



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

Artūras Kisielius

**AUKŠTESNIŲJŲ HARMONIKŲ TYRIMAS AB „ACHEMA“
ELEKTROS TINKLE**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Almantas Bandza

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

AUKŠTESNIŲJŲ HARMONIKŲ TYRIMAS AB „ACHEMA“
ELEKTROS TINKLE

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

Vadovas

Doc. dr. Almantas Bandza
2017-06-05

Recenzentas

Doc. dr. Gytis Svinkūnas

Projektą atliko

Artūras Kisielius
2017-06-05

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Artūras Kisielius

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Aukštesniųjų harmonikų tyrimas AB „Achema“ elektros tinkle“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. birželio 5 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Artūro Kisieliaus**, baigiamasis projektas tema „Aukštesniųjų harmonikų tyrimas AB „Achema“ elektros tinkle“ 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)

Kisielius, Artūras. Aukštesniųjų harmonikų tyrimas AB „Achema“ elektros tinkle. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Almantas Bandza; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Elektros ir elektronikos inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *harmonika, filtras, įtampa, srovė*

Kaunas, 2017. 52 p.

SANTRAUKA

Elektros energetikos sistemoje privaloma laikytis nustatytų standartų. Vieni standartų yra EN 50160 ir EN 61000, kurie nurodo harmoninių įtampų ir srovių maksimalias leistinas reikšmes.

Šio darbo tikslas yra ištirti AB „Achema“ elektros tinklą, nustatyti aukštesniųjų harmonikų generavimo šaltinius ir priimti sprendimus joms pašalinti.

Darbe išnagrinėti elektros kokybės parametrai, aukštesniųjų harmonikų atsiradimo bei šalinimo kriterijai, pasyvieji, aktyvieji ir hibridiniai filtrai. „Matlab“ programa sudarytas dažnio keitiklio modelis, kurio pagalba galime skaičiuoti srovės ir įtampos vertes, aukštesniąsias harmonikas, netiesinių iškreipimų faktorių. AB „Achema“ analizatoriumi „Chauvin arnoux CA8335“ tiriant skirtingas tinklo vietas, buvo nustatyta, kad pastotėje TP-7, narvelyje n.3 bendras netiesinių iškreipimų faktorius yra labai aukštas (A fazėje – 20%, B fazėje – 18,6%, C fazėje – 40,9%). Objektas yra 6/0,4 kV transformatorius, kurio žemoje pusėje esantis dažnio keitiklis ir generuoja harmonikas. „Matlab“ programa buvo sumodeliuotas tinklas ir parinktas pasyvus filtras 51 kVAr reaktyviosios energijos galingumu. Šie skaičiavimai yra tik teoriniai, todėl praktikoje situacija gali skirtis. Taip pat buvo atliekami matavimai senose kondensatorių baterijose ir pakeistose naujose, su reaktoriais.

Priėjome išvados, kad harmonikų filtrai žymiai sumažina netiesinių iškreipimų faktorių, todėl jų naudojimas gali tapti efektyvia priemone, užtikrinanti sistemos patikimumą, jautrių įrenginių apsaugą ir ilgesnį elektros įrenginių tarnavimo laiką.

Kisielius, Artūras. Research of Higher Harmonics in Power Grid of SC Achema: Master thesis in Master of Electrical Power/ supervisor assoc. Doc. dr. Almantas Bandza. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Power Systems.

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: harmonic, filter, voltage, current

Kaunas, 2017. 52 p.

SUMMARY

It is mandatory to follow the standards at the electrical power system. Some of standards are EN 50160 and EN 61000, which specifies maximum allowed values of harmonic voltages and currents.

The aim of the research is to examine electrical network of the JSC "Achema", to identify sources of the higher harmonic generation and to make decisions how to eliminate them.

In this work was examined the quality of the electrical parameters, generation and removal criteria for the higher harmonic, passive, active and hybrid filters. With the help of the model of frequency inverter which has been made with "Matlab" program, it is possible to calculate current and voltage values, higher harmonic and total harmonic distortion. Investigating different network locations of JSC "Achema" with "Chauvin Arnoux CA8335" analyzer, were found that in the cage n.3 of the TP-7 substation total harmonic distortion factor is very high (phase A – 20%, phase B – 18,6%, phase C – 40,9%). The object is 6/0,4 kV transformer which is generating harmonics with frequency converter at the lower side. The network was created with "Matlab" program using 51 kVAr reactive power passive filter. These calculations are only theoretical, in practise the situation may be different. There were also performed measurements of old capacitor banks and replaced in the new ones with reactors.

In conclusion, it was found the harmonic filters significantly reduces the harmonic distortion, so their use could become an effective means of ensuring the reliability of the system, the protection of sensitive devices and electrical equipment for a longer service life.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Įvadas	10
1. Informacijos šaltinių analizė	10
1.1. Elektros kokybės parametrai	10
1.2. Aukštesniosios eilės harmonikos	14
1.2.1. Srovės harmonikos	14
1.2.2. Įtampos harmonikos	17
1.3. Aukštesniųjų harmonikų atsiradimas	19
1.4. Aukštesniųjų harmonikų šalinimas	25
1.4.1. Iškraipymų šalinimas linijos reaktoriumi	25
1.4.2. Iškraipymų šalinimas aukštesniųjų harmonikų filtrais	26
1.5. Filtrai	28
1.5.1. Pasyvus filtras	28
1.5.2. Aktyvus filtras	30
1.5.3. Hibridinis filtras	33
2. Dažnio keitiklio modeliavimas	35
3. Tyrimas akcinėje bendrovėje „Achema“	41
3.1. Objekto pasirinkimas	41
3.2. „Danfoss VLT 6000“ dažnio keitiklio modeliavimas	43
3.3. Filtro parinkimas	45
3.4. Kondensatorių baterijos	47
4. Išvados	49
5. Informacijos šaltinių sąrašas	50
6. Priedai	52

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Maksimalios leistinos ribinės harmoninių srovių vertės	15
1.2 lentelė. Įtampos harmonikų maksimalios leistinosios amplitudės	18
1.3 lentelė. Netiesinių įrenginių aukštesniųjų harmonikų matavimo rezultatai	20
1.4 lentelė. Valstybinės įstaigos aukštesniųjų srovės matavimų rezultatai	20
1.5 lentelė. Harmonikų priklausomybė nuo lygintuvo pajungimo	23
2.1 lentelė. Simuliacijos rezultatai	38
2.2 lentelė. Aukštesniųjų harmonikų skaičiavimų rezultatai	40
3.1 lentelė. Matuoti ir skaičiuoti rezultatai	44
3.2 lentelė. THD priklausomybė nuo kondensatoriaus reaktyviosios galios	45
3.3 lentelė. THD priklausomybė nuo ritės induktyvumo	45

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Įtampos mirgėjimo matavimo atstojamoji schema.....	12
1.2 pav. Pagrindinė harmonika, 5-oji harmonika ir jų suma.....	14
1.3 pav. Idealus tinklo darbas.....	15
1.4 pav. Pagrindinės ir lyginės harmonikos sinusoidė.....	16
1.5 pav. Pagrindinės ir nelyginės harmonikos sinusoidė.....	17
1.6 pav. Netiesinių apkrovų iškreipimai ir harmonikų spektrai.....	21
1.7 pav. Trifazis variklis, valdomas dažnio keitikliu.....	21
1.8 pav. Teorinės aukštesniųjų harmonikų srovės.....	23
1.9 pav. Reaktorius maitinimo grandinėje.....	26
1.10 pav. Reaktorius DC grandinėje.....	26
1.11 pav. Pasyvus filtras.....	28
1.12 pav. Kelios atšakos pasyviųjų filtrų.....	29
1.13 pav. Pasyvus filtras elektros sistemoje.....	29
1.14 pav. Pasyviųjų filtrų tipai.....	30
1.15 pav. Aktyvieji filtrai.....	31
1.16 pav. Srovės sinusoidė su harmonikomis.....	32
1.17 pav. Kompensuojanti srovės sinusoidė.....	32
1.18 pav. Išfiltruota srovės sinusoidė.....	33
1.19 pav. Principinė aktyvaus filtro schema.....	33
1.20 pav. Hibridinio filtro principinė schema.....	34
2.1 pav. Struktūrinė schema.....	35
2.2 pav. Maitinimo šaltinis.....	35
2.3 pav. Jungtuvas.....	35
2.4 pav. Transformatorius.....	36
2.5 pav. Dažnio keitiklis.....	36
2.6 pav. LC pasyvus filtras.....	36
2.7 pav. Įtampos reguliatorius su išėjimais.....	37
2.8 pav. Apkrova.....	37
2.9 pav. Įtampos matavimų blokai.....	37
2.10 pav. Srovės matavimų blokai.....	38
2.11 pav. Bendra principinė schema.....	38
2.12 pav. Įtampos ir srovės sinusoidės.....	39
2.13 pav. „Scope“ ir harmonikų matavimo blokai.....	40

3.1 pav. Analizatorius „Chauvin arnoux CA8335“	41
3.2 pav. Analizatoriaus CA 8335 pajungimas su antrinėmis matavimo grandinėmis	42
3.3 pav. Tyrimui pasirinktas objektas	42
3.4 pav. Srovės sinusoidės pasirinktame objekte	43
3.5 pav. Srovės harmonikos	43
3.6 pav. A, B ir C fazių THD	43
3.7 pav. Dažnio keitiklis Danfoss VLT 6000.....	44
3.8 pav. Pasyvaus filtro pajungimas.....	45
3.9 pav. „Danfoss“ pasyvieji filtrai	46
3.10 pav. „Danfoss“ pasyviųjų filtrų charakteristikos	47
3.11 pav. Kondensatorių baterijų srovės harmonikų matavimai: a) senas įrenginys; b) naujas įrenginys	48

Ivadas

Pastaruoju metu didelis dėmesys yra skiriamas ne tik elektros energijos patikimumui, tačiau ir kokybei. Vienas iš kokybės kriterijų – šalinti arba bent prislopinti aukštesniašias harmonikas. Per daugelį metų buvo sukurta daugybė elektrą naudojančių įrenginių. Vieni prietaisai sukelia aukštesniašias harmonikas, kiti yra labai jautrūs tokiems iškraipymams, todėl šiuo klausimu yra suinteresuoti ir tiekėjai, ir vartotojai.

Europos Sąjungos standartuose tiekiamosios įtampos bendras netiesinių iškreipimų faktorius (visų įtampos harmonikų, išskyrus pirmąją, suma) neturi viršyti 8% pirmosios harmonikos. Taip pat, neturi viršyti atskirų harmonikų amplitudės: 3 – 5%, 5 – 6%, 7 – 5%, 9 – 1,5% , 11 – 3,5% ir t.t. Viso ribojimai nustatyti iki 25 harmonikos, nes aukštesniųjų harmonikų lygis paprastai būna nežymus ir sunkiai išmatuojamas.

Taip pat ribojamos ir srovės aukštesniosios harmonikos, dėl kurių šyla kabeliai, didėja nuostoliai bei relinės apsaugos gali netinkamai suveikti bei atjungti įrenginį, taip sustabdant elektros tiekimą ar gamybą.

Šiame darbe bus tiriamas AB „Achema“ elektros tinklas, nustatoma, kas sukelia aukštesniašias harmonikas bei ieškomi sprendimai joms pašalinti. Taip pat sudarytas modelis „Matlab“ programa, išmatuotos aukštesniosios harmonikos su ir be filtro. Dažnio keitikliui parinktas pasyvus filtras.

Darbo objektas: AB „Achema“ elektros tinklas.

Darbo tikslas: ištirti AB „Achema“ elektros tinklą, nustatyti aukštesniųjų harmonikų generavimo šaltinius ir priimti būdus joms pašalinti.

Tyrimo uždaviniai:

1. sudaryti dažnio keitiklio modelį;
2. išmatuoti harmonikas skirtingose elektros tinklo vietose;
3. pasirinkti tinklo vietas, kur yra didžiausios harmonikos;
4. išsiaiškinti harmonikų šaltinius;
5. simuliacijos pagalba apskaičiuoti harmonikas ir parinkti optimaliausią filtrą.

1. Informacijos šaltinių analizė

1.1. Elektros kokybės parametrai

Elektros kokybė yra vienas svarbiausių rodiklių ir privalo atitikti galiojančius standartus. Vienas standartų yra LST EN 50160 [1], jis apibrėžia bendrųjų skirstomųjų tinklų įtampos charakteristikas.

Šis Lietuvos standartas nustato, paaiškina ir tiksliai nusako pagrindines tinklo naudotojų maitinimo punktų įtampos charakteristikas viešuosiuose žemosios, vidutinės ir aukštosios įtampos elektros tinkluose, esant normaliajam režimui. Standarte aprašomos įtampos charakteristikų ribos arba vertės, kurios, kaip tikimasi, turi būti neviršytos bet kuriuose viešųjų Europos elektros tinklų maitinimo punktuose. Standarte neaprašomos avarinės būsenos, kurias paprastai patiria atskiras elektros tinklo naudotojas.

Pagrindiniai elektros kokybės parametrai yra šie:

1. dažnio kitimas;
2. įtampos svyravimai;
3. įtampos mirgėjimai;
4. reaktyviosios galios valdymo ribos;
5. harmoninės įtampos ir srovės.

1. Dažnio kitimas

Elektros sistemos apkrovą sudaro labai didelis kiekis elektrą vartojančių įrenginių ir prietaisų. Dalis jų, pavyzdžiui, apšvietimo lempos, viryklės ar šildytuvai yra nejautrūs dažnio kitimui. Tačiau tokie įrenginiai, kaip elektros varikliai, pasikeitus dažniui, keičia savo apsukas ir pasipriešinimo momentą. Lietuvoje, kaip ir visoje Europoje, elektros sistemos dažnis yra 50 hercų (Hz), bet dėl įvairių normalaus darbo sutrikimų (pvz. gaminamos ir sunaudojamos galių nebalansas), šis dydis gali kisti. Dažnio kitimas yra rimtas pažeidimas elektros tinkle ir jis turi būti apsaugotas apsaugine automatikos priemone, tokia kaip automatinis dažninis nukrovimas (ADN). ADN – tai greitas elektros vartotojų atjungimas, sumažėjus dažniui elektros energetikos sistemoje [2]. Lietuvoje dažnis gali kisti 1%, t.y. $\pm 0,5$ Hz. Jei jis nukrenta mažiau, atliekamas dažninis nukrovimas atjungiant iš anksto numatytus vartotojus tam tikromis porcijomis, kurios vadinamos ADN eilėmis. Yra trys ADN įrenginių grupės:

1. ADN1 grupės paskirtis yra sustabdyti dažnio mažėjimą. Jos maksimalus suveikimo dažnis yra 26 eilės, suveikimo trukmė minimali (0-0,3 s). ADN1 gali atjungti iki 60% sistemos vardinės galios, tarp eilių ji paskirstoma maždaug po lygiai;

2. ADN2 grupės paskirtis yra atkurti dažnį iki ilgalaikės leistinos vertės – 49 Hz (80 s). Jos - visų eilių suveikimo dažnis – 49,2 Hz, o suveikimo trukmės yra skirtingos ir siekia 5-60 s, selektyvumo pakopa yra 3 s. Prijungta galia siekia 40% ADN1 galios;

3. papildomas ADN yra naudojamas ten, kur elektrinės yra nedidelės, o visas tinklas daugiausia yra maitinamas iš kitų elektrinių. Šie įrenginiai turi užtikrinti, kad nesustotų elektrinės, jų dažnis nenukristų žemiau 45 Hz.

ADN realizuojamas specialios paskirties dažnio matavimo relėmis, kurios įrenginėjamos 110 kV pastotėse. Krintant dažniui, atjunginėjami vartotojai (pastotės, linijos), kurių įtampa <110 kV, o visas 110-330 kV įtampos tinklas lieka nedalomas ir paruoštas pakartotiniam vartotojų įjungimui, atsiradus galios rezervui.

2. Įtampos svyravimai

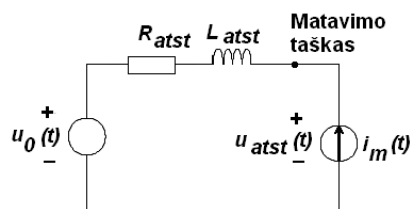
Elektros energetikos sistemose nuolat vyksta įvairūs skirstymo tinklų įjungimai ir atjungimai, apkrovų svyravimas, stambių vartotojų imtuvų įjungimai ir išjungimai, rečiau trumpieji jungimai. Visi šie reiškiniai daro įtaką elektros sistemos įtampai. Ji trumpam laikui sumažėja arba padidėja. Toks reiškinys vadinamas įtampos svyravimu. Didesni įtampos svyravimai gali trukti iki kelių sekundžių. Tai sukelia neigiamus poveikius [3]:

1. gamybinių procesų sutrikimai, dėl kurių atsiranda brokas;
2. elektros variklių darbo sutrikimai. Dėl sumažėjusios įtampos, padidėja srovė, todėl izoliacija sensta greičiau ir trumpėja variklio tarnavimo laikas;
3. įtampos svyravimams labai jautrūs elektroniniai įrenginiai;
4. įtampos svyravimai, didesni nei 10-15 %, sugadina kondensatorių baterijas, įtampos keitiklius, indukcinės krosnis;
5. dėl fazinės įtampos svyravimų atsiranda vibracijos varikliuose;
6. buityje dėl įtampos svyravimų atsiranda mirgėjimas kaitrinėse lempose, televizoriuose.

