



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Marius Konopko

**PRAMONĖS ĮMONĖS ELEKTROS ENERGIJOS KOKYBINIŲ
PARAMETRŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Renata Miliūnė

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**PRAMONĖS ĮMONĖS ELEKTROS ENERGIJOS KOKYBINIŲ
PARAMETRŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

Vadovas

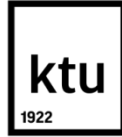
Doc. dr. Renata Miliūnė

Recenzentas

Projektą atliko

Marius Konopko

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

(Fakultetas)

(Studento vardas, pavardė)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pramonės įmonės elektros energijos kokybinių parametru tyrimas“
AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. birželio 1 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Mariaus Konopko**, baigiamasis projektas tema „Pramonės įmonės elektros energijos kokybinių parametru tyrimas“. 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)

Konopko, M. Pramonės įmonės elektros energijos kokybinių parametru tyrimas. *Magistrantūros studijų* baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Renata Miliūnė; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas, elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 45 psl.

SANTRAUKA

Šiame magistro baigiamajame darbe tiriami elektros energijos kokybiniai parametrai pramonės įmonėje 0,4 kV elektros tinkle. Darbe aptariami elektros energijos kokybiniai parametrai: įtampos trūkiai, įtampos asimetrija, svyravimai. Išanalizuojama aukštesniųjų harmonikų įtaka pramonės įmonės elektros tinklui ir įrangai. Analizatoriumi Janitza UMG60 atlikti elektros kokybinių parametru matavimai įvairiuose tiriamos įmonės elektros tinklo taškuose, pateikti bei įvertinti jų rezultatai. Ištyrus pramonės įmonės elektros tinklą nustatyta problema – šviesos mirgėjimas. Siekiant įvertinti įmonės apšvietimo sistema mirgėjimo problemą sudarytas MatLAB Simulink matematinis modelis įvertinantis apšvietimo sistemoje esančias aukštesniąsias harmonikas bei įtampos asimetriją. Pagrindinis baigiamojo darbo tikslas - atlikti pramonės įmonės elektros energijos kokybės parametru tyrimą ir įvertinti šviestuvų įtaką elektros energijos kokybei.

Reikšminiai žodžiai (iki 8 žodžių): elektros energijos kokybė, aukštesniosios įtampos harmonikos, aukštesniosios srovės harmonikos, įtampos asimetrija.

Konopko, M. The Analysis of Power Quality in an Industrial Company. Masters thesis / supervisor doc. dr. Renata Miliūnė; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power Systems.

Kaunas, 2016. 45 psl.

SUMMARY

This masters thesis analyses low voltage network power quality and its parameters in an industrial company. Power quality parameters, such as voltage sags, unbalance, fluctuations and harmonics are discussed and analyzed. Using the Janitza UMG60 power quality analyzer, measurements were taken in different locations of companies power network. Measurement results were analyzed and evaluated. When analyzing industrial companies power network, light flickering of MH lamps occurred. A MatLAB Simulink model was introduced in order to evaluate the voltage unbalance and harmonics of voltage and current in companies lighting system. The main goal of this thesis is to analyse power quality in an industrial company and evaluate the effects of metal halide luminaires for power quality.

Keywords (up to 8 words): power quality, voltage harmonics, current harmonics, voltage asymmetry.

TURINYS

IVADAS	8
1. TEORINĖ ANALIZĖ	9
1.1. Literatūros šaltinių analizė	9
1.2. Elektros energijos kokybės parametrai	10
1.2.1. Įtampos trūkiai	13
1.2.2. Įtampos svyravimai	14
1.2.3. Įtampos asimetrija	16
1.3. Aukštesniosios įtampos ir srovės harmonikos	19
1.3.1. Aukštesniųjų harmonikų filtravimas	21
1.4. Šviesos mirgėjimas	23
2. TYRIMO METODIKA	26
3. TYRIMO REZULTATAI IR JŲ APIBENDRINIMAS	28
3.1. Pramonės įmonės elektros energetinė sistema	28
3.2. Elektros energijos kokybės parametrų matavimas ir rezultatai	29
3.3. Pramonės įmonės apšvietimo sistemos problema	32
3.4. Aukštesniųjų harmonikų modeliavimas	35
3.4.1. Vienfazis tinklo grandies modelis	36
3.4.2. Trifazis tinklo grandies modelis	40
3.4.3. Įmonės plėtros perspektyva	41
3.5. Mirgėjimas	42
4. IŠVADOS	45
Literatūros sąrašas	47

IVADAS

Elektros energija greičiausiai yra viena pagrindinių ir plačiausiai naudojamų žaliavų pramonės įmonėse. Tobula tiekiamą elektros energiją būtų galima vadinti tokia, kurios įtampa ir dažnis visada išlieka apibrėžtose ribose ir kurios įtampa turėtų švarią sinusinės bangos formą. Tačiau sparčiai tobulinama elektros įranga pramonės įmonėse, kuri į įmonės sistemą įneša trikdžių, prastina elektros energijos kokybę. Būtent dėl šios priežasties, elektros energijos kokybės išlaikymas yra vienas aktualiausių ir svarbiausių pramonės įmonės elektros ūkį prižiūrinčio personalo iššukių.

Elektros energijos kokybės problema yra itin aktuali pramonės sektoriuje. Per pastarąjį dešimtmetį pramonės sektoriuje itin padaugėjo prietaisų, kurie yra itin jautrūs elektros energijos kokybės parametrų pokyčiams. Keitikliai, pavaros, varikliai, netiesinės elektros sistemos apkrovos – visa tai yra būdinga pramonės įmonės elektros ūkiui ir būtent šie elementai sukelia didžiausias elektros energijos kokybės problemas. Pagrindiniai prastos elektros energijos kokybės požymiai:

- harmoniniai įtampos ir srovės svyravimai;
- įtampos trūkiai;
- įtampos asimetrija;
- įtampos svyravimai bei kiti.

Šioms problemoms pašalinti yra taikomi įvairūs sprendimo būdai, tokie kaip aukštesniųjų harmonikų filtrai, įtampos stabilizatoriai, baterijų sistemos.

Įranga, kainuojanti didžiulius pinigus privalo būti apsaugota, ir būtent todėl didžiulis dėmesys yra skiriamas tvarkingų elektros kokybės parametrų palaikymui. Visgi pramonės įmonės esmė ir yra teisingas finansų valdymas bei pelno augimas, ir visa tai nebūtų įmanoma be teisingos elektros įrangos priežiūros bei elektros energijos kokybės užtikrinimo.

Darbo tikslas: Atlikti pramonės įmonės elektros energijos kokybės parametrų tyrimą ir įvertinti šviestuvų įtaką elektros energijos kokybei.

Darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti elektros kokybės sampratą bei tiekiamos elektros energijos kokybės parametrus ir jų svarbą elektros energetikos sistemai;
2. Atlikti pramonės įmonės elektros kokybės parametrų matavimus, įvertinti gautus rezultatus.
3. Išanalizuoti švietuvų įtaką elektros kokybės parametrams ir poveikį pramonės įmonės elektros tinklui, parašyti algoritmą jų įvertinimui bei pateikti racionalius elektros energijos kokybės užtikrinimo būdus.

1. TEORINĖ ANALIZĖ

Šiame skyriuje pateikiama literatūros apžvalga, aprašomi pagrindiniai elektros energijos kokybės parametrai ir jų sprendimo būdai. Taip pat išanalizuojami įtampos trūkiai, svyravimai, asimetrija. Aprašomi harmoniniai svyravimai, jų atsiradimo priežastys ir poveikis elektros sistemai. Analizuojant teorinę medžiagą susipažįstama su tarptautiniais standartais, reglamentuojančiais ribas, kuriose gali kisti aprašytieji elektros energijos kokybės parametrai. Skyriaus gale aprašomos priemonės padedančios užtikrinti tinkamą tiekiamos elektros energijos kokybę.

1.1. Literatūros šaltinių analizė

Nagrinėjant literatūrą buvo analizuojami straipsniai, kuriuose atliekami su elektros energijos kokybe ir jos parametrais susiję tyrimai. Šiame skyriuje pateikiami trys straipsniai, kuriuose naudojami skirtingi elektros energijos kokybės analizės metodai:

- Statistinė analizė;
- Analizė naudojantis Beyeso tinklais;
- Analizė naudojantis elektros sistemų modeliavimo programine įranga.

A.El Mofty, K. Youssef straipsnis (angl. k. „Industrial Power Quality Problems)

Šiame darbe pristatomi tiriamoje pramonės įmonėje esantys elektros energijos kokybės parametrai, jų matavimų registras. Taip pat surašomi pasiūlymai, kaip būtų galima sumažinti ar išvengti elektros kokybės parametrų sukeltų nepatogumų. Darbe analizuojami įtampos trūkiai, svyravimai, mirgėjimas, asimetrija bei aukštesniosios harmonikos.

Tyrimas susideda iš matavimų, atliktų prie maitinimo šaltinio bei prie 15 laisvai pasirinktų pramoninių elektros imtuvų. Apkrovos darbe, pagal savo parametrus skirstomos į 4 pramonės šakas ir klasifikuojamos kaip:

- Metalų pramonė;
- Chemijos pramonė;
- Maisto pramonė;
- Tekstilės pramonė.

Atlikus matavimus, gilinamasi į įtampos kreivės pokyčius, prieš ir po filtrų prijungimo, analize. Išvadose autorius išskiria, jog pats sėkmingiausias ir efektyviausias būdas, siekiant išvengti elektros energijos kokybės parametrų prastėjimo, yra trikdžių eliminavimas ankstyvoje objekto projektavimo ir vystymo stadijoje. [7]

A. Torres, M. T. Rueda, D. Reyes straipsnis (angl. k. „Bayesian Networks for Power Quality Analysis in the Industrial Sector“)

Šiame straipsnyje elektros energijos kokybės parametrai – išskirtinai įtampos trūkiai – analizuojami naudodajant Bajeso tinklų modelį. Darbe plačiai aprašomos įtampos trūkių charakteristikos, jų atsiradimo priežastys bei pašalinimo būdai. Duomenys, naudojami modeliuojant sistemą, gaunami pramoniniame sektoriuje atlikus matavimus. Modelis naudojamas elektros kokybės parametrų tyrimui, anot autorių, yra universalus. Taip yra todėl, kad jį įtampos trūkių analizei galima pritaikyti įvairioms pramonės įmonėms.

Darbo išvadose išskiriamas pagrindinis sprendimas įtampos trūkių mažinimui – UPS baterijų sistemos. Pasak autoriaus, net ir naudojant priemones, tokias kaip UPS sistemos, elektros kokybė negali būti 100% užtikrinta. [8]

M. Dumitrescu straipsnis (angl. k. „Analysis and Software Computation to Increase the power Quality in an Industrial Electrical Network“)

Šiame darbe siekiama įvertinti potencialias grėsmės, kurias pramonės įmonės elektros tinkle sukelia netiesinės ir nesubalansuotos apkrovos. Taip pat analizuojamos priemonės elektros energijos kokybės parametrų sukeltamų padarinių mažinimui. Naudojantis *Edsa Paladin* programine įranga įvertinamos apkrovos ir sistema modeliuojama įvertinant įvairius darbo režimus. Didelis dėmesys skiriamas aukštesniųjų harmoninių svyravimų modeliavimui.

Edsa Paladin programa įvertintas tirtos pramonės įmonės elektros tinklas, apskaičiuota, jog aukštesniosios harmonikos neviršija reglamentuotų ribų. Atlikus simuliacijas, anot autoriaus, nustatyta, kad šia specifine programine įranga galima simuliuoti ir sudėtingas sistemas bei tinklus.[9]

1.2. Elektros energijos kokybės parametrai

Dažnis

Dažnis - vienas svarbiausių elektros energijos kokybės parametrų, kuris visada turi išlikti pastovus arba kisti tik nustatytose ribose.

Projektuojant bei eksploatuojant elektros įrenginius ir prietaisus (elektros variklius, elektros ir elektronikos prietaisus ir t. t.) laikoma, kad dažnis yra standartinis (pramoninis) – 50 hercų.

Norint apibrėžti elektros sistemos dažnį esant normalioms darbo sąlygoms, įvedami šie parametrai:

- Δf – dažnio nuokrypis, leidžiantis įvertinti dažnio kitimą;

$$\Delta f = f - f_r; \quad (1)$$

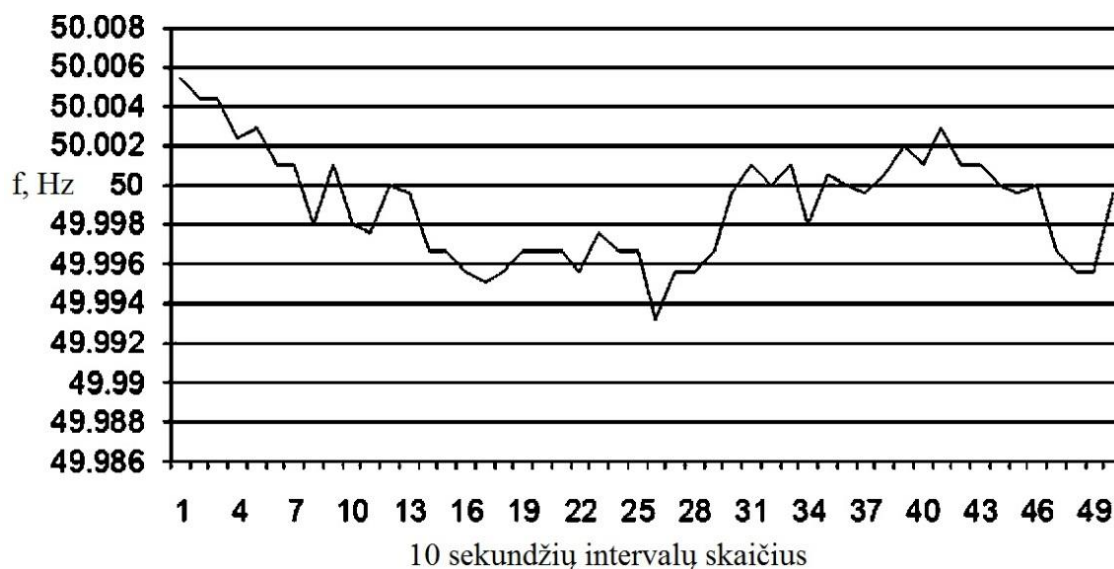
Čia f – išmatuotasis tinklo dažnis, f_r – nustatytas tinklo dažnis lygus 50 Hz.

- Santykinis dažnio nuokrypis $\varepsilon_f(\%)$:

$$e_f = \frac{f - f_r}{f_r} * 100; \quad (2)$$

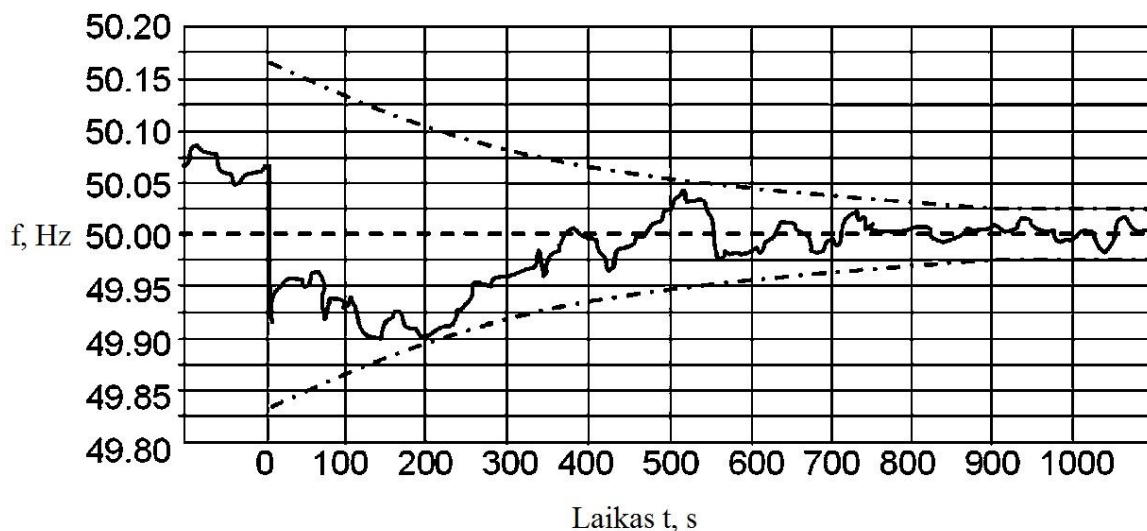
Remiantis EN 50160/2006 standartu, nustatytas tinklo dažnis yra 50 Hz. Esant normalioms darbo sąlygoms, vidutinė dažnio reikšmė, matuojama 10 sekundžių intervale turi išlikti tokia:

- Sistemoms su sinchronine jungtimi į bendrą sistemą:
 - 50 Hz \pm 1% (pvz.: 49,5 – 50,5 Hz) – toks dažnio svyravimas leidžiamas 95 % laiko, imant metų laikotarpį;
 - 50 Hz + 4%/-6% (pvz.: 47 – 52 Hz) – toks dažnio svyravimas leidžiamas nuolatos.
- Sistemoms su asinchronine jungtimi į bendrą sistemą (pavyzdžiui sistemoms veikiančioms salos režimu):
 - 50 Hz \pm 2% (pvz.: 49 – 51 Hz) – toks dažnio svyravimas leidžiamas 95% laiko, imant savaitės laikotarpį;
 - 50 Hz \pm 15% (pvz.: 42,5 – 57,5 Hz) – dažnio svyravimas leidžiamas nuolatos.



