa sukaupta energija atiduodama imtuvui. Kondensatoriuose įtampa kyla aukščiau nei įėjime, o grupės kondensatorių ir elektroninių jungtukų leidžia pakankamai tolygiai atiduoti sukeltą įtampą.

Induktoriumi pagrįsta įtampos kėlimo grandinė veikia panašiai kaip ir minėtoji, tik čia energijos greitą kaupimą ir atidavimą užtikrina induktorius.



3 Pav. Supaprastinta induktoriumi paremtos įtampos kėlimo grandinė [4]

Veikimo principas: kai S1 yra įjungiamas, rite pradeda tekėti srovė ir šerdis įsikrauna (energija kaupiama magnetiniame lauke). Išjungus S1 ir įjungus S2, srovė pradeda tekėti per kondensatorių ir srovė palaipsniui mažėja. Įtampa ties išėjimu priklauso nuo kondensatoriaus verčių. Jei apkrovos nėra, tai įtampa gali išaugti smarkiai ir pažeisti vidinius komponentus, tam reikalinga viršįtampio apsauga.

Srovės tekėjimą reguliuoja lauko tranzistoriai, o kad apskaičiau kaip keičiasi srovė induktoriuje pasinaudojau formule:

$$E = -L \frac{di}{dt}$$

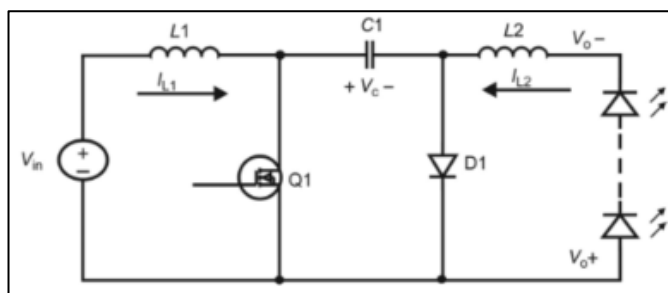
Čia E yra elektromagnetinė galia (EMF) arba įtampa, L yra induktyvumas, o di/dt pokytis srovės laike. Kai įtampa paduodama į induktorių, tai srovė kyla konstanta di/dt . Kai grandinė atidaroma, kad srovė tekėtų per kondensatorių ir apkrovą, tai visa energija perduodama iš induktoriaus į kondensatorių:

$$\frac{L}{2} \cdot I^2 = \frac{C}{2} \cdot V^2$$
$$V = I \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Įtampos didėjimas yra proporcingas didžiausiai srovei induktoriuje.

1.2.3. „Buck-Boost“ impulsiniai šaltiniai

„Buck-Boost“ maitinimo šaltiniai nepriklausomai nuo įėjimo įtampos dydžio gali ją padidinti arba pamažinti. Plačiausiai naudojama akumuliatorių krovimui, nes laikui bėgant jų įtampa labai skiriasi. Dažniausiai naudojami tipai: „Ćuk“ ir SEPIC (Single-ended primary-inductor converter).



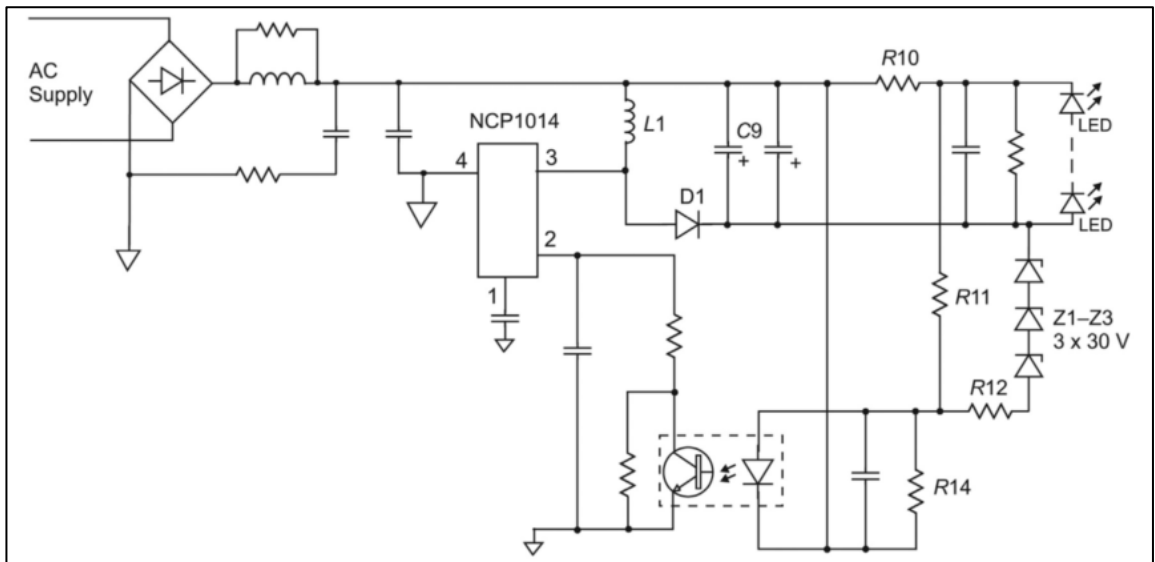
4 Pav. "Boost-Buck (Ćuk) galios grandinė [4]

„Ćuk“ keitiklyje yra induktyvinės ritės ties šaltinio įėjimu ir išėjimu. Nepertraukiamo laidumo režime srovė tekės abejose ritėse su mažais srovės šuoliais, dėl to reikia mažesnės talpos lyginančiųjų kondensatorių. Nepertraukiamos srovės režimas sumažina šuolius, kas leidžia išlaikyti žemus elektromagnetinius trikdžius (EMI) ir tenkinti nustatytus reikalavimus. Kadangi kiekviena jungiančioji grandis yra izoliuota induktoriumi, tai EMI spinduliuotė iš keitiklio yra minimali. Keitiklis turi talpinę izoliaciją, tai lauko tranzistoriaus gedimas nepadarys įtakos šviesos diodams išėjime gedimo atveju. Galimas ir abiejų rikių montavimas ant vienos šerdies, tokiu atveju induktoriaus srovės virpėjimas būtų sumažintas, nes viena kitą išlygintų. Naudojant minėtą būdą turi būti pastovus dažnis, kad išliktu stabilu. LED šviestuvams „Ćuk“ yra puikus įtampos keitiklis, nes diodams šylant keičiasi jų pralaidumas.

1.2.4. PFC – galios faktoriaus korekcija

Galios koeficientas (PF) yra tikrosios galios matuojamos vatais (W) ir pilnutinės galios matuojamos volt-amperais (VA) santykis. Reikšmė lygi 1 reikštų, kad 100 procentų yra aktyvioji galia, ir tai varžinė apkrova. Aktyviosios apkrovos yra tokios kaip LED maitinimo šaltinių grandinės. Jos kuria reaktyviąją galią, nes srovė praeina per diodų tiltelį, tada įtampa būna išlyginama naudojant elektrolitinį kondensatorių. Kintama įtampa išlyginama į nuolatinę ir srovė nebėra panaši į sinusoidę. Paprasti keitikliai turi apie 0,5 PF, bet gali būti pakoreguota. Tai būna pasiekta, kai AC srovės sinusoidė ir fazė vėl sutampa su AC įtampa. Sinusoidės iškraipymas sumažina PF, taip pat atsiranda ir šalutinės harmonikos. Dėl to PF ir harmonikos (angl. total harmonic distortion - THD) yra susietos (1):

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}} \quad (1)$$



5 Pav. „Buck-Boost“ su galios faktoriaus korekcijos (PFC) grandinė [3]

Tranzistorius atidaromas ir induktorius įkraunamas, po uždarymo srovė teka iš L1 per D1 diodą. Įkraunamas išėjimo kondensatorius C9 ir induktorius taip išsikrauna. Kai kondensatoriuje įtampa pakyla iki numatytos, tada srovė teka per šviesos diodus. Srovės tekėjimas padaro įtaką įtampos kritimui varžoje R10, šis įtampos kritimas naudojamas grįžtamajam ryšiui. Į valdymo įtaisą signalas eina per optroną. R11 ir R12 sudaro įtampos daliklį, kuris per optrono diodą praleidžia mažą srovę. Kai optronas perduoda signalą į elektroninį jungiklį (NCP1014), impulsai yra išjungiami. Zenerio diodai yra naudojami apsaugai, jei apkrovos nėra ir kondensatoriai C9 pasiekia aukštą įtampą. Tokiu būdu signalas perduodamas ir impulsai išjungiami.

Namų ūkiuose reaktyvioji galia nėra labai reikšminga vartotojams, kadangi tipiška gyvenamųjų namų PF viršija 0,95. Komercinės paskirties pastatų PF – (0,98 – 0,92), o industrinės paskirties gali siekti net iki 0,7. Žiūrint didesniu mastu bendroji reaktyvioji galia sumuojasi ir elektros skydinės gauna reaktyviasias apkrovas, o tai lemia energijos išekvojimą šiluminiu būdu transformatoriuose. Taip pat, reaktyvioji galia nulemia ir įtampos kritimą visoje grandinėje, o galios šaltinis apkraunamas dar labiau norint išlaikyti stabilumą. Daugiau galios reiškia ir energijos tiekimo išlaidų didėjimą, kabeliai, izoliacijos, transformatoriai ir t.t.

Kaip pavyzdį galime imti standartinę buitinę LED lemputę „Philips LEDBulb 13-100W“, aprašyme teigiama, kad skleidžiama šviesa prilygsta 100 W kaitrinę lemputę, o suvartojama galia siekia 13 W [3]. Taip pat aprašyme minima ir PF, kuris siekia 0,5. Pagal tai galime apskaičiuoti pilnutinę galią ir reaktyvią.

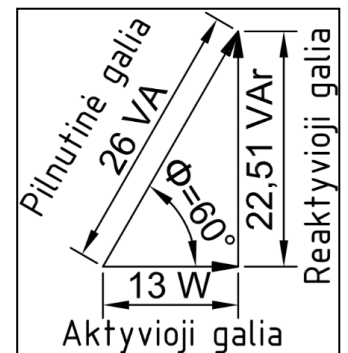
Pilnutinė galia:

$$S = \frac{P}{PF} = \frac{13W}{0.5} = 26 VA \quad (1)$$

Reaktyvioji galia:

$$\sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{26^2 - 13^2} = 22.51 VAr \quad (2)$$

Iš 7 Pav. grafiškai matome kiek reaktyviosios galios yra generuojama vienos tokios lemputės. Dėl šios priežasties yra kuriami maitinimo šaltiniai, kurie siekia aukščiausio galios faktoriaus ir mažiausio THD – harmoninių trikdžių poveikio. Šviesos diodams reikalinga pastovi ir limituota srovė, tam užtikrinti yra daugybė būdų, bet didesnės galios šviestuvuose montuojami aktyvieji elementai, kurie



6 Pav. Philips LED lemputės galios trikampis. $\cos \Phi$ –

generuoja reaktyviąją galią. Impulsiniai maitinimo šaltiniai dažniausiai naudojami dėl sąlyginai mažos kainos, naudingumo ir mažo profilio. Kita vertus tokie maitinimo šaltiniai turi ir neigiamas savybes jei juose nėra įdiegta PFC (power factor correction – galios faktoriaus korekcija) technologija. Tokie įrenginiai įveda harmonines apkrovas dėl naudojamų puslaidininkių komponentų tokių kaip lauko tranzistorius „MOSFET“. Tai padidina srovės iškraipymą ir sumažina energijos kokybę.[3]

1.2.5. Kelių etapų LED valdikliai

Dviejų etapų LED valdiklis, kurio veikimo principas sudarytas iš kelių dalių: [7]

- Elektromagnetinių triukšmų filtras (EMI).
- Kintamos įtampos (AC) – nuolatinės įtampos (DC) keitiklis naudojant diodų tiltelį.
- Galios faktoriaus korekcija (PFC). Šioje vietoje būtinas IEC 61000-3-2 standartas, kuris nusako maksimalų srovės dydį kiekvienai harmonikos grupei.
- Pusinės bangos lygintuvo keitiklio blokas. Siekiant iš sinusoidinės keisti į 50 % ciklo stačiakampes bangas. Šio etapo grandinę sudaro kondensatorius ir magnetinės indukcijos transformatorius. Šio bloko funkcija iš buvusių stačiakampės formos impulsų sudaryti didelio dažnio sinusoidę.
- Diodų tiltelis galiausiai generuoja DC įtampą, kurią tiekia šviesos diodui.

Straipsnyje pateiktas eksperimentas naudojant 150 W LED diodą ir pasiektas PF – 0.981, THD - < 6,5 % , naudingumo koef. 91,8 %. [7]

Galimas ir vieno etapo LED valdiklis. Toks valdiklis turi dvigubai didesnę virpėjimą, kas lemia įtampos kritimą ir išaugusią srovę. Tai žalinga tiek diodui, taip pat keičia ir jo skleidžiamos šviesos spalvą. To yra išvengiama naudojant vieno etapo modifikuotą „flyback“ LED valdiklį kartu kombinuojant su išoriniu nepertraukiamo laidumo režimo stiprinimo grandine. Iš straipsnyje atlikto tyrimo matyti, jog naudojant diodą 150 W, kurio vardinė įtampa 214 V ir srovė 0,7 A, buvo pasiektas PF – ~0,97, THD - < 8,8 %, naudingumo koeficientas apie 93,5 %. [8]

Integruotųjų sistemų pavyzdys pateiktas „ICPE – ECCE Asia“ konferencijoje. Vieno etapo šviesos diodo valdymo sistemos su integruota įtampos žeminimo (step-down) PFC grandine ir izoliuota DC-DC keitiklis. Šiame tyrime naudotas 30W šviesos diodas, 0,75A srovės. Bandymu metu PF buvo ne žemesnis nei 0,97, o naudingumo koeficientas siekė iki 88 %. [9]

Renkantis valdymo grandinę būtina atsižvelgti į apšvietimo sistemos galią, kiekvienu atveju reikia parinkti tiek grandinės tipą, naudojamus komponentus, apsaugą ir kitą. Projektuojant maitinimo šaltinį reikia laikytis Europos nustatytų reglamentų, kurie nusako energijos vartojimo, saugos, patvarumo ir kitus aspektus. Po korekcijos buitinių LED lempučių, PF turi gautis ne mažiau 0,7, siektina riba 0,9. Apšvietimo kokybė turi išlikti nepakitusi, o tai reiškia, kad negali atsirasti pašalinių mirgėjimų, šviesos stipris nenuslopti, elektronikos komponentai nekelti dėl dažnių pokyčių triukšmo, taip pat elementai negali pradėti generuoti daugiau šilumos.

1.3. Matricinis keitiklis

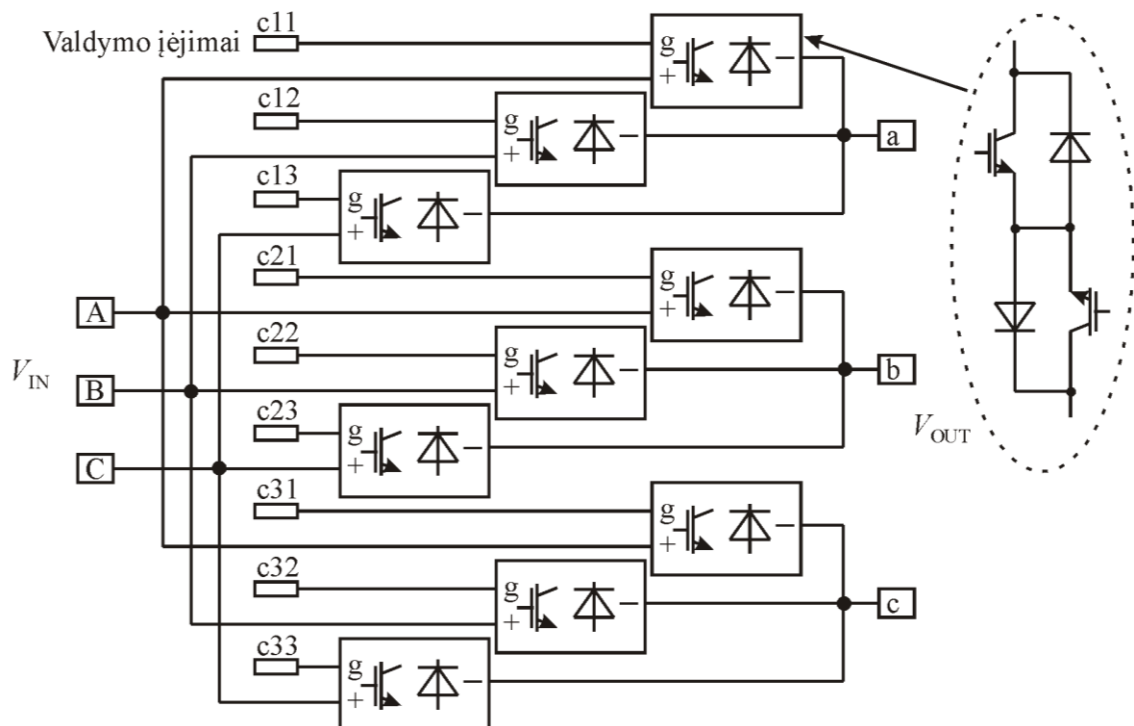
Matricinis keitiklis sudarytas iš $m \times n$ dvikrypčių galios jungiklių. M-fazių įtampos šaltinio ir n-fazių apkrovos atitikimas būtų 3×3 , kai naudojamas trifazis kintamos įtampos šaltinis ir prijungtas trifazis imtuvas. Tiesioginis matricinis keitiklis parodytas 21 Pav. yra tiesioginis AC-AC keitiklis, kuris yra pranašesnis už tradicinius keitiklius. Jis užtikrina sinusoidines įėjimo ir išėjimo bangas su minimaliomis aukštesniosiomis harmonikomis ir be subharmonkų. Subharmonikos, tai harmonikos, kurių dažnis žemesnis už fundamentaliosios. Taip pat keitiklis turi dvikryptę energijos srauto galimybę, o tai leidžia pilnai kontroliuoti galios faktorių. Konstrukcija nereikalauja didelio energijos kiekio kaupiklio, o tai nulemia ilgaamžiškumą ir pačio keitiklio kompaktiškumą.