Vartotojas įtampos svyravimams mažinti gali pasirinkti vieną iš šių priemonių: įtampos stabilizatorių arba nepertraukiamo maitinimo šaltinį (*NMS*, angl. *UPS*).

3. Įtampos mirgėjimai

Įtampos mirgėjimai – tai įtampos šuoliai, kuriuos mes matome, pavyzdžiui, elektros lemputėse, televizoriuose ir panašiai [3]. Toks mirgėjimas neigiamai veikia žmonių regėjimą. Atliktais tyrimais yra nustatytos ribinės tokio mirgėjimo vertės, kurios pateiktos mirgėjimą nagrinėjančiuose standartuose. Padidėjus ar sumažėjus įtampai, lemputė pradeda mirkčioti. Šių mirgėjimų priežastis – įtampos nuostolių tinkle nepastovumas, dėl kurio atsiranda elektrinės apkrovos nepastovumas. Šį parametą mes galime pamatuoti. Mirgėjimo matavimo atstojamoji schema pavaizduota 1.1 paveikslėlyje.



$$u_{atst}(t) = u_0(t) + R_{atst} i_m(t) + L_{atst} \frac{di_m(t)}{dt}$$

(pagal IEC 60868)

1.1 pav. Įtampos mirgėjimo matavimo atstojamoji schema

4. Reaktyviosios galios valdymo ribos

Elektros energetikos sistemoje turi būti galios balansas tarp pagaminamos ir suvartojamos galios [4]. Nusistovėjusiu EES darbo režimu, kiekvienu laiko momentu balansas privalo būti kaip aktyviajai, taip ir reaktyviajai galiai. Reaktyviųjų galių, o tuo pačiu ir reaktyviųjų energijų balanso lygtis:

$$\begin{aligned} & \sum Q_{gen.L} - \sum Q_{gen.C} + \sum Q_{sin.komp.L} - \sum Q_{sin.komp.C} + \sum Q_{stat.komp.L} - \sum Q_{stat.komp.C} + \\ & + \sum Q_{kond.C} + \sum Q_{lin.C} - \sum \Delta Q_{klin.L} - \sum \Delta Q_{traf.L} - \sum Q_{var t.L} = 0. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Į balanso lygtį neįtraukti elektros varikliai. Pirmiausia yra sunku įvertinti jų darbo režimus, o antra, reaktyviosios galios generavimas mažina variklių aktyvų darbą ir labai didina aktyviuosius variklių nuostolius. Vartotojams ekonomiškiau trūkstantą reaktyviąją galią pasigaminti su papildomai pastatyta kondensatorių baterija, o sinchroninę elektros variklį eksploatuoti vardiniame režime.

Reaktyviosios galios šaltiniai elektros sistemoje yra sinchroninės elektros mašinos, sinchroniniai generatoriai, sinchroniniai kompensatoriai ir sinchroniniai varikliai. Sinchroniniai generatoriai yra pagrindiniai reaktyviosios galios šaltiniai ir gamina apie 60% visos reikalingos reaktyviosios galios.

5. Harmoninės įtampos ir srovės

Pastaruosiu metu didelis dėmesys skiriamas kitam svarbiam elektros tinklo parametru – aukštesniosioms srovės ir įtampos harmonikoms. Taisyklingos sinusinės formos įtampos ar srovės kreivės yra idealas. Praktikoje tik hidrogenatorių kuriama trifazė įtampų sistema artima tokiai. Harmoninės įtampos ir srovės vis labiau teršia žemos ir vidutinės įtampos tinklus. Aukštesniosios harmonikos generuojamos esant nelinejiniams apkrovoms, kurias šiuolaikiniuose tinkluose turi nemažai vartotojų [3].

Aukštesniųjų harmonikų šaltiniai:

- a) galios elektronikos įtaisai (lygintuvai, starteriai, keitikliai ir kt.);
- b) pramonės įrenginiai (suvirinimo aparatai, indukcinės ir lankinės krosnys ir kt.);

- c) įvairių įmonių technika (kompiuteriai, atsarginio maitinimo šaltiniai, kopijuokliai ir kt.);
- d) buitiniai prietaisai (mikrobangų krosnelės, televizoriai, taupančiosios lemputės ir kt.);
- e) asinchroniniai varikliai su reguliuojamu greičiu, nuolatinės srovės varikliai, įvairūs transformatoriai.

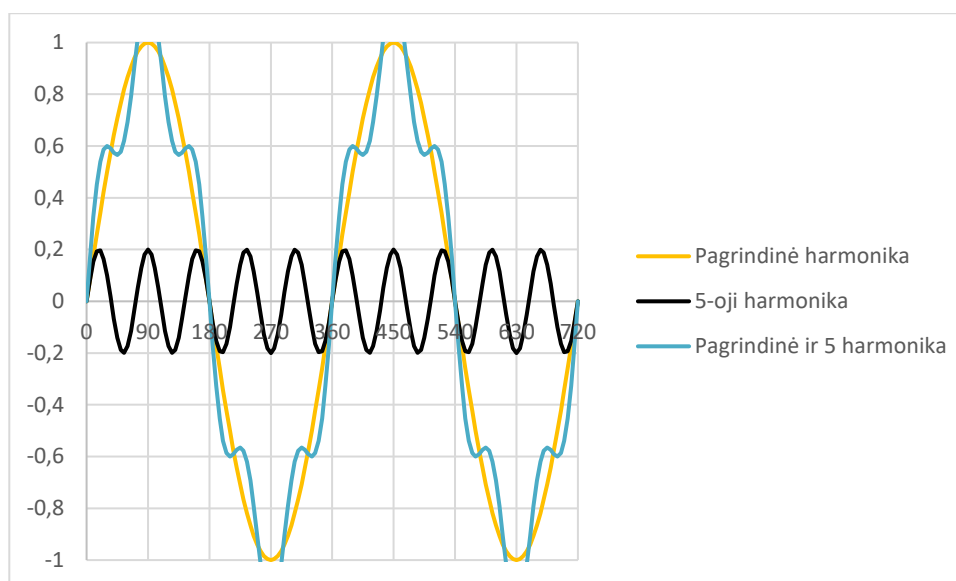
Aukštesniųjų harmonikų pasekmės:

- a) dėl harmoninių srovių įrenginiai perkaista ir trumpėja jų tarnavimo trukmė, todėl tenka juos anksčiau keisti arba remontuoti;
- b) skirstomuosiuose tinkluose didėja galios nuostoliai;
- c) harmoninės srovės gali sukelti netinkamus apsaugų poveikius ir nereikalingus įrenginių atjungimus;
- d) harmonikos trukdo elektros tinklais siunčiamiems signalams;
- e) skaitikliuose padidina elektros energijos suvartojimą.

Šiame darbe ir bus aptartos aukštesniosios harmonikos.

1.2. Aukštesniosios eilės harmonikos

Lietuvos, bei visos Europos elektros tinkluose kintamosios srovės įtampos ar srovės dažnis yra 50 Hz. Tai vadinama pagrindinė (pirmoji) harmonika arba pramoniniu dažniu. Aukštesniosios eilės harmonikos yra įtampos ar srovės pirmosios harmonikos kartotinės, tik aukštesnio dažnio. Norint sužinoti harmonikos dažnį, reikia harmonikos eilės numerį padauginti iš pramoninio dažnio. Pavyzdžiui, trečioji harmonika bus 3 kartus didesnio dažnio už pirmąją, tai yra – 150 hercų, 5-oji – 250 hercų, 7-oji – 350 hercų ir t.t. [3]. 1.2 paveiklėlyje pavaizduotos pagrindinė harmonika, 5-oji harmonika ir jų suma.

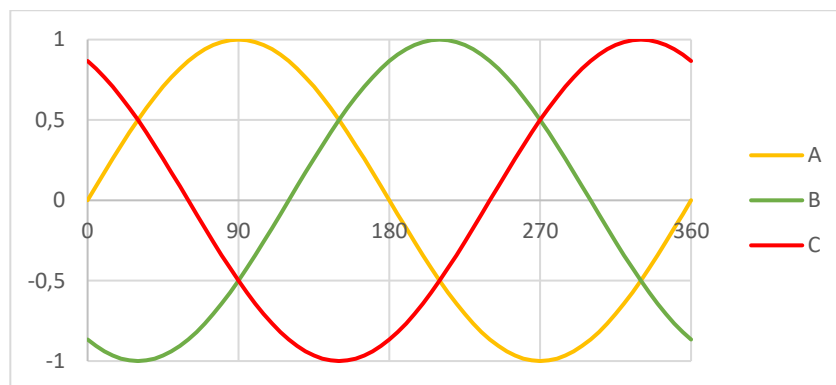


1.2 pav. Pagrindinė harmonika, 5-oji harmonika ir jų suma

Kaip matome, sudėjus harmonikas sinusoidė pasikeičia. Jei tinkle vyrauja daugiau aukštesniųjų harmonikų, kreivė dar labiau pasikeis.

1.2.1. Srovės harmonikos

Trifazė srovė, tai trijų vienfazių srovių sistema, kai tas srovės sukuria trys EVJ, kurių amplitudės ir dažniai yra vienodi. Tarpusavyje fazės viena kitos atžvilgiu skiriasi 120 laipsnių kampu arba 1/3 periodo laiko atžvilgiu. Idealiu atveju srovės kreivės yra taisyklingos sinusinės formos. Tai pavaizduota 1.3 paveikslėlyje:



1.3 pav. Idealus tinklo darbas

Dėl aukštesniųjų eilių harmonikų, srovės sinusoidė kintamojoje elektros energetikos sistemoje yra iškraipoma. Aukštesniosios srovės harmonikos, esančios tinkle, sumuojamos su pagrindine, 1-ąja harmonika, t.y. normaliu darbo režimu ir iškraipo sinusoidės formą. Tinklo įtampos ar srovės nukrypimą nuo sinusinės formos priimta vadinti NIF (netiesiniu iškreipų faktoriumi) arba dažniau naudojamą anglų kalba – THD (angl. *Total Harmonic Distortion*). Šis dydis apibūdina visų aukštesniųjų harmonikų sumą, išreikšiamą procentais. Kintamosios srovės netiesinių iškreipų faktorius THD_I apskaičiuojamas pagal formulę 1.2:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}; \quad (1.2)$$

čia:

THD_I – netiesinių iškreipų faktorius, %;

I_n – n-tosios eilės srovės harmonika, A;

I_1 – pagrindinė srovės harmonika, A.

EN 61000-3-2 standartas [5] reglamentuoja maksimalias leidžiamas harmoninių srovių vertes, kai maitinimo srovė yra iki 16 A. Aukštesniųjų srovės harmonikų ribinės vertės nurodytos 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Maksimalios leistinos ribinės harmoninių srovių vertės

Harmonikos, Nr.	A klasė, A	B klasė, A	C klasė, I_1/I_h , %	D klasė, mA/W
Nelyginės harmonikos				
3	2,30	3,45	$3 \times \lambda$	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,15	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,49	3	0,35
13	0,21	0,31	3	0,29
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \times 15/n$	$0,22 \times 15/n$	3	$3,85/n$
Lyginės harmonikos				
2	1,08	1,62	-	-
4	0,43	0,64	-	-
6	0,30	0,45	-	-
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \times 8/n$	$0,354 \times 8/n$	-	-

Pagal standartą, įrenginiai skirstomi į keturias klases [5]:

1. A klasė – subalansuoti trifaziai įrenginiai, namų apyvokos prietaisai (išskyrus D klasei priskiriamus), kaitrinių lempų apšvietimo reguliatoriai, garso aparatūra ir visa kita įranga, nepatenkanti į B, C ir D klases.
2. B klasė – nešiojamieji įrankiai ir neprofesionalūs lankinio suvirinimo aparatai.
3. C klasė – apšvietimo įranga.
4. D klasė – kompiuteriai, kompiuterių monitoriai ir televizoriai. Įrenginio galia turi būti ne mažesnė nei 75 W ir ne didesnė nei 600 W.

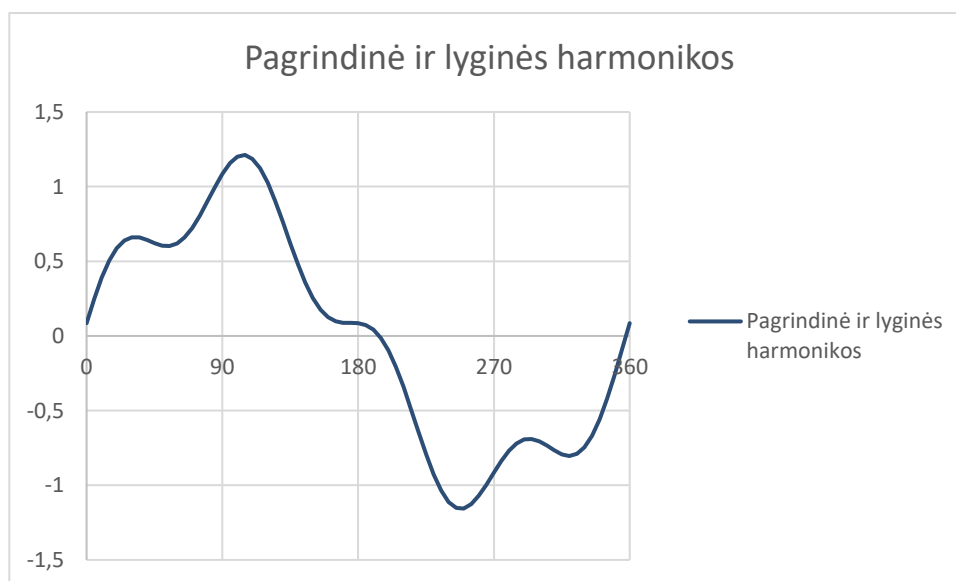
Skirtingi įrenginiai generuoja skirtingos eilės harmonikas. Puslaidininkiniai dažnio keitikliai ir trifaziai lygintuviniai imtuvai generuoja mažą 3-ios eilės aukštesniąją harmoniką bei jos aukštesniąsias kartotines – 9-ąją, 15-ąją, 21-ąją, kurios dar vadinamos trilypėmis arba nulinės sekos harmonikomis.

Dažnio pavarose vyrauja 5-oji ir 7-oji aukštesniosios harmonikos. Jos yra gan nemažos, todėl, galima sakyti, šie įrenginiai labai teršia mūsų tinklą. Pastaruoju metu dėmesys sutelktas būtent į šių harmonikų mažinimą. Sumažinus jas, kreivės forma taptų panašesnė į taisyklingą sinusoidę.

13-oji, 15-oji ir sekančios aukštesniosios srovės harmonikos paprastai būna nežymios ir neturi didelės įtakos kreivės formai.

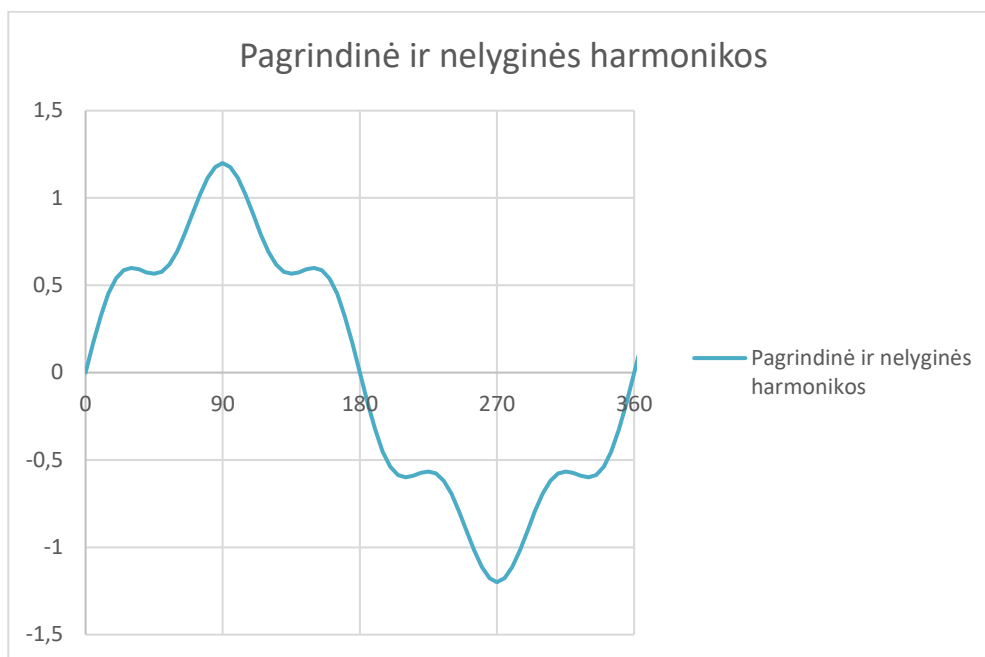
Jeigu elektros tinkle vyrauja viena aukštesnioji harmonika, ją galima atpažinti matydami kreivę. Iškraipymų forma yra pirmosios harmonikos kartotinė. Tačiau tai negalioja, jeigu tinkle vyrauja įvairių dažnių harmonikos.