1.1 pav. Dažnio svyravimai esant normalioms darbo sąlygoms

1.1 paveiksle pateiktas grafikas parodo dažnio svyravimus esant normalioms darbo sąlygoms, kai dažnis svyruoja leistinose normose.



1.2 pav. Dažnio svyravimai esant gedimui

1.2 paveiksle pateiktame grafike pavaizduotas dažnio svyravimas esant gedimui tinkle, matuojant 1000 sekundžių intervale.

Elektros sistemoje stabilų vardinį dažnį užtikrina vedantieji generatoriai. Dėl šios priežasties elektros energetinėje sistemoje išskiriamos specialios elektrinės, kurių personalas atsako už sistemos dažnį. [5]

Nenumatyti vartotojų galios nuokrypiai gali būti kompensuojami agregatų greičio reguliatoriais, kurie atstato galių balansą ir stabilizuoja dažnį. Kad reguliavimas būtų įmanomas, dirbantys agregatai privalo turėti tam tikrą galios keitimo diapazoną. Kartais nutinka, kad agregatų galios nebepakanka. Tai nutinka staiga sustojus dideliame blokui arba elektrinei ar įvykus avarijai aukštos įtampos perdavimo linijoje. Tuomet krenta sistemos dažnis, o tai yra labai pavojinga. Gali susidaryti dažnio mažėjimo lavina, dėl kurios galimai sustos visos sistemos elektrinės. Šį reiškinį iššaukia šiluminių elektrinių savųjų reikmių agregatų našumo mažėjimas. Greitas HE paleidimas trunka iki 120 sekundžių ir todėl negali būti naudojamas kaip prevencinė dažnio kritimo priemonė. Lieka viena išeitis - atjungti dalį vartotojų, kad atsistatytų galių balansas ir dažnis būtų artimas nominaliam. [4]

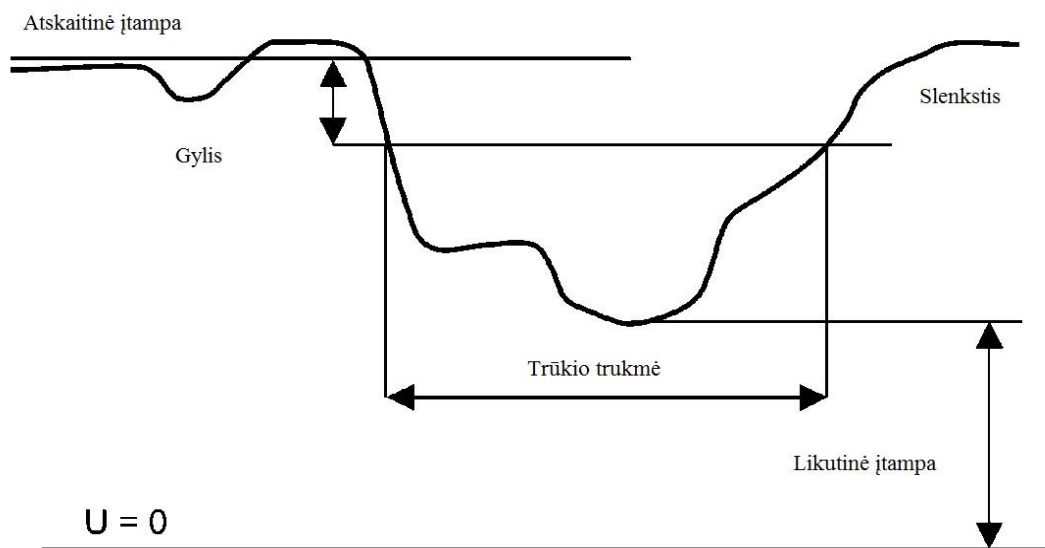
Dažnio reguliavimo kokybę rodo elektrinio laiko nuokrypis (paklaida) – sinchroninio laiko, tai yra laikrodžio, kurio rodyklės sukamos iš elektros tinklo maitinamo sinchroninio elektros variklio, laiko skirtumas nuo astronominio laiko. Laiko nuokrypis elektros sistemose yra reglamentuojamas. Elektros tinkluose dėl elektros įtaisų ir prietaisų darbo gali atsirasti nesisteminiai dažniai, kartotiniai pramoniniam dažniui, pavyzdžiui, 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz ir pan. Tai – aukštesniosios harmonikos ir jos bus aptiriamos tolimesniuose skyreliuose. [4]

Įtampa

Elektros srovės dažnis yra toks pats visoje elektros sistemoje, bet įtampa gali būti skirtinga atskiruose elektros tinklo taškuose. Tai reiškia, kad dažnį galima vadinti bendru sistemos elektros kokybės rodikliu, o įtampą – vietiniu. Įtampos dydis atskiruose elektros tinklo taškuose priklauso nuo įvairių veiksnių: įtampos atskirų generatorių gnybtuose, galios srautų elektros tinkle ir tinklo parametrų, elektros imtuvo reikalaujamos galios, įtampos reguliavimo įtaisų darbo. Daugelio elektros prietaisų darbui didesnę įtaką daro ne dažnis, o įtampa, todėl geriau, kad įtampa elektros prietaisų gnybtuose būtų pastovi. Tiesa, tai padaryti yra brangiau nei gaminti prietaisus, kurie gerai atliktų savo funkcijas net ir įtampai kintant tam tikrose ribose. Europos standartas EN 50160 rekomenduoja, kad skirstomuose elektros tinkluose ne mažiau kaip 95% laiko įtampa nuo vardinės skirtųsi ne daugiau kaip 8%. Gaminami prietaisai projektuojami taip, kad įtampai kintant šiose ribose veiktų be trikdžių [5]

1.2.1. Įtampos trūkiai

Įtampos trūkiai – tai trumpalaikiai įtampos kryčiai. Įtampa tinkle staiga pažemėja, kartais net iki 40% vardinės reikšmės, tai trunka dažniausiai iki 1s. Tokių trikdžių per metus gali būti iki 1000. Šie įtampos kryčiai ypač pavojingi automatikos įrenginiams, nuo jų daugeliu atvejų sudėtinga apsaugoti. 1.3 paveiksle pavaizduota įtampos trūkio charakteristika.



1.3 pav. Įtampos trūkio charakteristika

Įtampos trūkio gylis – tai skirtumas tarp pradinės (atskaitinės) įtampos, ir įtampos esant trūkiui (likutinė įtampa). Likutinė įtampa apibrėžiama kaip minimali įtampos vertė, iki kurios sumažėja pradinė įtampa įvykus įtampos trūkiui. Įtampos trūkio trukmė yra laikas, per kurį įtampa sumažėja iki minimalios reikšmės ir atsistato iki pradinės reikšmės. [2]

Įrenginių atsparumas įtampos pokyčiams yra apibrėžiamas keliais skirtingais tarptautiniais standartais. Pavyzdžiui standartas IEC 61000-4-11 apibrėžia įrenginių, su nominalia 16 A srove, atsparumą įtampos pokyčiams. [6]

Jei įtampa nukrenta iki pernelyg mažos vertės, ar įtampos trūkio trukmė yra pakankamai ilga (įtampos kritimas neviršija 40% U_n ir trunka neilgiau nei 1 sekundę), elektros įrenginiai gali nustoti normaliai funkcionuoti (tai priklauso nuo įrenginių jautrumo įtampos trūkiams), ir naudojantis pagalbinėmis priemonėmis, gali būti automatiškai atjungiami. Tai gali padidinti produkcijos kaštus, gali atsirasti papildomų išlaidų dėl technologinio proceso sustabdymų ir t.t.

1.2.2. Įtampos svyravimai

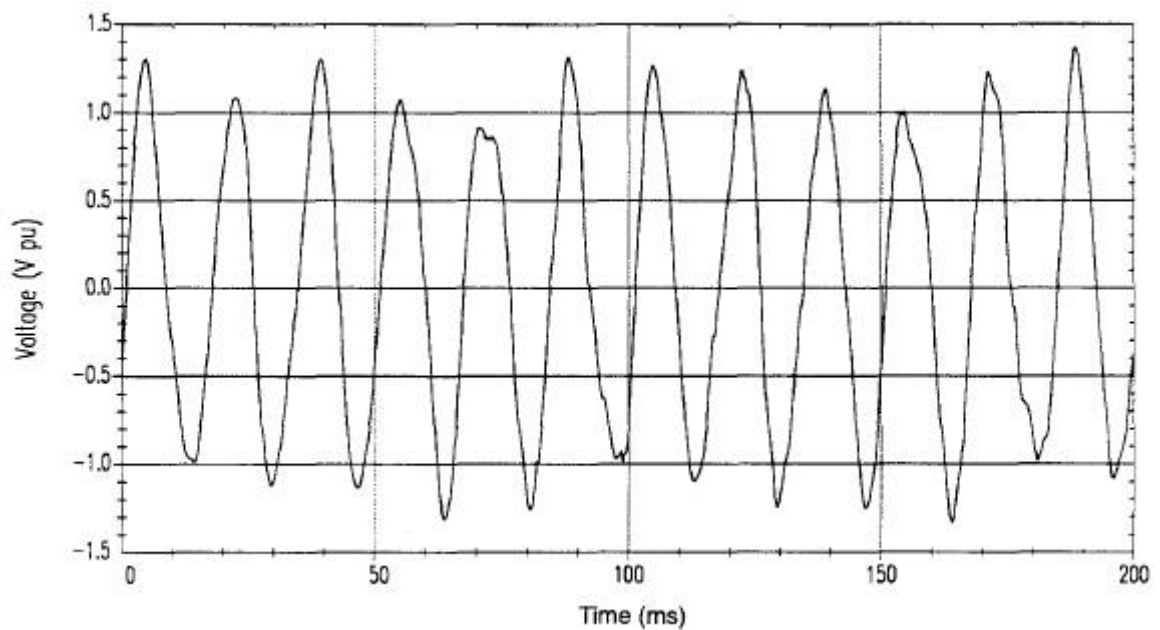
Elektros sistemose neįmanoma išvengti įtampos svyravimų – didesnių trumpalaikių įtampos sumažėjimų ar padidėjimų, truncančių iki kelių sekundžių. Įtampos svyravimų grafikas pateiktas 1.4 paveiksle.

Įtampos svyravimus elektros tinkle sukelia [10]:

- generatorių ar elektros linijų atjungimai ar įjungimai;
- trumpieji jungimai;
- didelių elektros imtuvų įjungimas ar išjungimas;
- visos ar dalies apkrovų pokytis.

Lietuvos standartas „LST EN 50160:2010 Viešųjų skirstomųjų tinklų tiekiamos elektros įtampinės charakteristikos“ reglamentuoja leistinas įtampos svyravimų normas: Normaliomis veikimo, išskyrus pažaidų ar įtampos pertrūkių būsenas, sąlygomis: kiekvienos savaitės visų 10 min. trukmės intervalų tiekiamosios įtampos vidutinių kvadratinių verčių 95 % vidurkių turi būti $U_N \pm 10\%$ srities ribose. Standartinė vardinė žemoji įtampa U_N yra [12]:

- dvilaidėje 1 fazės sistemoje: $U_N=230$ V tarp fazės ir neutralės,
- keturlaidėje 3 fazių sistemoje: $U_N=230$ V tarp fazės ir neutralės (tarp fazių $U_N= 400$ V)

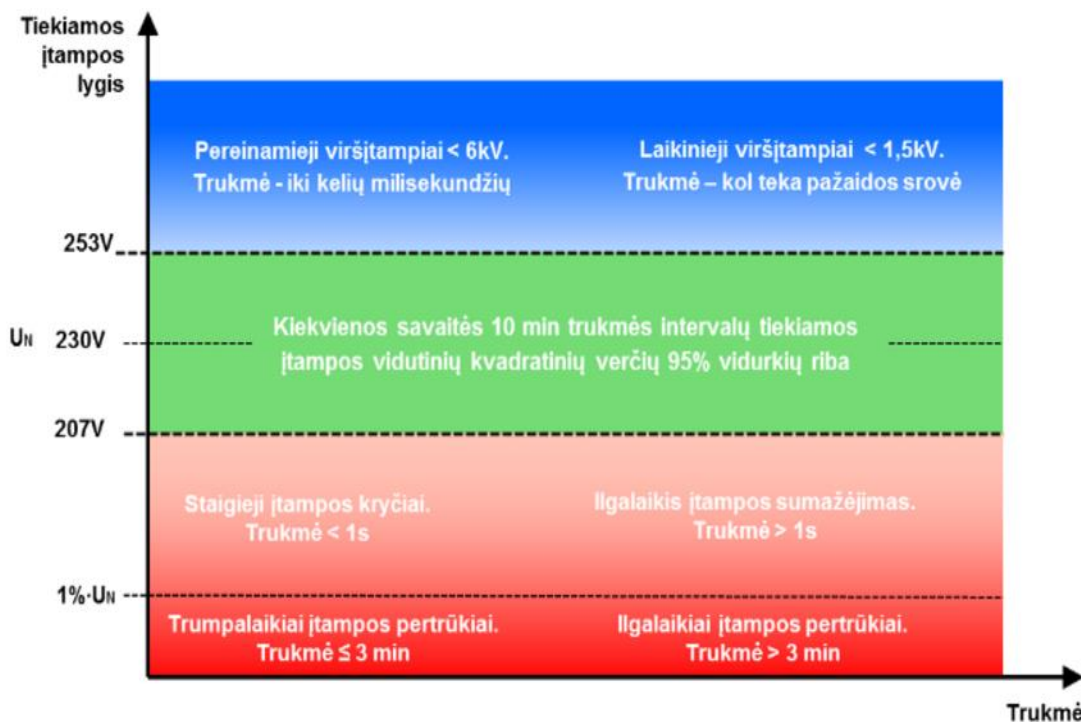


1.4 pav. Įtampos svyravimų grafikas [20]

Įtampos svyravimų neigiami poveikiai [10]:

- Įtampos svyravimai gali sutrikdyti įmonių gamybinius procesus. Dėl šios priežasties atsiranda nepageidaujamas gamybinis brokas.
- Įtampos nuokrypiai veikia elektros variklių darbą - esant sumažėjusiai įtampai, sumažėja įmagnetinimo reaktyvioji galia, prie tos pačios pareikalaujamos galios padidėja variklio srovė, dėl to perkaista izoliacija. Padidintas izoliacijos susidėvėjimas trumpina variklio amžių.
- Įtampos svyravimai pažeidžia normalų elektroninės aparatūros darbą, trumpina jos tarnavimo laiką.
- Įtampos svyravimai (10 – 15 %) gali sugadinti kondensatorines baterijas, lygintuvinius keitiklius, indukcinės krosnis, elektrolizinius įrenginius.
- Fazinės įtampos svyravimai sukelia elektros variklių vibracijas ir mechaninių konstrukcijų, ant kurių jie tvirtinami, nuovargį, sutrumpindami jų tarnavimo laiką.
- Įtampos svyravimai sukelia kaitrinių lempų mirgėjimą, nemalonų žmogui psichologinį efektą, akių ir viso organizmo nuovargį.

1.5 paveiksle pateikiama įtampos svyravimų grafinė tipologizacija pagal LST EN 50160 standartą.