Pagrindinės matricinių keitiklių savybės: [23]

- Tiesioginis dažnio keitimas
- Dažnis įėjime ir išėjime nėra apribotas tik 50hz
- Galios faktoriaus valdymo galimybė
- Nėra didelio energijos kaupimo elemento, dėl to eksploatacijos laikas prailgėja ir pats keitiklis yra kompaktiško dydžio
- Energijos srautas leidžiamas į abi puses per keitiklį todėl gali veikti tinkle kaip imtuvas ir energijos šaltinis, kai prijungtas variklis pereina į rekuperacinį režimą
- Sinusinės išėjimo įtampos ir įėjimo srovės bangos

Trūkumai: [23]

- Komutavimo ir valdymo schemų sudėtingumas
- Išėjimo įtampos amplitudės riba, dėl maksimalaus įtampos perdavimo santykio - 0.866 ($\cos 30^\circ$)
- Įtampos sutrikimai tinkle yra netoleruojami ir jie tiesiogiai perduodami per išėjimo įtampą, o tai kenkia prijungto elektros variklio darbui



7 Pav. Matricinio keitiklio sandara, kurią sudaro 9 IGBT poros [20]

Keitiklis sudarytas iš 9 dvikrypčių jungiklių, kurie leidžia kiekvienai įėjimo fazei būti sujungtai su kiekviena išėjimo faze. Teoriškai toks matricinis keitiklis gali turėti 512 (2^9) skirtingų sujungimo variacijų. Bet ne kiekviena iš šių kombinacijų gali būti pilnai įgyvendintos. Nepriklausomai nuo valdymo metodo keitiklio jungiklių kombinacijos turi atitikti dvi pagrindines taisykles:

- Keitiklis maitinamas iš įtampos šaltinio ir įprastai maitina induktyvinę apkrovą
- Įėjimo fazės niekada negali būti sujungtos tarpusavyje prie vienos išėjimo fazės (trumpojo jungimo režimu) ir išėjimo srovės negali būti nutrauktos, kas sudarytų atvirą grandinę išėjime

Taisyklės nusako, kad bet kuriuo metu turi būti įjungtas tik vienas dvikryptis jungiklis kiekvienoje išėjimo fazėje. Atsižvelgiant į šį apribojimą, 3x3 fazių keitiklyje leistini 27 perjungimo atvejai.

Tarp įėjimo ir išėjimo pusių nėra energijos kaupimo komponentų, todėl išėjimo įtampa ir srovė turi būti generuojami tiesiogiai iš įėjimo įtampos ir srovės.

LC filtras ties įėjimu veikia kaip sąsaja tarp matricos keitiklio ir kintamos srovės tinklo, kad būtų išvengta nepageidaujamų srovės harmonikų grįžtančių į tinklą.

Sąsaja tarp TMDK įėjimo ir išėjimo gali būti išreikšta: [25]

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa} & S_{Ba} & S_{Ca} \\ S_{Ab} & S_{Bb} & S_{Cb} \\ S_{Ac} & S_{Bc} & S_{Cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa} & S_{Ba} & S_{Ca} \\ S_{Ab} & S_{Bb} & S_{Cb} \\ S_{Ac} & S_{Bc} & S_{Cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\sum_{x=A,B,C} S_{xx} = 1, (x = a, b, c) \quad (5)$$

Čia S yra jungiklio matrica, $V_{A,B,C}$ – išėjimo fazių įtampos. Atitinkamai priskiriama reikšmė: S_{xx} lygu vienetui, tai įjungimo pozicija ir priešingai, kai reikšmė lygi nuliui – išjungimo pozicija. Pagal (3) ir (4) formules matyti, kad išėjimo įtampa ir įėjimo srovė gali būti kontroliuojamos keičiant jungiklių matricą. Jungiklių apribojimai išreikšti (5) formule, kai gali susidaryti trumpas jungimas ir atvira išėjimo grandinė, kas sukeltų staigų įtampos ir srovės šuolį elektros grandinėje.

1.3.1. Erdvės vektoriaus moduliacija skirta tiesioginiam matriciniam keitikliui

EVM (SVM - angl. space vector modulation) erdvės vektoriaus moduliacijos metodas yra skirtas valdyti inverterio išėjimo įtampai ir dažniui.

Trifazės sistemos kintamieji gali būti išreikšti erdvės vektoriais naudojant transformaciją:

$$x_s = \frac{2}{3}(x_1 + \alpha x_2 + \alpha^2 x_3) \quad (6)$$

$X_{1,2,3}$ – yra fazės srovės arba įtampos kintamieji.

$\alpha = e^{j(\frac{2\pi}{3})}$, $\alpha^2 = e^{j(\frac{4\pi}{3})}$ ir x_s yra atitikmenys erdvės vektoriaus po atliktos transformacijos.

EVM kuria norimą sinusoidinį trifazį įtampos išėjimą, o tai vyksta keičiant jungiklių būsenas ir apskaičiuojant jų uždarymo ir atidarymo laikus. EVM metodo naudojimas apima dvi pagrindines sritis, tai perjungimo vektorių parinkimas ir vektoriaus įjungimo laiko skaičiavimas. Kadangi galimos 27 jungiklių kombinacijos, tai leidžia išgauti 27 įtampos vektorius. Juos galima padalinti į tris grupes: sinchroniškai besisukantys, stacionarūs ir nuliniai (3 lentelė).

2 Lentelė. Jungiklių konfigūracijos ir vektoriai, kurie naudojami matriciniame keitiklyje [20]

3 Lentelė. Erdvinio vektoriaus formavimas

Switching Configurations				Output Voltage		Input Current		
SC. No.	A	B	C	V_o	α_o	I_i	β_i	
Group I	+1	a	b	b	$2/3V_{ab}$	0	$2/\sqrt{3}i_A$	$-\pi/6$
	-1	b	a	a	$-2/3V_{ab}$	0	$-2/\sqrt{3}i_A$	$-\pi/6$
	+2	b	c	c	$2/3V_{bc}$	0	$2/\sqrt{3}i_A$	$\pi/2$
	-2	c	b	b	$-2/3V_{bc}$	0	$-2/\sqrt{3}i_A$	$\pi/2$
	+3	c	a	a	$2/3V_{ca}$	0	$2/\sqrt{3}i_A$	$7\pi/6$
	-3	a	c	c	$-2/3V_{ca}$	0	$-2/\sqrt{3}i_A$	$7\pi/6$
	+4	b	a	b	$2/3V_{ab}$	$2\pi/3$	$2/\sqrt{3}i_B$	$-\pi/6$
	-4	a	b	a	$-2/3V_{ab}$	$2\pi/3$	$-2/\sqrt{3}i_B$	$-\pi/6$
	+5	c	b	c	$2/3V_{bc}$	$2\pi/3$	$2/\sqrt{3}i_B$	$\pi/2$
	-5	b	c	b	$-2/3V_{bc}$	$2\pi/3$	$-2/\sqrt{3}i_B$	$\pi/2$
	+6	a	c	a	$2/3V_{ca}$	$2\pi/3$	$2/\sqrt{3}i_B$	$7\pi/6$
	-6	c	a	c	$-2/3V_{ca}$	$2\pi/3$	$-2/\sqrt{3}i_B$	$7\pi/6$
	+7	b	b	a	$2/3V_{ab}$	$4\pi/3$	$2/\sqrt{3}i_C$	$-\pi/6$
	-7	a	a	b	$-2/3V_{ab}$	$4\pi/3$	$-2/\sqrt{3}i_C$	$-\pi/6$
	+8	c	c	b	$2/3V_{bc}$	$4\pi/3$	$2/\sqrt{3}i_C$	$\pi/2$
	-8	b	b	c	$-2/3V_{bc}$	$4\pi/3$	$-2/\sqrt{3}i_C$	$\pi/2$
	+9	a	a	c	$2/3V_{ca}$	$4\pi/3$	$2/\sqrt{3}i_C$	$7\pi/6$
	-9	c	c	a	$-2/3V_{ca}$	$4\pi/3$	$-2/\sqrt{3}i_C$	$7\pi/6$
Group II	0a	a	a	a	0	x	0	x
	0b	b	b	b	0	x	0	x
	0c	c	c	c	0	x	0	x
Group III	x1	a	b	c	x	x	x	x
	x2	a	c	b	x	x	x	x
	x3	b	c	a	x	x	x	x
	x4	b	a	c	x	x	x	x
	x5	c	a	b	x	x	x	x
	x6	c	b	a	x	x	x	x

Sinchroniškai besisukantis vektorius:

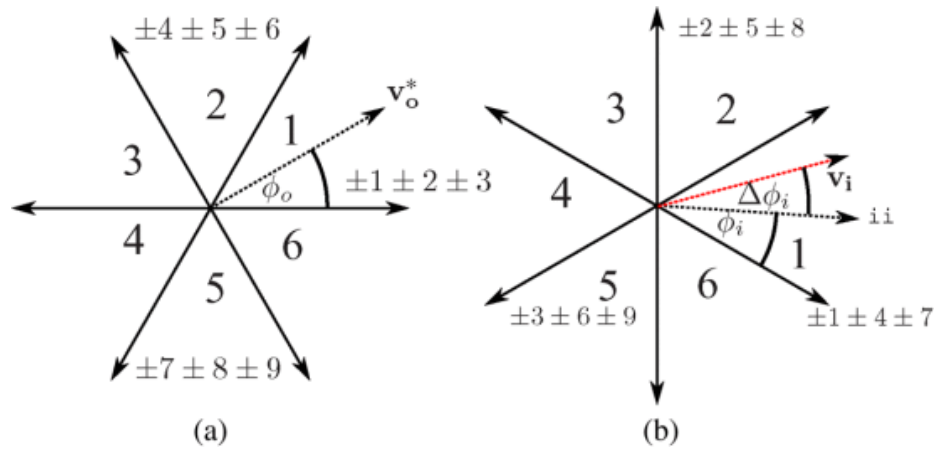
Perjungimo būseną, jungianti kiekvieną išėjimo fazę su skirtinga įėjimo faze, tai sukuria įtampos erdvės vektorius, kuris sukasi įėjimo kampiniu dažniu. Tai užtikrina pastovų dydį ir dažnį.

Stacionarus vektorius:

Būseną įgalinanti vienu metu tik dvi įėjimo įtampos, tai kuria įtampos erdvės vektorius kurio kampas yra konstanta. Kinta tik dydis, bet ne kampas.

Nulinis vektorius:

Visos išėjimo fazės yra sujungtos su ta pačia įėjimo faze, o tai sukuria nulinę išėjimo įtampą.



8 Pav. Galimi SVM vektoriai. (a) įtampos vektoriai. (b) srovės vektoriai [17]

Darbo ciklai yra apskaičiuojami pagal išėjimo įtampos fazę ir įėjimo srovės vektorių:

$$\delta_1 = -1^{K_v+K_i+1} \frac{2m}{\sqrt{3}} \frac{\cos(\phi'_o - \frac{\pi}{2}) \cos(\phi'_i - \frac{\pi}{2})}{\cos(\Delta\phi)} \quad (7)$$

$$\delta_2 = -1^{K_v+K_i} \frac{2m}{\sqrt{3}} \frac{\cos(\phi'_o - \frac{\pi}{2}) \cos(\phi'_i + \frac{\pi}{6})}{\cos(\Delta\phi)} \quad (8)$$

$$\delta_3 = -1^{K_v+K_i} \frac{2m}{\sqrt{3}} \frac{\cos(\phi'_o + \frac{\pi}{6}) \cos(\phi'_i - \frac{\pi}{2})}{\cos(\Delta\phi)} \quad (9)$$

$$\delta_4 = -1^{K_v+K_i+1} \frac{2m}{\sqrt{3}} \frac{\cos(\phi'_o + \frac{\pi}{6}) \cos(\phi'_i + \frac{\pi}{6})}{\cos(\Delta\phi)} \quad (10)$$

m – moduliacijos indeksas; $\Delta\phi$ – matuojamos įėjimo įtampos vektoriaus v_i ir įėjimo srovės vektoriaus i_i^* kampo skirtumas; K_v ir K_i yra įtampos ir srovės sektoriai (1-6);

$$\phi'_o = \phi_o - (K_v - 1) \frac{\pi}{6} \quad (11) \quad \phi'_i = \phi_i - (K_i - 1) \frac{\pi}{6} \quad (12)$$

Jei bent vienas iš darbo ciklų yra su neigiamu ženklu, tai jungiklių konfigūracijos pavadinimas turi būti taip pat su neigiamu ženklu. Nulinio darbo ciklo δ_0 vektorius yra toks, kad visad darbo ciklas turi būti lygus vienetui prie fiksuoto dažnio, pvz.:

$$\delta_0 = 1 - \delta_1 - \delta_2 - \delta_3 - \delta_4 \quad (13)$$

Atsižvelgiant į tai, kad $\Delta\phi = 0$, tai maksimalus didžiausias moduliacijos indeksas yra $m = \sqrt{\frac{3}{2}}$

2. Metodinė dalis

2.1. LED lempučių tyrimas

Norint pagerinti LED šviestuvų energijos suvartojimą reikia kompensuoti reaktyviają galią ir filtruoti harmonikas. Reaktyviosios galios kompensacija atliekama atsižvelgiant į pobūdį, o tai sužinoma jei srovės fazė atsilieka ar lenkia įtampos fazę. Siekiama, kad įtampa būtų sinchroniška su srove. Straipsnio [27] autoriai pateikia vieną iš gatvės šviestuvų kompensavimo variantų, kai šviestuvų valdymo spintose naudojami dinaminiai induktyviniai elementai, bet tokiu atveju išauga įrangos kaina, dydis, trumpėja ilgaamžiškumas.

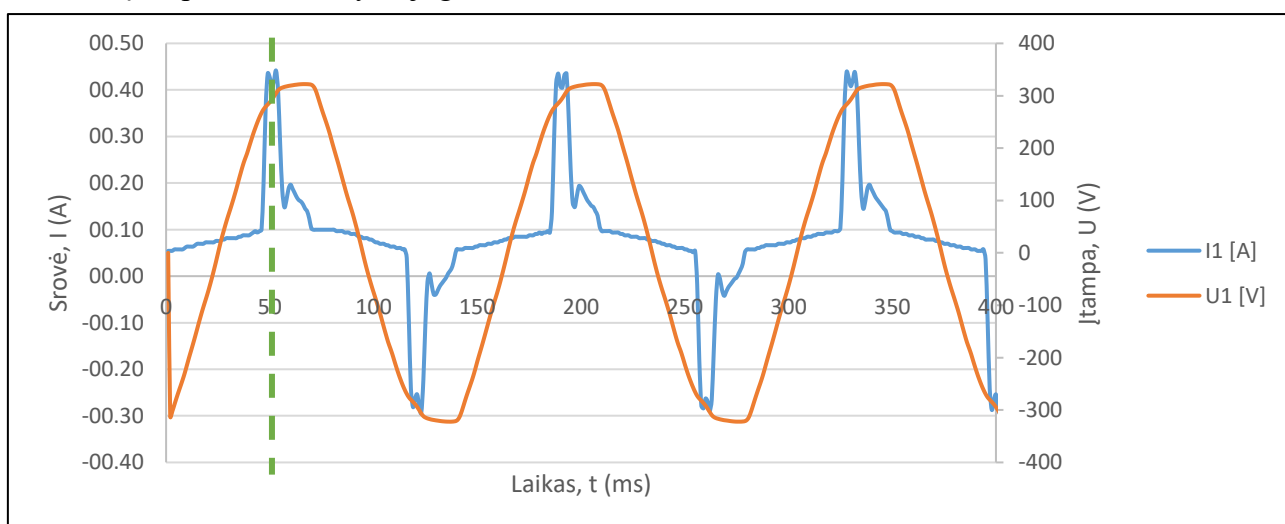
Naudojant A klasės trifazio tinklo kokybės analizatorių „Metrel MI 2892 Power master“ buvo ištirtos keturios buitėje naudojamos šviesos diodų lemputės:

3 Lentelė. Analizatoriaus rodmenys ištyrus buitines LED lemputes

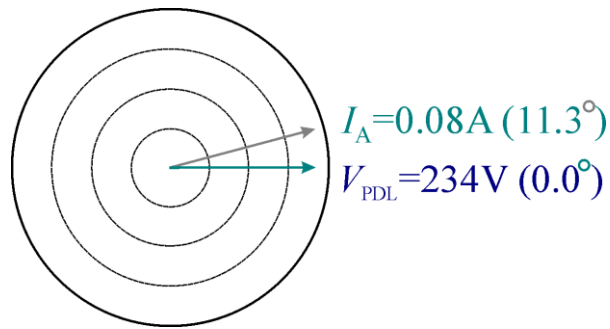
Gamintojas	Galia (W)	Šviesos srautas (lm)	Šviesos atspalvis (K)	Aktyvioji galia, P (W)	Reaktyvioji galia, N (var)	Galios faktorius, PF	THD, I (%)	THD, V (%)
Okko	15	1350	3000	18.757	-26.43	0.5787	101.4	3.66
Philips	7	806	2700	13.427	-12.54	0.7309	71.88	3.48
Spectrum	15	1500	3000	18.171	-32.54	0.4876	92.17	3.73
Spectrum premium	18	1850	4000	24.773	-28.99	0.6497	99.5	3.532

Pagal gautus duomenis matyti, kad visos buitinės lemputės naudojančios šviesos diodus generuoja reaktyviają talpinę galią. Teigiamas rodiklis parodo, jog reaktyvioji galia yra indukcinio tipo, o neigiamas rodiklis – talpinio tipo. Vienodos galios 15W „Okko“ ir „Spectrum“ lemputės turi skirtingą galios faktorių, kas nulemia jog reaktyviosios galios dydis skiriasi apie 20%, taip pat prie to prisideda ir didesnės šalutinės harmonikos. Iš tyrime buvusių lempučių geriausius parametrus parodė „Philips“ firmos lemputė, kuri turi didžiausią PF, šalutinės harmonikos įtampos ir srovės mažiausios. Nors ir ši lemputė yra 7 W galios, bet ji vienintelė atitinka Europos nustatytus normatyvus (1 Lentelė).

Žemiau pateikta srovės ir įtampos diagrama, kuri parodo „Okko“ lemputės reaktyviosios galios tipą. Kai srovė lenkia įtampą, tai induktyvinė, o kai nuo jos atsilieka - talpinė. Kuo didesnis persislinkimas srovės ir įtampos, tuo reaktyvioji galia didesnė.