1.4 paveiklėlyje pavaizduota pagrindinė harmonikos sinusoidė iškraipyta lyginių harmonikų.



1.4 pav. Pagrindinės ir lyginės harmonikos sinusoidė

1.5 paveiklėlyje pavaizduota pagrindinė harmonikos sinusoidė iškraipyta nelyginių harmonikų.



1.5 pav. Pagrindinės ir nelyginės harmonikos sinusoidė

Iš kreivių matome, kad lyginių harmonikų (2-oji, 4-oji, 6-oji ir t.t.) neigiamoji pusperiodžio pusė neatkartoja teigiamąjo periodo pusės. Taip pat galime atpažinti lygines harmonikas, kai matome, kad sutampa periodo ketvirčiai: pirmas su ketvirtu ir antras su trečiu. Tačiau didelis dėmesys į lygines harmonikas nekreipiamas, kadangi pramoniniuose tinkluose jos aptinkamos retai.

Nelyginių harmonikų (3-oji, 5-oji, 7-oji ir t.t.) neigiamoji pusperiodžio pusė atkartoja teigiamąją pusperiodžio pusę, bet priešingomis kryptimis. Taip pat sutampa pirmas su trečiu ir antras su ketvirtu periodo ketvirčiai.

1.2.2. Įtampos harmonikos

Pagal EN 50160:2010 standartą [1], tiekiamosios įtampos netiesinis iškreipimų faktorius arba kitaip įtampos nesinusiškumas turi būti mažesnis arba lygus 8%. THD skaičiuojamas sudėjus visas aukštesniasias harmonikas iki 40 eilės.

Bendro netiesinių iškreipimų faktoriaus (THD) apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1}; \quad (1.3)$$

čia:

U_h – h-tosios eilės harmonikos įtampa, V;

U_1 – pirmosios harmonikos įtampa, V.

Taip pat standarte reglamentuojama atskirų harmonikų amplitudės, kurios pateiktos 1.2 lentelėje:

1.2 lentelė. Įtampos harmonikų maksimalios leistinosios amplitudės

Nelyginės harmonikos				Lyginės harmonikos	
Nekartotinos su 3		Kartotinos su 3			
Eilės Nr.	Santykinė įtampa %	Eilės Nr.	Santykinė įtampa %	Eilės Nr.	Santykinė įtampa %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5	-	-
17	2	-	-	-	-
19	1,5	-	-	-	-
23	1,5	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-

1.3. Aukštesniųjų harmonikų atsiradimas

Aukštesniosios harmonikos teršia mūsų tinklą, todėl svarbu žinoti, iš kur jos atsiranda. Pagrindinis dalykas, dėl kurio jos atsiranda – tai nelinejinės apkrovos arba vartotojų apkrovos varžos netiesiškumas [6]. Kai kurių elementų voltamperinės charakteristikos yra netiesiškos. Šiais laikais tokių įrenginių vis daugėja. Biuruose, įmonėse ir buityje vis didėja kompiuterių, monitorių, spausdintuvų ir kitos įrangos, generuojančios harmonikas. Šiuos iškreipius jaučia ne tik technologiškai išsivysčiusios šalys, aukštesniųjų harmonikų problema su laiku atsiranda visose šalyse ir teršia žemos įtampos tinklą.

Nenormalių rodiklių priežastys yra įvairių nelinejinių elektros įrenginių panaudojimas: lygintuviniai keitikliai, galios elektros įrenginiai su tiristoriniu valdymu (dažnio keitikliai), lankinės ir indukcinės krosnys, liuminescencinės lempos, lankinio ir kontaktinio suvirinimo įrenginiai, buitinė technika (kompiuteriai, televizoriai ir kt.).

Aptarsime kelis pavyzdžius. Vienas jų – impulsiniai maitinimo blokai. Visų tipų impulsiniai maitinimo blokai turi per diodinį tiltelį jungtą elektrolitinį kondensatorių, iš kurio įtampa keliauja į keitiklį. Esant tinklo įtampai mažesnei už kondensatoriaus įtampą, iš tinklo į maitinimo bloką srovė netekės. Įtampai pasiekus kondensatoriaus įtampą, pradės tekėti srovė, užkraudama kondensatorių. Šią srovę ribos tinklo ir bloko elementų varžos. Taip srovėje yra daug aukštesniųjų harmonikų, nes kiekvieną pusperiodį teka tik siauri srovės impulsai. Tinklo varža yra baigtinė, todėl įtampa krenta joje ir sinusinė generatoriaus įtampa moduluojama aukštesniosiomis harmonikomis. Taip vartotojai, kurių apkrova netiesinė, skleidžia aukštesniąsias harmonikas po tinklą ir didina nuostolius vartotojams, kurių apkrova yra tik tiesinė. Galima teigti, kad visi vartotojai yra atsakingi už netiesinius iškreipius [6].

Kitas pavyzdys – elementarios elektros energiją taupančios dienos šviesos lempos. Kai keičiasi srovė lemposje, keičiasi ir joje esančių dujų jonizacijos laipsnis. Tokiu būdu keičiasi visa lempos varža. Tada didėjant srovei, mažėja lempos varža. Ribojant srovę, nuosekliai jungiamas droselis. Esant sinusinei įtampai, per dienos šviesos lempą tekės nesinusinė srovė. Momentinė srovės vertė bus mažesnė už ekvivalentinės galios tiesinės apkrovos srovės momentinę vertę, kai įtampa nedidelė ir didesnė, kai įtampa artima amplitudinei. Tokia apkrova yra srovės harmonikų šaltinis [6]. Dienos šviesos lempos pagrinde generuoja 3-ios eilės aukštesniąsias srovės harmonikas.

Straipsnyje [6] apžvelgiamos srovės harmonikos žemos įtampos tinkluose, kurias sukelia įvairūs netiesiniai prietaisai. Netiesinių įrenginių matuotos srovės harmonikos parodytos 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Netiesinių įrenginių aukštesniųjų harmonikų matavimo rezultatai

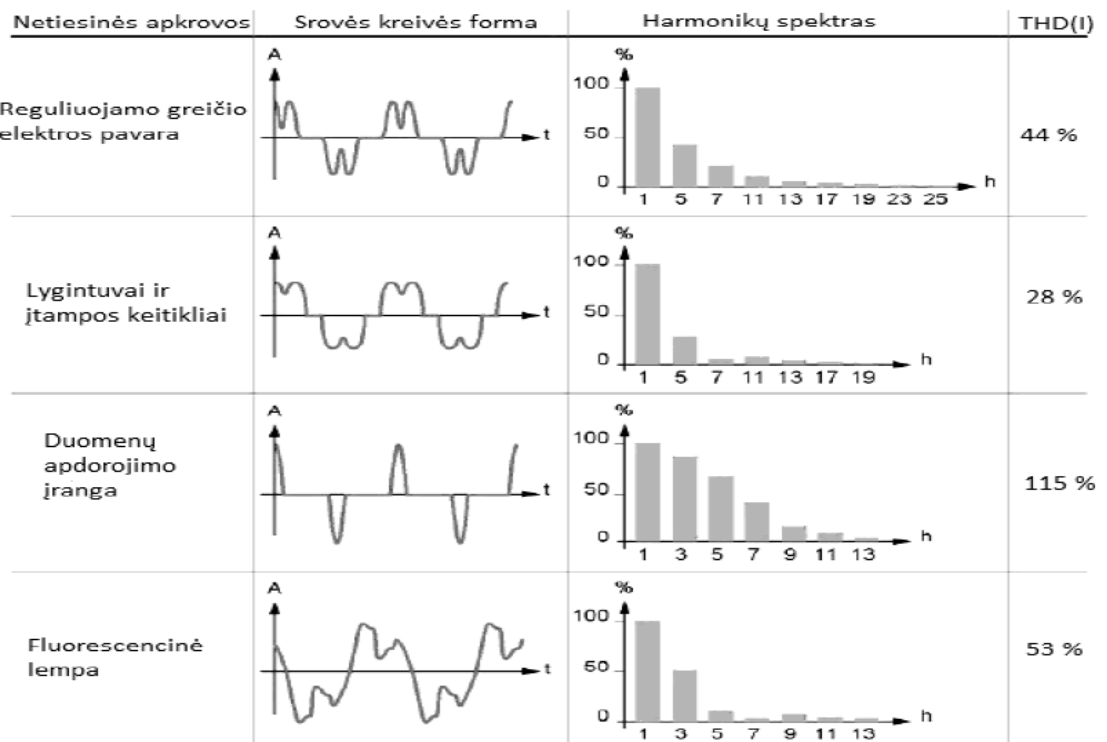
	Įrenginys	Srovė, A	THD, %	Pagrindinių harmonikų numeriai
Vienfaziai įrenginiai	Naujo kompiuterio impulsinis maitinimo blokas	1,1	40,3	3 (33%), 5 (13%)
	Prieš 10 metų pagaminto kompiuterio impulsinis maitinimo blokas	0,28	137	3 (53%), 5 (44%), 7 (33%)
	Dienos šviesos lempų grupė auditorijos apšvietimui	3,7	24	3 (23%), 5 (1%)
	Rezervinio maitinimo įtaiso impulsinis maitinimo blokas (2,2 kW)	2,7	58	3 (45%), 5 (20%), 7 (7%)
Trifaziai įrenginiai	Invertoriaus impulsinis maitinimo blokas	3,4	67,7	5, 7
		4,4	55,3	5, 7
		4,7	54,5	5, 7
	Rezervinio maitinimo įtaiso impulsinis maitinimo blokas (20 kW)	12,5 5,3 12,1	2,4 7,5 1,7	3 (2%) 3 (4,7%), 5 (2,6%) 3 (0,7%), 5 (0,7%)

Taip pat buvo išmatuotos harmonikos valstybinėje įstaigoje, turinčioje didelį kiekį netiesinių apkrovų (kompiuterinė technika, taupantis elektros energiją apšvietimas ir t.t.). Matuota tinklo įvaduose. Rezultatai pateikiami 1.4 lentelėje.

1.4 lentelė. Valstybinės įstaigos aukštesniųjų srovės matavimų rezultatai

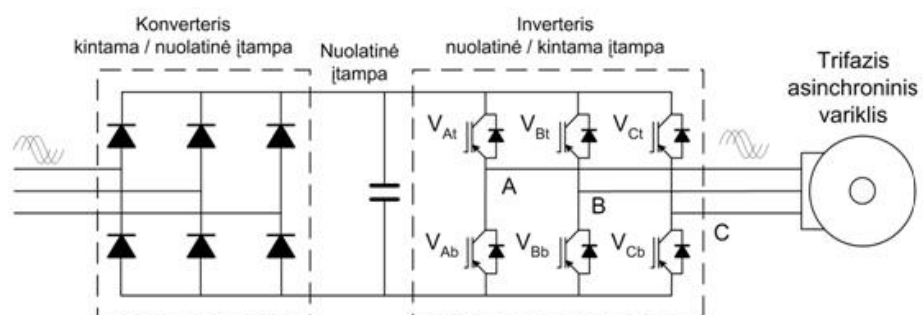
Įvado kabelis Nr. 1	Fazinės įtampos	THD, %	Harmonikų eilės Nr.
	A	3,4	3 (2,5%), 5 (2%), 7 (1,1%)
	B	2,2	3 (1,4%), 5 (1,5%), 7 (0,5%)
	C	3,4	3 (2,9%), 5 (1,5%), 7 (0,8%)
	Nulinio laido srovė	THD	Harmonikų eilės Nr.
	7 A	55	3 (44%), 5 (9%)
Įvado kabelis Nr. 2	Fazinės įtampos	THD	Harmonikų eilės Nr.
	A	3,4	3 (2,5%), 5 (2,0%), 7 (1,0%)
	B	2,4	3 (1,5%), 5 (1,7%), 7 (0,4%)
	C	3,2	3 (2,7%), 5 (1,5%), 7 (0,5%)
	Nulinio laido srovė	THD	Harmonikų eilės Nr.
	5,4 A	58	3 (50%), 5 (7%)

Keleta netiesinių apkrovų imtuvų sukeltamų srovės iškraipymų pavyzdžiai su harmonikų spektrais pavaizduoti 1.6 paveiklėlyje [7].



1.6 pav. Netiesinių apkrovų iškraipymai ir harmonikų spektrai

Pramonėje, kur vyksta didelė gamyba, reikalingi galingi elektros varikliai. Esant skirtingiems gamybos procesams, reikalingas variklio reguliavimas, kuris dažniausiai išpildomas dažnio keitikliais. Jo veikimo principas paprastas – kintamoji įėjimo įtampa paduodama į lygintuvą, kuriame tilteliu keičiama į nuolatinę. Nuolatinė įtampa paduodama į nuolatinės srovės grandinę, kuri filtruoja pulsuojančią įtampą. Tada tranzistoriai nustatytu dažniu atsidarinėja ir sukuria tam tikro dažnio kintamąją įtampą. Elektros variklis, jungiamas per dažnio keitiklį, pavaizduotas 1.7 paveiklėlyje.



1.7 pav. Trifazis variklis, valdomas dažnio keitikliu

Iš 1.6 paveikslėlio matome, kad dažnio keitikliai yra gan nemaži netiesinių apkrovų imtuvai. Tikslinga būtų išsiaiškinti, kodėl jie generuoja dideles aukštesniasias harmonikas. Pagrindinės dvi priežastys [8]:

- 1) asinchroninis variklis. Dėl aukšto inverterio raktų perjungimo dažnio inverteris generuoja aukšto dažnio harmonikas, kurios apima iki 10 MHz dažnio. Išspręsti šiai

problemai visi dažnio keitiklių gamintojai rekomenduoja, jų pajungimui su varikliu, naudoti ekranuotus kabelius, kurie nurodytu atstumu būtų nutolę nuo kitų kabelių (dėl indukuotos įtampos). Taip pat, atstumas tarp dažnio keitiklio ir jo valdomo variklio turėtų būti kuo mažesnis;

- 2) maitinimo tinklas. Dažnio keitikle, kintamoji srovė tiltelio pagalba išlyginama lygintuvu. Jame ir susidaro aukštesniosios harmonikos. Trifazį srovės lygintuvą sudaro šeši diodai. Perjungimų dažnis tiltelyje yra 300 Hz pagrindinio dažnio elektros tinkle (50 Hz). Aukštesniosios srovės harmonikos, kurių spektras yra iki 3 kHz, patenka į elektros tinklą.

Kintamieji, nuo kurių priklauso dažnio keitiklių generuojamų aukštesniųjų harmonikų dydis:

- a) per lygintuvą pratekančios srovės;
- b) lygintuvo konfigūracijos (6 pulsų, 12 pulsų ir t.t.);
- c) elektros tinklo savybių ir maitinimo šaltinio induktyviosios varžos.

Dažnio keitiklyje kiekvienoje fazėje yra srovės pulsacijos. Tai ir yra pagrindinė aukštesniųjų harmonikų generavimo priežastis. Lygintuve kiekvienoje fazėje yra po du diodus, kurie sujungti taip, kad praleistų tik neigiamas arba tik teigiamas pusperiodžio sroves. Išėjime gauname 6 kartus didesnę nuolatinės srovės pulsacijų dažnį, nei kintamosios srovės dažnis. Šios pulsacijos yra sumažinamos droseliu, esančiu nuolatinės srovės grandinėje. Bet to neužtenka ir lygintuvą dėl mažos induktyviosios varžos tampa aukštesniųjų srovės harmonikų generatoriumi [9].