1.5 pav. Įtampos svyravimų grafinė tipologizacija pagal LST EN 50160 standartą [10]

LST EN 50160 Europos 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, neturi būti viršytos bet kuriuose viešųjų Europos elektros tinklų maitinimo punktuose. [10]

Įtampos svyravimai (nuokrypiai) gali būti apskaičiuojami formule:

$$\delta U_t = \frac{U_i - U_{ai+1}}{U_{vard}} * 100\%; \quad (3)$$

čia U_{vard} – vardinė įtampa,

δU_t – įtampos svyravimai procentais,

U_i – akimirkinė įtampa laikotarpiu t ,

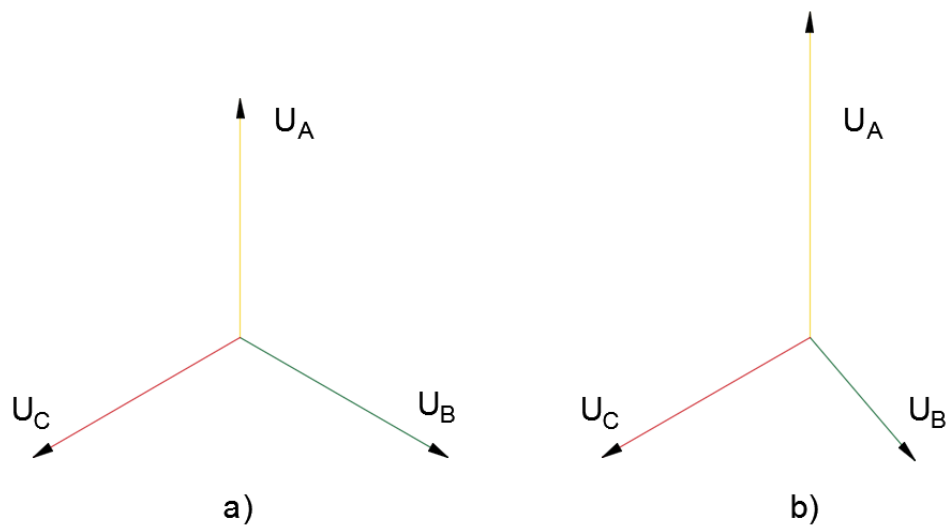
U_{ai+1} – akimirkinė sekančio intervalo a įtampa.

1.2.3. Įtampos asimetrija

Subalansuotoje sistemoje, kur nėra įtampos asimetrijos, visų fazių įtampų amplitudės yra vienodos ir jų tarpusavio kampai yra po 120° . Bet koks šių sąlygų neatitikimas lemia įtampų asimetrijos atsiradimą. Taigi, apibendrinant, įtampos asimetrija – tai trifazės sistemos būseną, kai tenkinamos šios sąlygos: [1]

- Fazių įtampos vidutinės vertės nėra lygios;

- Fazių tarpusavio kampai nėra lygūs.

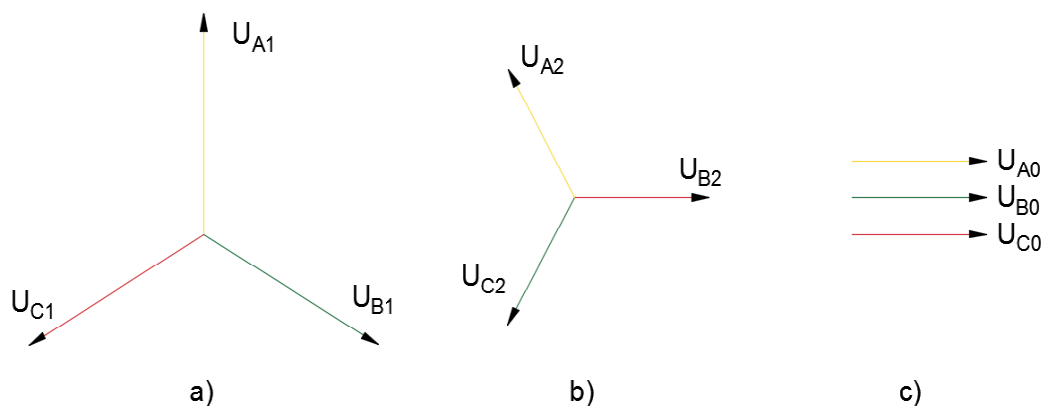


1.6 pav. a) Subalansuotos (simetrinės) sistemos fazinės įtampos; b) Nesubalansuotos (asimetrinės) sistemos fazinės įtampos

1.6 paveiksle palygintos simetrinės sistemos įtampos ir nesubalansuotos sistemos asimetrinės įtampos su skirtingomis amplitudėmis ir tarpusavio faziniais kampais. Tiriant įtampos asimetriją, remiantis simetrinių dedamųjų metodu, nesimetrinės įtampos gali būti išskaidytos į simetrines tiesiogines, atvirkštines ir nulines sekas dedamąsias [21]:

- Tiesioginės sekos įtampos dedamosios pasiskirsčiusios kas 120° ir sukasi prieš laikrodžio rodyklę;
- Atvirkštinės sekos įtampos dedamosios pasiskirsčiusios kas 120° ir sukasi pagal laikrodžio rodyklę;
- Nulinės sekos dedamosios išsidėsčiusios viena kryptimi ir nesisuka jokia kryptimi.

Tiesioginės, atvirkštinės ir nulinės sekos dedamosios pavaizduotos 1.7 paveiksle.



1.7 pav. Simetrinės dedamosios: a) Tiesioginės sekos; b) Atvirkštinės sekos; c) Nulinės sekos

Fazinių įtampų asimetrijai didėjant, tiesioginės sekos dedamoji mažėja, o atvirkštinės sekos dedamoji didėja. Žemiau pateiktomis formulėmis apskaičiuojamos tiesioginės, atvirkštinės ir nulinės sekos dedamosios:

- Tiesioginės sekos:

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2 \underline{U}_B + a \underline{U}_C); \quad (4)$$

- Atvirkštinės sekos:

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a \underline{U}_B + a^2 \underline{U}_C); \quad (5)$$

- Nulinės sekos:

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2 \underline{U}_B + a \underline{U}_C); \quad (6)$$

Maitinimo įtampos asimetrija yra reglamentuota LST EN 50160:2001 standartu. Vienos savaitės periode, 95% laiko įtampos asimetrija turi išlikti $\pm 2\%$ intervale. Kai kuriose vietose, kur vartotojo įrenginiai yra iš dalies vienfaziai arba dvifaziai, trifazė įtampos asimetrija elektros tinkle nuosavybės ar eksploataavimo atsakomybės ribos taškuose gali pasiekti apie 3%. [5]

Asimetrijos faktorius U_U apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$U_U = \frac{|U_B|}{|U_A|} * 100\%; \quad (7)$$

Asimetrija taip pat gali būti apskaičiuojama naudojantis šia formule:

$$U_U = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 * \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 * \beta}}} * 100\%, \quad (8)$$

$$\text{čia } \beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}.$$

Literatūroje [25] taip pat galima rasti ir šiek tiek kitokia išraiška pateiktą formulę įtampos asimetrijai apskaičiuoti:

$$\text{Įtampos asimetrija} = \frac{\text{maks. nuokrypis nuo vidutinės } \{U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}\} \text{ vertės}}{\text{vidutinės įtampos } \{U_{ab}, U_{cb}, U_{ca}\} \text{ vertės}}. \quad (9)$$

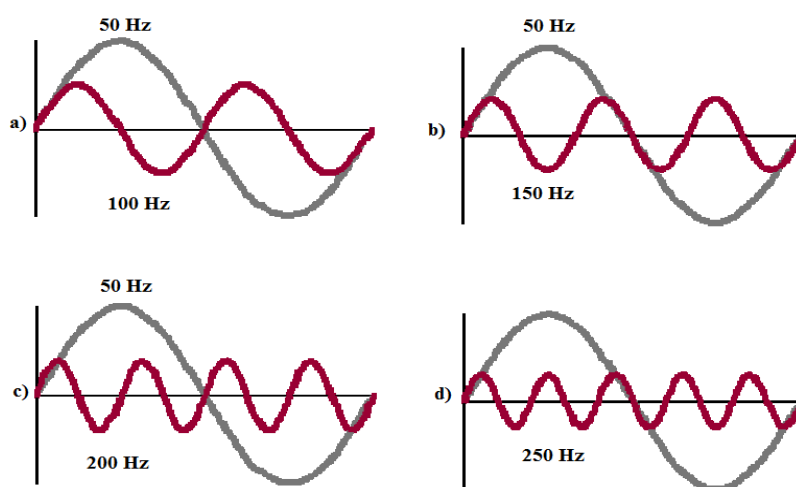
1.3. Aukštesniosios įtampos ir srovės harmonikos

Idealyje elektros energetinėje sistemoje, tiekiamos įtampos ir apkrovomis tekančios srovės kreivės yra sinusoidės. Tiesa, praktikoje nebūna idealių sąlygų, todėl šios sinusoidės dažnai būna iškraipytos. Šis srovės ir įtampos nuokrypis nuo tobulos sinusoidės vadinamas netiesiniu iškraipymų faktoriumi. [2]

Netiesiniai iškraipymai pasireiškia atsirandant pagrindinio dažnio kartotinėms. Tai reiškia, kad 50 Hz dažnio sistemoje aukštesniosios harmonikos turės tokį dažnį:

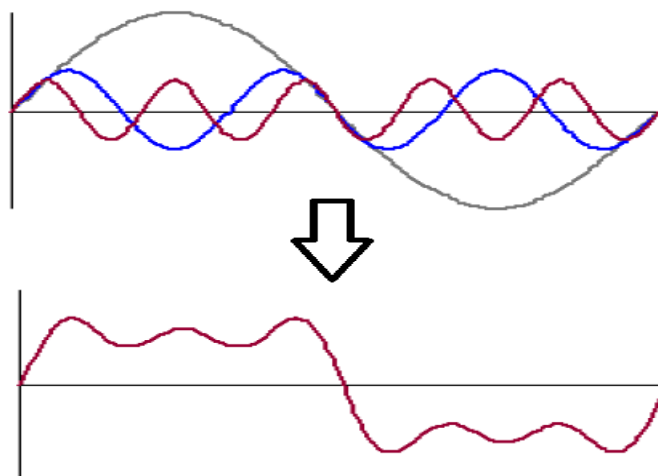
$$f_n = n * 50 \text{ Hz}; \quad (11)$$

1.9 paveiksle pateiktuose grafikuose pagrindinio dažnio kreivė lyginama su 2, 3, 4 ir 5 eilės aukštesniųjų harmonikų kreivėmis.



1.9 pav. Pagrindinio dažnio kreivė sulyginama su: a) 2-ios eilės; b) 3-ios eilės; c) 4-ios eilės; d) 5-ios eilės aukštesniųjų harmoninių svyravimų kreivėmis [12]

1.10 paveiksle pavaizduota, kokią įtaką fundamentalaus (50 Hz) dažnio kreivei daro 3-iosios (150 Hz) ir 5-osios (250 Hz) eilės harmonikos.



1.10 pav. 50 Hz dažnio kreivė užteršta 3-ios ir 5-os eilės harmonikomis [12]

Matematiškai, tokia nesusininė periodinė funkcija, su aukščiausio h eilės dažnio komponente, gali būti aprašoma Furjė eilute [21]:

$$a(t) = A_0 + A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + A_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots \quad (12)$$

$$\dots + A_{hm} \sin(h\omega t + \psi_h);$$

čia A_0 – pastovus dydis;

$A_{hm} \sin(h\omega t + \psi_h)$ – sinusinės laiko funkcijos, kurių amplitudės $A_{1n}, A_{2n}, \dots, A_{hn}$;

$\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{hn}$ – pradinės fazės;

$\omega, 2\omega, \dots, h\omega$ – kampinis dažnis;

Elektrotechnikoje šios sumos dėmenys vadinami: [21]

- A_0 – nuolatinė dedamoji (DC);
- $A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ – pagrindinė (pirmoji – 50Hz) harmoninė dedamoji;
- Trečiasis ir tolimesnieji – aukštesniosios (iki h eilės) harmoninės dedamosios.

Netiesiniai įtampos ir srovės iškraipymai NIF (angl. k. *THD – Total Harmonic Distortion*) aprašomi kaip visų aukštesniosios eilės harmonikų amplitudžių vidutinės kvadratinės vertės ir pagrindinės (50Hz) dedamosios santykis. Šis santykis negali viršyti 8% ribos. Įtampai ir srovės šis santykis užrašomas taip:

- Įtampos NIF :

$$NIF_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^h U_n^2}}{U_1}; \quad (13)$$

- Srovės NIF:

$$NIF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^h I_n^2}}{I_1}; \quad (14)$$

čia n – harmonikos eilės numeris;

h – aukščiausios tiriamos harmonikos numeris;

U_1 – 50 Hz dažnio įtampa;

I_1 – 50 Hz dažnio srovė;

U_n – n – tosios harmonikos įtampa;

I_n – n – tosios harmonikos srovė;

Ne visais atvejais NIF parodo tikrąjį harmonikų lygį, todėl atliekant tyrimą reikia nustatyti visų harmoninių dedamųjų vertes ir įsitikinti, ar jos neviršija normų. [12]

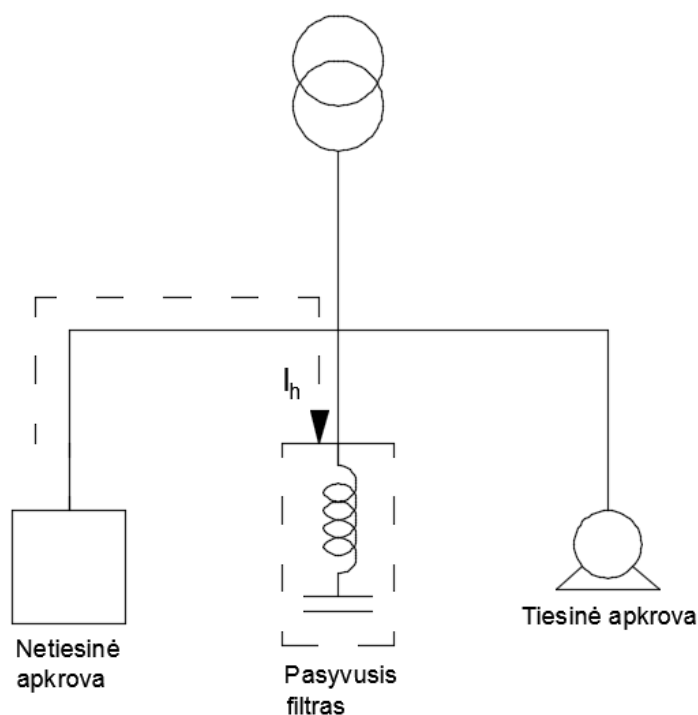
1.3.1. Aukštesniųjų harmonikų filtravimas

Siekiant išvengti aukštesniųjų įtampos ir srovės harmonikų sukeltų problemų, joms eliminuoti naudojami filtrai. Iš viso yra trys aukštesniųjų harmonikų filtrų tipai:

- Pasyvus filtras;
- Aktyvus filtras;
- Mišrus filtras.