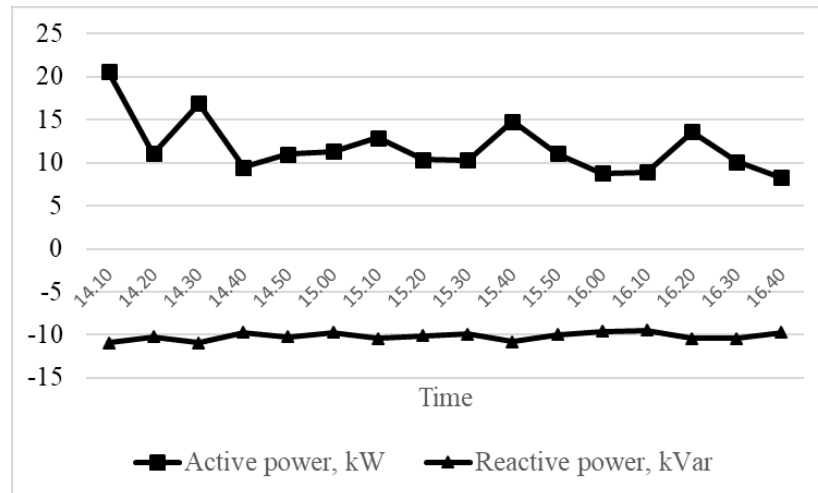


9 Pav. „Okko“ 15W lemputės srovės ir įtampos priklausomybė nuo laiko



10 Pav. „Okko“ LED lempuės srovės ir įtampos vektorinė diagrama

LED reaktyviosios galios generavimo pavyzdį galime matyti „Žalgirio“ arenoje Kaune. Ant arenos sienos įrengtas ekranas sudarytas iš RGB (raudonos, žalios, mėlynos) šviesos diodų ir dėl jų galios ir pačio ekrano dydžio yra didelės aktyvios ir reaktyvios galios. Pagal surinktus duomenis 11 Pav. matyti, kad 32kW LED sieninio ekrano - „DA80.1600RGB-50M LED“ reaktyvioji galia didesnė nei aktyvioji. Esančios talpinio pobūdžio kompensavimo sistemos nesugeba deramai kompensuoti reaktyviosios galios. Dėl šios priežasties areną eksploatuojanti įmonė susiduria su papildomomis išlaidomis.



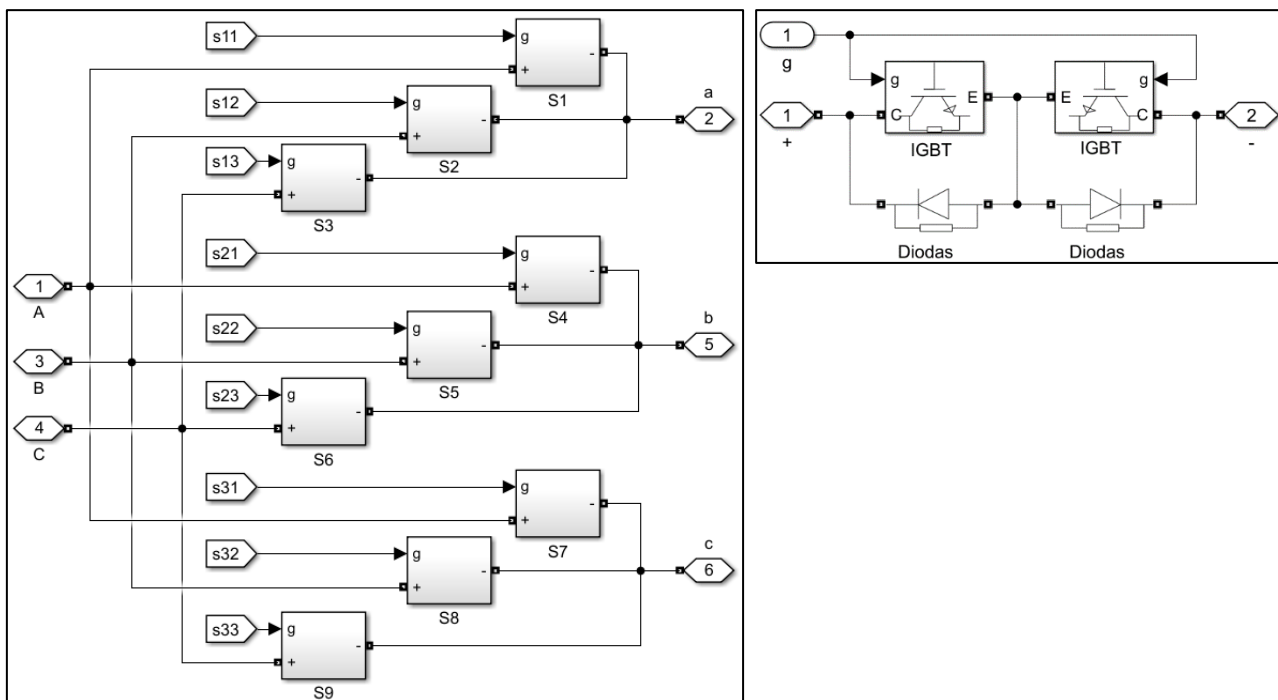
11 Pav. Aktyviosios ir reaktyviosios galios duomenys gauti iš 0.4 kV įtampos paskirstymo linijos taško, prie kurio prijungtas LED sieninis ekranas

Žalgirio arenoje buvo įdiegtas LED sieninis ekranas ir senoji reaktyviosios galios kompensavimo sistema tapo nebetinkama, ji nepajėgi kompensuoti naujai sugeneruojamą reaktyviąją galią. Arenos projektavimo ir statymo laikotarpiu pagrindiniai reaktyviosios galios šaltiniai buvo elektros varikliai, o tai induktyvioji apkrova, bet šiuo metu diegiami elektros varikliai su tradicine dažnio pavarą, montuojami LED šviestuvai ir jie visi generuoja talpinę reaktyviąją galią. Kad būtų išlaikoma pusiausvyra, reiktų atnaujinti kompensavimo grandinę, kas reikalautų didelių lėšų, todėl siūlomas ekonomiškai patrauklesnis variantas – tradicinės dažnio pavaros keitimas į matricinę dažnio pavarą.

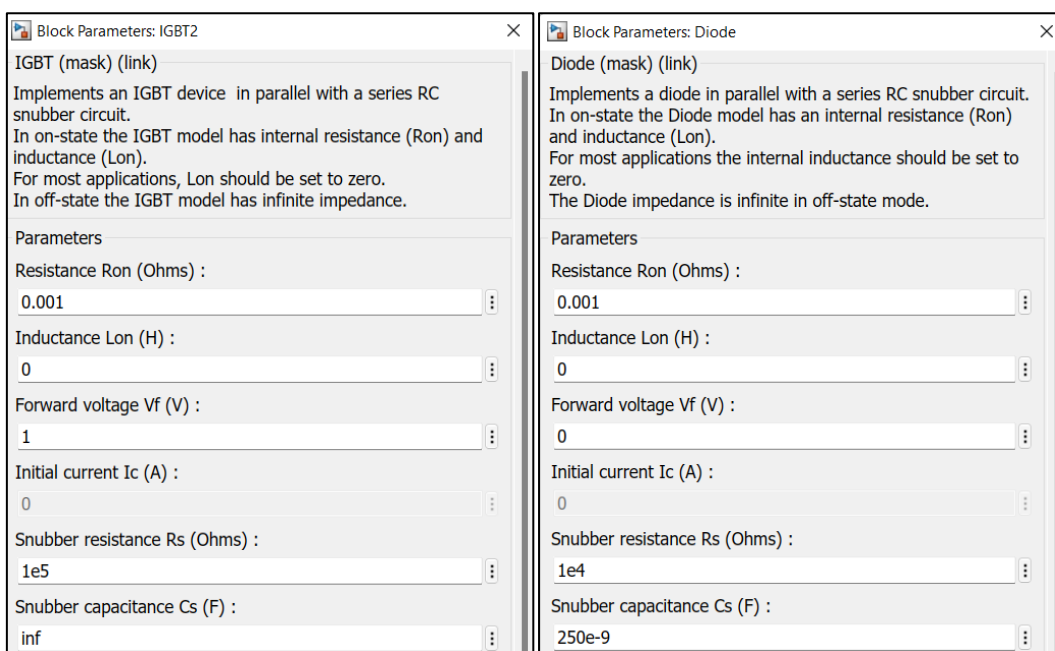
2.2. Matlab Simulink modelis

2.2.1. Matricinės pavaros modelis Matlab-Simulink aplinkoje

Matricinio keitiklio standartinio Matlab-simulink modelio bloko posistemėje yra devynios poros IGBT tipo tranzistorių (S1,S2...), kurių bendras emiteris, jie reguliuoja srovės tekėjimo kryptį, o diodai blokuoja atgalinę įtampą atsirandančią dėl induktyvinių apkrovų. Taip yra sukuriamas kelias atvirkštinei srovei ir išsaugomas tranzistorius. (A,B,C) atitinka kiekvieną trifazio šaltinio maitinančio matricinį keitiklį fazę, o IGBT valdymo signalai (s11, s12 ...)

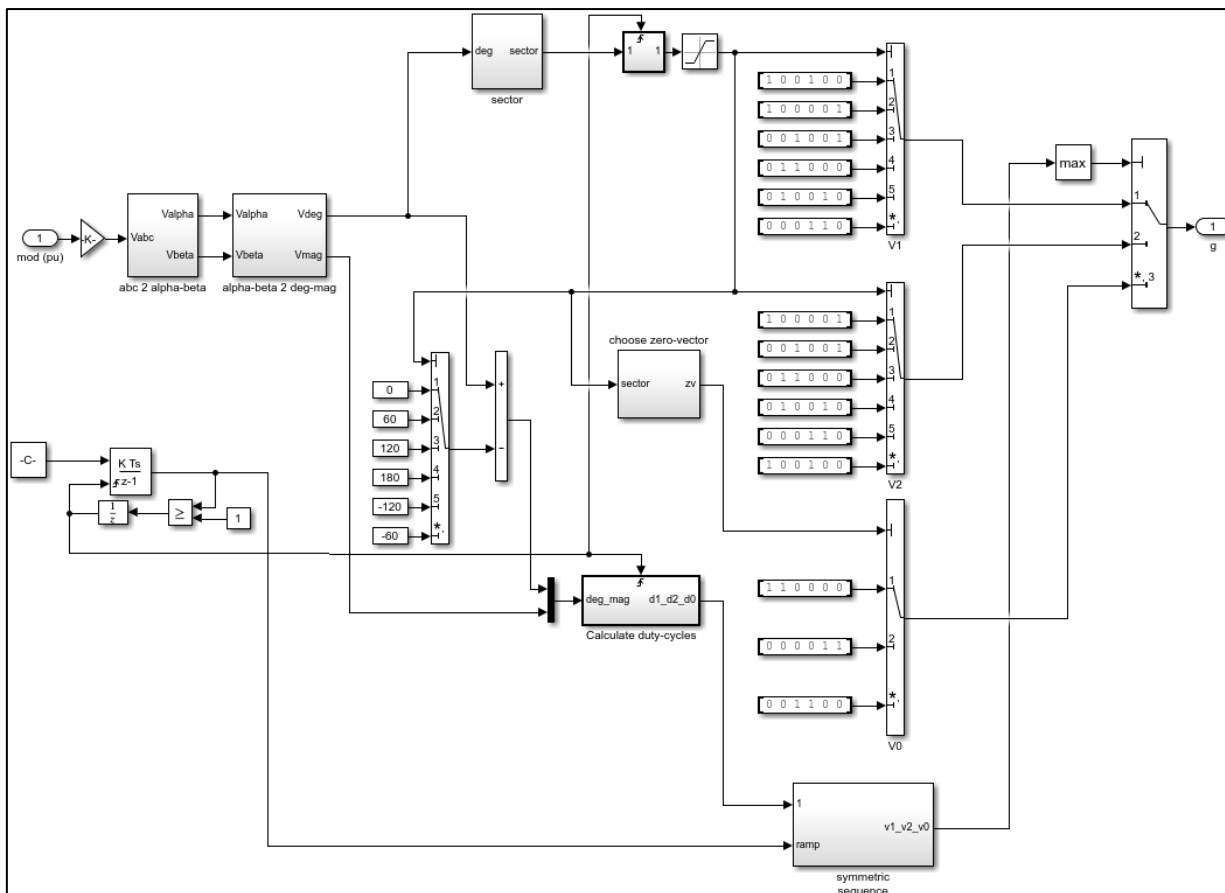


12 Pav. Matricinio keitiklio modelio sandara ir S1 bloko posistemė.



13 Pav. IGBT ir diodo blokų parametrai

2.2.2. Erdvinio vektoriaus moduliacijos modelis



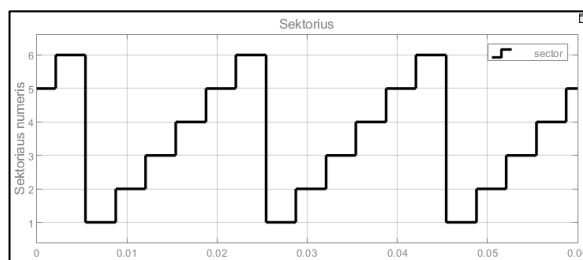
14 Pav. Posistemė atsakinga už erdvinio vektoriaus moduliacijos signalo formavimą (1. Priedas)

Valdymas sudarytas iš kelių etapų. Pirmiausia tai padauginame iš perdavimo koeficiento, dėl papildomos harmonikos, o toliau vyksta trifazių sistemos koordinatinių transformaciją į dviejų koordinatinių sistemą. Tam naudojama Klarko transformacija ir jos posistemė - „abc 2 alpha-beta“.

$$U_{\alpha} = \frac{2}{3} \left(U_a - \frac{1}{2} U_b - \frac{1}{2} U_c \right) \quad (14)$$

$$U_{\beta} = \frac{2}{3} \left(0 * U_a - \frac{\sqrt{3}}{2} U_b - \frac{\sqrt{3}}{2} U_c \right) \quad (15)$$

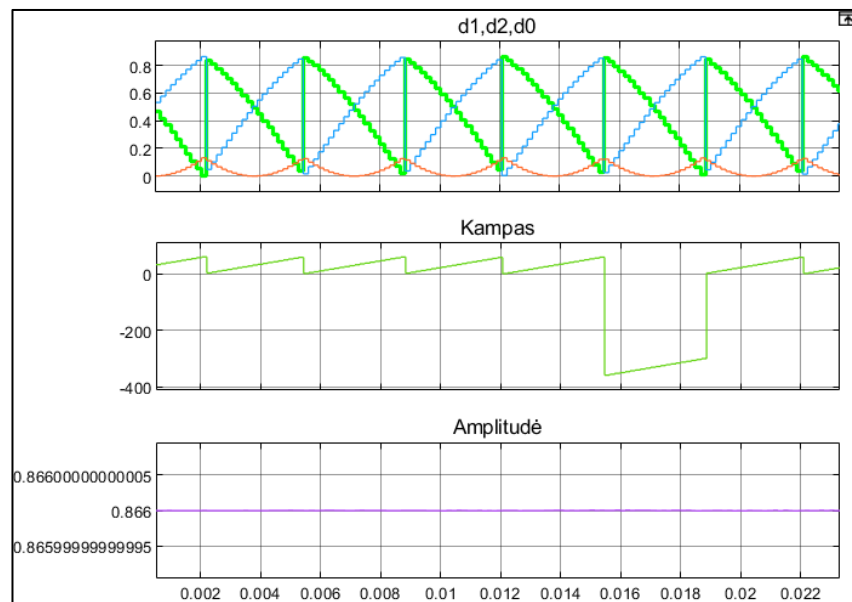
Sekantis žingsnis vektorių išraiška amplitude ir kampo dedamosiomis naudojant „alpha-beta 2 deg-mag“ posistemę. Pagal signalo vektoriaus kampą parenkamas vektorių sektorius naudojant „Sector“ posistmemę. Čia gaunamas kintamasis nuo 1 iki 6, kuris atitinka 15 pav. pavaizduotus sektorius. Pagal vektorių užduodamos ir jungiklių kombinacijos, kur erdvės vektoriaus amplitudė nėra lygi nuliui.



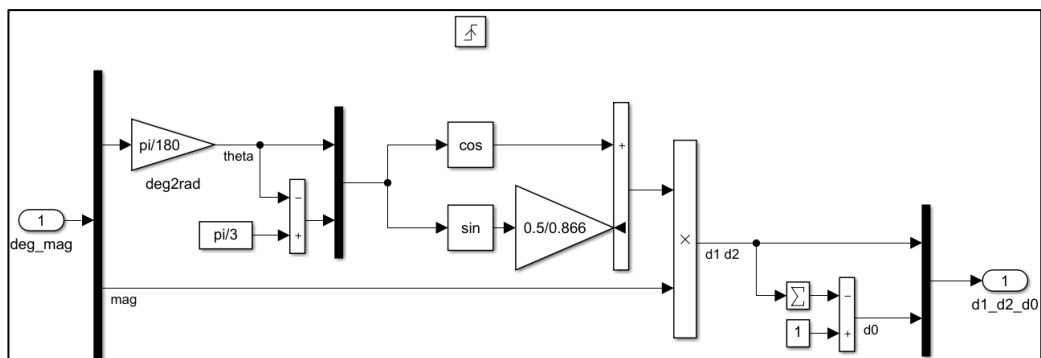
15 Pav. Sektoriaus numerio priklausomybė nuo laiko

Esant nuliniams vektoriams yra išskiriamos jungiklių kombinacijos ir parenkamas perdavimo koeficientas. Pagal erdvės vektoriaus kampą nustatomas skyrius ir parenkamos jungiklių kombinacijos, taip pat parenkamas išėjimo koeficientas nuo 1 iki 3.

Kadangi valdymas paremtas impulso pločio moduliacija, tai reikia apskaičiuoti šių impulsų plotį, tam naudojama „Calculate duty-cycles“ posistemė (27 pav.). Matome, kad vektoriaus amplitudė nekinta, tik keičiasi jos kampas. Valdymui naudojame diskrečias impulsų pločio reikšmes.