Kelintos eilės aukštesniosios harmonikos generuojamos į tinklą, galima apskaičiuoti žinant lygintuvo pulsacijų skaičių [10]:

$$f_n = (k \cdot p \pm 1) \times f_1; \quad (1.4)$$

čia:

f_n – n-tosios harmonikos dažnis, Hz;

f_1 – 1-osios harmonikos dažnis, Hz;

k – kintamieji, 1, 2, 3, 4, ...;

p – lygintuvo pulsacijų skaičius.

Iš šios formulės matome, kad harmonikų, kurios generuojamos į tinklą, eilės numeris priklauso nuo lygintuvo pajungimo tipo. Tai parodyta 1.5 lentelėje.

1.5 lentelė. Harmonikų priklausomybė nuo lygintuvo pajungimo

Lygintuvo pajungimo tipas	Pulsacijų skaičius	Generuojamų harmonikų eilės Nr.
Vienfazis vieno pusperiodžio	1	3, 5, 7, 9, 11, 13
Trifazis vieno pusperiodžio	3	2, 4, 5, 7, 8, 10
Trifazis dviejų pusperiodžių	6	5, 7, 11, 13, 17, 19
Šešiafazis dviejų pusperiodžių	12	11, 13, 23, 25

Aukštesniųjų harmonikų dydis priklauso nuo apkrovos reikalaujamos aktyviosios galios, kuri yra tiesiogiai proporcinga nuolatinės srovės apkrovai I_D . Trifaziam 6 pulsacijų lygintuvui apkrovos srovė skaičiuojama pagal formulę 1.5[11]:

$$I_A = \sqrt{3} \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_D = 0,78 I_D; \quad (1.5)$$

čia:

I_A – lygintuvo apkrova, A;

I_D – nuolatinės srovės apkrova, A;

Jei paimtume, kad pulsacijų visiškai nėra ir nuolatinė srovė I_D yra lygi, tai teoriškai galima apskaičiuoti lygintuvo harmonikų srovę:

$$I_n = \frac{I_1}{n}; \quad (1.6)$$

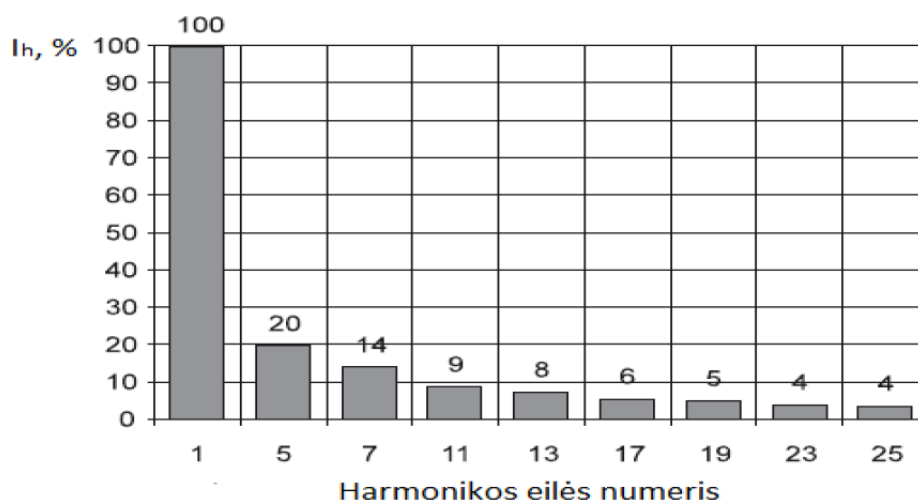
čia:

I_n – n-tosios eilės srovės harmonika, A;

I_1 – pagrindinė harmonika, A;

n – aukštesniosios harmonikos eilės numeris.

Pagal 1.6 formulę, gautos aukštesniosios eilės harmonikų procentinės srovės pateikiamos paveikslėlyje 1.8.



1.8 pav. Teorinės aukštesniųjų harmonikų srovės

Tačiau tai tik teorinės srovės, kadangi pulsacijų pilnai išlyginti neįmanoma. Todėl aukštesniųjų harmonikų srovės ištikrųjų yra gerokai didesnės.

Taigi, yra trys pagrindiniai faktoriai, nuo kurių priklauso dažnio keitiklio lygintuvo teršiamų aukštesniųjų harmonikų dydis [10]:

1. maitinimo šaltinio induktyvinės varžos;
2. kabelio induktyvinės varžos;
3. droselio panaudojimo nuolatinės srovės grandinėje.

1.4. Aukštesniųjų harmonikų šalinimas

Aukštesniųjų harmonikų problema yra labai aktuali ir reikalauja tokio pat dėmesio, kaip ir apsaugos nuo trumpųjų jungimų, perkrovimų ar viršįtampių. Aukštesniųjų harmonikų problemos aktualumas atsirado po telefoninių ryšių trugdymų, nes šalia telefoninių linijų esančios elektros linijos trugdė susisiekimo kokybei, dėl indukuojamos įtampos. Šiuo metu telefoninės linijos klojamos toliau nuo jėgos linijų arba naudojami ekranuoti kabeliai, kurie slopina aukštosios įtampos poveikį.

Neigiami veiksniai, kurie atsiranda dėl aukštesniųjų srovės harmonikų [9]:

1. papildomi aktyviosios galios nuostoliai;
2. papildomi transformatorių ir variklių nuostoliai;
3. įrenginių tarnavimo laiko sumažėjimas dėl įšilimo;
4. galios koeficiento sumažėjimas;
5. variklių vibracija;
6. apkrautas nulinis laidininkas;
7. srovės ir įtampos sinusoidžių iškraipymai;
8. relinių apsaugų klaidos.

Didelis dėmesys skiriamas harmonikų tyrimams. Periodiškai daromi kompleksiniai matavimai pramoniniuose ir energetiniuose tinkluose, vykdomas įvertinimas pagal tarptautines normas. Aukštesniosios harmonikos prognozuojamos, skaičiuojamos, kad būtų galima taikyti priemones jų pašalinimui.

Pagrindinės priemonės aukštesniųjų harmonikų mažinimui yra linijos reaktorių arba harmonikų filtrų panaudojimas.

1.4.1. Iškraipymų šalinimas linijos reaktoriumi

Linijos reaktoriai naudojami ribotos galios tinkle. Rekomenduojama statyti, kai [12]:

1. vieno dažnio keitiklio galia neviršija 500 kW;
2. visų pajungtų dažnio keitiklių galia neviršija 1 MW.

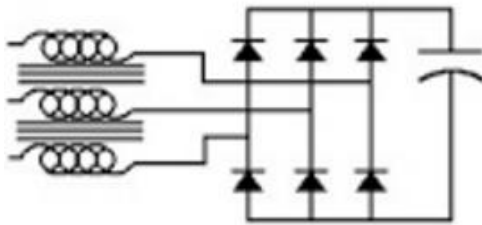
Iš esmės, reaktorius yra paprasta indukcinė ritė. Srovei, tekant per ritę, sukuriama magnetinis laukas. Jis yra proporcingas vijų skaičiui ir per vijas tekančiai srovei. Dažniausiai šerdis gaminama iš elektrotechninio plieno, kuris pagerina induktyvumą. Indukcinė ritė kaupia energiją magnetiniame lauke ir sukuria saviindukcijos elektrovarą. Ši neleidžia kisti srovei. Dažnio keitiklio nuolatinės srovės grandinėje ritės induktyvumas riboja srovės pokyčius.

Naudojant reaktorių, atsiranda ir neigiami veiksniai:

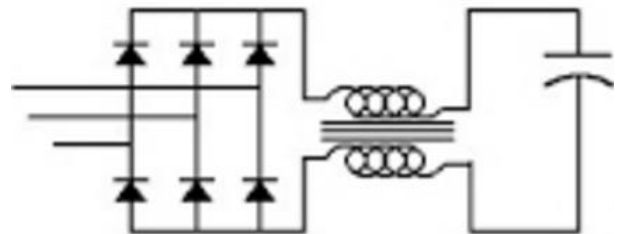
1. elektros sistemos savikainos padidėjimas;

2. nuostoliai varinėje vieloje;
3. papildomi nuostoliai feromagnetinėje šerdyje dėl susidariusių sūkurinių srovių;
4. papildomas įšilimas;
5. elektros sistemos efektyvumo sumažėjimas;
6. dėl reaktoriuje kritusios įtampos, sumažėja ir vartotojų įtampa;
7. reikalinga papildoma vieta.

Galimi du linijų reaktoriaus jungimo būdai. Pirmas – linijos reaktorių jungiamas maitinimo grandinėje kiekvienai fazei po ritę (1.9 pav.), antras – linijos reaktorių jungiamas nuolatinės srovės grandinėje (1.10 pav.). Abu variantai atlieka tą pačią funkciją, t.y. mažina netiesinius srovės iškraipymus. Dėl reaktoriaus sumažintų srovės pikų, sinusoidė tampa panašesnė į taisyklingą. Šiuolaikiniuose dažnio keitikliuose, kurių galia didesnė nei 7,5 kW, jau yra integruoti linijos reaktoriai nuolatinės srovės grandinėje. Šis būdas yra pigesnis, nes pakanka tik vieno reaktoriaus.



1.9 pav. Reaktorių maitinimo grandinėje



1.10 pav. Reaktorių DC grandinėje

Projektuojant elektros tinklą, svarbu numatyti visus aukštesniąsias harmonikas generuojančius įrenginius. Taip galima tinkamai parinkti linijos reaktorių ir labai sumažinti bendrą netiesinių iškreipimų faktorių [6].

1.4.2. Iškreipimų šalinimas aukštesniųjų harmonikų filtrais

Harmonikų filtrus rekomenduojama naudoti, kai neužtenka linijos reaktorių. Esant visiems pajungtiems dažnio keitikliams, kurių bendra galia viršija 1 MW, harmonikų filtrai geriau sumažins bendrą netiesinių iškreipimų faktorių iki leistinų ribų.

Analizuojant aukštesniąsias harmonikas, buvo pastebėta, kad labiausiai elektros tinklą iškraipo 3-iosios ir 5-osios eilės harmonikos. 3-ios eilės harmonikas sukelia kompiuterinė technika, liuminescencinės lempos ir t.t., 5-ios – dažnio keitikliai, lygintuvai ir t.t. Žinant, kokie įrenginiai sukelia kokios eilės harmonikas, galime ženkliai sumažinti bendrą netiesinių iškreipimų faktorių panaudojant konkrečią harmoniką slopinančius filtrus.

Egzistuoja trys skirtingų tipų filtrai:

1. pasyvus filtras;
2. aktyvus filtras;

3. hibridinis filtras.

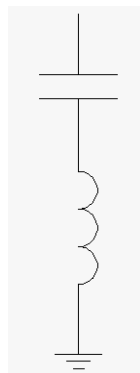
Plačiau aukštesniųjų harmonikų filtrai bus aptarti sekantėje skyriuje.

1.5. Filtrai

Elektros sistemose filtrai naudojami, kad sumažinti srovių ar įtampų amplitudę vieno ar kelių aukštesniųjų harmonikų dažnių. Tai priklauso nuo jų tipo.

1.5.1. Pasyvus filtras

Kai būtina išvengti konkrečios eilės aukštesniosios harmonikos tam tikrame mazge skirstymo pastotėse arba daliai elektros energijos sistemos, galima lygiagrečiai pajungti pasyvųjį filtrą. Jie vadinami pasyviaisiais, nes neturi išorinio maitinimo šaltinio ir jų sudėtyje nėra aktyviųjų komponentų. Pasyvusis filtras susideda iš kondensatoriaus ir ritės (pav. 1.11). Šie elementai sukuria didelį pasipriešinimą tam tikro dažnio harmoninėms srovėms. Tačiau toks sprendimas negali būti pritaikytas maitinimo harmonikoms sumažinti, nes netiesinių elementų, pavyzdžiui, transformatorių, harmonikų generavimas yra neatsiejamo normalaus darbo dalis[13].



1.11 pav. Pasyvus filtras

Filtras yra nustatytas tam tikram dažniui, prie kurio talpuminė ir induktyvinė reaktyvinė varžos yra lygios. Filtro kokybės faktorius Q_F nusako nustatymo tikslumą. Pasyvusis filtras, su aukštu kokybės faktoriumi (nuo 30 iki 60) yra nustatomas griežtai vienos eilės žemai harmonikai, pavyzdžiui trečiajai arba penktajai. Filtras su žemu kokybės faktoriumi turi mažą varžą plačiame dažnio diapozone, ypač jeigu faktorius neviršija 5. Jeigu toks filtras naudojamas aukštų eilių harmonikoms mažinti, pavyzdžiui 17-os ir aukštesnės, tai tokį filtrą galima pritaikyti ir kaip filtrą aukštiems dažniams. Filtro kokybės faktorius priklauso nuo induktyvinės arba talpuminės rezonansinės varžos ir aktyvinės varžos:

$$Q_F = \frac{X_R}{R}; \quad (1.7)$$

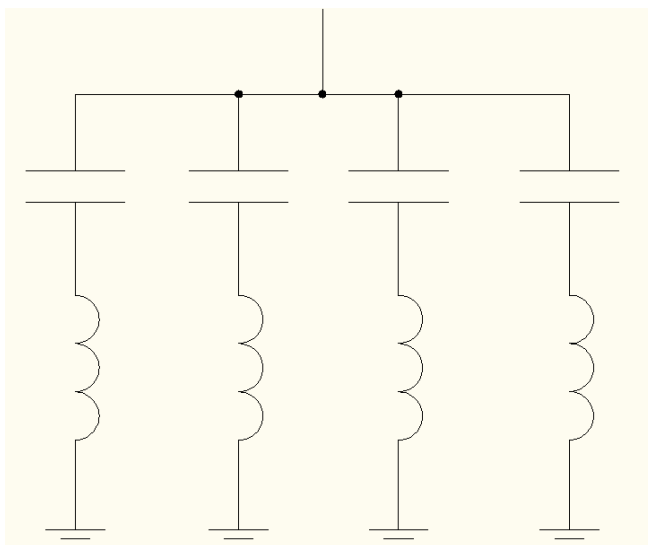
čia:

Q_F – filtro kokybės faktorius;

X_R – induktyvinė arba talpuminė rezonansinė varža;

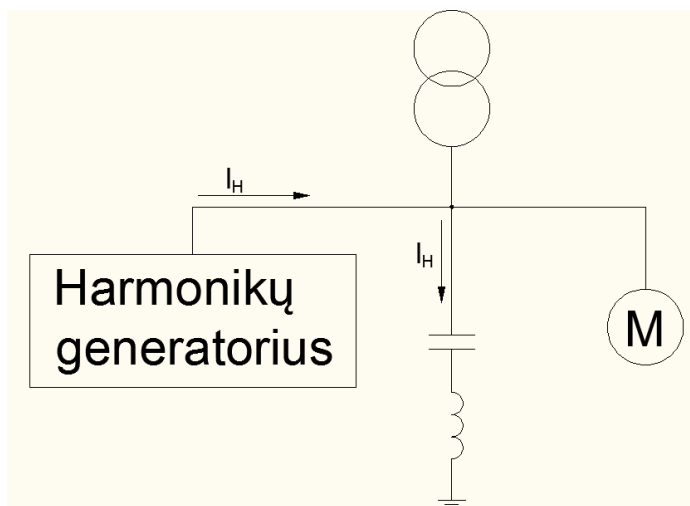
R – aktyvioji varža.

Norint sumažinti keleta harmonikų dedamųjų, gali būti panaudojami keli filtrų atšakų kontūrai. Toks pavyzdys pavaizduotas paveikslėlyje 1.12.



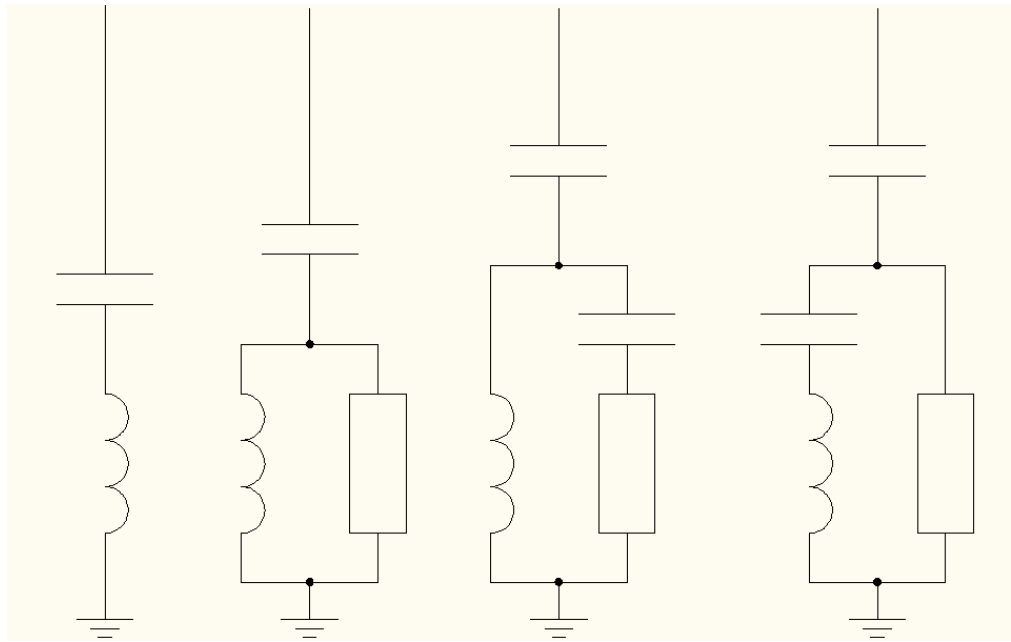
1.12 pav. Kelios atšakos pasyviųjų filtrų

Pasyvaus filtro prijungimo prie elektros sistemos pavyzdys pavaizduotas 1.13 paveikslėlyje.