Pasyvus filtravimas

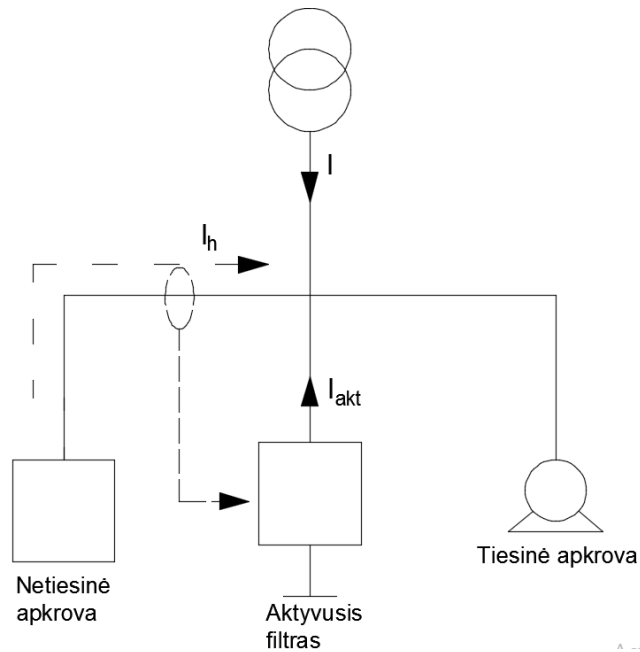
Pasyvūs harmonikų filtrai (PHF) – tai nuosekliai sujungtų kondensatorių ir induktorių sistema. Ji suderinta taip, kad šiuo kontūrų dėl mažos varžos tekėtų tik aukštesniųjų harmonikų (250 Hz, 350 Hz, t.t.) srovės. Pagrindinės harmonikos srovė „matys“ didelę varžą ir šiuo kontūru netekės. Tokie filtrai dažniausiai naudojami ne visos sistemos, bet atskirų apkrovų generuojamų aukštesniųjų harmoninių srovių filtravimui. Šio filtro sandara pavaizduota 1.11 paveiksle. [22]



1.11 pav. Pasyvus harmonikų filtras [22]

Aktyvus filtravimas

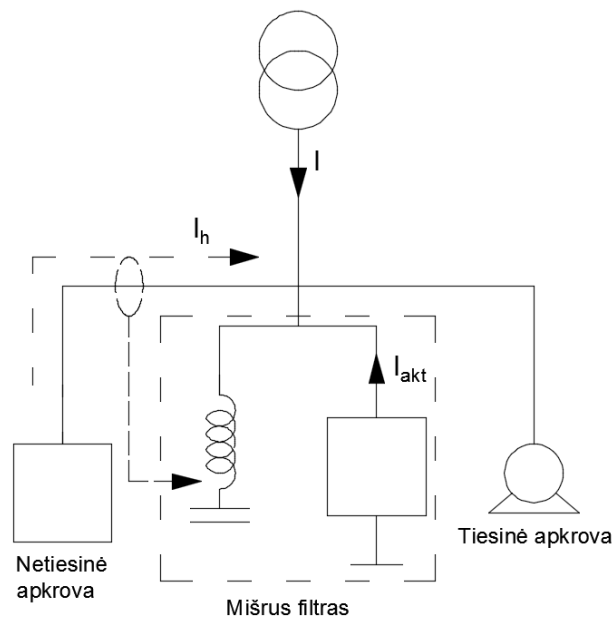
Aktyvus harmonikų filtravimas (AHF) – tai procesas, kurio metu stebima ir matuojama netiesinės apkrovos generuojama harmoninė srovė. Filtro schema pateikta 1.12 paveiksle. Tuomet filtras sugeneruoja priešingą išmatuotajai srovei, taip ją pašalindamas iš tinklo. Aktyvaus filtro reakcijos laikas gali siekti 300 μ s. Priešingai nei pasyvūs, aktyvūs filtrai gali kompensuoti harmonines sroves kintant apkrovai bei harmoninėms srovėms. [22]



1.12 pav. Aktyvus harmonikų filtras [22]

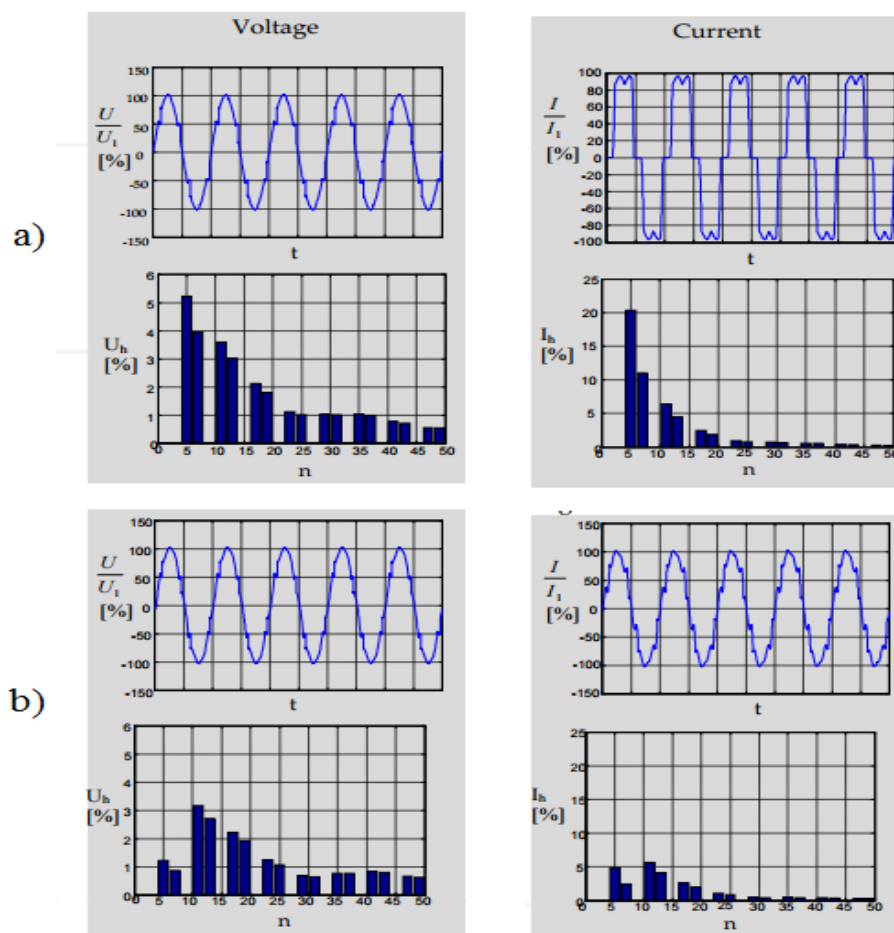
Mišrus filtravimas

Mišri harmonikų filtravimo sistema yra jau aptartų aktyvaus ir pasyvaus filtravimo sistemų kombinacija. Šio filtravimo esmė yra tame, kad didesnis pasyvus filtras filtruoja pastovių apkrovų generuojamas harmonines sroves, o mažesnis aktyvus filtras filtruoja kitų kintamų apkrovų generuojamas laiko atžvilgiu kintamas harmonines sroves. Šis sprendimas aukštesniosios eilės harmonikų filtravimui dažniausiai būna efektyvus tiek iš praktinės pusės (puikiai atlieka savo paskirtį), tiek iš ekonominės pusės. Filto sandara ir prijungimas prie tinklo pavaizduotas 1.13 paveiksle. [22]



1.13 pav. Mišrus harmonikų filtras [22]

1.14 paveiksle pateiktuose grafikuose matyti kaip kinta įtamos ir srovės kreivės prieš įdiegiant filtrus (a) ir po filtrų įdiegimo į sistemą (b). Po aukštesniųjų harmonikų filtravimo stipriai sumažėja srovės kreivės pikai, iškraipantys sinusoidę. Taip pat sumažėjusios charakteringųjų įtamos ir srovės harmonikų reikšmės pateiktos 1.14 paveiksle spektrinės analizės formoje.

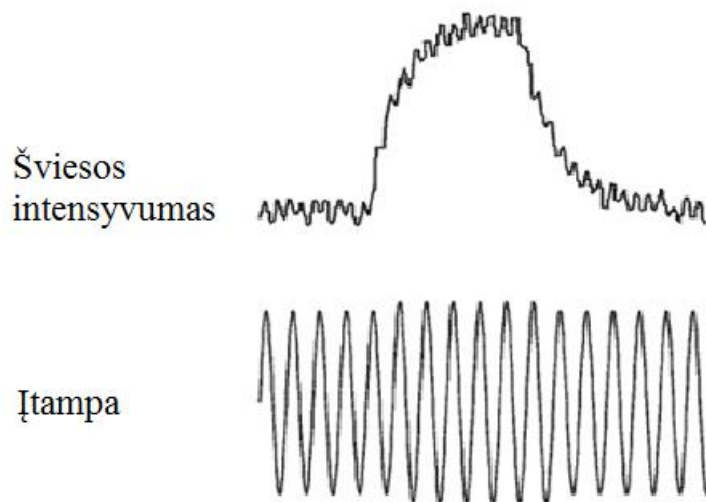


1.14 pav. Įtamos ir srovės kreivės a) prieš naudojant filtrus; b) su filtrais [14]

1.4. Šviesos mirgėjimas

Šviesos mirgėjimas – tai geitai įvykstantys ir pasikartojantys šviesos intensyvumo pakitimai. Atsiradus šviesos mirgėjimams, susidaro išpūdis, jog šviesa sąlyginai „vibruoja“ ir tampa nestabili. Šis reiškinys pastebimas, kai atsiranda pokyčių tiekiamoje įtampoje, arba tuomet, kai tinkle pastebimi įtamos svyravimai. Šviesos mirgėjimo intensyvumas (aštrumas) priklauso nuo šių parametru [16]:

- Įtamos svyravimų intensyvumo, trukmės, bei pasikartojimų skaičiaus;
- Įtamos pokyčio svyravimų metu;
- Šviesos šaltinių tipo (kaitrinės, fluorescencinės lempos ir t.t.);
- Bendro patalpos apšvietimo lygio;



1.8 pav. Įtampos svyravimų įtaka apšvietimui [20]

Aukščiau pateiktame 1.8 paveiksle pateiktos kreivės, vaizduojančios tiekiamos įtampos svyravimų įtaka apšvietimo intensyvumui - didėjant įtampai, šviesos srautas suintensyvėja.

Mirgėjimų faktorius

Mirgėjimų faktorius – tai santykinis dydis išreikštas procentais, aprašantis šviesos šaltinio mirgėjimo stiprumą. Kitais žodžiais tariant, šis faktorius įvertina maksimalaus ir minimalaus apšvietimo lygių santykį. Mirgėjimų faktorius gali būti aprašomas 15 formule. Šis mirgėjimų faktorius taip pat priklauso nuo šviesos šaltinio tipo. Tipiniai skirtingų šviesos šaltinių mirgėjimo faktoriai pateikti 1 lentelėje. Šviesos šaltinis su 0% mirgėjimo faktoriumi skleis pastovų šviesos srautą ir mirgėjimas nebus užfiksuotas. 100% siekiantis mirgėjimo faktorius aprašo šaltinį, kurio šviesos srautas, esant mirgėjimui, gali sumažėti iki minimalios reikšmės. [16]

1 lentelė. Tipiniai įvairių šviesos šaltinių mirgėjimo faktoriai [16]

Šviesos šaltinio tipas	Mirgėjimo faktorius
LED lempa, pritemdyta iki 50%	99%
MH su magnetiniu balastu	0 – 70 %
Fluorascencinė lempa su magnetiniu balastu	30 – 60 %
Fluorascencinė lempa su elektroniniu balastu	0 – 12 %
Kaitrinė lempa	0 – 10%
Saulės šviesa	0 %

Šviesos mirgėjimui išmatuoti naudojami specialūs prietaisai – flikermetrai (angl. *flickemeter*). Dažniausiai šiais prietaisais matuojamas šviesos mirgėjimų dažnis. Šie nuo dažnio

matuoklių skiriasi tuo, kad fiksuoja ne tik dažnį, bet ir apskaičiuoja mirgėjimo faktorių. Siekiant nustatyti, ar tiriamasis šviesos šaltinis skleidžia tolygią šviesą, privaloma išmatuoti tiek mirgėjimų dažnį, tiek ir mirgėjimų faktorių. [16]

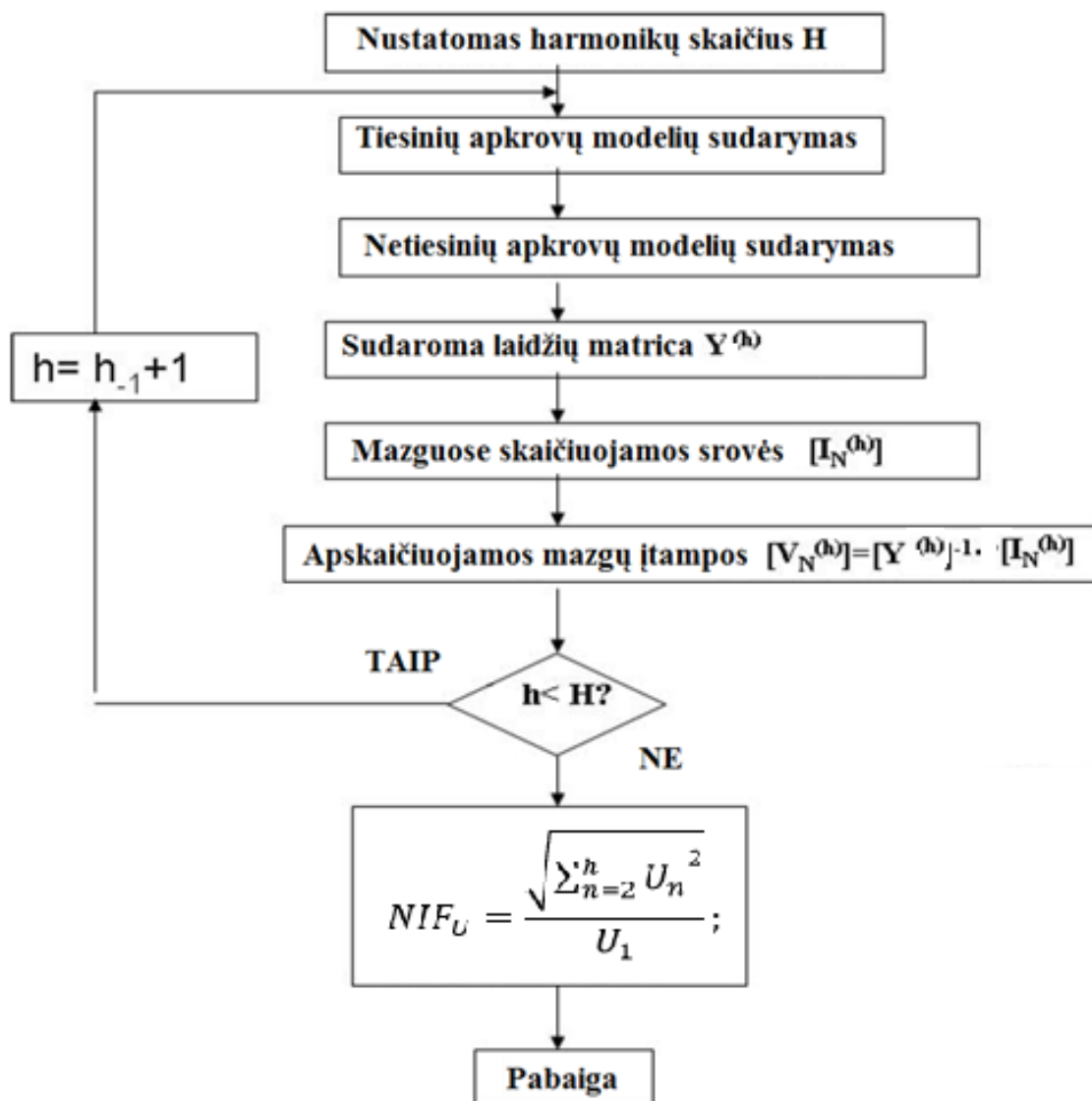
$$\text{Mirgėjimų faktorius} = \frac{1}{2} * \frac{E_{MAX} - E_{MIN}}{E_{VID}} * 100\%. \quad 15)$$

čia E – apšvietos lygis.

Bendriniu atveju, jei mirgėjimo faktorius neviršija 3% vertės, laikoma, kad šviesos šaltinis skleidžia tolygią šviesą ir nemirga.