16 Pav. Vektoriaus kampo ir amplitudės priklausomybė nuo laiko (s)

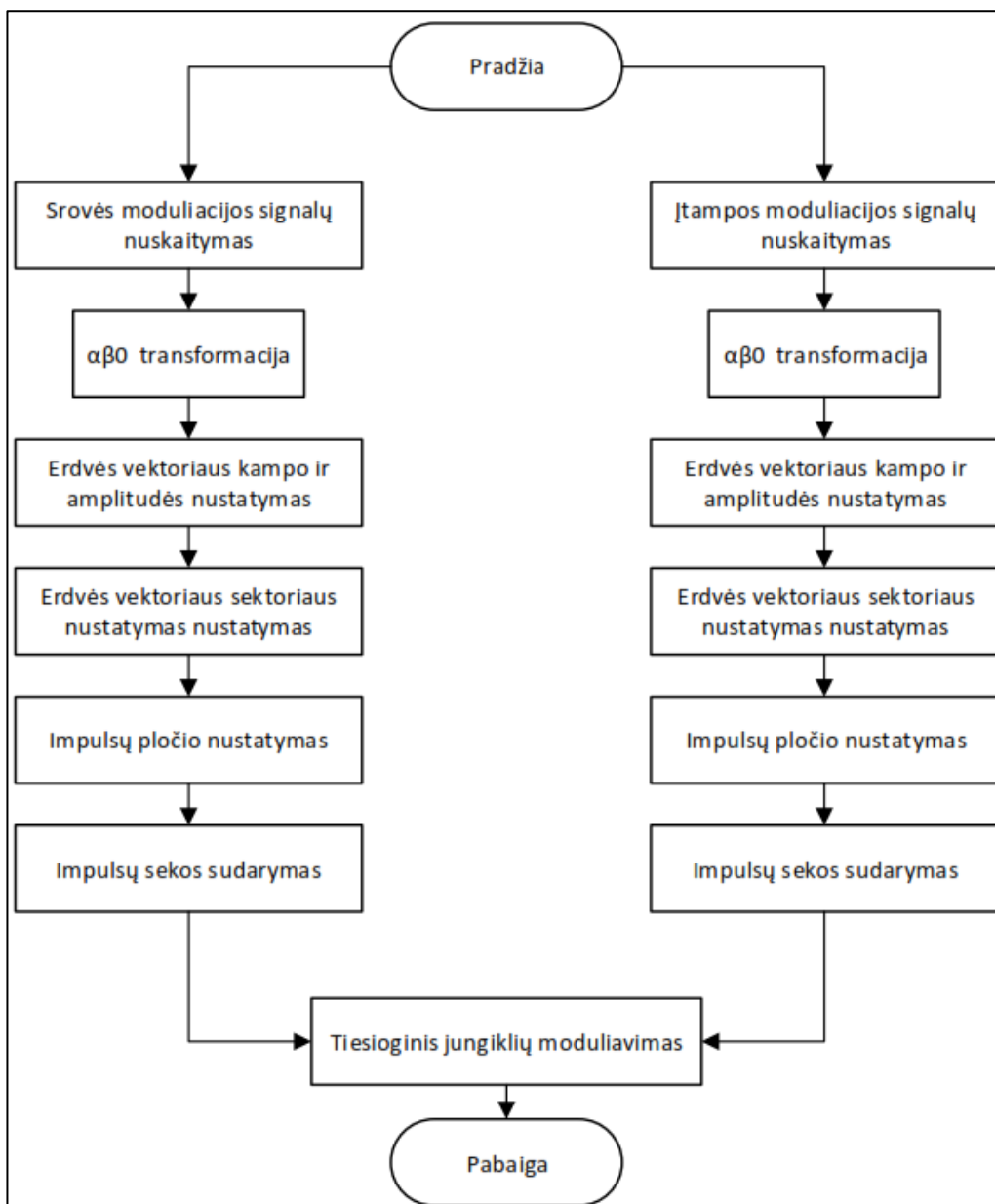


17 Pav. Impulsų pločio apskaičiavimo blokas ir jo schema

PWM – impulso pločio moduliacija

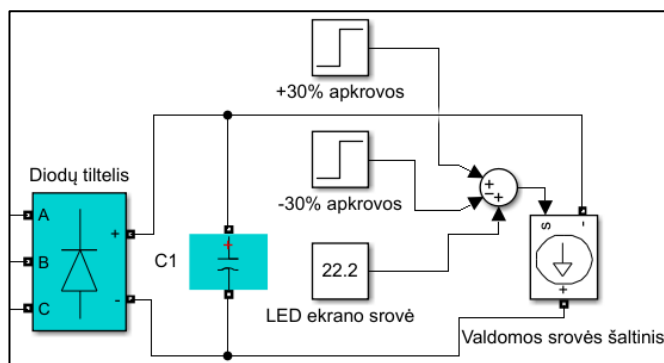
Iš gauto diskrečiojo signalo sukuriama trijų reikšmių impulso pločio moduliacijos signalai, kurie jau naudojami tiesioginiam moduliatoriui. Grafike matome kaip sugeneruoti impulsai.

Tamsesnės zonos reiškia, kad impulsai dažni, plotis mažas, kas nulemia kylančią amplitudę moduluoto signalo. Šiai operacijai atlikti naudojama „Symmetric sequence“ posistemė. Toliau sukuriama trijų impulso pločio moduliacijų signalai ir perduodami tiesioginiam komutatoriui (2. Priedas). Žemiau pateikiamas EVM algoritmas:



18 Pav. Erdvinio vektoriaus moduliacijos valdymo algoritmas

2.3. Reaktyviosios galios šaltinio modelis Matlab-Simulink aplinkoje



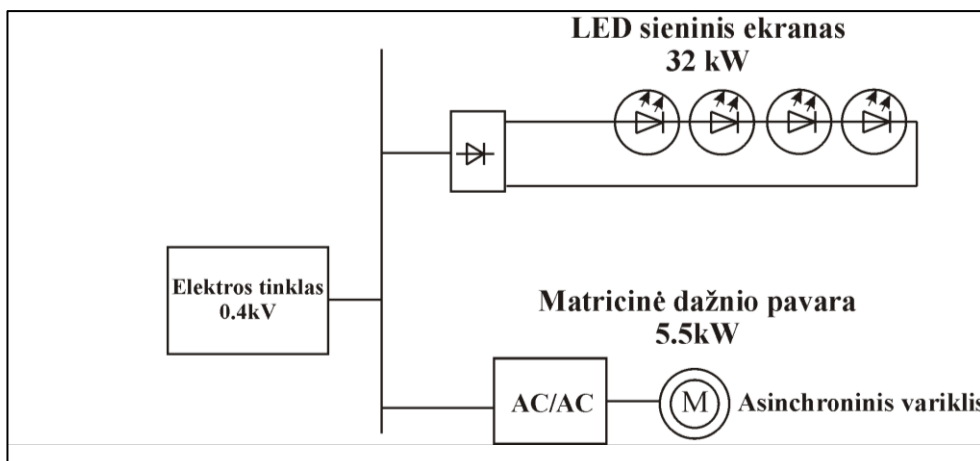
19 Pav. Žalgirio arenos sieninį LED ekraną imituojantis modelis

Modelį sudaro trifazės srovės lygintuvas – diodų tiltelis, kurį sudaro šeši diodai. Bloko parametrai pavaizduoti 20 Pav. Srovei išlyginti naudojamas standartinis kondensatoriaus blokas – C1. Iš literatūros apžvalgos žinoma, kad vienas šviesos diodas naudoja apie 22 mA, o ekrane jų yra 1000. Valdamos srovės šaltinis su nustatyta 22.2 amperų srove atitinka LED šviesos diodų grupę. „Step“ blokas su nustatyta 6,66 verte atitinka -30 % nuo visos ekrano apkrovos, o tai reiškia, kad dalis šviesos diodų bus išjungti po 0,04 sekundės ir įjungti papildomi 30 % po 0,08 sekundės.

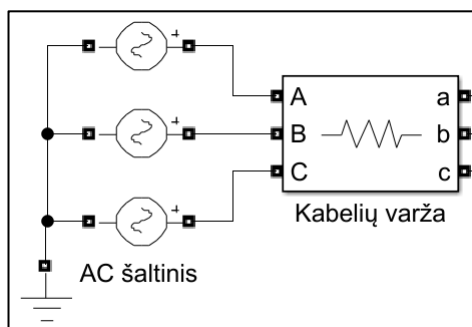
<p>Block Parameters: Diodų tiltelis</p> <p>Universal Bridge (mask) (link)</p> <p>This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. Press Help for suggested snubber values when the model is discretized. For most applications the internal inductance Lon of diodes and thyristors should be set to zero</p> <p>Parameters</p> <p>Number of bridge arms: 3</p> <p>Snubber resistance Rs (Ohms): 100</p> <p>Snubber capacitance Cs (F): 0.1e-6</p> <p>Power Electronic device: Thyristors</p> <p>Ron (Ohms): 1e-3</p> <p>Lon (H): 0</p> <p>Forward voltage Vf (V): .8</p> <p>Measurements: Device currents</p>	<p>Block Parameters: C1</p> <p>Parallel RLC Branch (mask) (link)</p> <p>Implements a parallel branch of RLC elements. Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.</p> <p>Parameters</p> <p>Branch type: C</p> <p>Capacitance C (F): 500*10^-6</p>	<p>Block Parameters: 30% apkrovos</p> <p>Step</p> <p>Output a step.</p> <p>Main Signal Attributes</p> <p>Step time: 0.04</p> <p>Initial value: 0</p> <p>Final value: 6.66</p> <p>Sample time: 0</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Interpret vector parameters as 1-D</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Enable zero-crossing detection</p>
---	---	--

20 Pav. Diodų tiltelio, kondensatoriaus ir „Step“ – apkrovos bloko parametrai

2.4. Matricinės pavaros ir reaktyviosios galios šaltinio prijungto prie elektros tiekimo linijų modelis

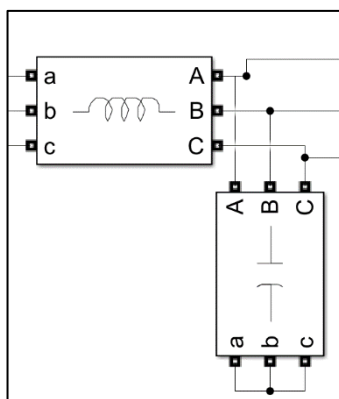


22 Pav. Matricinės pavaros, kompensuojančios reaktyviąją galią tinkle, sistema. Išsamus Matlab-Simulink sistemos modelis – 3 priedas.



21 pav. Matlab Simulink modelio fragmentas 0,4kV tinklui imituoti

- „Ideal sinusoidal AC voltage source“ blokas imituoja vienos fazės tinklo įtampą, kai amplitudė 322 V, o dažnis 50 Hz.
- RLC blokas su nustatyta $0,036 \Omega$ varža atitinka kabelių vidinę varžą.

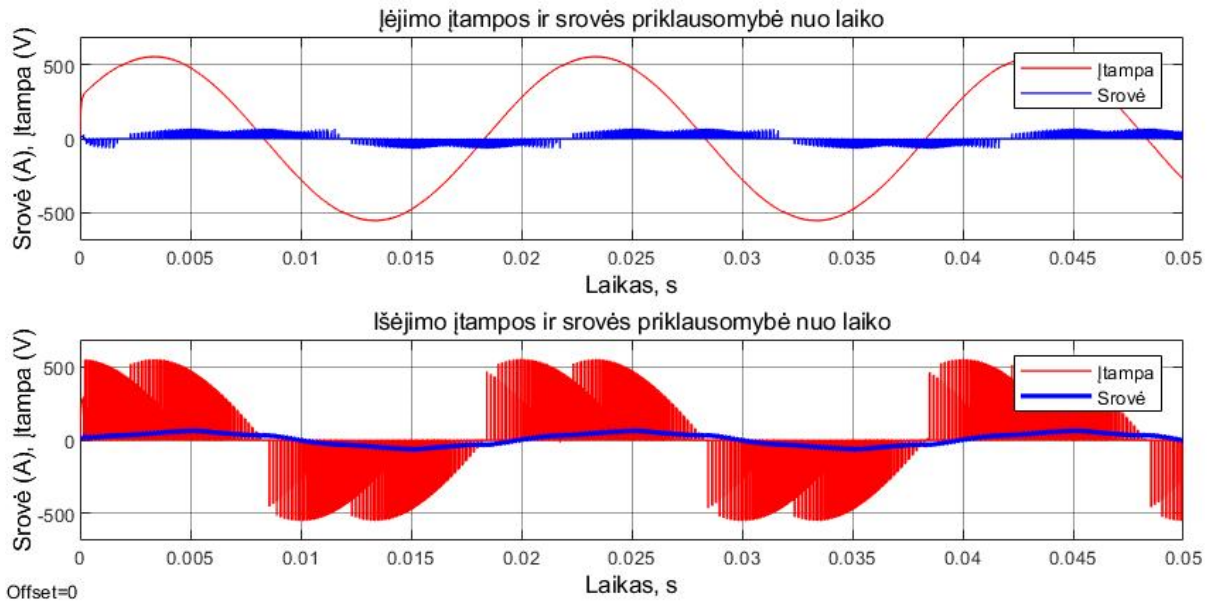


23 Pav. Šalutinių harmonikų filtras

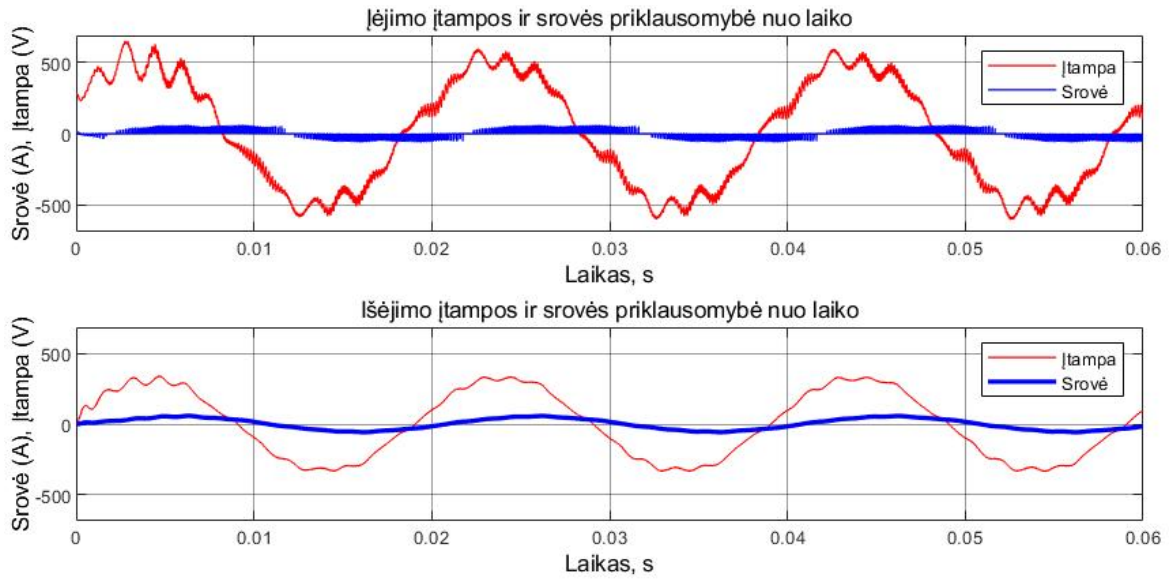
LC filtrai sudaryti iš kondensatorių ir induktyvinių elementų. Modelyje jų paskirtis yra išlyginti įėjimo srovę, kad būtų sumažinti elektromagnetiniai triukšmai - EMI. Kondensatorius parenkamas toks, kad būtų užtikintas galios koeficientas $>0,8$, kurio vardinė galia yra 10 %. Induktyvusis

elementas parenkamas pagal IEEE 519-1992 rekomendacijas dėl harmonikų [21]. Šių filtrų naudą galime matyti 24 ir 25 paveikslėliuose.

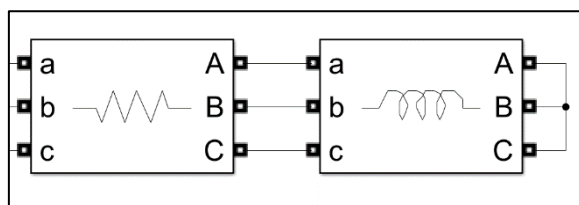
- Kondensatoriaus talpa – 0.00293 H
- Ritės induktyvumas – 30.1 μF



25 Pav. Įėjimo ir išėjimo srovių bei įtampų oscilogramos be šalutinių harmonikų filtro

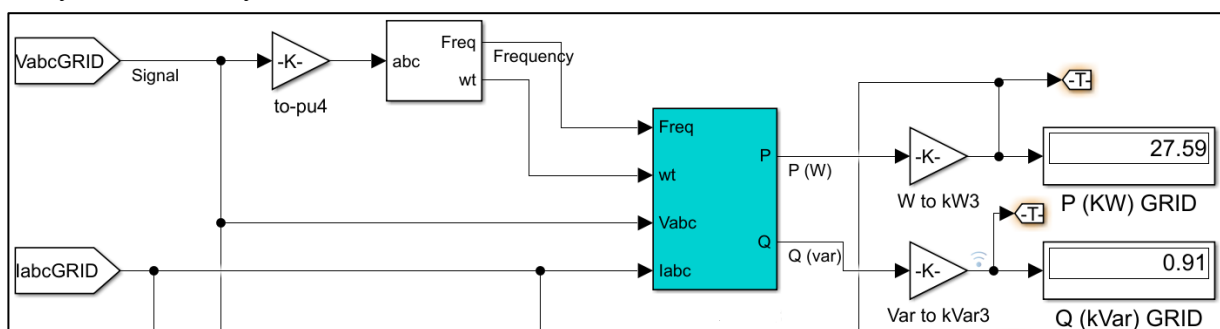


24 Pav. Įėjimo ir išėjimo srovių bei įtampų oscilogramos be šalutinių harmonikų filtro



27 Pav. 5.5 kW asinchroninio variklio imitacija

„RLC“ blokas su nustatyta 3,5 Ω varža atitinka variklio apvijų varžą, o apvijų 0,00079 H induktyvumas nustatytas su kitu „RLC“ bloku.



26 Pav. Aktyviosios ir reaktyviosios galios matavimo modelis

Naudodami „PLL“ bloką nustatome grandinės įėjimo įtampos dažnį (Freq) ir fazės kampą ω (wt).

Mėlynai pažymėtas blokas atlieka aritmetiką:

$$P = 3 \cdot \frac{|V_1|}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|I_1|}{\sqrt{2}} \cdot \cos(\varphi) \quad (14)$$

$$Q = 3 \cdot \frac{|V_1|}{\sqrt{2}} \cdot \frac{|I_1|}{\sqrt{2}} \cdot \sin(\varphi) \quad (15)$$

$$\varphi = \varphi_{V_1} - \varphi_{I_1} \quad (16)$$

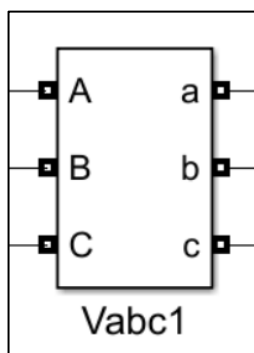
P – aktyvioji galia;

Q – reaktyvioji galia;

V_1 – momentinė įtampa;

I_1 – momentinė srovė;

φ – fazės kampas.