1.13 pav. Pasyvus filtras elektros sistemoje

Pasyvieji filtrai gali būti ne tik iš vienos ritės ir vieno kondensatoriaus. Yra keli skirtingi jungimo būdai, kurie pavaizduoti 1.14 paveikslėlyje.



1.14 pav. Pasyviųjų filtrų tipai

Pasyvieji filtrai panaudojami:

1. elektros tinkluose, turinčiuose didesnę nei 200 kVA galios bendrą apkrovą;
2. pramoniniuose elektros tinkluose, turinčiuose daug skirtingos eilės aukštesniųjų harmonikų;
3. elektros tinkluose, kuriuose yra kondensatorinės baterijos, kompensuojančios reaktyviąją energiją;
4. elektros tinkluose, kuriuose yra jautrūs įtampos iškreipymams imtuvai;
5. elektros tinkluose, kuriuose siekiama išvengti įrenginių perkrovimo ar perkaitimo.

1.5.2. Aktyvus filtras

Aktyvus harmonikų filtras susideda iš elektroninės galios sistemos. Galimi du jungimo būdai – lygiagrečiai arba nuosekliai aukštesniųjų harmonikų šaltiniui. Jo veikimo principas pagrįstas srovės padavimu į tinklą, priešingu iškreipymams. Aktyviųjų filtrų darbo parametrai nustatomi programiniu būdu ir lengvai kontroliuojami tiek vietiniu, tiek nuotoliniu būdu [14]. Keli pavyzdžiai, kaip atrodo aktyvieji filtrai pavaizduoti 1.15 paveikslėlyje.

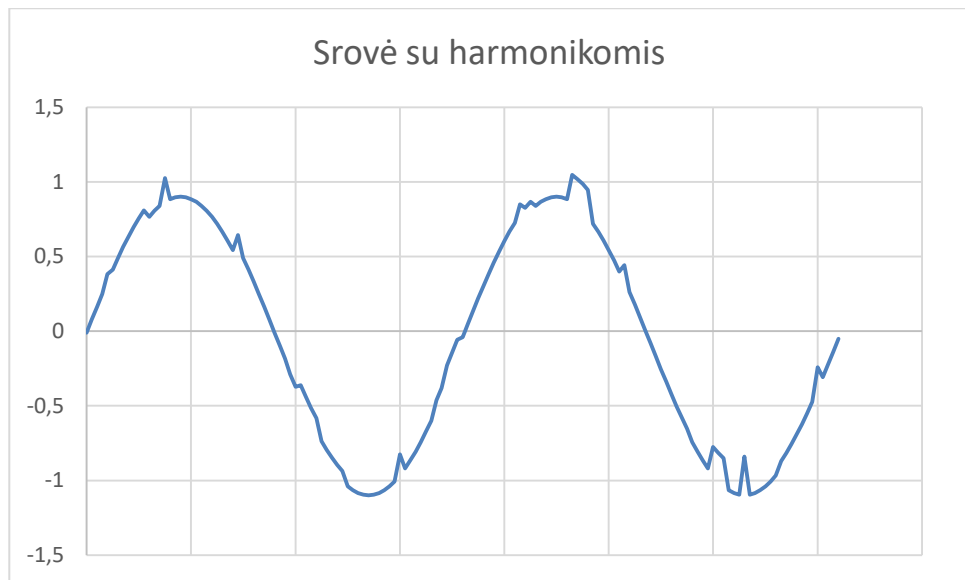


1.15 pav. Aktyvieji filtrai

Aktyvieji harmonikų filtrai yra žinomi gan seniai, tačiau jų gaminimą kurį laiką stabdė aukšta kaina. Šiandien platus pasirinkimas bipoliarinių tranzistorių su izoliuotu užtvaru ir skaitmeninių signalų procesoriumi pavertė aktyviuosius filtrus puikiu harmonikų problemų sprendimu [15]. Jie nuo pasyvių filtrų skiriasi ne tik aktyvių elementų sedėtimi, bet ir tuo, kad aktyviems filtrams būtinas atskiras maitinimas. Aktyvieji filtrai labiausiai pasižymi žemųjų dažnių diapozone. Jie pranašesni už pasyvius tuo, kad yra mažesnių matmenų ir lengvesni. Taip pat kaina tampa vis labiau prieinama.

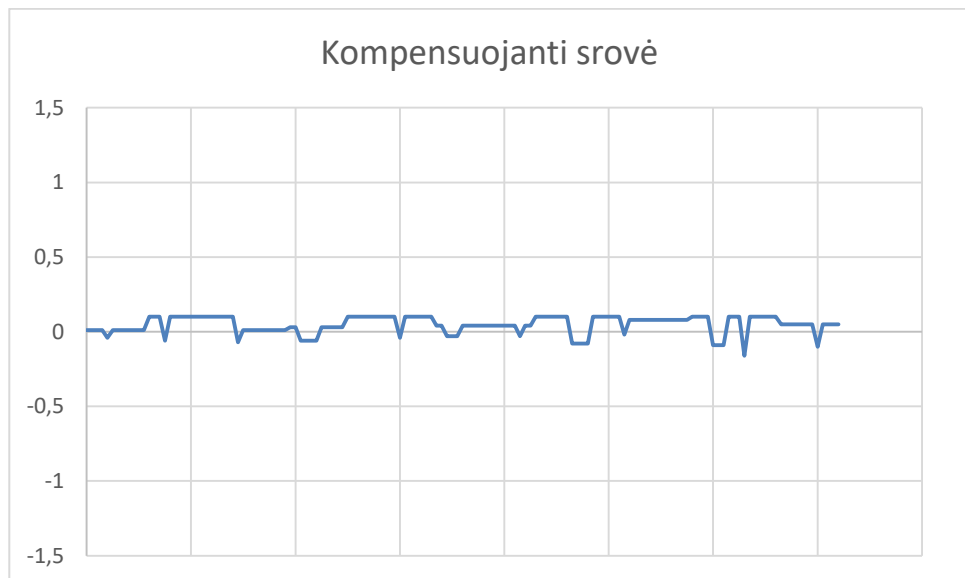
Aktyvus filtras mažina aukštesniąsias harmonikas plačiame dažnių diapozone. Jis tinkamas naudoti prie visų apkrovų, tačiau jo harmonikų galia yra ribota.

Pagrindinis aktyviųjų filtrų parametras yra kompensuojamoji srovė. Įrenginys momentaliai sugeba matuoti tinklo parametrus ir paduoti srovę, priešingą iškraipymams. 1.16 paveikslėlyje pavaizduota srovės sinusoidė su harmonikomis.



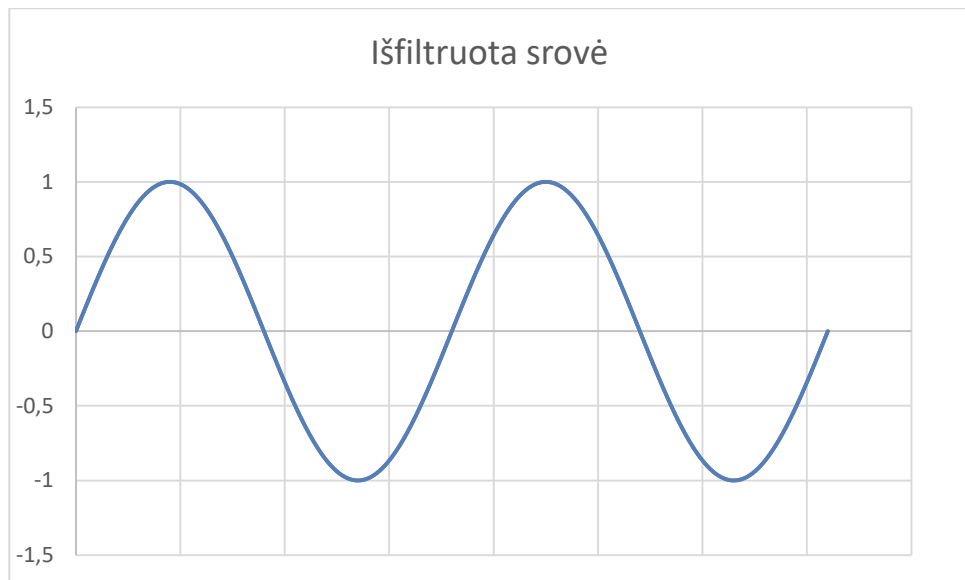
1.16 pav. Srovės sinusoidė su harmonikomis

Aktyvus filtras matuoja bendrą srovę su iškreipymais ir paduoda kompensuojančią srovę, priešingą harmonikoms, kuri pavaizduota 1.17 paveikslėlyje.



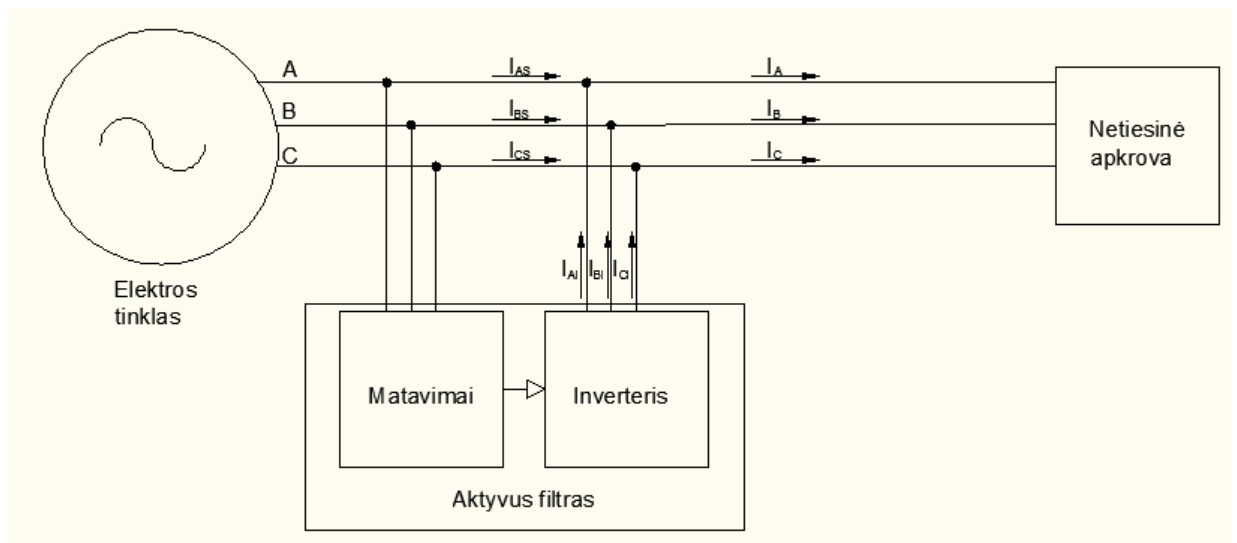
1.17 pav. Kompensuojanti srovės sinusoidė

Sudėjus abi srovės dedamąsias, gauname išėjimo sinusoidę, kuri pavaizduota 1.18 paveikslėlyje.



1.18 pav. Išfiltruota srovės sinusoidė

Iš grafikų matome, kad aktyvusis filtras paduoda srovę, lygią iškraipymams, tik priešingo pusperiodžio, taip panaikindama tinkle esančias aukštesnias harmonikas. Principinė schema su lygiagrečiai sujungtu aktyviu harmonikų filtru pavaizduota 1.19 paveikslėlyje.



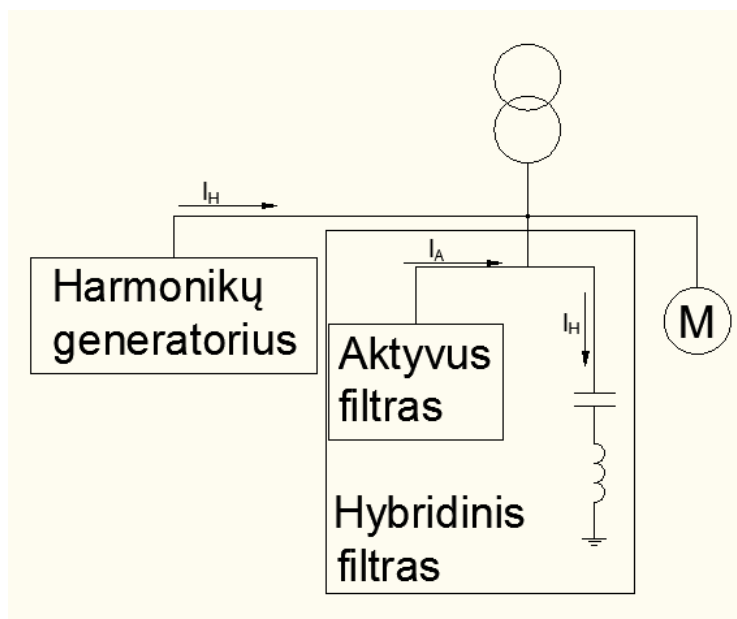
1.19 pav. Principinė aktyvaus filtro schema

Aktyvieji filtrai panaudojami:

1. elektros tinkluose, turinčiuose didesnę nei 200 kVA galios bendrą apkrovą;
2. gyvenamųjų sektorių, biurų, prekybos centrų elektros tinkluose, turinčiuose daug skirtingos eilės aukštesniųjų harmonikų;
3. elektros tinkluose, kuriuose siekiama išvengti įrenginių perkrovimo ar perkaitimo.

1.5.3. Hibridinis filtras

Hibridiniai harmonikų filtrai susideda iš pasyvaus ir aktyvaus filtrų ir apjungia jų privalumus. Filtras pavaizduotas 1.20 paveikslėlyje.



1.20 pav. Hibridinio filtro principinė schema

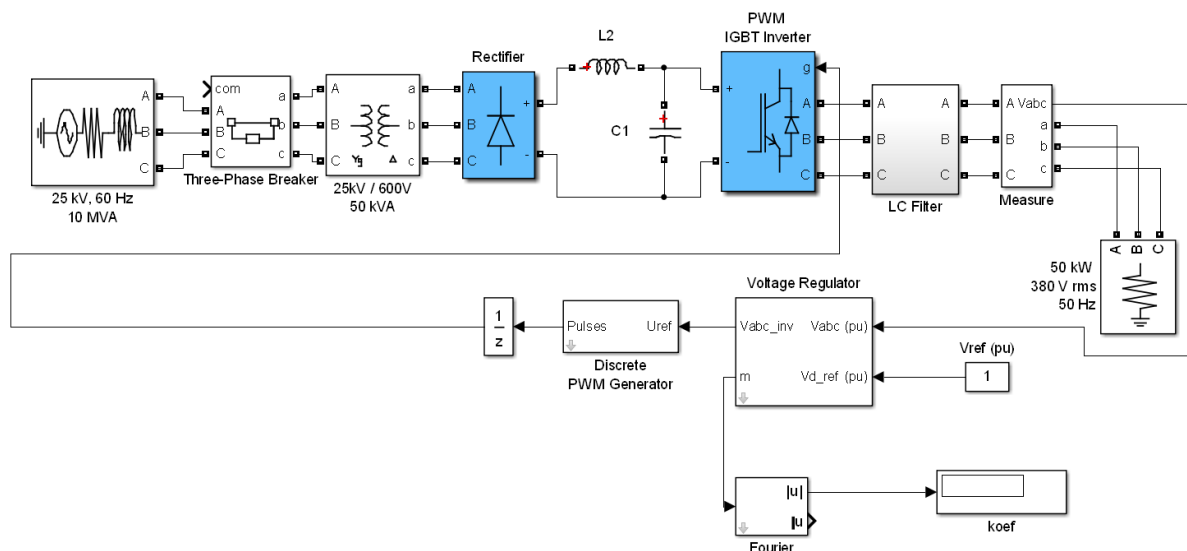
Hibridiniai filtrai panaudojami:

1. elektros tinkluose, turinčiuose didesnę nei 200 kVA galios bendrą apkrovą;
2. pramoniniuose elektros tinkluose, turinčiuose daug skirtingos eilės aukštesniųjų harmonikų;
3. elektros tinkluose, kuriuose yra kondensatorinės baterijos, kompensuojančios reaktyviąją energiją;
4. elektros tinkluose, kuriuose yra jautrūs įtampos iškreipymams imtuvai;
5. elektros tinkluose, kuriuose siekiama išvengti įrenginių perkrovimo ar perkaitimo;
6. elektros tinkluose, kuriuose laikomasi griežtų aukštesniųjų harmonikų emisijų reikalavimų.