2. TYRIMO METODIKA

Harmonikų skaičiavimo ir modeliavimo algoritmas pateiktas 2.1 paveiksle. Prieš pradėdant dirbti su šiuo algoritmu, nustatomas tiriamųjų aukštesniųjų harmonikų skaičius. Dažniausiai šis skaičius siekia 25 harmoniką, tačiau kai kurie šaltiniai teigia, jog išskirtiniais atvejais tiriama net iki 40 harmonikos. [11]



2.1 pav. Skaičiavimams bei modeliavimui naudojamas algoritmas [11]

Darbas pradamas elektros energijos sistemos apžvalga, jos analize bei tiesinių apkrovų, kurios formuoja sistemą, parametrų nustatymu ir modeliavimu. Būtina nustatyti netiesines apkrovas, apibrėžti jų modelius, nes būtent šios apkrovos generuoja aukštesniąsias harmonines sroves. Tokios apkrovos modeliuojamos kaip aukštesniųjų harmonikų srovės šaltiniai. Šios srovės yra apskaičiuojamos remiantis pagrindinės harmonikos srovės paramerais. Srovės šaltinio į sistemą skleidžiamos srovės apskaičiuojamos šia formule:

$$I_{(h)} = Y^{(h)} * U^{(h)}; \quad (16)$$

čia

$I_{(h)}$ – h – tosios harmonikos srovė;

$Y^{(h)}$ – h – tosios harmonikos laidis;

$U^{(h)}$ – h – tosios harmonikos įtampa;

Sudarius matematinius sistemos elementų modelius, nustatomi galios srautai ir tuomet visuose sistemos mazguose galima apskaičiuoti harmoninius svyravimus, kuriuos ir sukelia minėtosios netiesinės apkrovos. [11]

Netiesiniai įtampos iškreipimai NIF_U aprašomi kaip visų aukštesniosios eilės harmonikų amplitudžių vidutinės kvadratinės vertės ir pagrindinės (50Hz) dedamosios santykis:

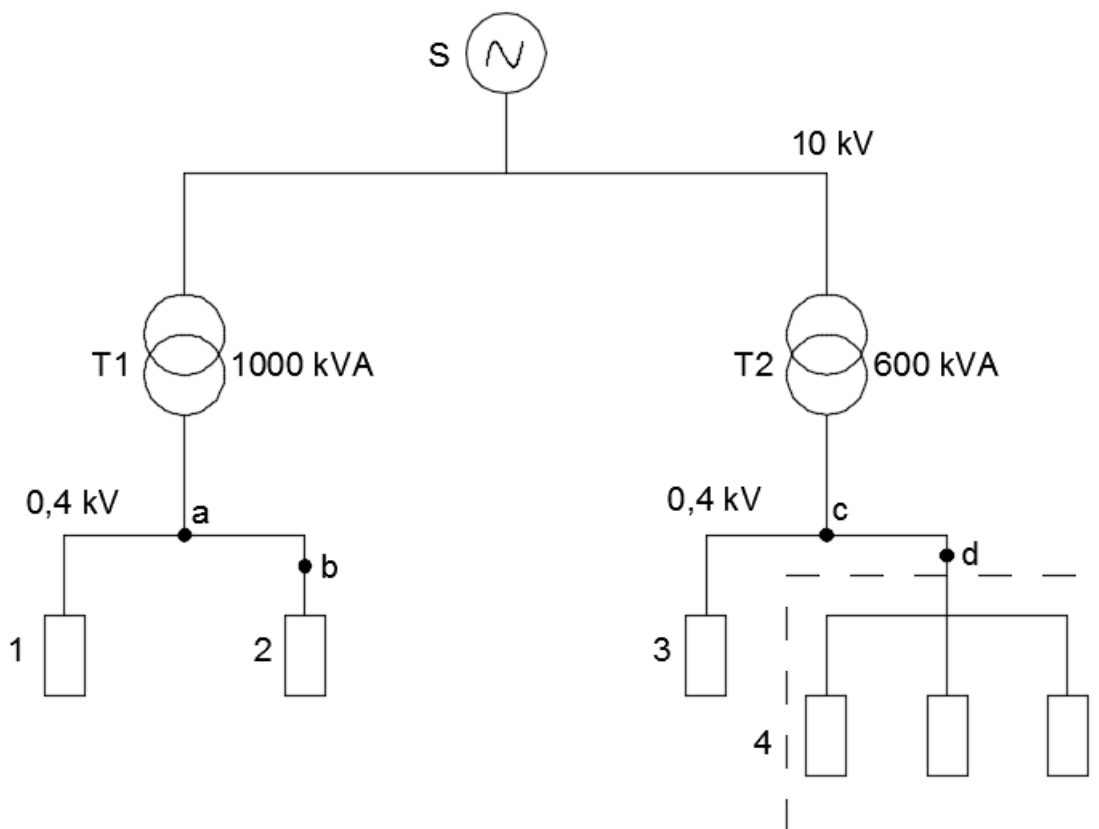
$$NIF_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^h U_n^2}}{U_1}; \quad (17)$$

3. TYRIMO REZULTATAI IR JŲ APIBENDRINIMAS

Šiame skyriuje grafiškai pateikiama ir aprašoma tiriamos pramonės įmonės elektros energetinė sistema. Kadangi tyrimo metu įmonėje buvo atliekami matavimai, trumpai aprašoma įranga, su kuria dirbta. Apibendrinami ir išanalizuojami atliktų elektrinių parametų matavimo rezultatai, kurie pateikiami grafinėje formoje. Susipažinus su pramonės įmonės elektros sistema, nustatyta problema, susijusi su įmonės apšvietimo sistema. Dėl šios priežasties, apšvietimo sistema analizuojama plačiau. MatLAB Simulink programa sudarytas įmonės apšvietimo sistemos modelis, aprašantis ir padedantis analizuoti harmoninius svyravimus, įtampos asimetriją. Modelis taip pat naudotas siekiant nustatyti įtampos ir srovės iškreipimus įmonės plėtos atveju. Rezultatai aprašomi ir pateikiami išvadų skyriuje.

3.1. Pramonės įmonės elektros energetinė sistema

Tiriamoji pramonės įmonės elektros sistema yra plati, su kompleksiniais įrenginiais, tiesinėmis bei netiesinėmis apkrovomis, sistemoje gausu keitiklių bei jautrių elektronikos komponentų. Šioje įmonėje buvo atlikti matavimai elektros energijos kokybės parametrams nustatyti. Siekiant supaprastinti matavimus, buvo tiriama tik dalis įmonės energetinės sistemos. Atliekant matavimus, buvo pasirinkti 4 galimai problemiški tinklo taškai. Įmonės principinė vienalinijinė schema pateikta 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Pramonės įmonės elektros energetinės sistemos principinė vienalinijinė schema

Elektros energija pramonės įmonei yra tiekama dviem aukštos įtampos įvadais per 2 įmonei priklausančius transformatorius:

- T1 – 10/0,4 kV, 1000 kVA;
- T2 – 10/0,4 kV, 600 kVA;

Transformatoriai yra sujungti lygiagrečiai, todėl prie jų prijungtų apkrovų sukeliama elektros parametrų trikdžiai, kito transformatoriaus (bei prie jo prijungtų įmtumų) darbui įtakos neturės. Taip iš esmės yra todėl, kad matavimai atliekami žemosios įtampos pusėje.

Sudarytoje įmonės elektros sistemos dalyje pažymėti taškai, kuriuose buvo atliekami ilgalaikiai matavimai:

1. Elektros kokybės parametrų matavimai įmonės IPS-2 įvade (a taškas);
2. Elektros kokybės parametrų matavimai ties lygintuviniu keitikliu valdomomis staklėmis (b taškas);
3. Elektros kokybės parametrų matavimai įmonės IPS-1 įvade (c taškas);
4. Elektros kokybės parametrų matavimai apšvietimo grandinės įvade (d taškas).

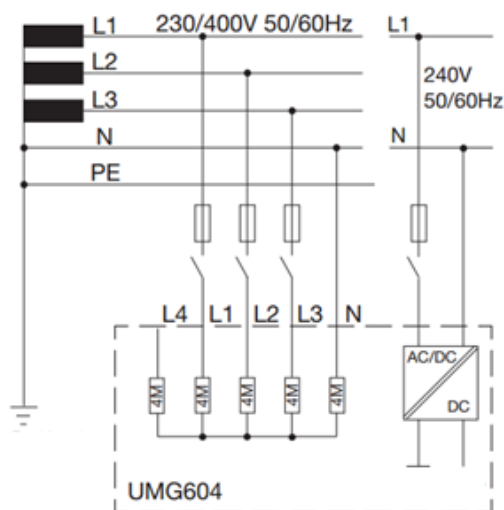
Atliktų matavimų vietas tinkle 3.1 paveiksle pažymėtos raidėmis a, b, c ir d. Taškuose a ir c matavimai atlikti siekiant nustatyti ir įvertinti elektrinių parametrų reikšmes pradiniuose įmonės energetinės sistemos taškuose – įvaduose IPS-1 ir IPS-2. Taškai b ir d pasirinkti norint iširti konkrečių netiesinių įmtuvų (šiuo atveju dažnio keitikliais valdomų staklių bei metalo halogenų šviestuvų sistemos) sukeltus trikdžius bei elektros kokybės parametrų nuokrypius nuo norminių dydžių.

3.2. Elektros energijos kokybės parametrų matavimas ir rezultatai

Pramonės įmonėje nustatant elektros energijos kokybės parametrus ir jų vertes buvo naudojami šie matavimo prietaisai:

- Elektros energijos kokybės analizatorius Janitza UMG604;
- Trifazis elektros energijos kokybės analizatorius Chauvin Arnoux C.A. 8332;
- Skaitmeninis analizatorius Eurotest 61557;

Matavimų metu buvo siekiama nustatyti įtampos, srovės bei aukštesniųjų įtampos ir srovės harmonikų reikšmes bei sudaryti jų grafikus. Taip pat buvo stebima pereinamųjų procesų (prijungiant ar atjungiant didesniąsias apkrovas) įtaka įtampos ir srovės kreivėms. Matavimai buvo atliekami skirtingomis dienomis ir skirtingu paros metu, siekiant kuo tiksliau išanalizuoti įmonės elektros energijos kokybinius parametrus. Kiekvienas tinklo taškas buvo stebimas parą laiko.



3.2 pav. Elektros energijos kokybės analizatoriaus Janitza UMG604 prijungimo schema [23]

3.2 paveiksle pavaizduota elektros energijos kokybės analizatoriaus Janitza UMG604 prijungimo prie sistemos schema. Šiam analizatoriui reikalingas atskiras maitinimas.

Atlikus matavimus buvo nustatytos skirtingų fazių (L1, L2, L3) įtampų minimali, maksimali ir vidutinė reikšmės, pateiktos 1 lentelėje. Dėl nevienodai paskirstytų vienfazių imtuvų šios reikšmės skirtingose fazėse skiriasi. Tai reiškia, kad įtampos fazėse nėra simetrinės, tačiau ši asimetrija nerimo nekelia, nes neviršija reglamentuotos normos (įtampos fazėse negali skirtis daugiau kaip $\pm 2\%$).

1 lentelė. Įtampų reikšmės tirtuose tinklo taškuose.

Matavimų vieta	Fazė	U_{\min}, V	U_{vid}, V	U_{\max}, V
a	L1	232,22	235,59	238,50
a	L2	233,35	236,61	239,54
a	L3	231,91	234,79	237,70
b	L1	230,43	235,29	239,82
b	L2	232,64	236,61	240,98
b	L3	230,25	234,69	239,15
c	L1	235,63	238,31	240,70
c	L2	237,20	239,56	242,25
c	L3	234,29	236,79	239,44
d	L1	235,89	238,71	241,48
d	L2	236,99	240,06	242,87
d	L3	234,43	237,35	240,65

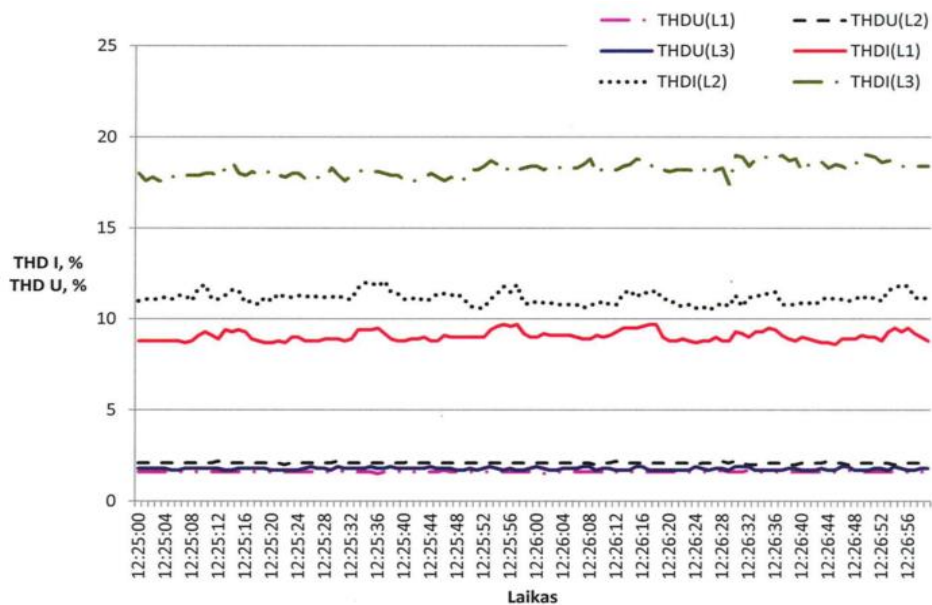
2 lentelėje pateikti netiesinių iškreipimų faktorių minimalios, maksimalios bei vidutinės vertės visuose 4 matavimo taškuose. Maksimalus NIF_U užfiksuotas 3-iaame matavimo taške L2 fazėje. Mažiausia užfiksuota reikšmė buvo 4-ame taške L1 fazėje – jis siekė vos 0,73%. Visgi, didžiausia NIF_U vidutinė reikšmė pastebėta 4-ame taške (apšvietimo sistemoje) L3 fazėje – 2,18%. Toks rezultatas gaunamas dėl šviestuvų apkrovos netiesiškumo ir dėl nevienodai fazėms paskirstytų apkrovų. Išanalizavus šviestuvų prijungimą, nustatyta, jog L1 fazei tenka 25% visos apšvietimo sistemos apkrovos, L2 – 33%, o L3 – 42%.

2 lentelė. Įtampos kreivės suminiai netiesiniai iškreipimo faktoriai.

Matavimų vieta	Fazė	NIF_{Umin} , %	NIF_{Uvid} , %	NIF_{Umax} , %
a	L1	0,79	1,49	2,20
a	L2	1,40	1,56	2,25
a	L3	1,26	1,79	2,48
b	L1	1,15	1,75	2,53
b	L2	1,47	1,74	2,31
b	L3	1,69	1,78	2,67
c	L1	1,04	1,57	2,12
c	L2	1,91	2,27	2,70
c	L3	1,43	1,81	2,30
d	L1	0,73	1,30	2,00
d	L2	1,30	1,64	2,23
d	L3	1,89	2,18	2,57

3.3 paveiksle pateikti 2 grafikai: įtampos NIF ir srovės NIF faktorių. Šiuose grafikuose atvaizduoti visų fazių netiesinių iškreipimo faktorių kitimo laike grafikai. Kituose matavimų taškuose užfiksuoti parametrų dydžiai atvaizduoti grafiškai ir pateikti prieduose (Priedai 1 – 4).

Analizuojant 3.3 paveikslą pastebima, jog NIF_I faktorių lygiai fazėse skiriasi. To priežastimi tampa nesubalansuota apšvietimo sistema. Kaip minėta anksčiau, apšvietimo sistemos L3 fazė apkrauta labiausiai. Tai pastebima 3.3 paveikslo grafike – L3 fazės NIF_I yra didžiausias. Išmatuota, kad visose fazėse netiesinių iškreipimų faktoriai atitinkamai siekia 9,7%, 12,1% ir 19,1%. Tiesa, atlikti matavimai parodė, kad įtampos netiesiniai iškreipimai skirtingose fazėse yra panašūs, ir skiriasi iki 0,70%. Taigi, nors maksimali išmatuota NIF_I vertė siekia 19,1%, įtampa tėra iškreipoma minimaliai.



3.3 pav. Įtampos ir srovės NIF matavimo taške c

Analizuotoje literatūroje pastebėta, kad neretai tiriamuose objektuose srovės NIF siekia ir 50 – 60 %. Šiame tyrime, nepaisant įmonėje esančių daugelio netiesinių apkrovų (MH apšvietimas, lygintuviniai keitikliai), maksimalus NIF_1 buvo 19,1%. Šis faktas, kaip ir užfiksuotos žemos įtampos harmonikos, padeda įsitikinti, kad tiriamosios pramonės įmonės elektros energija yra kokybiška ir atitinka standartus.