28 Pav. Matlab Simulink blokas „Three – Phase V-I Measurement“

Tinklo įtampos ir srovės matavimams naudojamas standartinis Matlab-Simulink blokas. Blokas momentinę įtampą matuoja pagal (17) formulę, o srovę pagal (18) formulę:

$$V_{abc}(pu) = \frac{V_{ph}(V)}{V_{base}(V)} \quad (17)$$

$V_{abc}(pu)$ – momentinė įtampa;

$V_{ph}(V)$ – įtampa grandinėje;

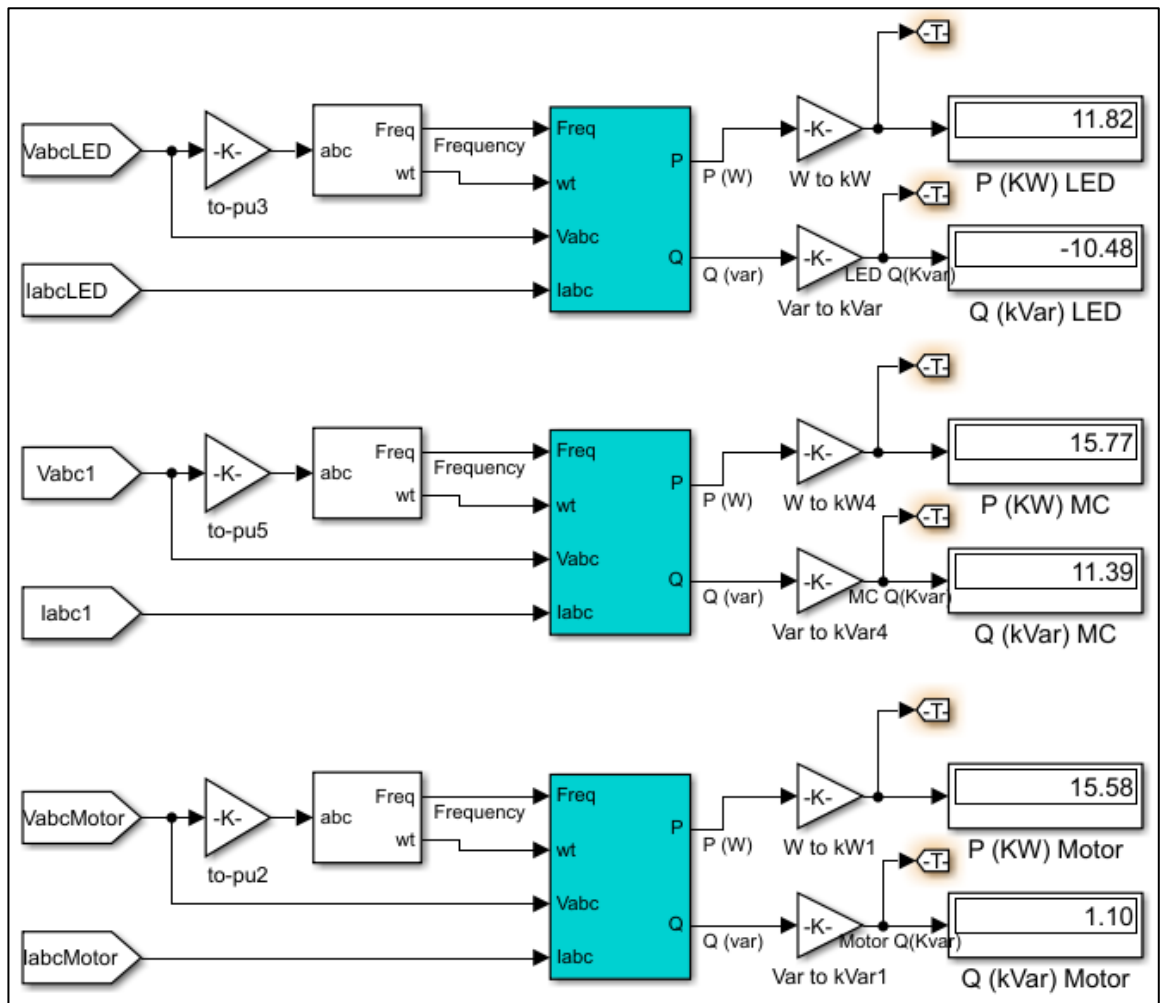
$V_{base}(V)$ – efektinė įtampa

$$I_{abc}(pu) = \frac{I_{ph}(A)}{I_{base}(A)} \quad (18)$$

$I_{abc}(pu)$ – momentinė srovė;

$I_{abc}(I)$ – srovė grandinėje;

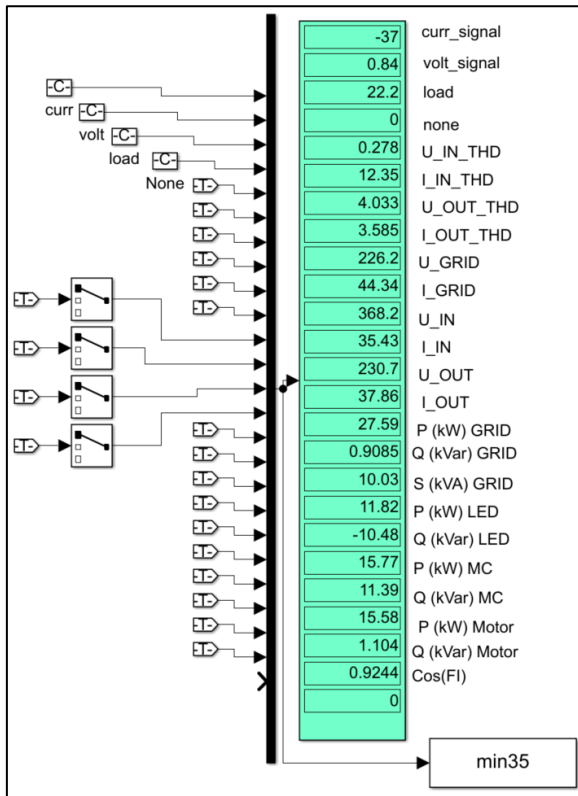
$I_{base}(I)$ – efektinė srovė.



29 Pav. LED ekrano, matricinio dažnio keitiklio, asinchroninio variklio elektros grandinių aktyviosios ir reaktyviosios galios matavimo blokinės sistemos

2.5. Sumodeliuotos sistemos duomenų surinkimas atliekant simuliaciją

Matlab/Simulink programoje parašomas scenarijus, kuris paleidžia simuliacijos ciklą, kaskart keisdamas srovės fazės poslinkio kampą nustatytu žingsniu. Visi duomenys rašomi į Excel failą.



A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Srovės	tampos	THD(%) Uin	THD(%) Iin	THD(%) Uout	THD(%) Iout	P(kW) GRID	Q(kVar) GRID	P(kW) Motor	Q(kVar) Motor	U_in	I_in	U_out	I_out	Deg	cos phi
-180	0.6	0.284555087	18.54482761	3.576551881	2.92163528	24.0550459	-11.55197111	10.25568292	0.725468247	396.5807497	25.42471646	202.8861443	33.303545	-41.56559114	0.488617434
-180	0.65	0.287987439	19.30703985	5.700165741	4.601099675	26.13382577	-11.46774075	12.00640976	0.847672137	398.7253947	28.6940877	219.73962	36.05764275	-41.55509802	0.650393927
-180	0.7	0.287524011	17.79195656	6.361937655	5.064385821	28.27654354	-11.379958	13.79034463	0.97293191	399.3192057	31.94351929	235.6910771	38.67166481	-41.54794519	0.791934463
-180	0.75	0.282876659	14.33594178	5.900459932	4.682495313	30.50881377	-11.27360593	15.70007714	1.10704807	398.4421781	35.23457726	251.1386572	41.21149597	-41.55096794	0.906711291
-180	0.8	0.275977449	11.40300658	5.284998049	4.235794464	32.78887387	-11.16498993	17.63752299	1.244110697	397.3736631	38.54531249	266.088286	43.67098016	-41.55308543	0.979094637
-180	0.85	0.269326376	8.817447828	4.466429112	3.721428668	35.18115154	-11.03959145	19.66872491	1.38686398	396.4040786	41.90563357	280.7340693	46.08217032	-41.55558416	0.998977579
-180	0.9	0.263946853	6.586373191	3.597433436	2.971170544	37.5367005	-10.91383652	21.63256501	1.52859417	395.9938833	45.1685267	294.5368736	48.3532414	-41.54318528	0.955991543
-180	0.95	0.263191860	4.300961396	3.364336101	1.664193562	39.63066524	-10.73740267	23.37038296	1.654904626	396.0043216	47.89803904	306.6413063	50.31056293	-41.53566637	0.9829219623

30 Pav. Matlab Simulink duomenų surinkimo sistema ir duomenų perkeltų į Excel failą iškarpa.

Programos kodas:

```
for Curr = -60:1:60 % Srovės fazės poslinkis
```

```
    Row_Num = Row_Num + 1; % Eilutės numeris
```

```
    num2str(Row_Num);
```

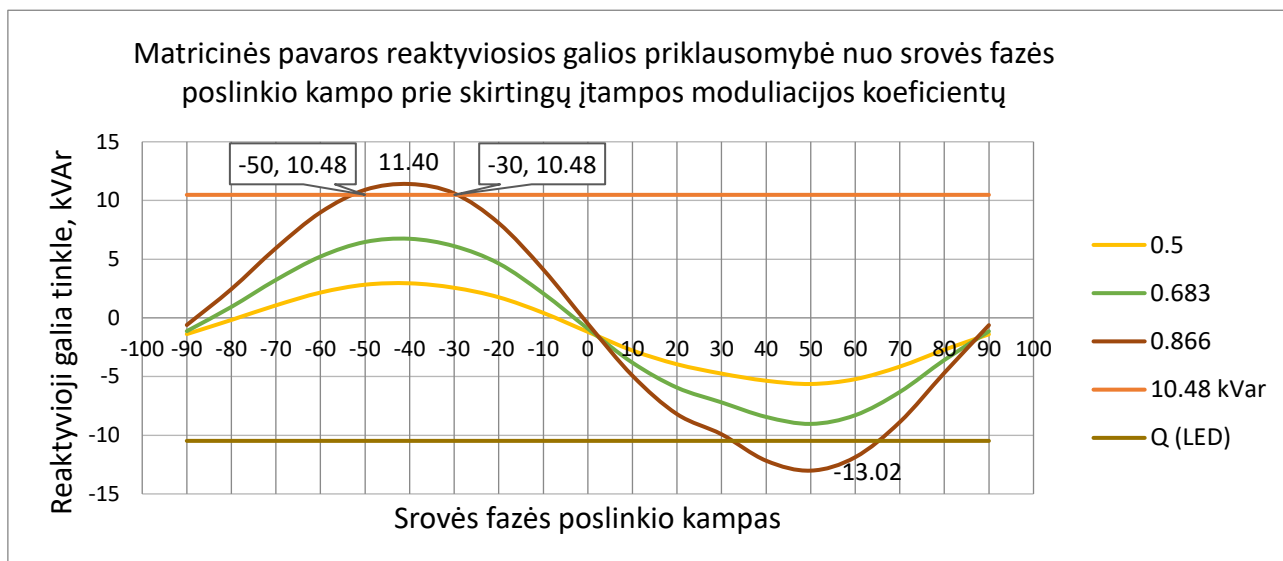
```
sim(,MC_15kW_plius_AC_DC_LED.slx',3/50) % Simuliacijos paleidimas
```

```
    xlswrite(,Duomenys.xlsx',min35, ,Duomenys', [,A' num2str(Row_Num)]); % Duomenų įrašymas į Excel failą
```

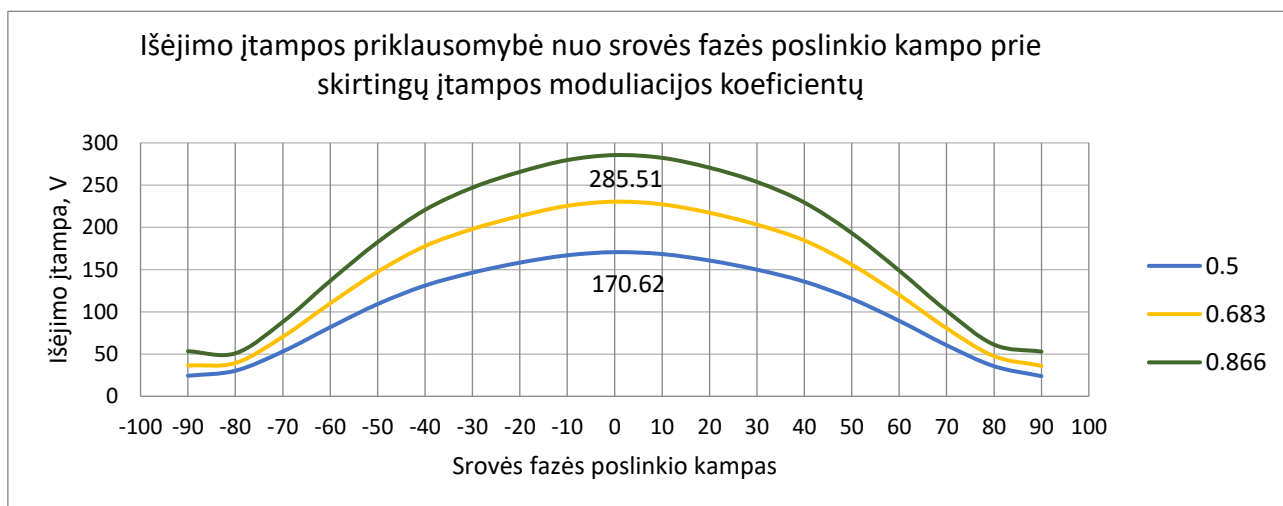
```
    end
```

```
end
```


3. Modeliavimo rezultatai



31 Pav. Matricinės pavaros reaktyviosios galios generavimo priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio kampo prie skirtingų išėjimo įtampos moduliacijos koeficientų

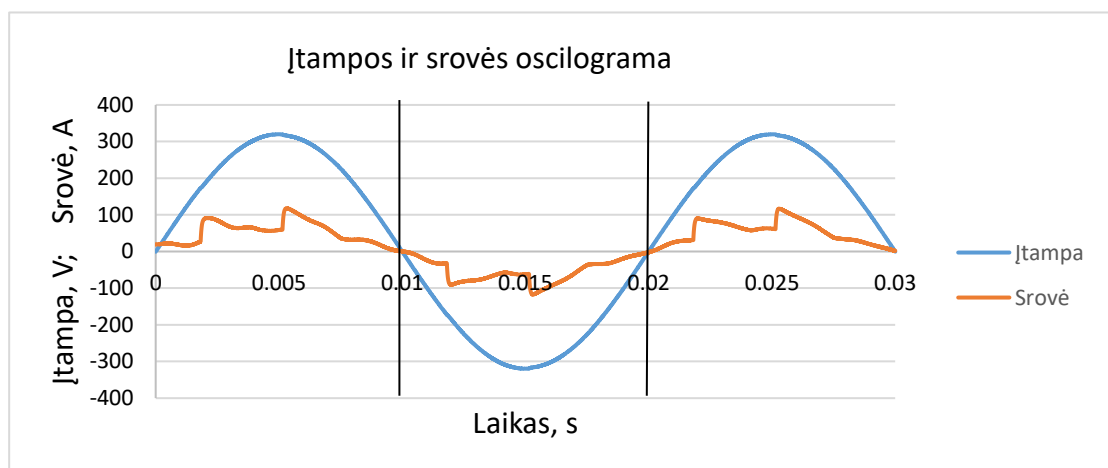


32 Pav. Išėjimo įtampos priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio kampo prie skirtingų įtampos moduliacijos koeficientų

Atliekant tyrimą, buvo keičiamas matricinės pavaros erdvinio vektoriaus moduliacijos srovės fazės poslinkio kampo ir išėjimo įtampos moduliacijos koeficiento reikšmės, o tai lėmė reaktyviosios galios, kurią generuoja matricinė elektros pavara kitimą. Nustatyta, kad ši elektros pavara gali generuoti nuo 2,66 kVAr iki 35,74 kVAr induktyvinės galios į tinklą. Matricinio dažnio keitiklio išėjimo įtampa siekia nuo 23,99 VAC iki 285,96 VAC. Pagal tai nustatytos ribos ties kuriomis vyksta LED ekrano reaktyviosios galios kompensavimas.

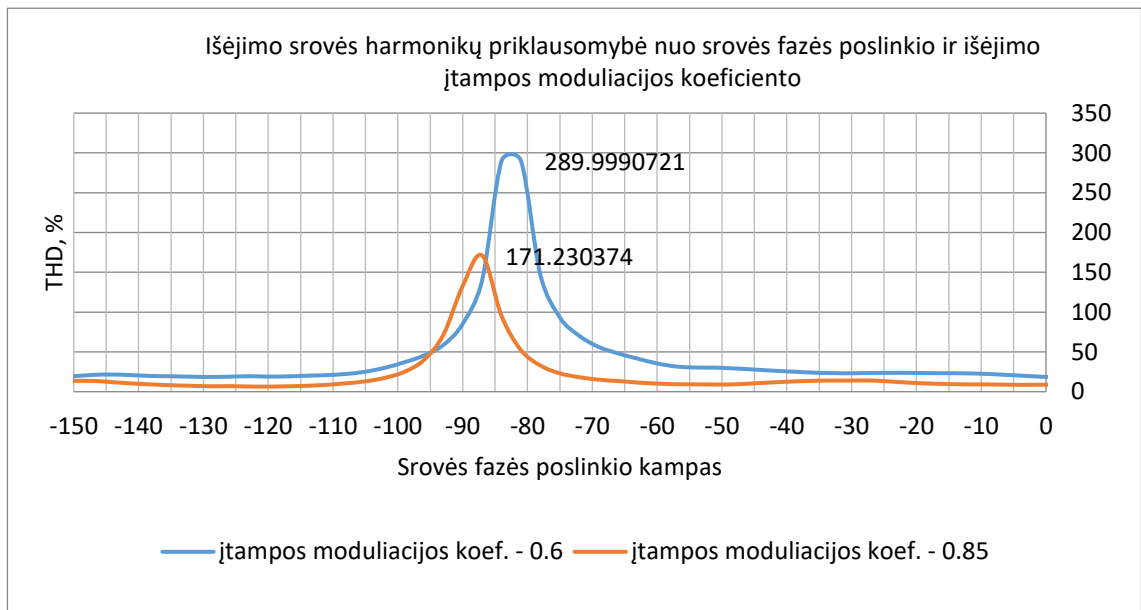
Srovės fazės poslinkis	Įtampos amplitudė	Įėjimo įtampos THD (%)	Įėjimo srovės THD (%)	Išėjimo įtampos THD (%)		Išėjimo srovės THD (%)	Išėjimo įtampa (V)	Q (kVAr) tinklas	Galios faktorius
									Cos Φ
-30	0.86	0.258	4.814	14.013		4.118	245.72	-0.017	0.944
-37	0.84	0.28	4.829	14.388		4.121	223.48	-0.01222	0.916
-46	0.84	0.284	4.404	11.856		3.615	193.11	-0.00637	0.877
-52	0.86	0.278	3.62	9.229		2.945	173.03	0.01217	0.851
-14	1	0.253	2.475	6.066		1.945	306.49	-2.891	0.971

Buvo atrinkti keturi tyrimo rezultatai prie kurių pasiektos didžiausios galios faktoriaus reikšmės nulemiančios geriausių tinklo reaktyviosios galios kompensavimą. Bet tik viena iš jų atitiko reikalavimą, kad išėjimo įtampos nuokrypis nuo variklio vardinės įtampos neviršytų 5% [21]. Šiai kompensavimo sistemai buvo pritaikyti parametrai, kai srovės fazės poslinkio kampas -37, o įtampos moduliacijos koeficientas – 0,84. Pasiektas 0,916 galios faktoriaus koeficientas, tai parodo srovės ir įtampos oscilograma, nes srovė nebelenkia įtampą. Tačiau srovės kreivė yra iškraipoma dėl šalutinių harmonikų, kurios siekia 4,83 %.