2. Dažnio keitiklio modeliavimas

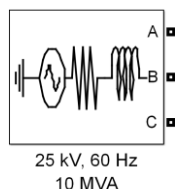
Modeliavimui buvo pasirinkta „Matlab“ programa. „Matlab“ yra viena seniausių kompiuterinių programų, kurios skirtos automatizuoti ir modeliuoti mokslinius ir inžinerinius skaičiavimus. Turint bent minimalios programavimo patirties, nesunku perprasti darbą su ja [16].

„Simulink model“ pagalba sudaryta schema, pavaizduota 2.1 paveiklėlyje.



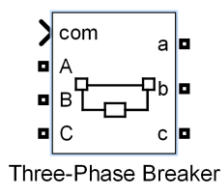
2.1 pav. Struktūrinė schema

Maitinimo šaltinio parametrai: įtampa – 25 kV, dažnis – 60 Hz, galia – 10 MVA. Blokas pavaizduotas 2.2 paveiklėlyje.



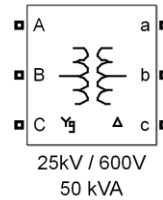
2.2 pav. Maitinimo šaltinis

Šaltinis nuo sistemos atskirtas jungtuvu, kuris pavaizduotas 2.3 paveikslėlyje.



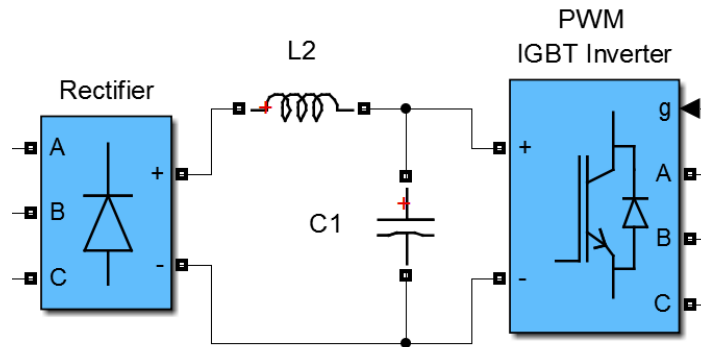
2.3 pav. Jungtuvas

Įtampa yra žeminama transformatoriumi, kurio pagrindiniai parametrai: pirminė įtampa – 25 kV, antrinė įtampa – 600 V, galia – 50 kVA, jungimo tipas – žvaigždė-trikampis. Transformatoriaus blokas pateikiamas 2.4 paveiklėlyje.



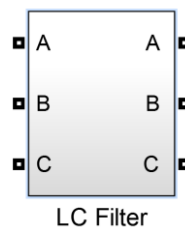
2.4 pav. Transformatorius

Toliau jungiamas dažnio keitiklis, kuris susideda iš diodinio lygintuvo (Retrifer), AC/DC nuolatinės įtampos intarpo papildomų elementų L2 ir C1 ir PWM (impulsų pločio moduliacijos) inverterio DC/AC su IGBT tranzistoriais (PWM IGBT Inverter). Pažeminta įtampa išlyginama per šešių impulsinių diodų tiltelį, nufiltruojama ir panaudojama dviejų lygių IGBT inverteriui generuoti 50 Hz. IGBT inverteris naudoja impulsų pločio modeliaciją prie 5 kHz bazinio dažnio. Dažnio keitiklis pavaizduotas 2.5 paveikslėlyje.



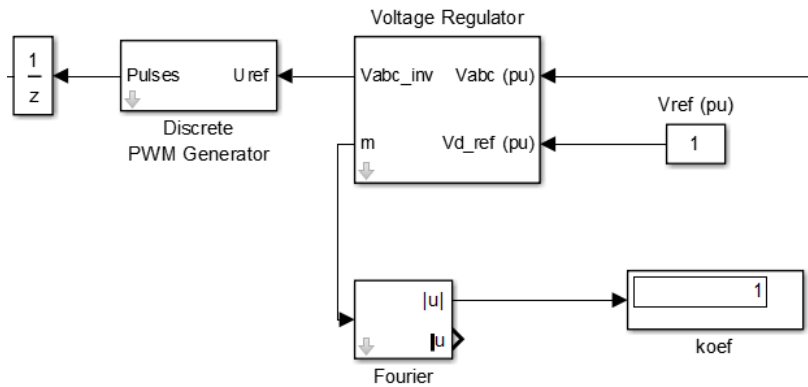
2.5 pav. Dažnio keitiklis

Po dažnio keitiklio pajungiamas pasyvus filtras LC, kurio parametrai: ritės induktyvumas – 2mH, kondensatoriaus įtampa – 380 V, dažnis – 50 Hz, reaktyvinė galia – 3 kVAr. Jis pavaizduotas 2.6 paveikslėlyje.



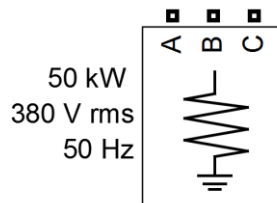
2.6 pav. LC pasyvus filtras

Blokas „Measure“ reikalingas įtampos reguliatoriui (Voltage Regulator). Įtampos reguliatoriui siunčiami matavimai verčiami abc_to_dq ir dq_to_abc transformacijomis. Pirmas įtampos reguliatoriaus išėjimas yra vektorius, susidedantis iš trijų modeliuojančių signalų, kuris reikalingas reguliuoti IGBT pulsus, antras parodo moduliacijos koeficientą. Blokai pavaizduoti 2.7 paveikslėlyje.



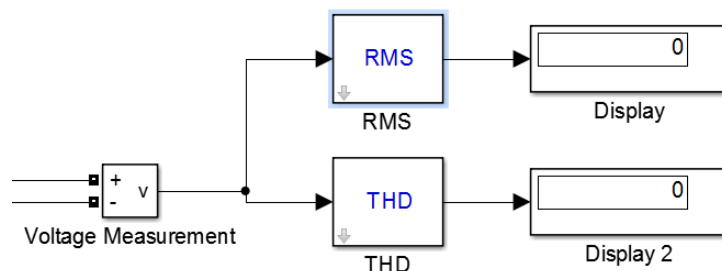
2.7 pav. Įtampos reguliatorius su išėjimais

Apkrovos parametrai: galia – 50 kW, įtampa – 380 V, dažnis – 50 Hz. Apkrova pavaizduota 2.8 paveikslėlyje.



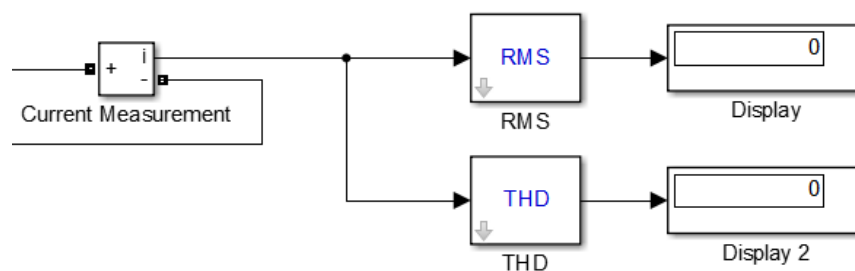
2.8 pav. Apkrova

Iš praeitų skyrių žinome, kad dažnio keitikliai sukelia aukštesniąsias harmonikas. „Matlab“ programa leidžia mums jas išmatuoti. Tai atliekame keliais papildomais blokais, pavaizduotais 2.9 paveikslėlyje. „Voltage Measurement“ blokas matuoja momentinę įtampos reikšmę. „+“ jungiame prie fazės, „-“ prie įžeminimo. „RMS“ blokas skaičiuoja vidutinę kvadratinę reikšmę (fazinę įtampą). „THD“ blokas skaičiuoja bendrą netiesinių iškreipimų faktorių, išreiškiamą santykiniais vienetais. Šiuos blokus sujungiame su „Display“ bloku, kuris parodo mums reikšmę.



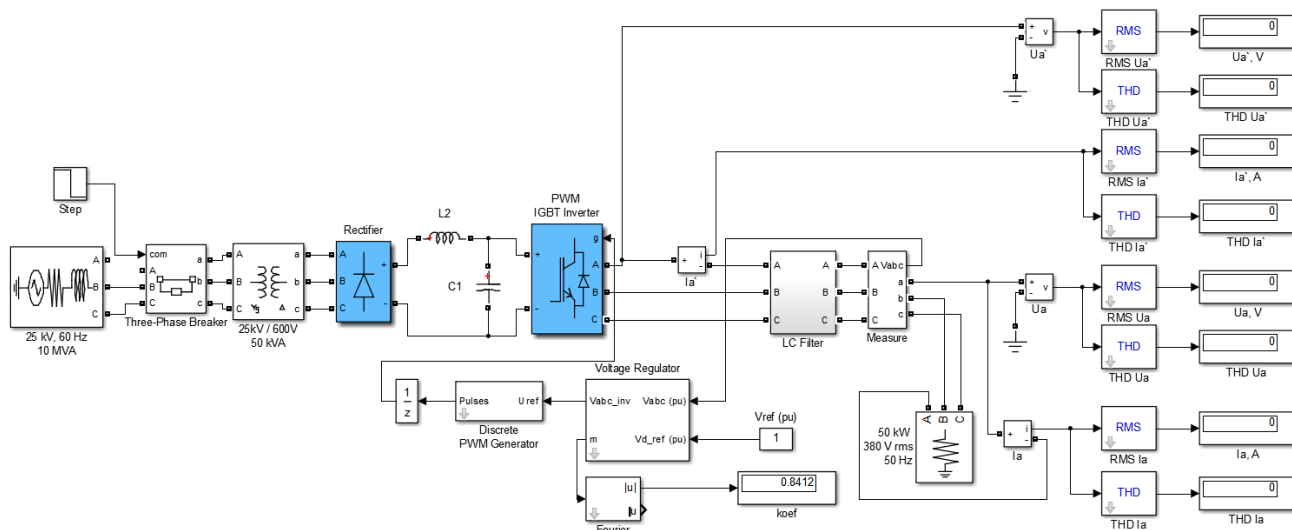
2.9 pav. Įtampos matavimų blokai

Analogiškai matuojame ir srovės harmonikas, tačiau šiek tiek skiriasi bloko pajungimas. Matavimo prietaisą reikia jungti nuosekliai prie „+“ ir „-“ jungčių. Srovės matavimai ir pajungimas parodytas 2.10 paveikslėlyje.



2.10 pav. Srovės matavimų blokai

Norint matyti, kaip pasyvus filtras atlieka savo darbą, reikia jungti du matavimų blokus. Vieną jungti tarp dažnio keitiklio ir filtro, kitą tarp filtro ir apkrovos. Bendra schema pavaizduota 2.11 paveikslėlyje.



2.11 pav. Bendra principinė schema

„Run“ mygtuku yra paleidžiama simuliacija. Gauti rezultatai pateikiami 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Simuliacijos rezultatai

	Prieš filtrą	Po filtro
U, V	293,3	219,9
$THD_U, \%$	86,1	2,122
I, A	76,41	76,15
$THD_I, \%$	5,954	2,122

Čia:

U – įtampa;

THD_U – įtampos netiesinių iškreipimų faktorius;

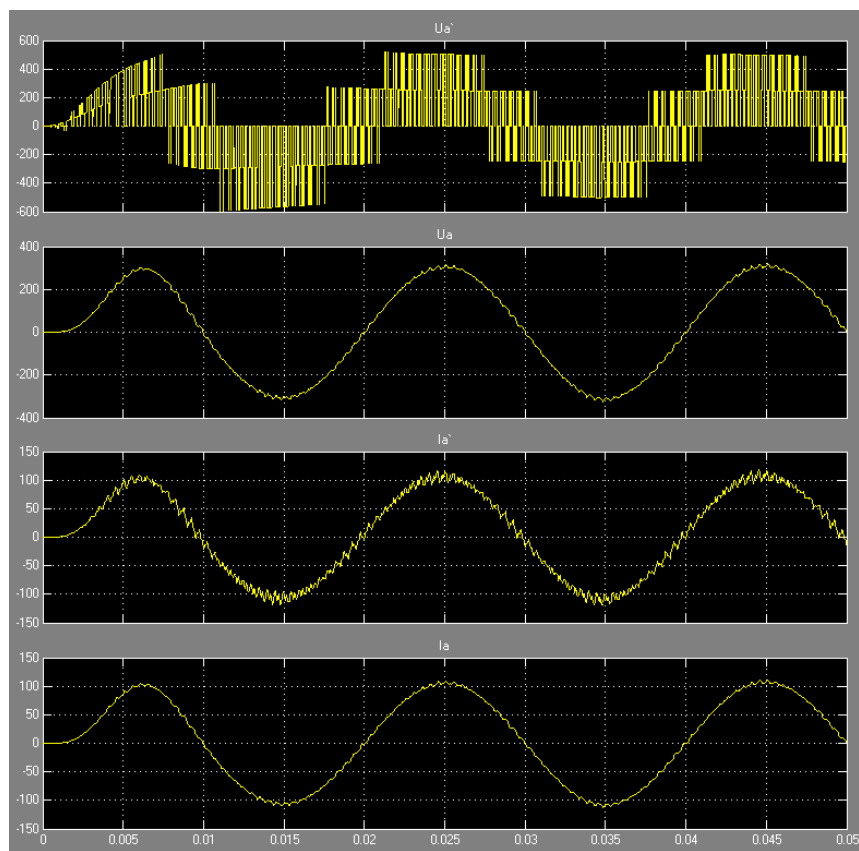
I – srovė;

THD_I – srovės netiesinių iškreipimų faktorius.

Iš rezultatų matome, kad įtampos harmonikos prieš filtrą yra labai didelės (86,1 %), todėl ir įtampa labai didelė (293,3 V). Po filtro matuota įtampa smarkiai pakitus (219,9 V) ir bendras

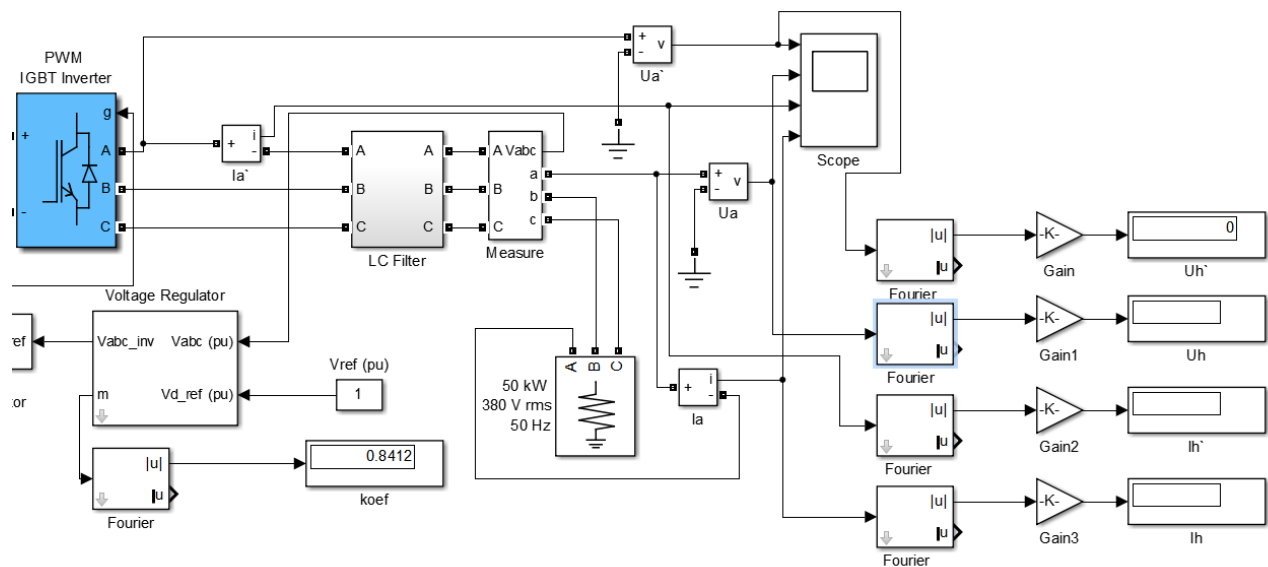
iškreipių faktorius tampa EN 50160 standarto ribose (2,122 %). Galima teigti, kad filtras gerai atlieka savo darbą.