3.3. Pramonės įmonės apšvietimo sistemos problema

Tiriamosios pramonės įmonės apšvietimo sistemoje buvo pastebėta problema – neperiodinis, atsitiktiniuose sistemos taškuose atsirandantis lempų mirgėjimas. Įmonėje įdiegta gana standartinė pramonės įmonėms – metalo halogenų šviestuvų sistema. Iš viso bendrose patalpose sumontuoti 93 vnt. 400 W galios šviestuvų, iš kurių 2 trečdaliai naudojami įrenginių salei, o likusieji – sandėliavimo patalpoms apšviesti. Įtampa šioms lempoms tiekama per elektromagnetinius balastus. Minėtasis mirgėjimas vienu metu buvo pastebimas vienoje – dviejose lempos. Norint išanalizuoti šį reiškinį, MatLAB Simulink programa buvo sumodeliuota įmonės elektros sistemos dalis aprėpanti apšvietimo sistemą. Sekančiame skyrelyje trumpai išanalizuojama metalo halogenų apšvietimo sistema ir šių lempų veikimo principas.

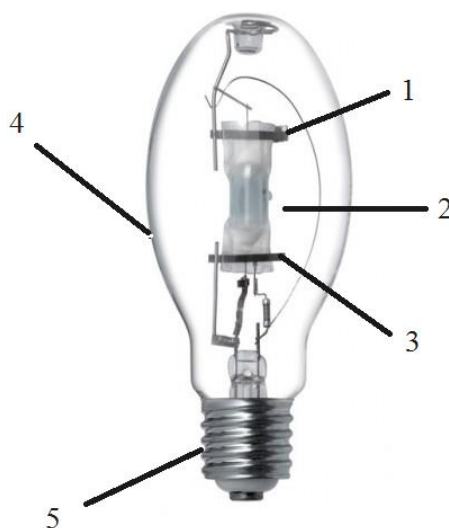
Metalo halogenų šviestuvai

Metalo halogenų lempą charakterizuojantys dydžiai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Metalo halogenų lempą charakterizuojantys dydžiai [15]

Šviesos šaltinis	Vardinių galių ribos, W	Šviesos efektyvumas, Lm/W	Resursas, h	Užsidegimo trukmė, min	
				Šaltos lempos	Išilusios lempos (trumpam dingus įtampai)
Metalų halogenų lempos	35÷2000	60÷100	2000÷10000	3÷5	6÷10

Metalo halogenų lempa – aukšto slėgio, turinti platų spinduliavimo spektrą, gyvsidabrio lempa. Jos degiklyje yra gyvsidabrio ir argono bei kitų metalų. Šie metalai lemposje yra halogenų (pvz.: jodidų) pavidalu. Halogenai yra elektriškai negiami, t.y., lengvai sugeria laisvuosius elektronus ir tai trukdo lempai užsidegti. [17]



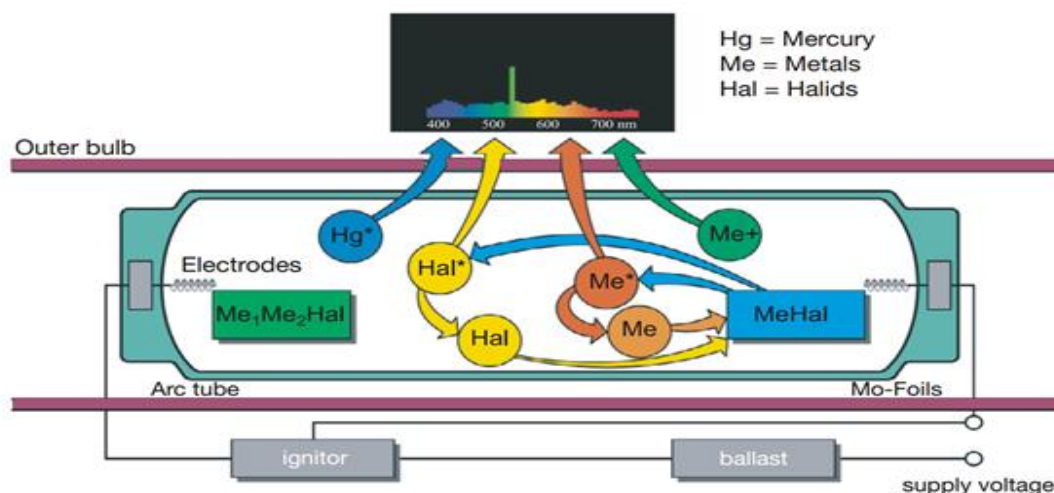
3.4 pav. Metalo holegenų lempos struktūra

3.4 paveiksle pavaizduota 400 W galios metalo halogenų lempa ir jos sandara:

- 1, 2 – elektrodai;
- 3 – lankinio išlydžio silicio vamzdelis;
- 4 – išorinis lempos sluoksnis (dengtas UV filtru);
- 5 – bazė.

Metalo halogenų lempų veikimas

Metalo halogenų lemposje šviesa sukuriama tarp dviejų hermetiškai izoliuotų elektrodų. Po uždegimo, silicio vamzdelyje tarp elektrodų esančios dalelės dalinai jonizuojamos (taip tampa laidžios elektros srovei) ir sukuriama „plazma“. Dažniausiai silicio vamzdelis yra vidinėje lempos dalyje, kurią gaubia UV filtru padengtas stiklas. Silicio vamzdelyje atsiradus elektros srovei, sužadinami metalo halogenai skleidžiantys šviesą. [15] Šis principas pavaizduotas 3.5 paveiksle.



3.5 pav. Metalo halogenų lempos veikimas [15]

Metalo halogenų struktūra

Siekiant tvarkingai įžiebtį metalo halogenų lempą, reikalinga eilė papildomų komponentų, kurie užtikrina saugų ir sklandų lempos paleidimą ir veikimą. Tai yra balastas, ignitorius ir kondensatorius. Šie elementai ir jų reikšmė sistemoje aprašyti žemiau.

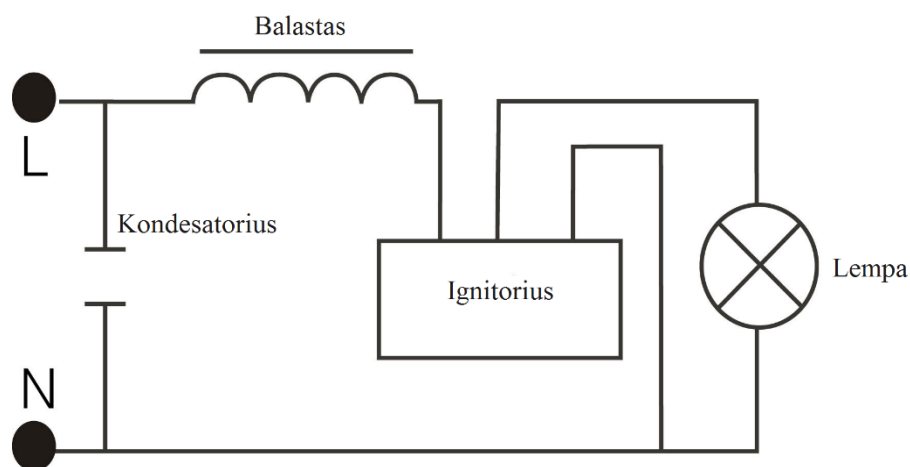
Metalo halogenų lemposje sukuriamas elektros laukas turi neigiamos varžos savybę. Tai reiškia, kad didėjant lempos tenkačiai srovei, įtampa ties lempos sumažės. Tarkime, kad įtampa šiai lempos yra tiekiamas iš pastovaus įtampos šaltinio. Tokiu atveju srovė, tekanti lempos, didėtų tol, kol lempos sprogtų. Dėl šios priežasties srovė turi būti ribojama, o tai pasiekama naudojant elektromagnetinius arba elektroninius balastus [18]:

1. Elektromagnetinis balastas;
2. Elektroninis balastas.

Metalo halogenų lemposje nėra lempos uždegimui skirtas elektrodas, todėl papildomai prie balasto jungiamas ir ignitorius (priklausomai nuo gamintojo, ignitorius gali būti įtrauktas į elektroninio balasto sandarą). Jo paskirtis – sugeneruoti aukštos įtampos impulsą (1 – 5 kV šaltai lempos; virš 30 kV kai lempos karta tik išjungta ir vis dar yra karšta), kuris padeda užsidegti elektros lankui.

Siekiant sumažinti galios nuostolius, lygiagrečiai lempai jungiamas kondensatorius. Paprastai kondensatorius jungiamas ne visai lempų sistemai, bet kiekvienai lempai atskirai. Taip užtikrinami mažesni nuostoliai. [15]

Principinė metalo halogenų lempos paleidimo sistema pavaizduota 3.6 paveiksle.



3.6 pav. Principinė MH lempos paleidimo sistema

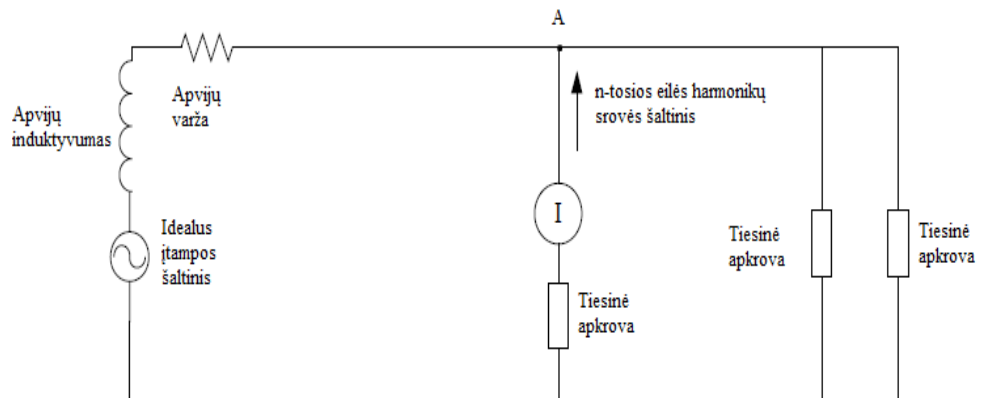
3.4. Aukštesniųjų harmonikų modeliavimas

Pagrindinis harmonikų tyrimo ir analizės tikslas – nustatyti įtampos ir elektros srovės signalų iškraipymą įvairiuose elektros tinklo taškuose. Atliktos analizės rezultatai naudojami aukštesniųjų harmonikų sukeltų problemų diagnostikai ir jų šalinimui. Harmonikų tyrimai taip pat gali padėti nustatyti pavojingų rezonansinių sąlygų buvimą ir patikrinti, ar laikomasi reglamentuotų įtampos ir srovės harmonikų ribų. Poreikis tokiems tyrimams gali atsirasti analizuojant išmatavus tinklo parametrus ir nustatius ribas viršijančią signalo iškraipymą. Harmonikų analizė susideda iš šių žingsnių [24]:

- Aukštesniašias harmonikas skleidžiančių įrenginių nustatymas ir juos reprezentuojančių modelių sudarymas;
- Kitų elektros energetinės sistemos komponentų modelių sudarymas;
- Sistemos simuliacija esant įvairiems darbo režimams.

Bet kokia apkrova, prijungta prie transformatoriaus (vaizduojamo kaip įtampos šaltinis), “matys” neiškraipytą įtampos sinusoidę. Srovės, tekančios šia apkrova dydis, priklausys nuo jos varžos. Kai apkrova yra tiesinė (jos varža nekinta laiko atžvilgiu), srovės sinusoidė bus neiškraipyta ir atkartos įtampos sinusoidės formą. Tačiau, jeigu apkrova bus netiesinė (tokia, kurios varža kinta laiko atžvilgiu, dėl lygintuvų ar kitų netiesinių apkrovų), srovės sinusoidės forma gali stipriai skirtis nuo įtampos sinusoidės. Ši iškraipyta srovė, remiantis Furjė eilutės

principu, susideda iš daug skirtingo dažnio ir amplitudės neiškraipytų harmoninių srovių sinusoidžių. [19]



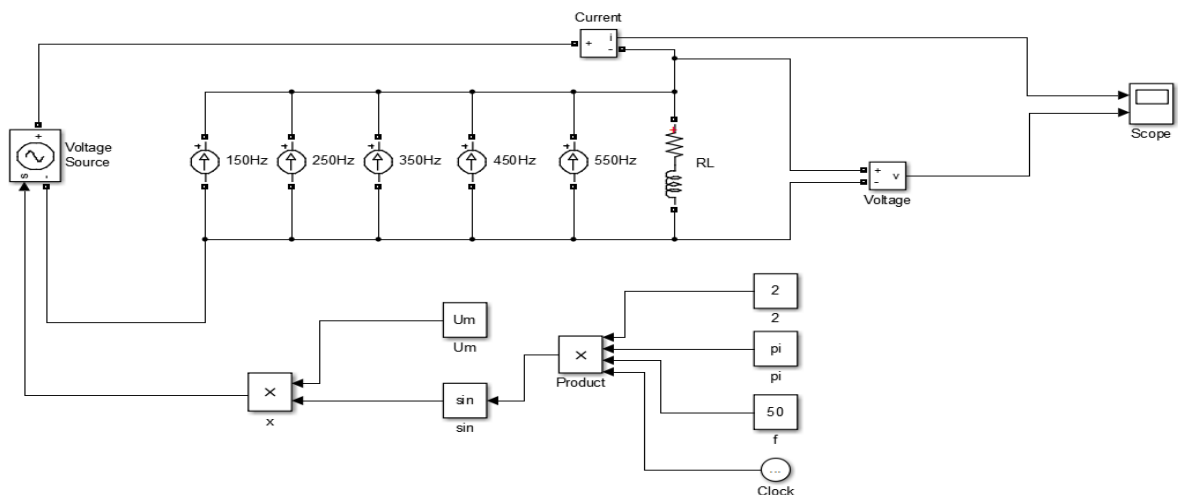
3.7 pav. Tinklo, kurio viena iš apkrovų generuoja n-tąją harmoninę srovę, schema [24]

Netiesinė apkrova modeliuojant pramonės įmonės elektros energetinę sistemą vaizduojama kaip tiesinė apkrova ir nuosekliai prijungtas tam tikrą harmoninę srovę, su žinomais amplitudė ir dažniu, generuojantis srovės šaltinis. Tokios schemos pavyzdys yra pateiktas 3.7 paveiksle.

Duomenys, naudojami kuriant modelį, gali būti gaunami remiantis idealiu teoriniu modeliu arba iš atliktų tinklo parametrų matavimų. Tiesa, naudojant matavimų rezultatus gaunamas realistiškesnis ir tinklą geriau vaizduojantis modelis. Tai yra itin svarbu, jei sistema yra nesubalansuota arba generuojamos harmonikos nėra sveiko skaičiaus kartotinės. [24]

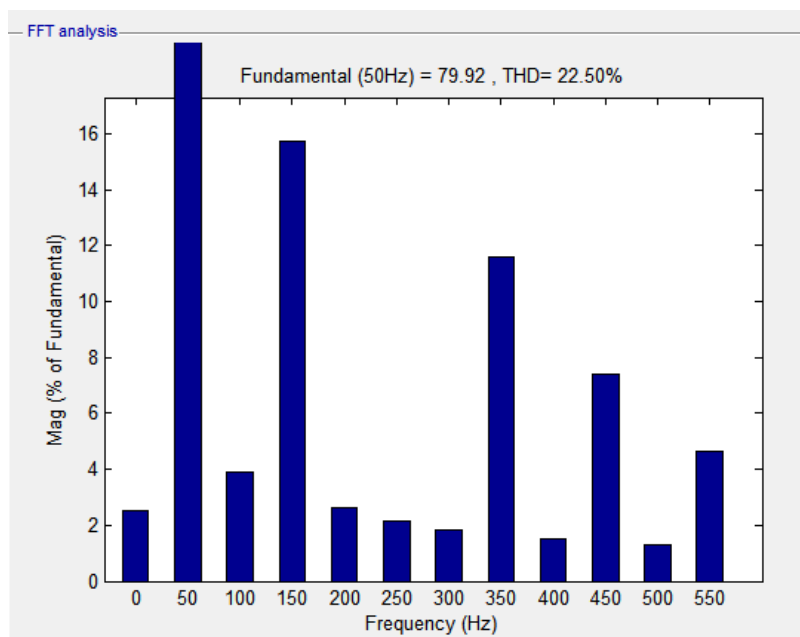
3.4.1. Vienfazis tinklo grandies modelis

MatLAB Simulink programa sumodeluota pramonės įmonės elektros tinklo dalis, vaizduojanti šyną, prie kurios prijungta metalo halogenų šviestuvų sistema. Ši tinklo dalis pavaizduota 3.8 paveiksle.