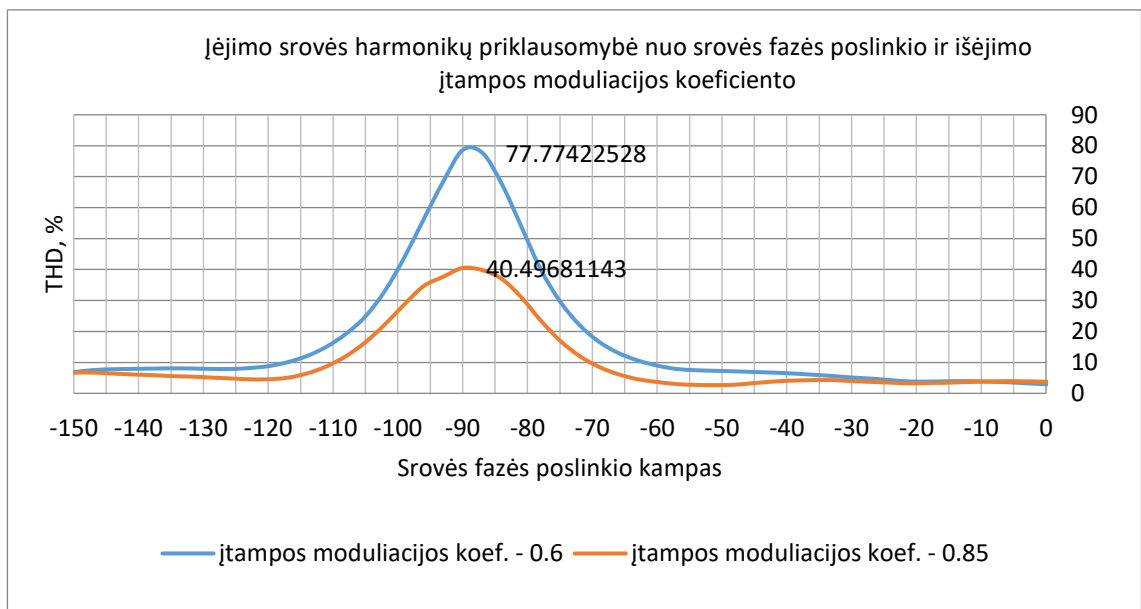
33 Pav. Įtampos ir srovės oscilograma, prie tyrimo metu gautos didžiausios galios faktoriaus reikšmės

Keičiant įtampos moduliacijos koeficientą, galima sumažinti harmonikas, bet didinant moduliacijos indeksą kyla įtampa atitenkanti variklio apvijoms. Priklausomybes netiesinių iškraipymų parodo grafikai pavaizduoti 35,36,37,38 pav.

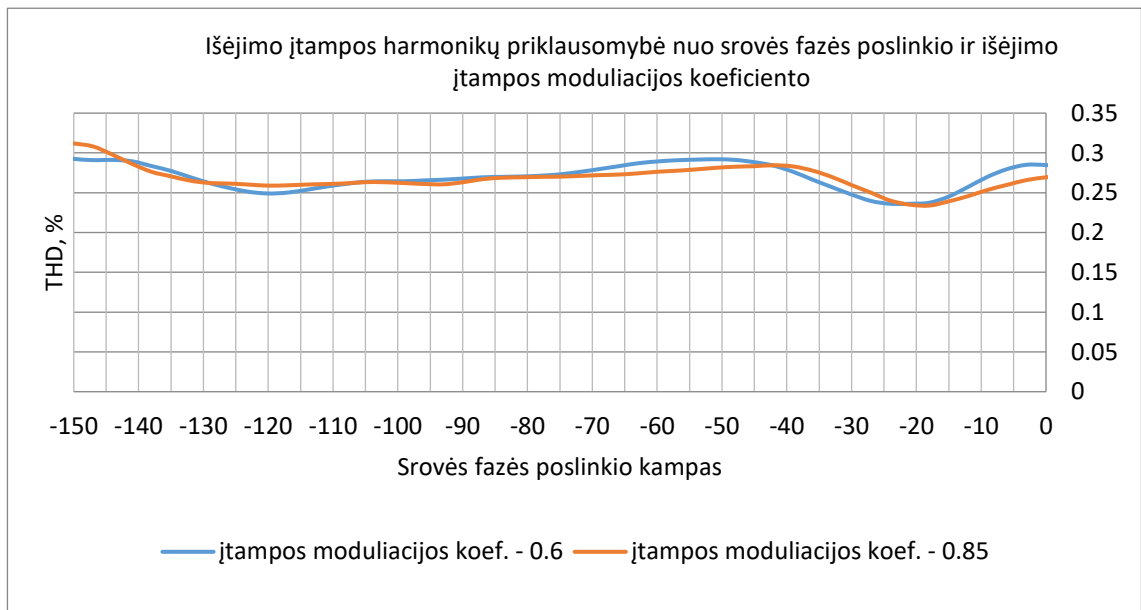


34 Pav. Išėjimo srovės harmonikų priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio ir išėjimo įtampos moduliacijos koeficiento

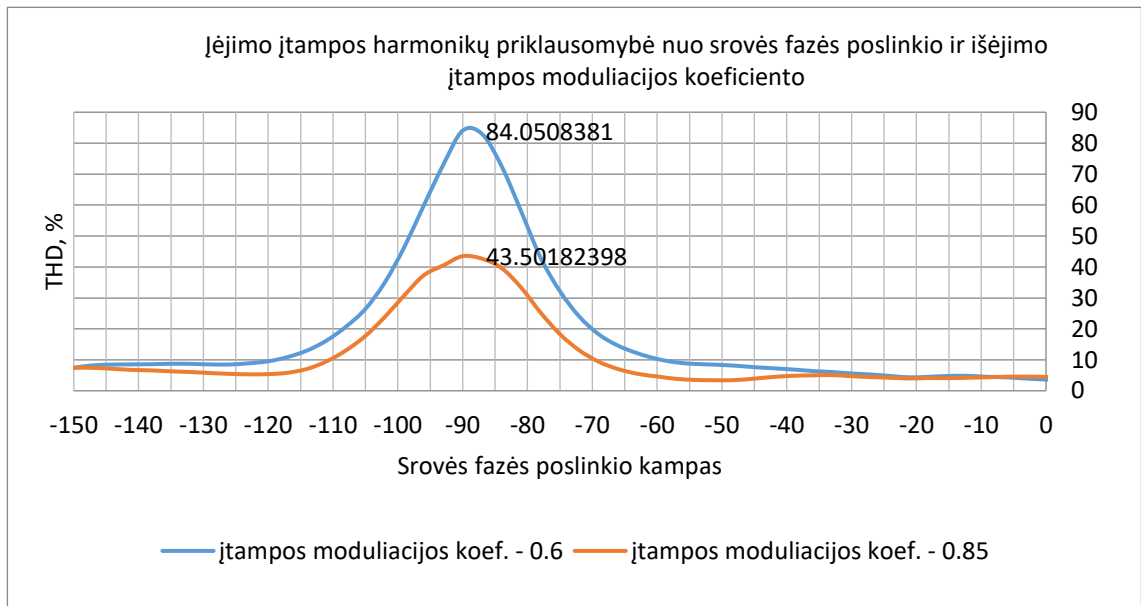
Srovės harmonikos išėjime esant žemam įtampos moduliacijos koeficientui išauga iki 290 %, kai srovės fazės poslinkio kampas ties -83. Keliant įtampos moduliaciją harmonikos dydis mažėja, bet išlieka aukštas – 160 %. Srovės harmoniniai iškraipymai TMDK įėjime prie srovės fazės poslinkio -85, siekia nuo 40 % iki 77 % priklausomai nuo moduliacijos koeficiento. Modeliuojamo tinklo kompensacija vyksta ties (-40) – (-30) srovės fazės kampo riba, o šioje vietoje įėjimo harmonikos iki 8 %, o srovės išėjimo iki 25 %.



35 Pav. Įėjimo srovės harmonikų priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio ir išėjimo įtampos moduliacijos koeficiento



36 Pav. Išėjimo įtampos harmonikų priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio ir išėjimo įtampos moduliacijos koeficiento

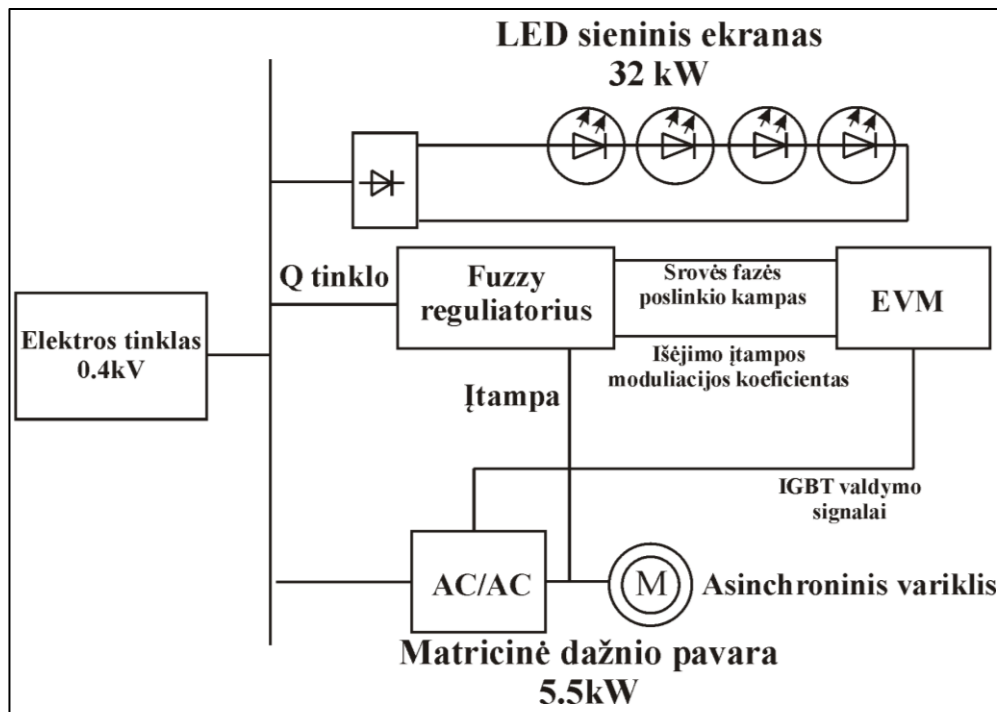


37 Pav. Išėjimo srovės harmonikų priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio ir išėjimo įtampos moduliacijos koeficiento

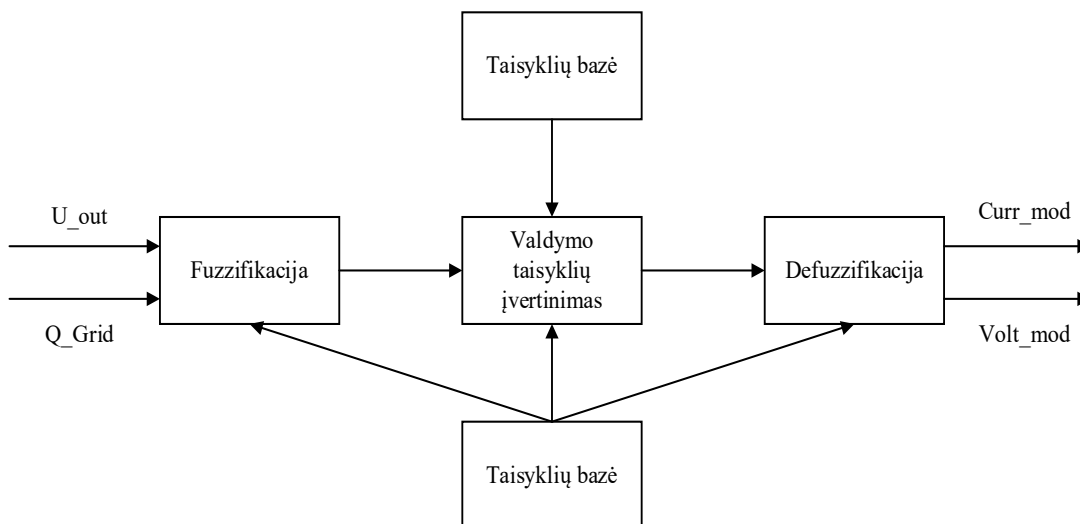
Harmonikos įtampoje ties TMDK įėjimu esant žemam įtampos moduliacijos koeficientui išauga iki 84 %, kai srovės fazės poslinkio kampas ties -87. Keliant įtampos moduliaciją iki 0,85 - harmonikos dydis sumažėja iki 43 %. Įtampos išėjime harmoniniai iškreipymai svyruoja nuo 0,23 % iki 0,3 %, įtampos moduliacijos koeficientas šioje vietoje turi mažą įtaką harmoniniams iškreipymams. Modeliuojamo tinklo kompensacija vyksta ties (-40) – (-30) srovės fazės kampo riba, o šioje vietoje įėjimo įtampos harmonikos iki 8 %, o išėjime iki 0,28 %. Ties srovės fazės poslinkio kampu -3, pasiekiamos mažiausios išėjimo įtampos harmonikos.

4. „Fuzzy“ regulatoriaus pritaikymas modeliuojamai sistemai

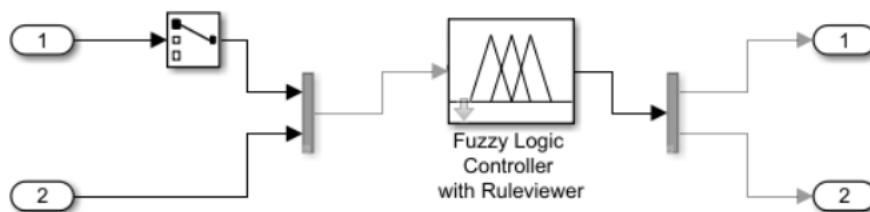
„Fuzzy Logic“, tai informacijos apdorojimo būdas, leidžiantis apdoroti kelias vertes per tą patį kintamąjį. Naudojant nekonkrečią logiką bandoma spręsti problemas naudojant atvirą, netikslų duomenų spektrą, kuris leidžia gauti daugybę tikslių išvadų. „Fuzzy“ logika sukurta spręsti problemas, atsižvelgiant į turimos informacijos visumą ir duoti geriausią įmanomą sprendimą turimai įvesčiai.



34 Pav. Fuzzy reguliatorius modeliuojamoje sistemoje

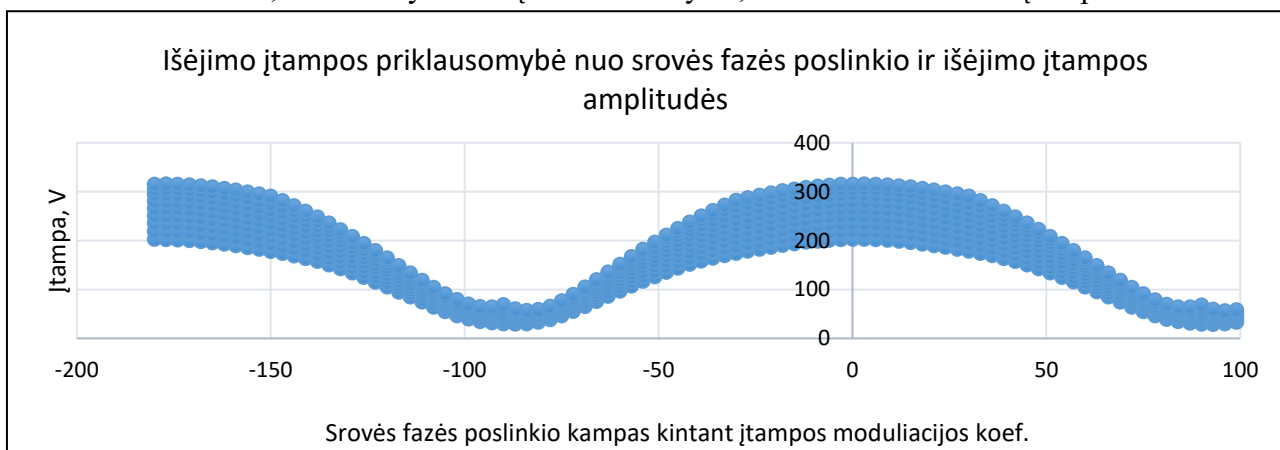


35 Pav. Fuzzy bloko konfigūracija

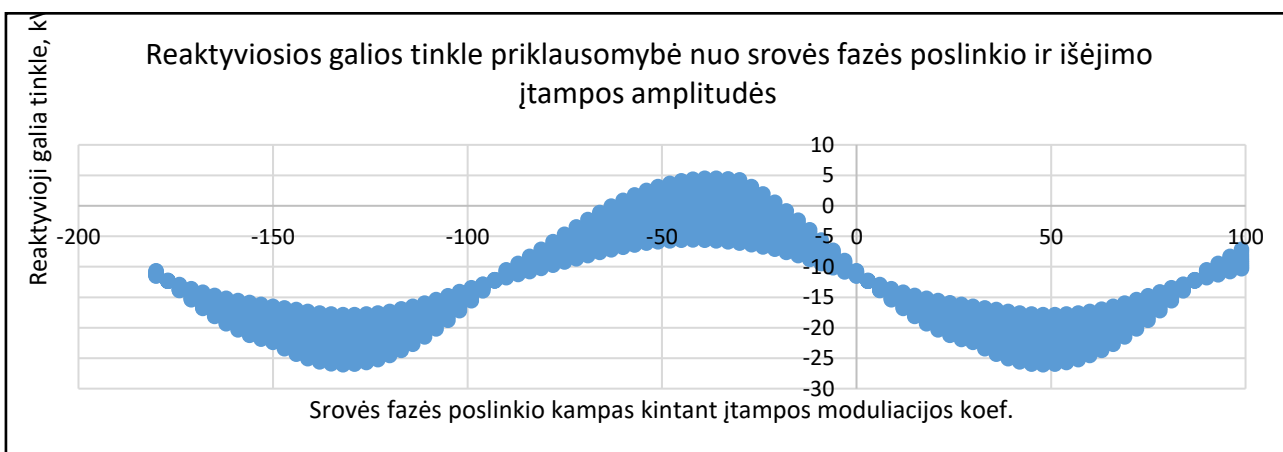


36 Pav. Matlab-Simulink Fuzzy regulatoriaus blokas.

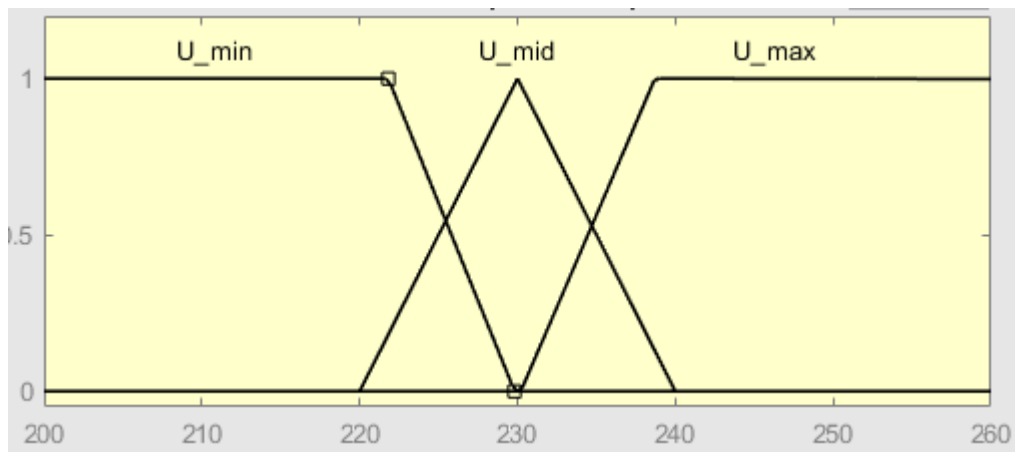
„Fuzzy“ regulatoriaus tikslas yra sumažinti sistemos paklaidą iki minimumo. Valdiklio įvesties dydis yra tiesiogiai susijęs su klaidos dydžiu. Šiame tyrime naudosime kaip įvestis išėjimo įtampą (U_{out}) ir reaktyviosios galios dydį tinkle (Q_{Grid}). Išėjimo signalai: srovės fazės poslinkio kampas ($Curr_{mod}$) ir įtampos amplitudės moduliacija ($Volt_{mod}$). Žemiau pateikti išėjimo įtampos ir reaktyviosios galios generavimo į tinklą grafikai (36 pav., 37 pav.), kurie buvo gauti tyrimo metu keičiant tiek srovės fazės poslinkio kampą, tiek išėjimo įtampos amplitudę. Atsižvelgiant į priklausomybių grafikus sukurtos Fuzzy reguliatoriui valdymo taisyklės. Pirmiausia fuzzifikacijai reikia nurodyti įėjimo signalų režius. Išėjimo įtampos signalui buvo pasirinkti režiai nuo 200 V iki 260 V, o centras yra mūsų siekiamas dydis, tai nominali variklio įtampa 230 V.