Įtampos ir srovės kitimus galima pavaizduoti ir grafiškai, „Scope“ bloko pagalba. Grafikai pavaizduoti 2.12 paveikslėlyje.



2.12 pav. Įtampos ir srovės sinusoidės

Taip pat galima nustatyti ir konkrečios harmonikos vertes. Tą darome furje transformacijos pagalba. Įkeliamo „Fourier“ bloką ir daugiklį „Gain“, lygų $\sqrt{2}$, kad matyti efektines vertes. Schema pavaizduota 2.13 paveikslėlyje.



2.13 pav. „Scope“ ir harmonikų matavimo blokai

Skaičiuota buvo 3, 5, 7, 9, 11, 13 ir 15 eilės numerio aukštesniosios harmonikos. Rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Aukštesniųjų harmonikų skaičiavimų rezultatai

Harmonikos eilės nr.	Uh' , V	Uh , V	Ih' , A	Ih , A
3	0,9773	0,9473	0,3296	0,328
5	0,3893	0,3033	0,1118	0,105
7	0,1954	0,1691	0,0603	0,05857
9	0,04483	0,04763	0,01403	0,01649
11	0,2133	0,05899	0,02927	0,02043
13	0,0736	0,01979	0,01113	0,006851
15	0,3101	0,083	0,04157	0,02874

Čia:

Uh' - įtampos harmonika prieš filtrą;

Uh – įtampos harmonika po filtro;

Ih' - srovės harmonika prieš filtrą;

Ih – srovės harmonika po filtro.

Iš rezultatų matome, kad aukštesniosios harmonikos sumažėjo filtro dėka. Reikšmės skiriasi nedaug, bet to užtenka, kad sumažinti suminių netiesinių iškreipimų faktorių. Tai matėme ir iš sinusoidžių grafikų.

„Matlab“ programa sukurtas modelis bus naudojamas tyrimojoje dalyje. Skaičiavimo rezultatai bus palyginti su matavimo rezultatais. Taip pat modelis reikalingas filtro parinkimui.

3. Tyrimas akcinėje bendrovėje „Achema“

3.1. Objekto pasirinkimas

Darbo tyrimams buvo naudotasi trifaziu elektros tinklų analizatoriumi „Chauvin arnoux CA8335“. Jis pavaizduotas 3.1 paveikslėlyje.

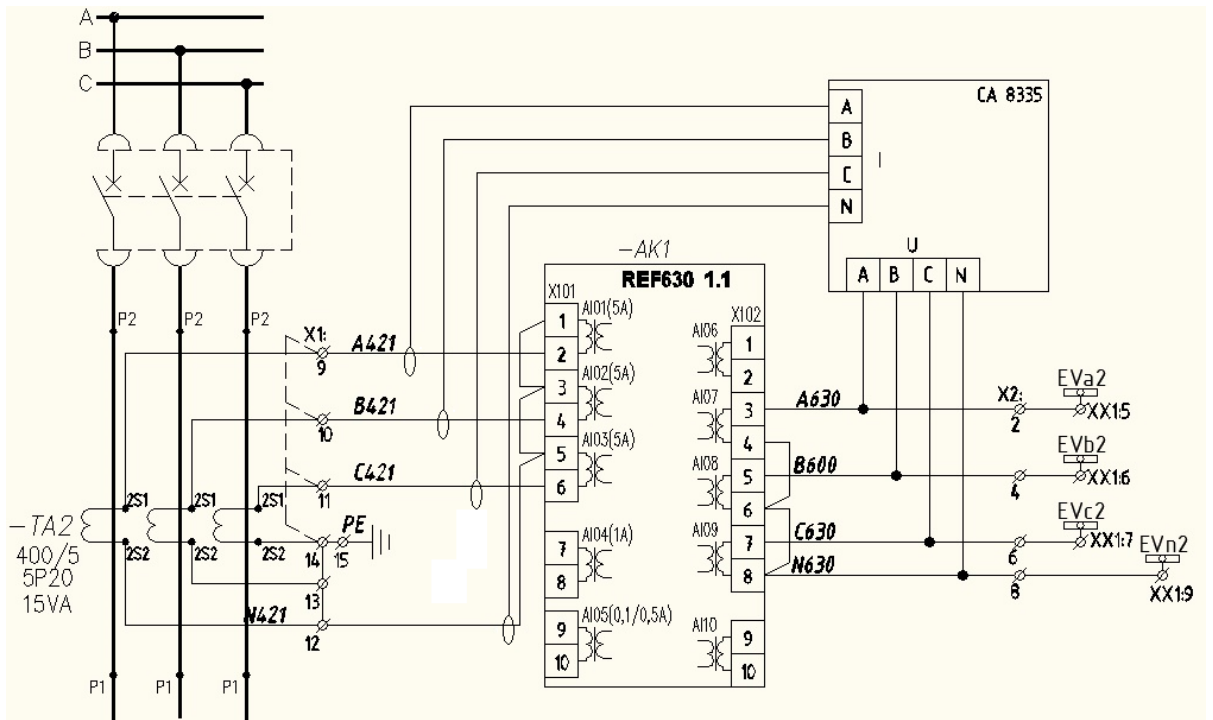


3.1 pav. Analizatorius „Chauvin arnoux CA8335“

Šis prietaisas leidžia mums analizuoti elektros tinklą. Analizatorius turi 4 srovinius įėjimus ir 4 įtampinius įėjimus. Įtampas galime matuoti iki 1200 V, srovės iki 6500 A. Pagrindinės analizatoriaus funkcijos:

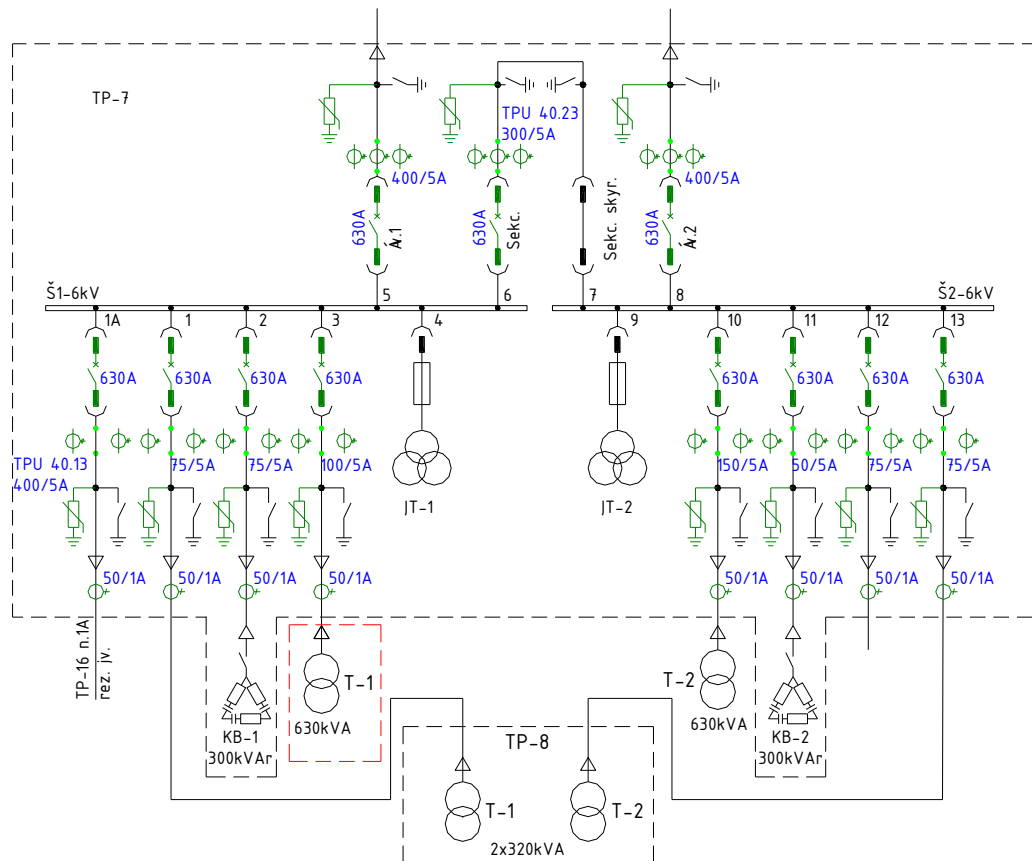
1. įtampų matavimai;
2. srovių matavimai;
3. pereinamųjų procesų aptikimai ir įrašymai;
4. aktyvios, reaktyvios ir suminės galios matavimai;
5. grafiniai srovių ir įtampų parodymai;
6. vektoriniai srovių ir įtampų parodymai;
7. srovių ir įtampų aukštesniųjų harmonikų matavimai.

Analizatoriumi matuota buvo 6 kV pastotėse, prijungiant įrenginį prie antrinių srovės ir įtampos matavimo grandinių, kaip pavaizduota 3.2 paveikslėlyje. Įtampos transformatoriaus antrinėse grandinėse linijinė įtampa lygi 100 V. Srovės transformatorių koeficientai kiekviename narvelyje skirtingi priklausomai nuo apkrovos.



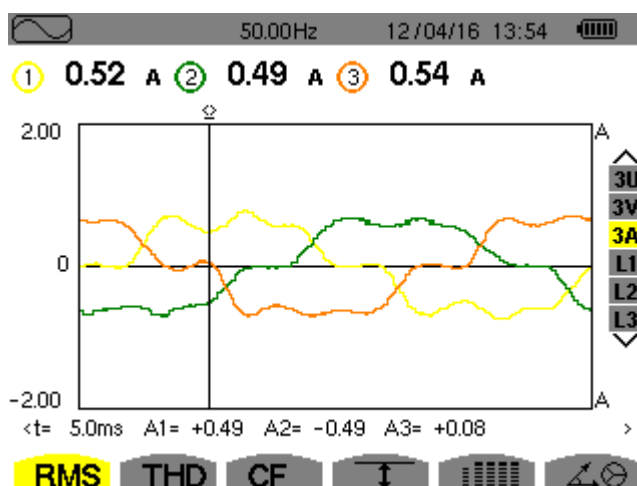
3.2 pav. Analizatoriaus CA 8335 pajungimas su antrinėmis matavimo grandinėmis

Matuojant aukštesnias harmonikas skirtingose vietose, aukštesniųjų harmonikų būta visur. Vienose vietose jos buvo nedidelės (0,5-3%), kitose ženkliai didesnės (5-20%). Tiriant buvo pastebėta, kad didžiausios yra pastotėje TP-7, narvelyje 3. Objektas – 6/0,4 kV galios transformatorius, apibrauktas 3.3 paveikslėlyje raudonu punktyru.



3.3 pav. Tyrimui pasirinktas objektas

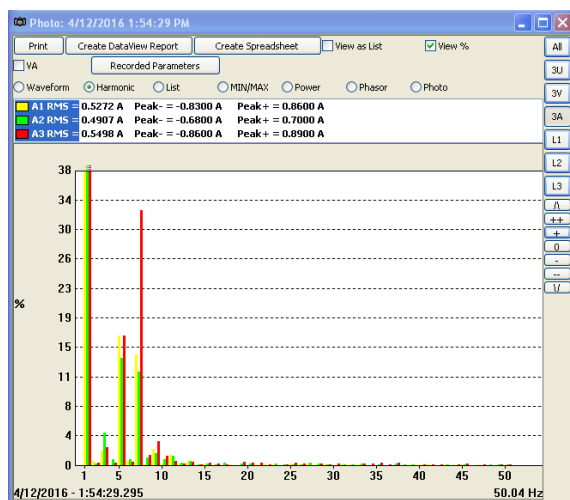
Prijungus analizatorių gavome labai smarkiai iškraipytas srovės sinusoides, pavaizduotas 3.4 paveikslėlyje.



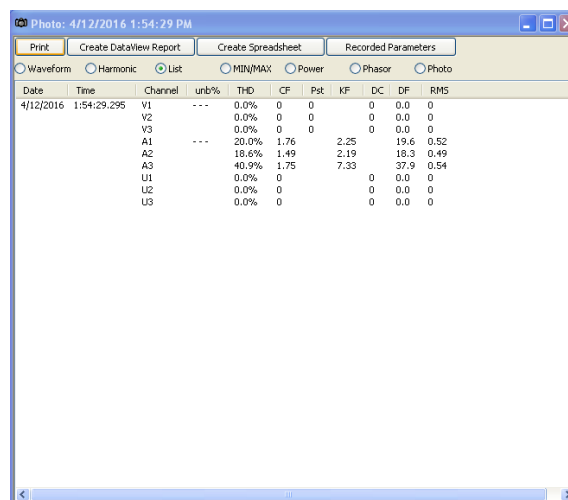
3.4 pav. Srovės sinusoidės pasirinktame objekte

Išsamiai išnagrinėjus šį objektą, buvo nustatyta, kad aukštesniąsias harmonikas sukelia galios transformatoriaus žemoje pusėje esantis dažnio keitiklis, kuris yra be filtro.

CA 8335 analizatoriaus pagalba galima duomenis įrašyti į atmintį ir įkelti į kompiuterį. Paveikslėliuose 3.5 ir 3.6 matome srovės harmonikas ir bendrą netiesinių iškreipčių faktorių (THD).



3.5 pav. Srovės harmonikos



3.6 pav. A, B ir C fazių THD

Kaip matome, srovės harmonikos viršija leistinas ribines vertes. Bendras netiesinių iškreipčių faktorius: A fazėje – 20 %, B fazėje – 18,6%, C fazėje – 40,9 %. Dažnio keitiklis didžiausias harmonikas sukelia 5-os ir 7-os eilės.

3.2. „Danfoss VLT 6000“ dažnio keitiklio modeliavimas

Dažnio keitiklio modelis – Danfoss VLT 6000. Pagrindiniai keitiklio parametrai: įėjimo įtampa U_{in} – 3x 380-480 V, įėjimo dažnis f_{in} – 50/60 Hz, įėjimo srovė I_{in} – 256-236 A, išėjimo

įtampa $U_{out} = 0-U_{in}$ V, išėjimo dažnis $f_{out} = 0-800$ Hz, išėjimo srovė $I_{out} = 260-240$ A, galia 132 kW. Kaip atrodo dažnio keitiklis, matote 3.7 paveikslėlyje.



3.7 pav. Dažnio keitiklis Danfoss VLT 6000

Šis dažnio keitiklis reikalingas reguliuoti vandens siurblio (asynchronous variklio) greitį. Vandens siurblio parametrai: įtampa – 380 V, galia – 125 kW, dažnis – 50 Hz, $\cos\varphi = 0,9$, srovė – 211 A.

Tyrimui panaudotas 2 skyriuje naudotas metodas. Pagal parametrus sudarytas tinklo modelis „Matlab“ programa ir analogiškai skaičiuojamos aukštesniųjų harmonikų vertės. Bendra schema pavaizduota 1-ame priede. Paleidus simuliaciją, gautos srovės vertės bei harmonikos skiriasi nuo praktinių matavimų rezultatų. Tai gali būti dėl kiek skirtingų „Matlab“ programos skaičiavimų algoritmų. Rezultatai pateikti 3.1 lentelėje.