3.8 pav. Metalo halogenų lempų skleidžiamų harmonikų Simulink modelis

Srovės signalui išanalizuoti, MatLAB Simulink aplinkoje atlikta signalo Furjė transformacija, kurios pagalba vizualizuotas aukštesniųjų harmoninių srovių spektras, pateiktas 3.9 paveiksle.

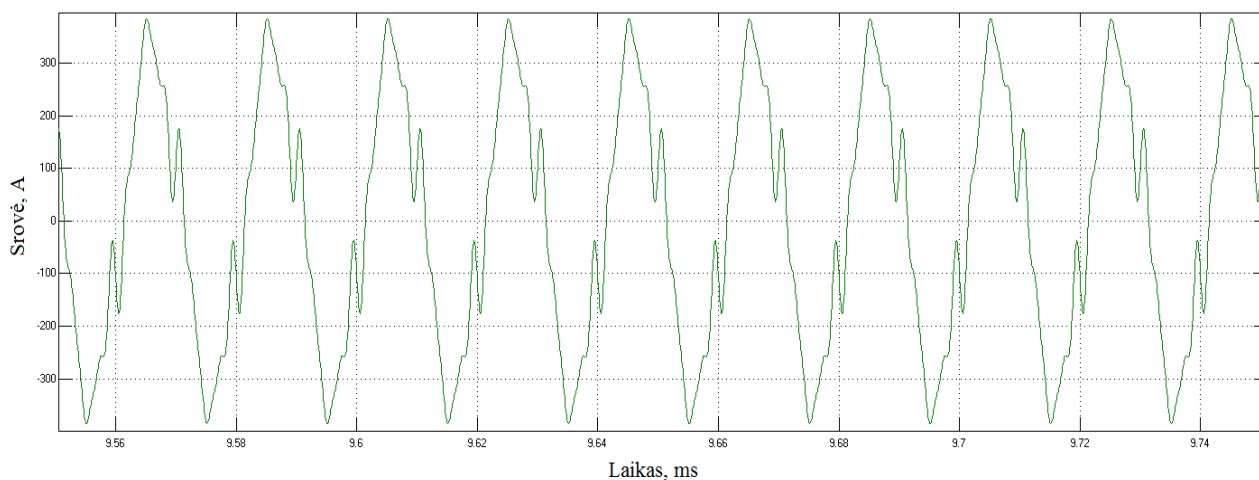


3.9 pav. Aukštesniųjų srovės harmonikų spektras.

Išanalizavus aukštesniasias srovės harmonikas, MatLAB Simulink programa apskaičiuotas srovės NIF:

$$NIF_1 = 22,50 \%;$$

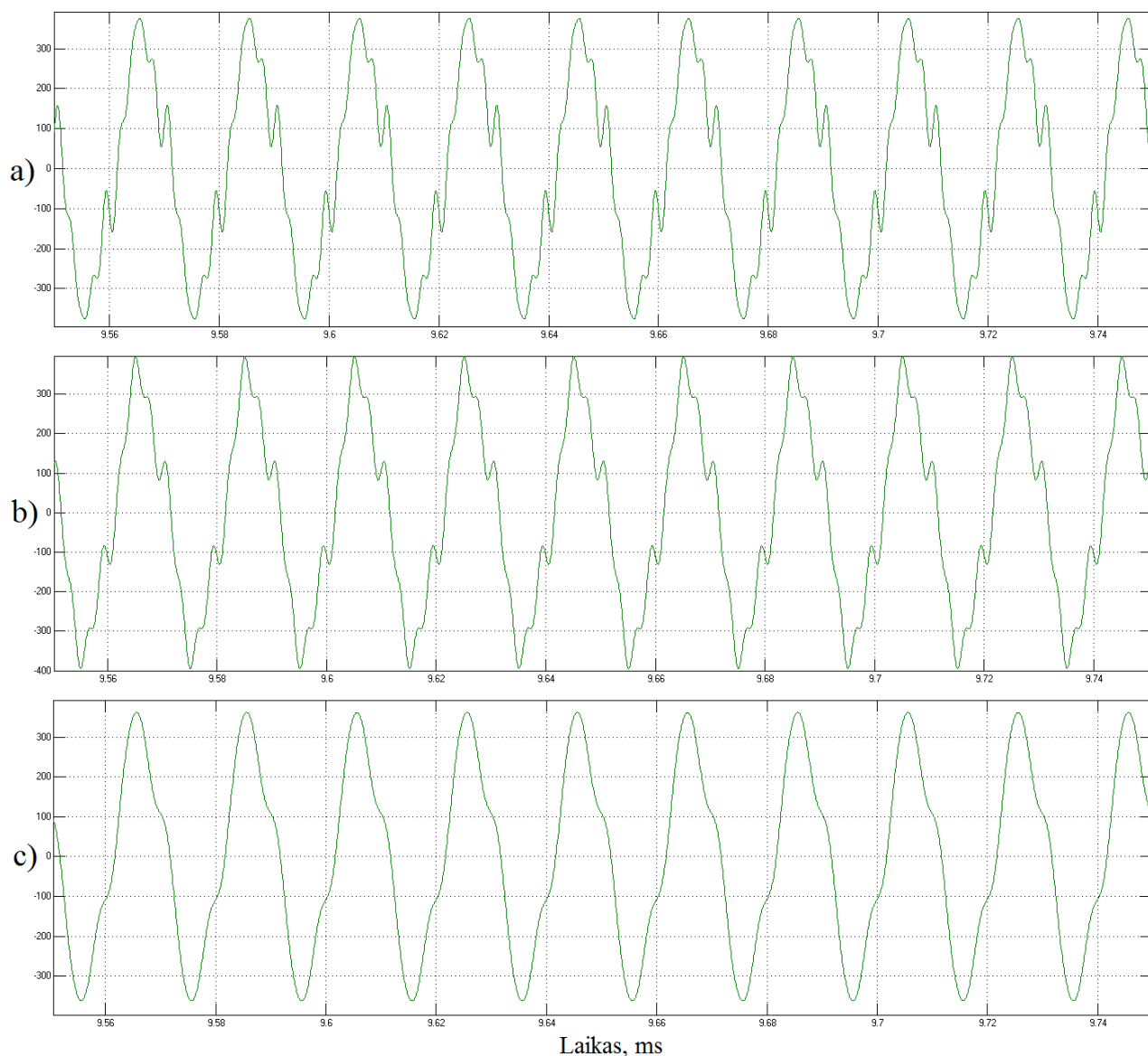
Kaip minėta anksčiau, promonės įmonėje, ties apšvietimo šyna atlikus matavimus, nustatyta, jog tinklą teršia 3, 5, 7, 9 bei 11 harmonikų srovės. Siekiant realiai atvaizduoti tinklą, šios srovės MatLAB Simulink programoje buvo modeliuojamos kaip srovės šaltiniai generuojantys nustatytos amplitudės ir dažnio sroves.



3.10 pav. Sumodeliuota iškraipyta srovės sinusoidė

3.10 paveiksle pateiktame grafike atvaizduota modeliavimo būdu gauta iškraipyta srovės sinusoidė. Didžiausią nerimą kelia puikiai matomi pikai, pastebimi srovės kreivės minimume ir maksimume, bei ties sinusoidės viduriu, kur ji ir yra labiausiai iškraipoma.

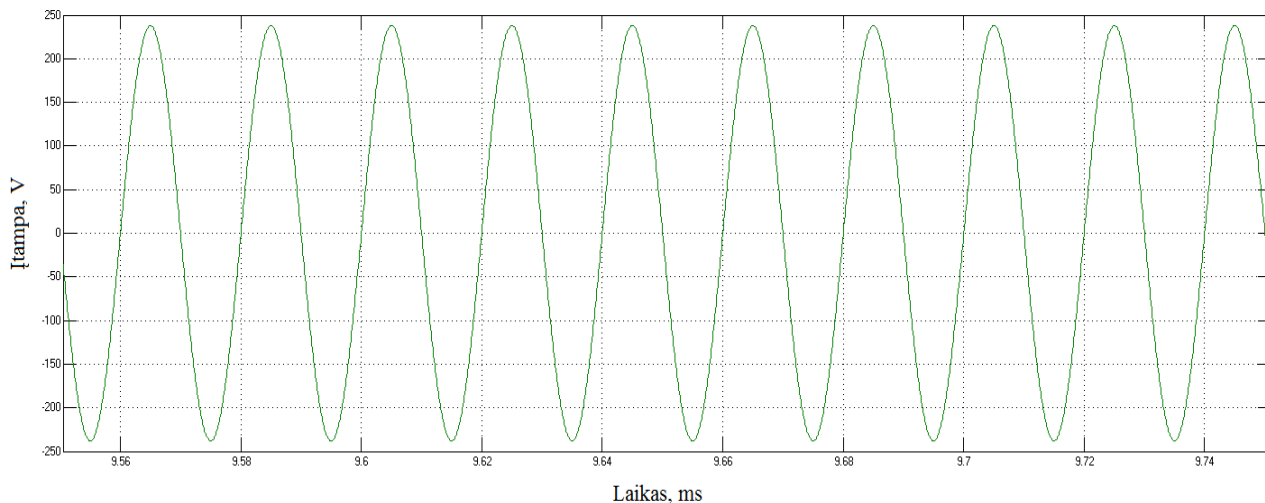
Siekiant įsitikinti, kurios harmoninės srovės daro didžiausią įtaką sinusoidės iškraipymui, tinklas buvo modeliuojamas kompensuojant tam tikros eilės harmonines sroves. 3.11 paveiksle pateiktuose grafikuose pavaizduotos srovės sinusoidės su kompensuotomis 7, 9 ir 11 harmonikomis.



3.11 pav. Srovės sinusoidė, kompensuojant: a) 11 eilės harmonikas; b) 11 ir 9 eilės harmonikas; c) 11, 9 ir 7 eilės harmonikas.

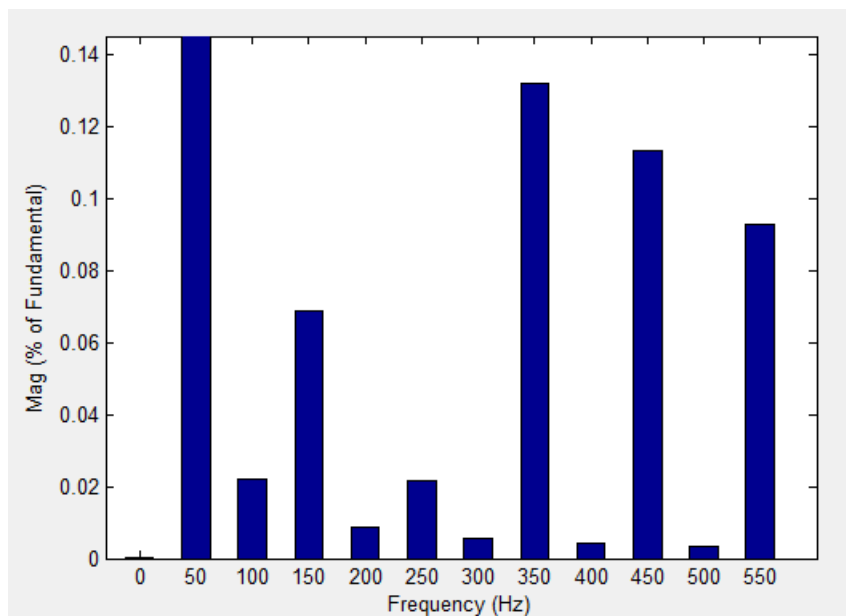
Atlikus matavimus, bandymų būdu nustatyta, jog labiausiai srovės sinusoidę paveikia 7, 9 ir 11 harmonikos, 3-sios ir 5-sios harmonikų srovės pastebimai srovės neiškraipo. Dėl šios priežasties siekiant išvengti nuostolių pakanka kompensuoti 7, 9 ir 11 eilių harmonines sroves.

Siekiant nustatyti įtampos iškraipymus, kuriuos sukelia aukštesniosios srovės harmonikos, sistemos modelyje buvo išmatuota įtampa. Matavimų rezultatai grafiškai pateikiami 3.12 paveiksle.



3.12 pav. Sumodeliuota įtampos sinusoidė.

Iš 3.12 paveikslo matyti, jog įtampos sinusoidė neturi ryškių iškraipymų. Norint tuo įsitikinti, buvo pasinaudota MatLAB Simulink įrankiu *powergui*, kuriuo buvo atlikta signalo Furjė transformacija. Tokiu būdu sudarytas aukštesniųjų įtampos harmonikų spektras, pateiktas 3.13 paveiksle.



3.13 pav. Įtampos harmonikų spektras

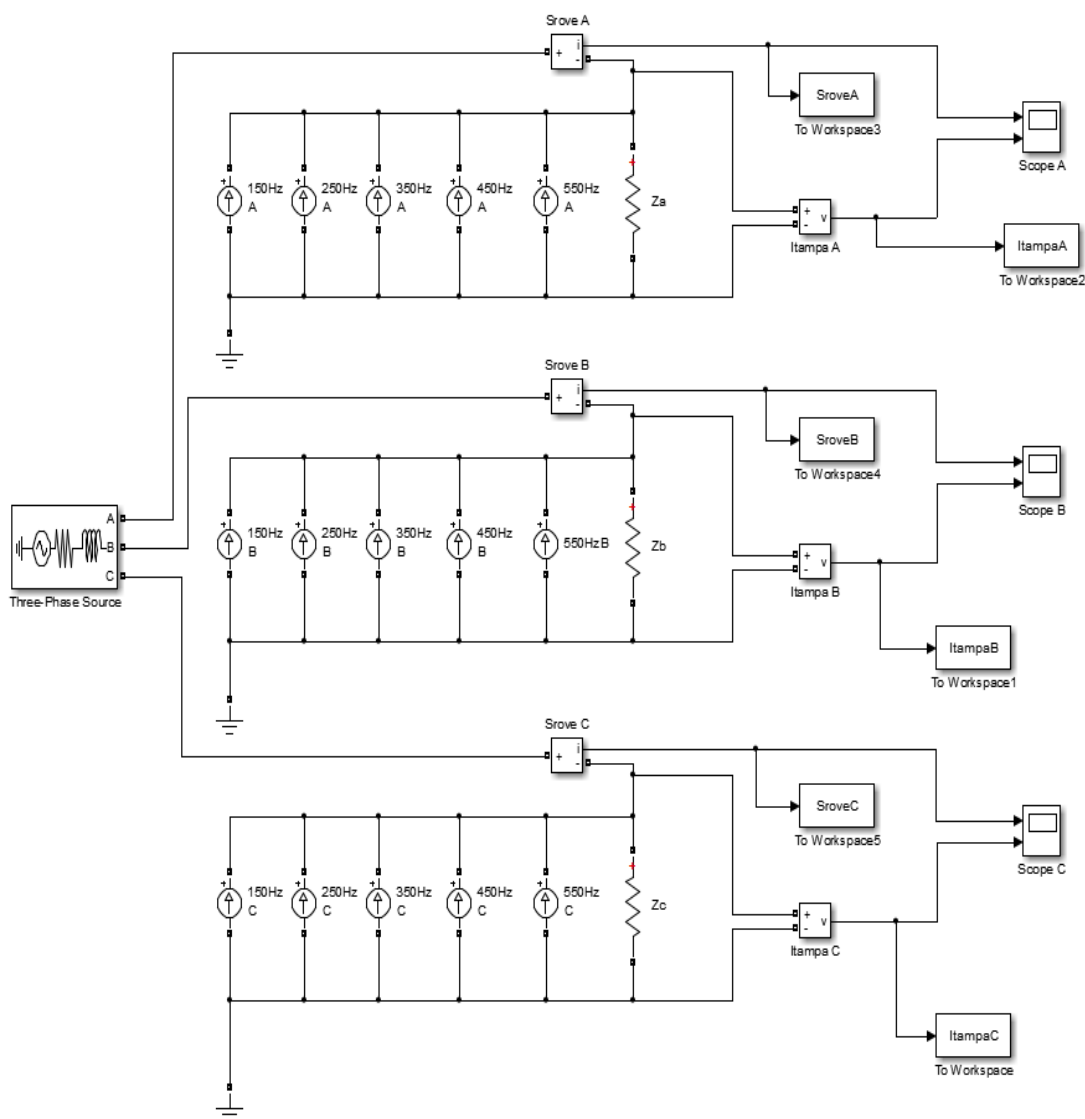
MatLAB Simulink aplinkoje sugeneruotas aukštesniųjų įtampos harmonikų spektras ir apskaičiuotas NIF_U :

$$NIF_U = 0,23 \%;$$

Įtampos netiesinių iškraipymų faktorius yra itin mažas (leistina riba $\pm 8\%$), todėl galima daryti išvadą, kad metalo halogenų apšvietimo sistemos į tinklą generuojamos srovės įtampai įtakos nedaro ir jos sinusoidės neiškraipo.