38 Pav. Išėjimo įtampos priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio kampo ir įtampos moduliacijos koeficientui.

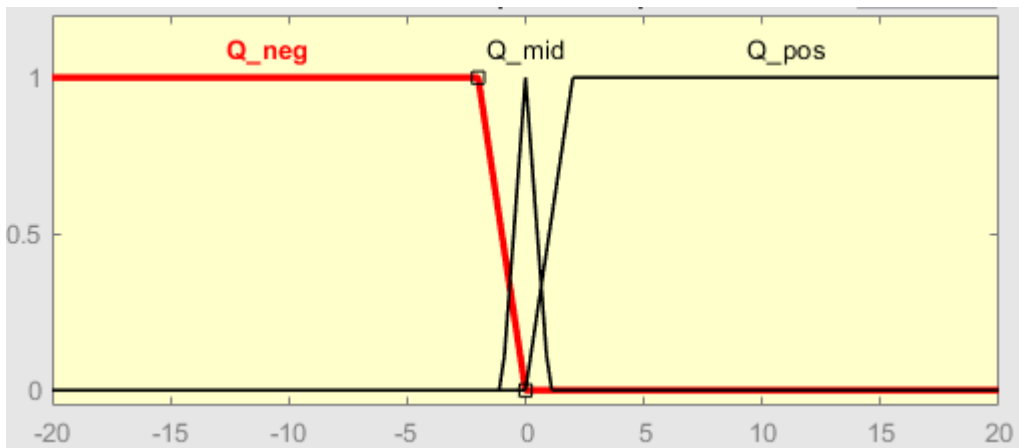


37 Pav. Reaktyviosios galios tinkle priklausomybė nuo srovės fazės poslinkio kampo ir įtampos moduliacijos koeficientui.

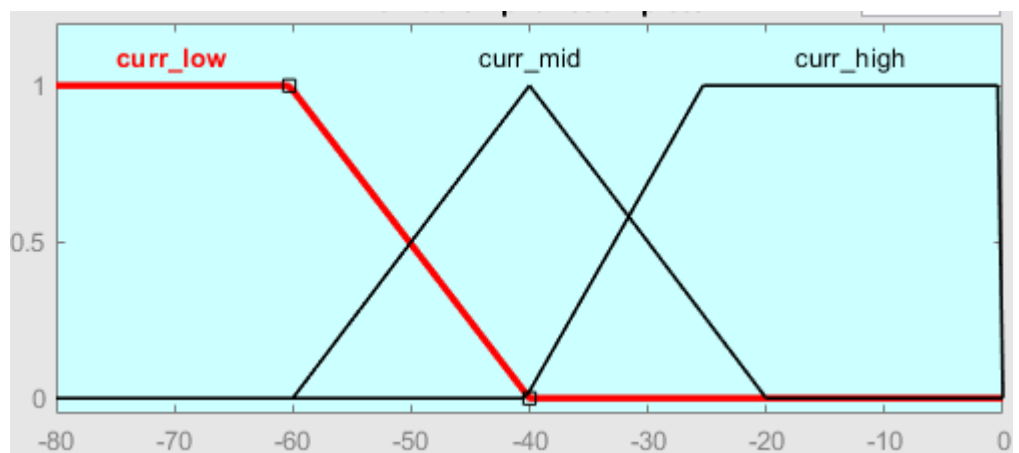


39 Pav. Įtampos išėjime signalo vertės skaidymas į skyrius

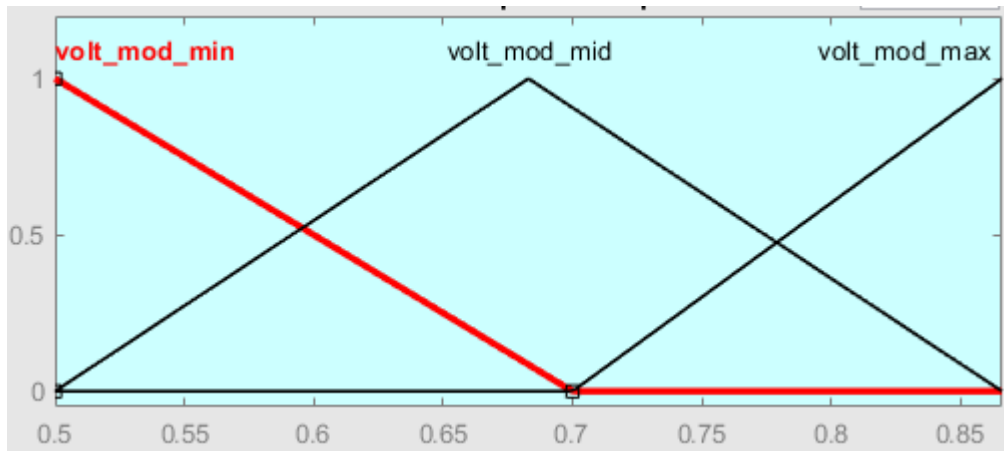
Reaktyviosios galios signalą norima gauti kuo artimesnį 0, o tai būtų pilnas reaktyviosios galios kompensavimas tinkle.



40 Pav. Reaktyviosios galios vertės skaidymas į skirsnius

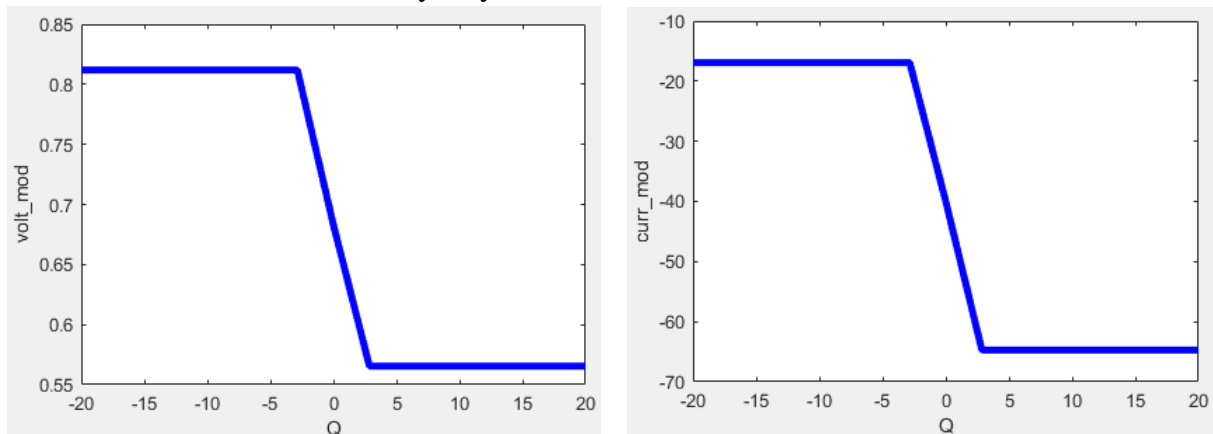


41 Pav. Srovės fazės poslinkio kampo signalo vertės skaidymas į skirsnius

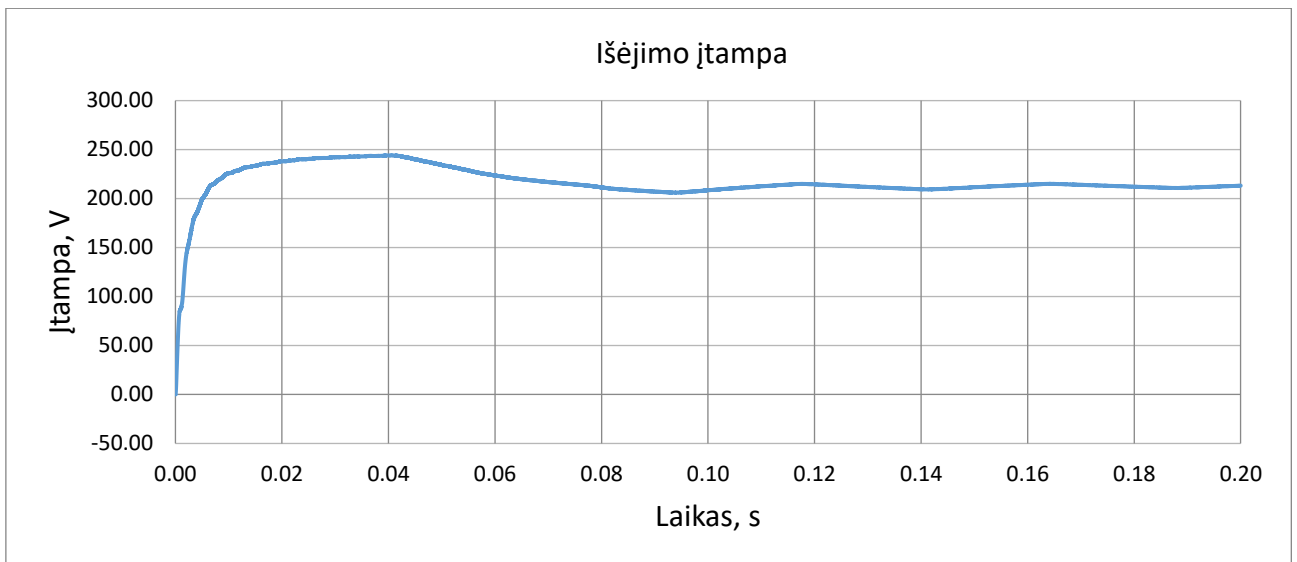


42 Pav. Įtampos moduliacijos signalo vertės skaidymas į skirsnius

Kai jau išėjimo ir įėjimo signalai turi priskirtus skirsnius, tuomet yra apjungiamos pritaikant taisyklių bazę. Pagal atliktus tyrimus ir gautus grafikus rašomos taisyklės sistemai. Kadangi žinoma, kad keliant įtampos moduliacijos koeficientą įtampa išėjime didėja, tai užduodame taisyklę pagal šią priklausomybę. Jei įtampa išėjime mažėja – keliamo koeficientą, kitu atveju mažiname. Įtampa didėja ir didinant srovės fazės poslinkio kampą nuo -80 iki 0 , dėl to rašome taisyklę, kad viršijus nustatytą įtampos ribą privalome sumažinti ir srovės fazės poslinkio kampą. Taisyklės sudaromos ir reaktyviajai galiai mažinti. Kaip iš tyrimo grafikų matyti, įtampos moduliacijos kampas didina sustiprina reaktyviosios galios generavimą ne tiesiškai. Norint padidinti reaktyviosios galios įtaką tinklui didiname įtampos moduliaciją. Signalų perdavimo posistemė pateikta – Priedas 4. Pagal tai kokio tipo ir kokios galios reaktyvioji galia, mažiname arba didiname srovės fazės poslinkio kampą, nuostata nuo kurios keičiamas dydis yra -37 .



43 Pav. Išėjimo įtampos moduliacijos koeficiento signalo (volt_mod) ir srovės fazės poslinkio signalo (curr_mod) priklausomybė nuo reaktyviosios galios dydžio elektros tinkle signalo (Q_{Grid})

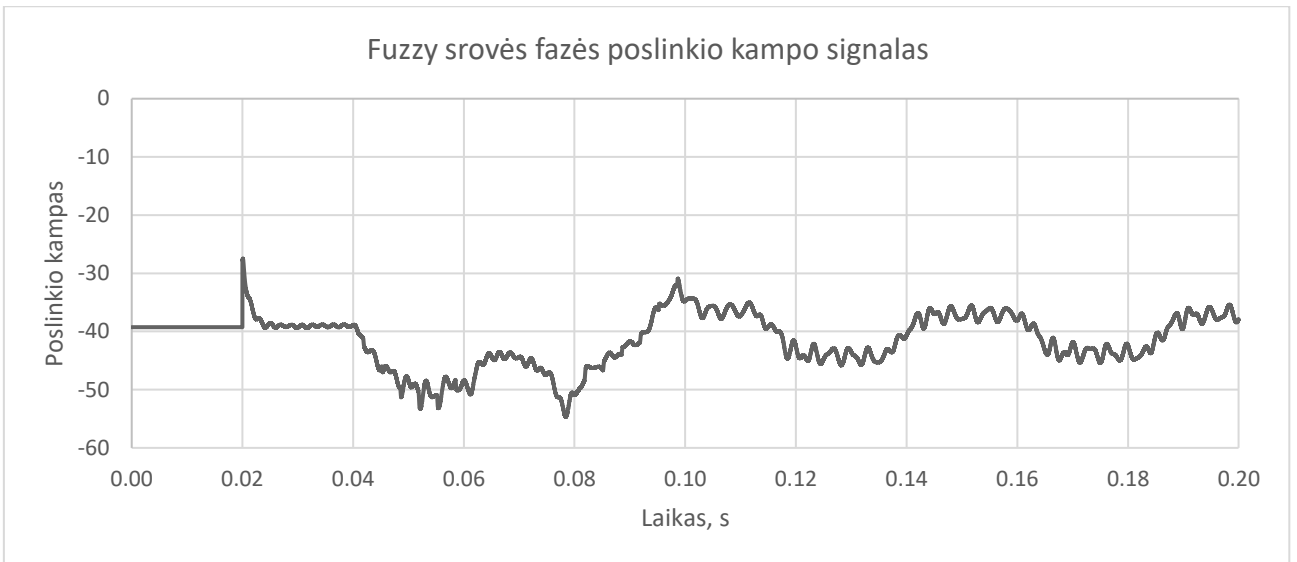


44 Pav. Išėjimo įtampos priklausomybė nuo laiko

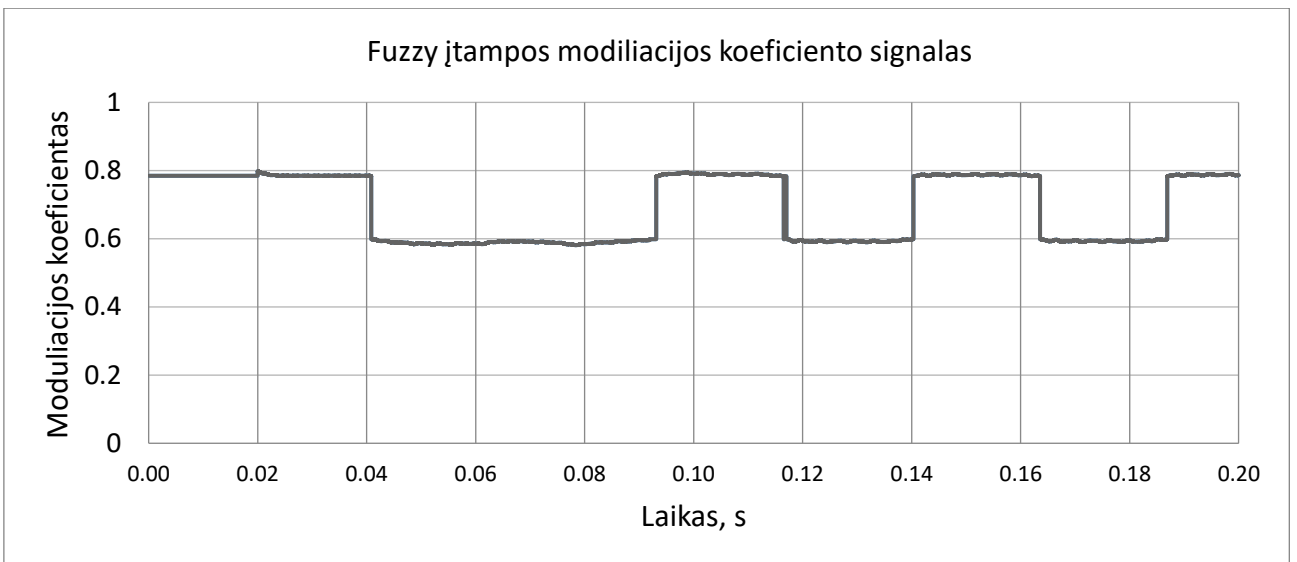


45 Pav. Reaktyviosios galios priklausomybė nuo laiko

Pagal tyrimo rezultatus matyti, kad Fuzzi reguliatorius gali išlaikyti pastovią išėjimo įtampą, taip išsaugant modeliuojamą elektros variklį. Apkrova buvo sumažinta 30% ties 0.04s ir reguliatorius išlaikė išėjimo įtampą %5 procentų ribose, reaktyvioji galia siekė apie 0.6 kVAr. Apkrovą padidinus 0,08 sekundę 30% procentų nuo pradinės, įtampa išėjime išliko stabili, o reaktyvioji galia svyravo tinkle nuo -0,4 iki 0,4. Tokiu atveju reiktų didinti induktyvinės reaktyviosios galios šaltinį prijungiant prie matricinio dažnio keitiklio didesnės galios elektros variklį.