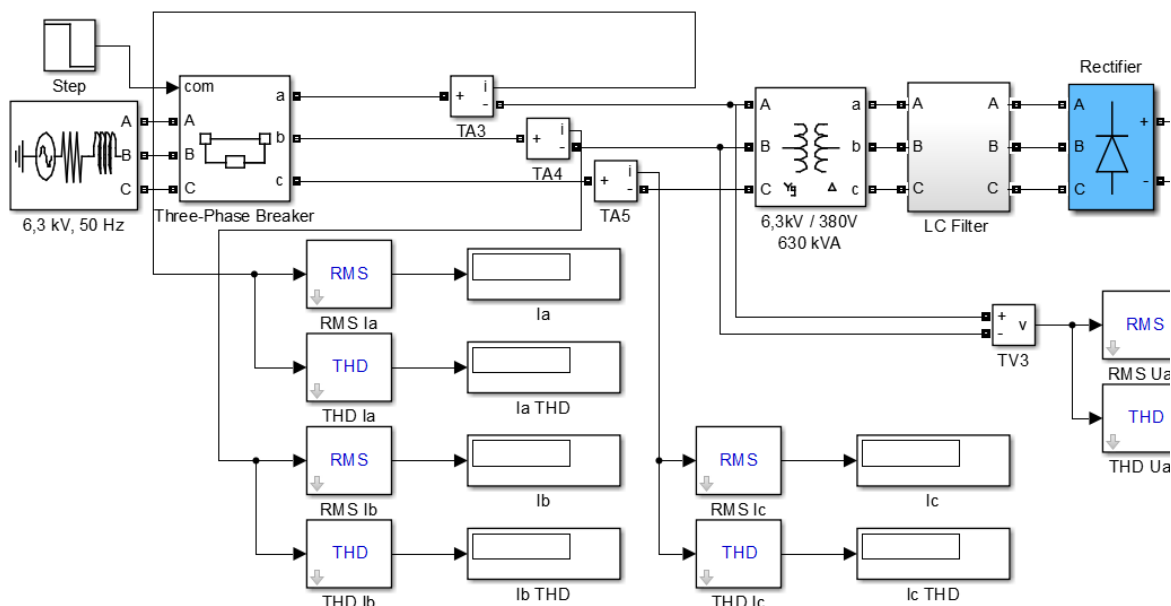
3.1 lentelė. Matuoti ir skaičiuoti rezultatai

	Matuota	Skaičiuota
I_A, A	$0,52 \times 20 = 10,4$	15,25
I_B, A	$0,49 \times 20 = 9,8$	13,66
I_C, A	$0,54 \times 20 = 10,8$	12,42
$THD_A, \%$	20	35,1
$THD_B, \%$	18,6	48,56
$THD_C, \%$	40,9	54,11

Pastaba: matuotos srovės buvo jungiamos prie antrinių grandinių, todėl norėdami sužinoti tikslią srovę, dauginame iš srovės transformatorių transformacijos koeficiento 20 (100/5 A).

3.3. Filtro parinkimas

Harmonikoms sumažinti naudosime pasyvų filtrą, kurį jungsime tarp transformatoriaus ir dažnio keitiklio „Matlab“ pagalba. Schema pavaizduota 3.8 paveikslėlyje.



3.8 pav. Pasyvaus filtro pajungimas

Pagrindiniai šio filtro dydžiai – tai talpumas ir induktyvumas. Pirmu bandymu buvo nustatytas ritės induktyvumas – 2 mH ir kondensatoriaus reaktyvioji galia – 30 kVAr. Šiuos dydžius keičiant, parinksime geriausią variantą aukštesniųjų harmonikų šalinimui.

Iš pradžių keitėme kondensatoriaus reaktyviąją galią. Rezultatai pateikti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. THD priklausomybė nuo kondensatoriaus reaktyviosios galios

Reaktyvioji galia, kVAr	THD _A , %	THD _B , %	THD _C , %
20	15,05	20,79	25
30	10,98	24,14	29,36
40	17,29	18,61	24,21
50	10,45	16,24	18,63
60	14,38	16,49	19,64

Iš rezultatų matome, kad labiausiai srovės filtruojamos su 50 kVAr galios kondensatoriumi. Pasirenkame šį dydį pastovų ir keičiame induktyvumą. Rezultatai pateikiami 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. THD priklausomybė nuo ritės induktyvumo

Induktyvumas, mH	THD _A , %	THD _B , %	THD _C , %
2	10,45	16,24	18,63
5	10,48	5,63	8,25
10	14,7	3,25	5,26
15	0,83	0,67	0,81
20	1,98	1,48	0,81

Iš rezultatų matome, kad mažiausias netiesinių iškreipų faktorius yra, kai ritės induktyvumas pasirinktas 15 mH.

Taigi, priėjome išvados, kad labiausiai srovės harmonikas mažins pasyvus filtras su 50 kVAr reaktyvinės galios kondensatoriumi ir 15 mH induktyvumo rite. Pagal šiuos dydžius galime parinkti filtrą iš gamintojų katalogo. Rinkomės iš „Danfoss“ firmos pasyviųjų filtrų [21]. Modeliai pavaizduoti 3.9 paveikslėlyje.

Code number AHF005 IP00 IP20	Code number AHF010 IP00 IP20	Filter current rating [A]	Typical motor hp [kW]	VLT model and current ratings hp [kW] [A]		Losses		Acoustic noise [dBA]	Frame size	
						AHF005 [W]	AHF010 [W]		AHF005	AHF010
130B1446 130B1251	130B1295 130B1214	204	150 [110]	N150 [N110]	204	1080	742	<75	X6	X6
130B1447 130B1258	130B1369 130B1215	251	175 [132]	N175 [N132]	251	1195	864	<75	X7	X7
130B1448 130B1259	130B1370 130B1216	304	250 [160]	N250 [N160]	304	1288	905	<75	X7	X7
130B3153 130B3152	130B3151 130B3136	325	Paralleling for 475 hp [355 kW]			1406	952	<75	X8	X7
130B1449 130B1260	130B1389 130B1217	381	300 [200]	N300 [N200]	381	1510	1175	<77	X8	X7
130B1469 130B1261	130B1391 130B1228	480	350 [250]	N350 [N250]	472	1852	1542	<77	X8	X8
2x130B1448 2x130B1259	2x130B1370 2x130B1216	608	450 [315]	N450 [N315]	590	2576	1810	<80		

Table 4.7 Advanced Harmonic Filters 380–415 V, 50 Hz, D-frame

3.9 pav. „Danfoss“ pasyvieji filtrai

AHF005 tipo įrenginiai praleidžia bendrą netiesinių iškreipų faktorių iki 5 %, AHF010 – iki 10 %. Iš pradžių įrenginį parinkinėsime pagal galingumą su 10 % rezervu ($125 \text{ kW} + 10 \% = 137,5 \text{ kW}$). Iš katalogo mums tinkantys filtrai – 160, 200, 250 ir 315 kW galingumo.

Toliau renkames pagal parinktą reaktyviąją galią iš 3.10 paveikslėlio.

Current rating 380-415V, 50 and 60Hz	Current rating 440-480V, 60Hz	Danfoss Contactors for AHF005 and AHF010	Alternative type AC3
A	A	Type	Contactor rating ¹⁾ KVAR
10	10	CI 9	1
14	14	CI 9	2
22	19	CI 9	4
29	25	CI 9	6
34	31	CI 16	7
40	36	CI 16	7
55	48	CI 16	9
66	60	CI 61	11
82	73	CI 61	15
96	95	CI 61	17
133	118	CI 61	22
171	154	CI 61	29
204	183	CI 61	36
251	231	CI 110	44
304	291	CI 110	51
325	355	CI 110	58
380	380	CI 110	66
480	436	CI 141	88

3.10 pav. „Danfoss“ pasyviųjų filtrų charakteristikos

Pagal šią lentelę matome, kad artimiausias mūsų nustatytiems parametrams būtų filtras su 51 kVAr galimumu ir 304 A nominalia srove.

Pagal mūsų kriterijus labiausiai tinkantys „Danfoss“ pasyvieji filtrai: 130B1448, 130B1259, 130B1370 arba 130B1216. Skiriasi jie filtravimo lygiu ir atsparumo klase.

Šie „Matlab“ programos skaičiavimai yra tik teoriniai, todėl praktikoje situacija gali skirtis. Tačiau, galime teigti, kad daugiau ar mažiau filtras vistiek sumažins aukštesniąsias srovės harmonikas. Įdiegus filtrą, bus mažiau nuostolių, sumažės kabelių bei transformatoriaus apvijų įšilimas ir prailginsime elektros įrenginių tarnavimo laiką.

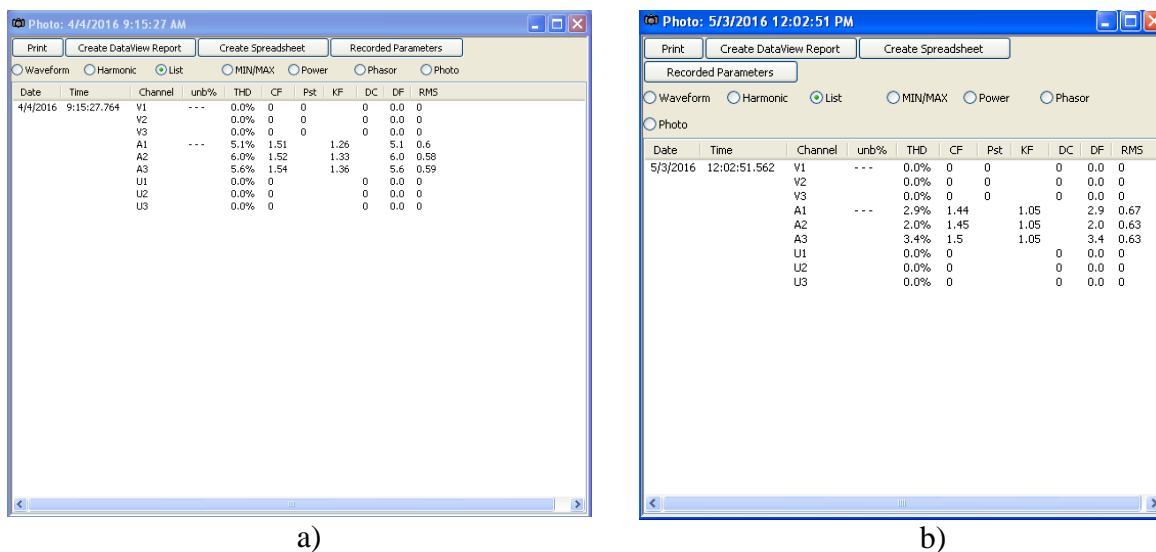
3.4. Kondensatorių baterijos

AB „Achema“ yra daug kondensatorių baterijų, skirtų elektros tiekimo linijų reaktyvinės energijos ($\cos\varphi$) kompensavimui. Šiems įrenginiams yra griežtos įtampinės apsaugos, kurios negali viršyti $\pm 10\%$ nominalo. Vis daugėjant netiesinių iškreipčių sukėlėjų, įmonėje privaloma rasti būdus, kad įtampos harmonikos būtų mažinamos. Įtampai viršijus $\pm 10\%$ ribą, baterijos bus atjungtos relinių apsaugų. Tačiau elektros sistemoje ne visada įrenginiai atlieka savo darbą kaip priklauso. Jeigu relinės apsaugos nesuveiks, kondensatorių baterijos galimai bus pažeistos.

Taip pat kondensatorių baterijoms svarbios ir srovinės harmonikos. Jeigu tinkle vyrauja netiesiniai iškreipiai, kondensatorių baterijų vietoje susidaro rezonansai. Šie srovės rezonansai gali viršyti saugiklių maksimalią srovę ir jų siūlelis tiesiog sudegs.

Akcinėje bendrovėje „Achema“ dėl šios priežasties (sudegė keli saugikliai) yra atnaujinamos kondensatorių baterijos, kurių komplektacijoje yra reaktoriai. Šie reaktoriai ir atlieka harmonikų slopinimo funkciją.

Buvo matuotos srovės harmonikos su sena kondensatorių baterija ir pakeista nauja. Rodmenys pavaizduoti 3.11 paveikslėlyje.



3.11 pav. Kondensatorių baterijų srovės harmonikų matavimai: a) senas įrenginys; b) naujas įrenginys

Kaip matyti iš duomenų, naujose kondensatorių baterijose su filtrais yra mažiau srovės harmonikų. Taigi padaryta išvada, kad kondensatorių baterijos su reaktoriais yra efektyvus būdas aukštesnėms srovės harmonikoms sumažinti.

4. Išvados

1. „Matlab“ programa leidžia mums matyti tinkle vykstančius procesus, apskaičiuoti netiesinį iškreipų faktorių ir konkrečios eilės aukštesniąsias harmonikas. Sudarius dažnio keitiklio modelį, nustatyta, kad panaudojus pasyvų filtrą, netiesinių iškreipų faktorius ženkliai sumažėja: įtampos harmonikos nuo 86,1% iki 2,122%, srovės harmonikos nuo 5,954% iki 2,122%. Tai galima matyti ir iš grafikų paveikslėlyje 2.12.
2. Matuojant aukštesniąsias harmonikas analizatoriumi „Chauvin arnoux CA8335“ skirtingose vietose, harmonikų būta visur. Vienose vietose jos buvo nedidelės, 0,5-3%, kitose ženkliai didesnės, 5-20%.
3. Tiriant buvo pastebėta, kad didžiausios aukštesniosios srovės harmonikos (A fazėje – 20%, B fazėje – 18,6%, C fazėje – 40,9%) yra pastotėje TP-7, narvelyje 3. Objektas – 6/0,4 kV galios transformatorius.
4. Išsiaiškinta, kad harmonikas sukelia transformatoriaus žemoje pusėje esantis dažnio keitiklis „Danfoss VLT 6000“. Labiausiai generuojamos 5-os ir 7-os eilės aukštesniosios srovės harmonikos.
5. Simuliacijos pagalba apskaičiuoti netiesinių iškreipų faktoriai: A fazėje – 35,1 %, B fazėje – 48,56 %, C fazėje – 54,11 %. Keičiant filtro parametrus, buvo parinktas optimaliausias pasyvus filtras, kurio parametrai: reaktyvioji galia – 50 kVAr, ritės induktyvumas – 15 mH. Šio filtro pagalba srovės harmonikos buvo ženkliai sumažintos: A fazėje – 0,83 %, B fazėje – 0,67 %, C fazėje – 0,81 %.

5. Informacijos šaltinių sąrašas

1. *Bendrųjų skirstomųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos. Lietuvos standartas LST EN 50160*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2001.
2. NARGĖLAS, A. *Elektros sistemų automatika: Mokymo priemonė*. Vilnius: Lietuvos TSR aukštojo ir specialiojo vidutinio mokslo ministerijos leidybinė redakcinė tarnyba, 1984.
3. SCHLABBACH, J.; BLUME, D.; STEPHANBLOME, T. *Voltage Quality in Electrical Power Systems*. London, 1999.
4. CHATTOPADHYAY, Surajit; MITRA, Madhuchhanda; SENGUPTA, Samarjit. *Electric Power Quality*. 2011.
5. *Limits for harmonic current emissions*. Europos standartas EN 61000-3-2. 2014
6. BUGENIS, Saulius Jonas; KRIKŠTAPONIS, Laimutis; SKUČAS, Ipolitas. *Aukštesniosios harmonikos žemos įtampos tinkluose*. Vilnius.
7. Marinko STOJKOV, Kruno TRUPINIC, Darko POLETO. *Determination of specific electricity consumers, which have great impact on harmonic distortion of voltage waveform, 19th International conference on electricity distribution (CIRED)*, Vienna, 2007. 46 – 73 psl.
8. Schneider electric. *Harmonics mitigation and solution*. 2010. 31 psl.
9. BIMAL, K. BOSE. *Modern Power Electronics and AC Drives New Jersey: Prentice Hall PTR*. 2002.
10. LUNDQUIST, J. *Field Measurements of harmonic Distortion and the Role of the DC-Link Inductor*. Athens, 1998. 18-31 psl.
11. SUBRAHMANYAN, V. *Electric Drives*. McGraw-Hill, 1996.
12. *Linijos reaktorius* [žiūrėta 2017 m. balandžio 27 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ieautomatika.lt/variklio-paleidejai/daznio-keitikliu/linijos-reaktorius>.
13. АРРИЛЛАГА, Дж.; БРЭДЛИ, Д.; БОДЖЕР, П. М. *Гармоники в электрических системах*. Энергоатомиздат, 1990.
14. *Активные динамические фильтры гармоник Comsys* [žiūrėta 2017 m. balandžio 28 d.]. Prieiga per internetą: http://esto.pro/comsys_adf/.
15. *Активные фильтры гармоник* [žiūrėta 2017 m. balandžio 28 d.]. Prieiga per internetą: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2561.
16. *MATLAB functions and features* [žiūrėta 2017 m. balandžio 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://se.mathworks.com/products/matlab.html>.
17. SVINKŪNAS, G.; MEDVEDEV, K. *Simulation of Frequency Converters Operation in Industrial Power Net*. Kaunas, 2012

18. SVINKŪNAS, G.; NAVICKAS, A. *Elektros energetikos pagrindai: mokomoji knyga*. Kaunas, 2014.
19. BAUBLYS, J.; JANKAUSKAS, P.; MARKEVIČIUS, L.A.; MORKVĖNAS, A. *Izoliacija ir viršįtampiai: vadovėlis*. Kaunas, 2008.
20. DEKSNYS, R.P.; DANILEVIČIUS, K.; MIŠKINIS, V.; STANIULIS, R. *Energetikos ekonomika*. Kaunas, 2007.
21. Danfoss Advanced Harmonic Filters. *Design Guide AHF005/010*. 2010.
22. Informacija, gauta iš AB „Achema“.

6. Priedai

1. Elektros tinklo modelis, sudarytas „Matlab“ programa;

1. Priedas. Elektros tinklo modelis, sudarytas „Matlab“ programa