46 Pav. Fuzzy reguliatoriaus išduodamas srovės fazės poslinkio kampo signalas



47 Pav. Fuzzy reguliatoriaus išduodamas įtampos modiliacijos koeficiento signalas

Išvados

1. Atlikus eksperimentinį tyrimą laboratorijos prototipu naudojant „Metrel MI 2892“ tinklo analizatorių buvo nustatyta, kad didžioji dalis buitinių LED šviestuvų generuoja reaktyviąją talpinę galią. Iš tiriamų lempučių didžiausią reaktyviąją galią turėjo Spectrum LED lemputė – 32,54 VAr, ir parodė žemiausią galios koeficientą – 0,49. Geriausius parametrus turėjo „Philips“ gamintojo 7 W LED lemputė, nes galios faktorius siekė 0,73, šalutinės harmonikos mažiausios – 71 %. Šis tyrimas patvirtina literatūros šaltinyje [28] pateiktas išvadas.
2. Matricinio keitiklio pagrindu sudaryta dažninė pavara turi galimybę tiesiogiai keisti kampą tarp įėjimo srovės ir įtampos dėl netiesioginio erdvinio vektoriaus moduliacijos principo. Tai leidžia ją naudoti ne tik pagrindinių funkcijų atlikimui, bet ir kaip reaktyviosios galios kompensatorių. Sumodeliuota matricinė pavara gali generuoti į tinklą 11,4 kVAr reaktyviąją induktyviąją galią ir 13,02 kVAr reaktyviąją talpinę.
3. Atlikus tyrimą nustatyta, kad pakeitus vieną 5,5 kW tipinę AC-DC-AC kintamo dažnio pavara su nuolatinės srovės grandine į tiesioginę AC-AC matricinę pavara, ji būtų pajėgi kompensuoti 32 kW LED ekrano generuojamą reaktyviąją galią. Parinktos optimaliausios reikšmės prie kurių mažiausia reaktyvioji galia tinkle: srovės fazės poslinkio kampas -37, išėjimo įtampos moduliacijos koeficientas 0,84. Įėjimo srovės harmonikos siekia 4,8 %
4. Sumodeliuotas Fuzzy reguliatorius gali palaikyti matricinės pavaros asinchroninio variklio vardinę įtampą, bet jei matricinė pavara yra pajėgi kompensuoti reaktyviąją galią tinkle. Įtampa palaikoma pastovi, o reaktyviosios galios kompensavimas svyruoja iki 0,5 kVAr ribose. Kad sumažinti svyravimus, reikia atlikti detalesnį derinimą.

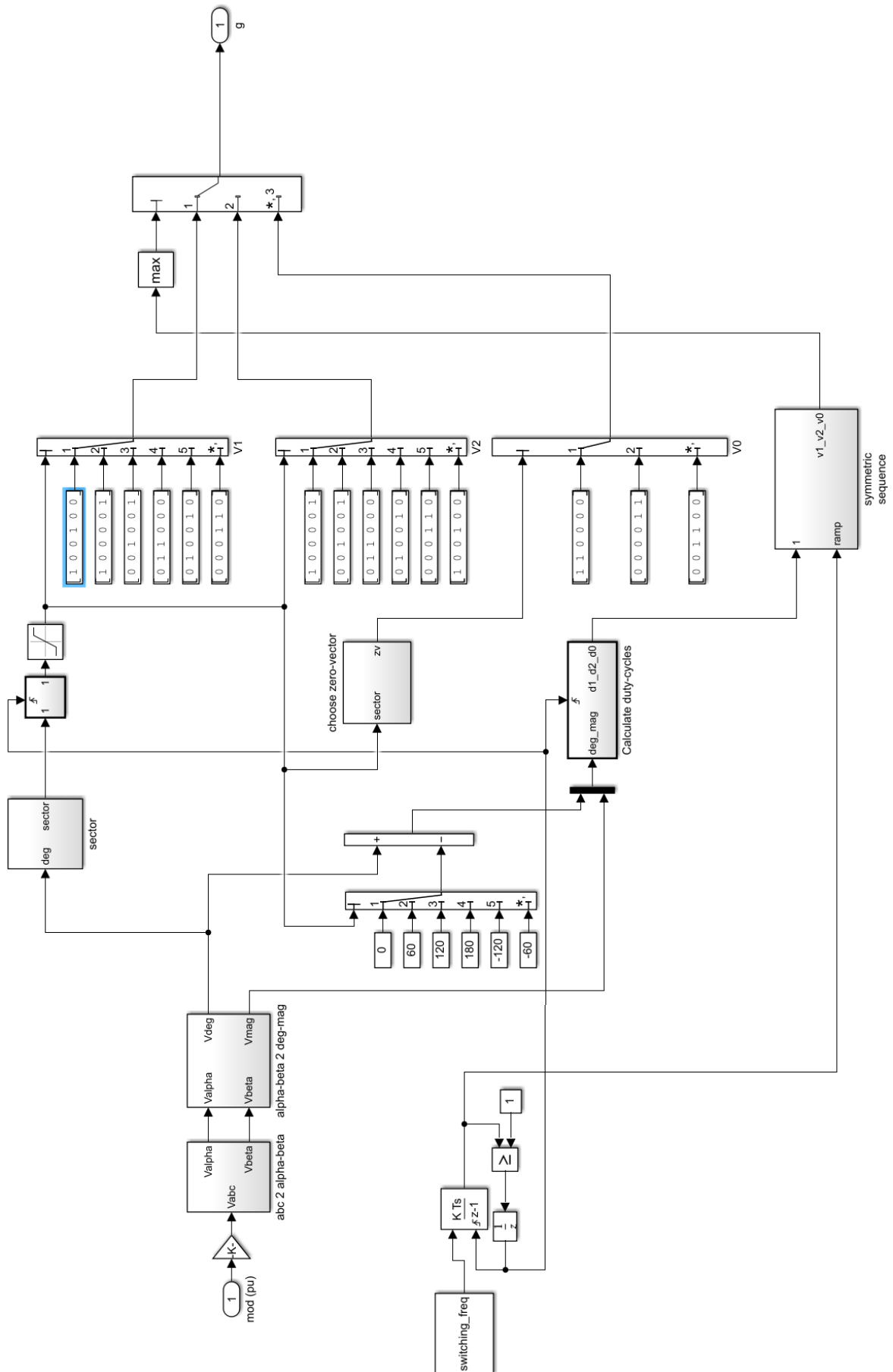
Literatūros šaltiniai

1. <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/10341545/8-04022020-BP-EN.pdf/39dcc365-bdaa-e6f6-046d-1b4d241392ad> žiūrėta (2022-04-28)
2. https://www.streetlight-epc.eu/fileadmin/redakteure/Streetlight-EPC/Project_outputs/WP7/Streetlight-EPC_Project_Publication.pdf
3. 2015 m. rugpjūčio 25 d. Komisijos reglamentas (ES) 2015/1428
4. <https://se.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/power-factor-correction.html> žiūrėta (2020-04-03)
5. „Power Supplies for LED Driving“ Steve Winder, ISBN: 9780081009253, 2017
6. <https://www.assets.lighting.philips.com/is/content/PhilipsLighting/fp929001163991-pss-global> žiūrėta (2020-04-03)
7. Tung, Ngo & Nguyen, Tuyen & Nguyen, Huy & Nguyen, Phong & Cuong, Ngo & Minh Phuong, Le. (2019). Design and Implementation of 150 W AC/DC LED Driver with Unity Power Factor, Low THD, and Dimming Capability. Electronics. 9. 52. 10.3390/electronics9010052.
8. Cheng, Chun-An & Chang, Chien-Hsuan & Cheng, Hung-Liang & Tseng, Ching-Hsien & Chung, Tsung-Yuan. (2017). A Single-Stage High-Power-Factor Light-Emitting Diode (LED) Driver with Coupled Inductors for Streetlight Applications. Applied Sciences. 7. 167. 10.3390/app7020167.
9. W. Lin, X. Yuzhen and Q. L. Zheng, „A high efficiency integrated step-down Cuk and flyback converter for LED power driver,“ 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), Seoul, 2015, pp. 60-64. Doi:10.1109/ICPE.2015.7167767
10. <https://electrical-engineering-portal.com/how-reactive-power-is-helpful-to-maintain-a-system-healthy> žiūrėta (2020-04-03)
11. Power supplies for LED Driving 2nd Edition, Steve Winder, 2017, ISBN: 9780081010242
12. Wlas, Mirosław & Galla, Stanisław. (2018). The Influence of LED Lighting Sources on the Nature of Power Factor. Energies. 11. 10.3390/en11061479.
13. Singh, Subhash. (2009). Basics of Light Emitting diodes, Characterizations and Applications.
14. Ali, Mohammad & Repalle, Shiva. (2014). Power Factor Correction. 10.13140/RG.2.2.36524.05768.
15. Wheeler, P. & Rodriguez, Jose & Clare, Jon & Empringham, Lee & Weinstein, Alejandro. (2002). Matrix converter: A technology review. Industrial Electronics, IEEE Transactions on. 49. 276 – 288. 10.1109/41.993260.
16. M. Rameshkumar, Y. Sreenivasa Rao and A. Jaya laxmi ‘Modulation And Control

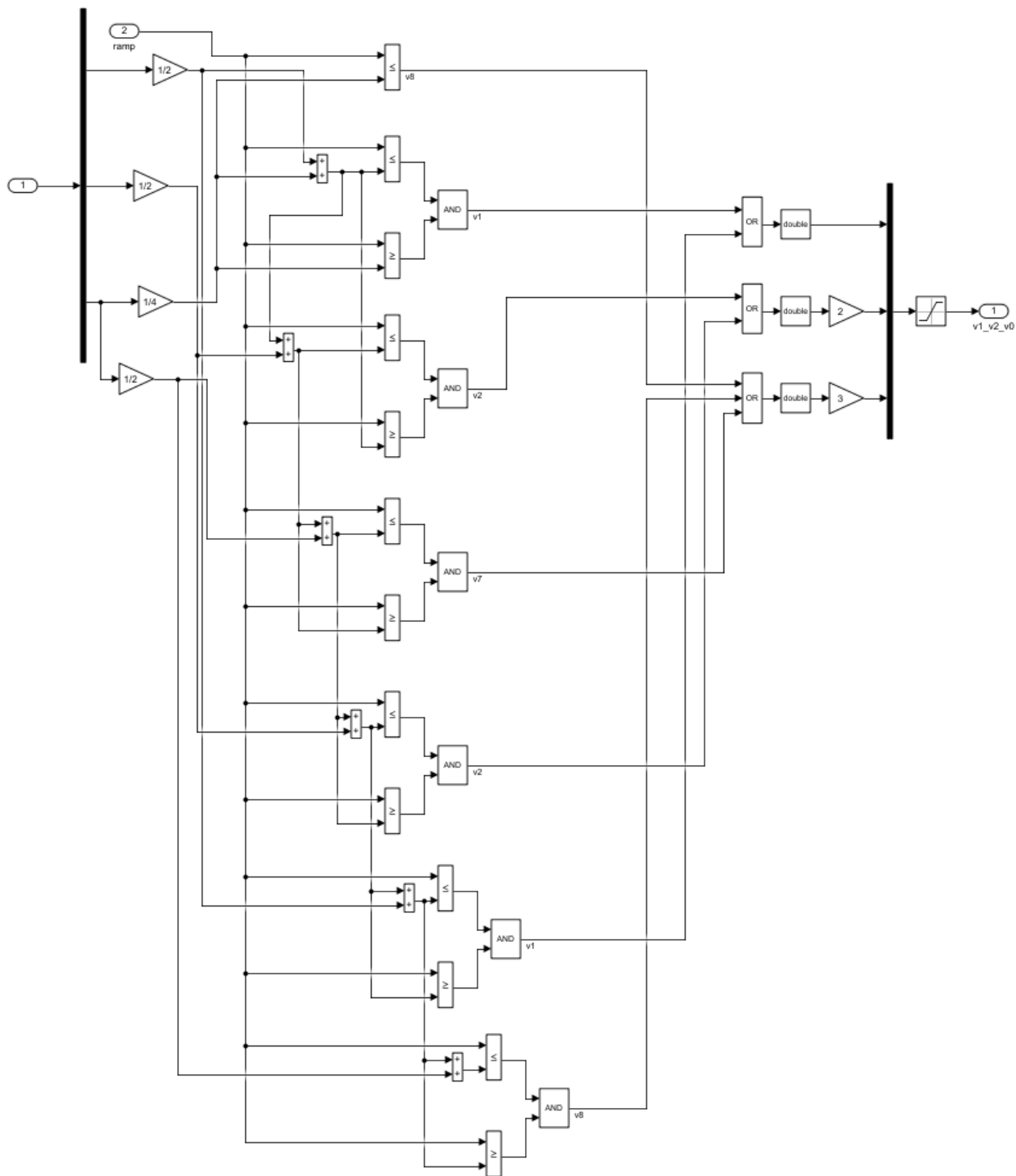
- Techniques Of Matrix Converter' International Journal of Advances in Engineering & Technology, July 2012 Vol. 4, Issue 1, pp. 244-255.
17. J. Rodriguez, M. Rivera, J. W. Kolar and P. W. Wheeler, „A Review of Control and Modulation Methods for Matrix Converters,“ in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 1, pp. 58-70, Jan. 2012. Doi: 10.1109/TIE.2011.2165310
 18. Valentinas Zaveckas, Elektrotechnikos pagrindai, Mokomoji knyga, Vilnius „Technika“ 2012
 19. Shabanpour, Amin & Gholami, Sasan & Seifi, Ali Reza. (2012). Comparative Studies of Different Switching Patterns for Direct and Indirect Space Vector Modulated Matrix Converter. Advances in Power Electronics. 2012. 10.1155/2012/852024.
 20. Sekhar, Chandra & Ravi, Hemantha Kumar & Rajan, Vijaya & Sasikumar, Muthuserpi. (2014). Space Vector Modulation Based Direct Matrix Converter for Stand-Alone system. International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS). 4. 10.11591/ijpeds.v4i1.5104.
 21. „IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems,“ in IEEE Std 519-1992 , vol., no., pp.1-112, 9 April 1993, doi: 10.1109/IEEESTD.1993.114370.
 22. Baldor Motor Basics: Electric Motors and Power Systems and Electric Motors and Voltage Edward Cowern, P.E.
 23. Reactive power compensation using a fuzzy logic controlled synchronous motor, Energy Conversion and Management, Volume 44, Issue 13, 2003, Pages 2189-2204, ISSN 0196-8904
 24. M. Rameshkumar, Y. Sreenivasa Rao¹ and A. Jaya laxmi ‘Modulation and Control techniques of Matrix Converter‘ International Journal of Advances in Engineering & Technology, July 2012. Vol. 4, Issue 1, pp. 244-255.
 25. Kannan S, Jayaram S, Salama MMA. Fuzzy logic based supplementary controller for static synchronous series compensator. Electrical and Computer Engineering, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 2, 1998. P. 489–492
 26. J. Zhang, L. Li and D. G. Dorrell, "Control and applications of direct matrix converters: A review," in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 18-27, June 2018, doi: 10.23919/CJEE.2018.8409346.
 27. Ernst, S.; Kotulski, L.; Lerch, T.; Rad, M.; Sędziwy, A.; Wojnicki, I. Application of reactive power compensation algorithm for large-scale street lighting. J. Comput. Sci. 2021, 51, 101338.
 28. Petrauskas, G.; Svinkunas, G. Application of Matrix VFD for Power Factor Improvement in LED Lighting Sources Loaded Power Distribution Lines. Energies 2021, 14, 3546. <https://doi.org/10.3390/en14123546>

Priedai

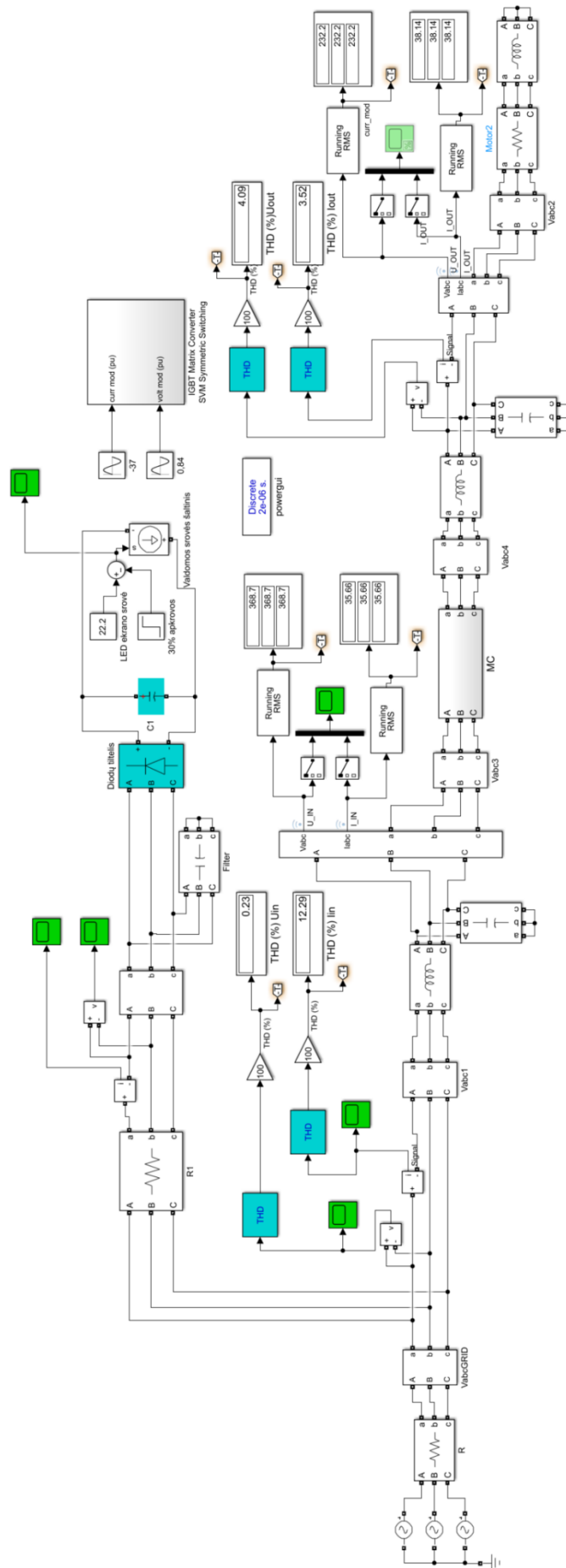
1. Priedas. Posistemė atsakinga už erdvinio vektoriaus moduliacijos signalo formavimą



2. Priedas. Impulsų sekos formavimo komutatoriui posistemė



3. Priedas. Matricinės pavaros, kompensuojančios reaktyviąją galią tinkle, sistema.



4. Priedas. Fuzzy signalų apdorojimo posistemė