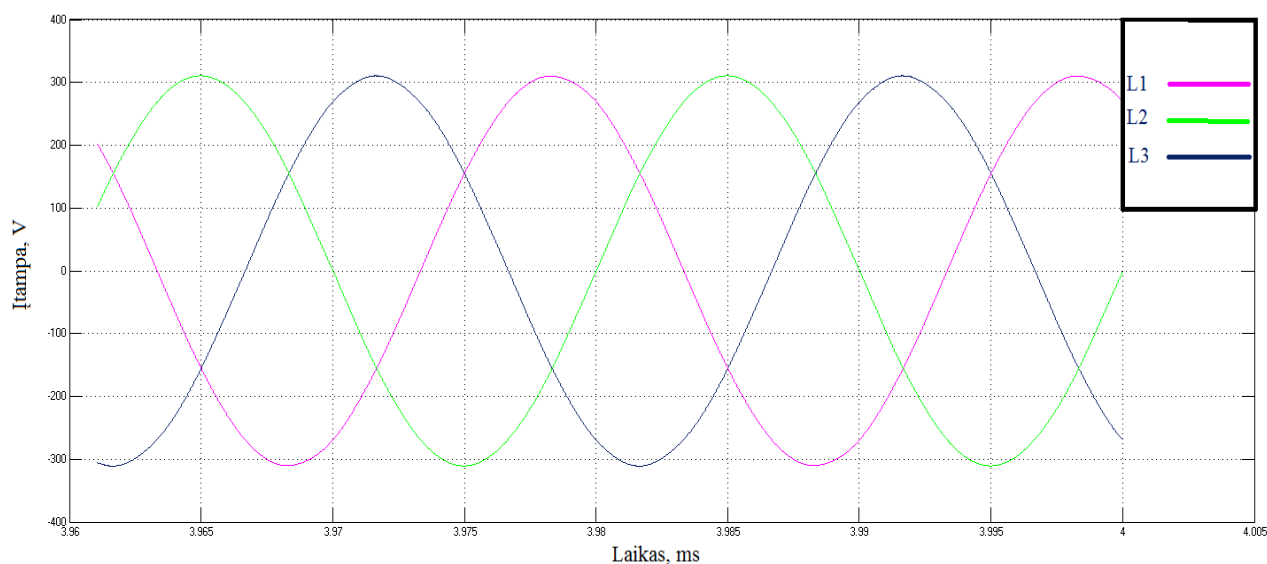
3.4.2. Trifazis tinklo grandies modelis

Siekiant nustatyti tinklo asimetriją, sumodeliuota trifazio tinklo šaka su prie jos prijungta apšvietimo sistema, pateikta 3.14 paveiksle. Šis modelis buvo sudaromas analogiškai aukščiau pateiktam vienfaziam modeliui. Apkrovos Z_a , Z_b ir Z_c sumodeliuotos naudojantis turimais duomenimis apie šviestuvų paskirstymą fazėse (kaip minėta anksčiau, šviestuvai fazėms paskirstyti netolygiai, todėl skiriasi ir jų galingumai).



3.14 pav. Trifazis įmonės apšvietimo sistemos MatLAB Simulink modelis.

MatLAB Simulink programoje buvo atlikti matavimai, siekiant nustatyti tinklo įtampos asimetriją. Rezultatai pateikti 3.15 paveiksle.



3.15 pav. L1, L2 ir L3 fazių įtampų kreivės

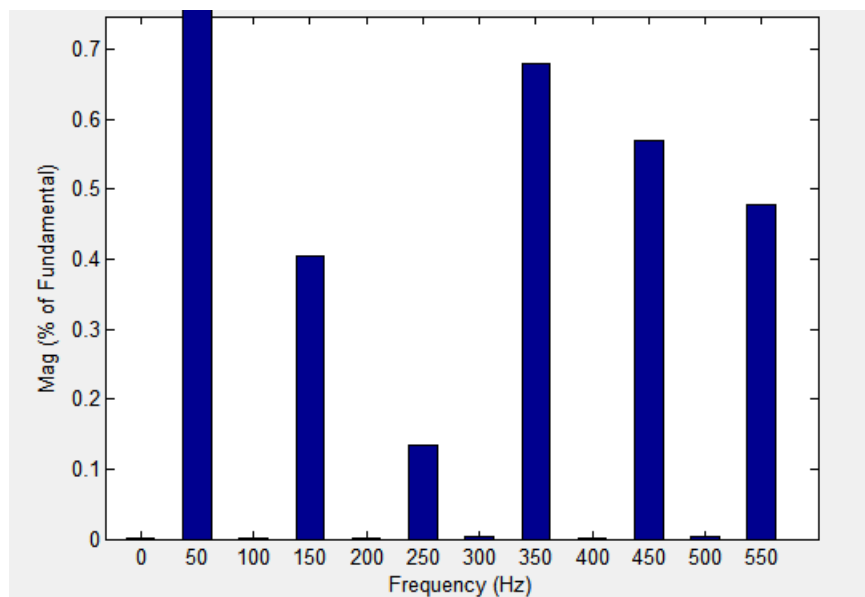
Išanalizavus 3.15 paveikslą, nustatyta, jog tinkle nevyrauja ryški įtampos asimetrija. Nors šviestuvai, kaip minėta, fazėms paskirstyti atitinkamai po 25%, 41% ir 33%, tai nesukelia nepageidaujamos įtampos asimetrijos ir pernelyg didelės įtakos tinklui nedaro. Tam didelės įtakos turi tai, kad pramonės įmonės tinklas, lyginant su apšvietimo sistemos apkrova, yra ganėtinai galingas.

3.4.3. Įmonės plėtros perspektyva

Ankstesniuose poskyriuose atliktais bandymais ir matavimais nustatyta, kad įmonės elektros kokybiniai parametrai yra geri, atitinkantys reglamentuotas normas. Nepastebėta nepageidaujamų įtampos svyravimų, įtampos asimetrijos; aukštesniosios įtampos harmonikos taip pat atitiko standartuose nurodytus reikalavimus ($NIF_U > 8\%$).

Tiriamoji įmonė neslepia ambicingų plėtros planų, tad MatLAB Simulink modeliu siekiant įvertinti kokybinius elektros parametrus, patikrinti galimi plėtros scenarijai.

Trifazio modelio pagalba patikrinti tinklo parametrai vykdant galimą įmonės plėtrą. Natūralu, jog įmonei plečiantis atsirastų papildomų įrenginių, naujas patalpas taip pat reikėtų apšviesti. Kadangi nėra žinomos galimų naujų įrenginių charakteristikos ir darbo režimai, tačiau iš atliktų matavimų žinomi esamų šviestuvų parametrai (tai yra problematiška įmonės elektros sistemos dalis), buvo susitelkta ties papildomų šviestuvų prijungimu. Šioje vietoje daroma prielaida, jog įmonės plotas padidės dvigubai. Pagal naujų patalpų plotą modelyje buvo prijungta papildomai 100% šviestuvų, t.y., jų kiekis padvigubėjo. 3.16 paveiksle pateiktame grafike pavaizduotas įtampos harmonikų spektras tokio scenarijaus atveju.



3.16 pav. Įtampos harmonikų spektras, kai apšvietimo sistemos apkrova padidėja 100%

Sumodeliavus tokį pramonės įmonės elektros sistemos variantą, gauta ši NIF_U reikšmė:

$$NIF_U = 1,09 \%;$$

Gautoji NIF_U reikšmė neviršija reglamentuotos įtampos iškraipymų normos (>8%). Tai reiškia, kad vykdant įmonės plėtrą, galima nesibaiminant diegti jau esamą apšvietimo sprendimą – metalo halogenų šviestuvus. Jie pastebimos įtakos tinkle įtampai neturės ir elektros energijos kokybės parametrų negadins.

3.5. Mirgėjimas

Kaip minėta anksčiau, pramonės įmonės elektros energetinėje sistemoje didesnių elektros kokybės problemų nepastebėta. Tai įsitikinta atliktais matavimais bei MatLAB Simulink modeliu.

Plačiau nagrinėtoje įmonės apšvietimo sistemoje buvo įvardinta problema – šviesos mirgėjimas. Siekiant rasti šios problemos sprendimą buvo analizuojamos aukštesniosios įtampos ir srovės harmonikos. Gauti rezultatai pateikti 3.3.2. skyriuje. Tiesa, šviestuvų generuojamos harmoninės srovės pastebimos įtakos nedaro – dėl šių srovių atsirandantis įtampos iškraipymas siekia <1-2%. Tokie įtampos svyravimai yra leistini, ir šviesos mirgėjimo nesukelia. Tad kodėl, esant tvarkingiems tinklo kokybiniais parametrams, matomas šviesos mirgėjimo reiškinys?

Siekiant atsakyti į šį klausimą, du šviestuvai (to paties gamintojo, skirtingi modeliai), su skirtingomis 400W metalo halogenų lempomis, buvo prijungti prie atskiro tinklo. Atlikti jų aukštesniųjų harmoninių srovių matavimai pateikti 4 lentelėje. Lyginant išmatuotus rezultatus pastebėta, kad tipinės tiriamųjų lempų vyraujančios harmonikos yra ganėtinai panašios. Aukščiausia užfiksuotoji aukštesnioji harmonika – 150 Hz 18,7 %.

4 lentelė. MH lempų generuojamos harmoninės srovės.

Harmonikos Nr.	MH lempos Nr. 1 harmoninės srovės, %	Harmonikos Nr.	MH lempos Nr. 2 harmoninės srovės, %
1	97,7	1	96,6
3	14,5	3	18,7
5	2,6	5	3,9
7	10,2	7	13,7
9	8,1	9	7,1
11	5,7	11	6,1

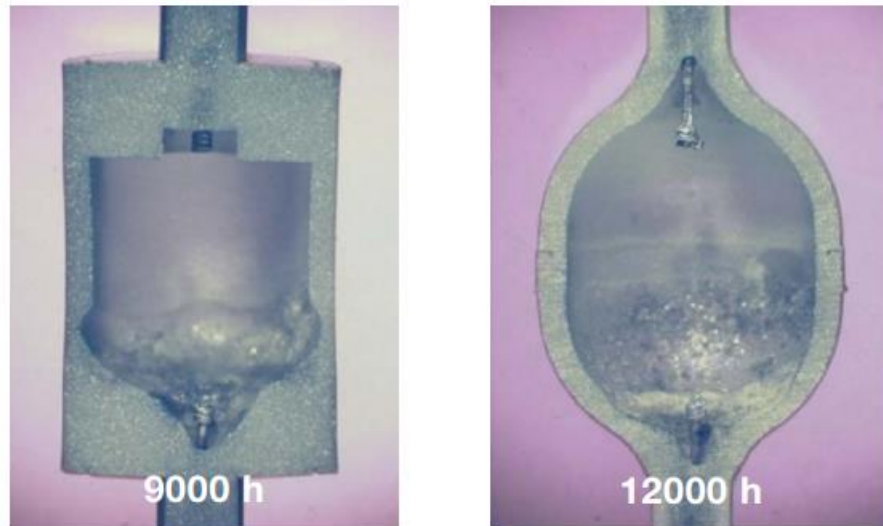
Tyrimo metu buvo atlikti ir aukštesniųjų įtampos harmonikų matavimai. Jie pateikti 5 lentelėje. Nei viena harmonika, pradedant 3-čiaja neviršija reglamentuotų 8%. Praktiškai visų harmoninių įtampų reikšmės neperkopia 1% reikšmės. To daugiau nei pakanka įsitikinti, jog aukštesniosios įtampos harmonikų reikšmės nesukelia šviesos mirgėjimo efekto.

5 lentelė. MH lempų įtampos harmonikos.

Harmonikos Nr.	MH lempos Nr. 1 įtampos harmonikos, %	Harmonikos Nr.	MH lempos Nr. 2 įtampos harmonikos, %
1	99,9	1	99,9
3	3,2	3	3,2
5	0,7	5	0,7
7	1,2	7	1,2
9	0,7	9	0,1
11	0,4	11	0,3

Išanalizavus rezultatus nustatyta, jog MH lempų mirgėjimo priežastis nėra priklausoma nuo lempos elektros energijos kokybinių parametrų. Dėl šios priežasties mėginama į šią problemą pažvelgti kitu kampu.

Didėjant MH lempos eksploatacinei trukmei (mažėjant resursui) lempos viduje esančiame ankščiau aptartame silicio vamzdelyje esančios metalo halogenidų dalelės pradeda nykti (išgaruoja). Šis dalelių nykimas vadinamas korozija. Tai nutinka dėl silicio vamzdelyje įvykstančio išlydžio, kurio metu generuojama šviesa. Silicio vamzdelio korozijos pavyzdys pateiktas 3.17 paveiksle.



3.17 pav. MH lempos silicio vamzdelio korozijos efektas mažėjant lempos resursui [16]

Esant normalioms darbo sąlygoms, gamintojų numatytas MH lempų resursas vyrauja tarp 2000 – 10000 valandų. Tiesa, įmonėje pastebimi mirgėjimai įvykdavo net su naujomis lempomis. Dėl šios priežasties MH lempos silicio vamzdelyje atsirandantys išlydžiai, kaip šviesos mirgėjimų priežastis, atmetami.

Nei aukštesniosios harmonikos, nei MH lempos resurso mažėjimas nebuvo nustatyti kaip šviesos mirgėjimus sukiantys reiškiniai. Tirtos MH lempos buvo arba visiškai naujos, arba veikusios iki 100 valandų. Dėl šios priežasties šviesos mirgėjimų priežastimi laikomas gamyklis brokas, įvykęs gaminant lempas.

4. IŠVADOS

1. Atlikus literatūros apžvalgą nustatyta, kad elektros energijos kokybės tyrimai yra aktualūs dėl vis plačiau pramonės įmonėse naudojamų netiesinių apkrovų (kompiuterių sistemos, lygintuviniai keitikliai, liuminescencinės lempos). Šie įrenginiai pagrindinio dažnio elektros energiją naudoja ne tik naudingam darbui ir nuostolių padengimui. Būtent šios netiesinės apkrovos sukelia vieną iš darbų aprašytų elektros energijos kokybės parametrų – aukštesniąsias harmonikas, kurios iškraipo įtampos ir srovės kreives. Aukštesniųjų harmonikų įtaka įvertinama dviem parametrais NIF_1 ir NIF_U , aprašančiais srovės ir įtampos iškreipymų lygį. Nustatyta, jog aukštesniosios harmonikos gali sukelti neigiamus padarinius: įtampos kryčius, trūkius, vibraciją elektros mašinų sistemose, šviesos mirgėjimą.
2. Įmonei elektros energija tiekama dviem 10/0,4 kV lygiagrečiai sujungtais transformatoriais, todėl matavimams pasirinkti 4 taškai: 0,4 kV pusėje ties įvadais, lygintuviniu keitikliu valdomomis staklėmis ir ties apšvietimo sistemos įvadu. Nustatyta įtampos asimetrija įvaduose neviršija reglamentuotų ribų ($\pm 2\%$), nors apkrovos fazėse ir nėra paskirstytos visiškai tolygiai. Taip pat nei viename matavimų taškų nebuvo užfiksuotas NIF_U viršijantis nustatytą 8% ribą (maksimalus NIF_U , užfiksuotas apšvietimo sistemos L3 fazėje, siekė 2,7%) Analizuotoje literatūroje pastebėta, kad neretai tiriamuose objektuose srovės NIF siekia ir 50 – 60 %. Šiame tyrime, nepaisant įmonėje esančių daugelio netiesinių apkrovų (MH apšvietimas, lygintuviniai keitikliai), maksimalus NIF_1 buvo 19,1%. Šis faktas, kaip ir užfiksuotos žemos įtampos harmonikos, padeda įsitikinti, kad tiriamosios pramonės įmonės elektros energija yra kokybiška ir atitinka standartus.
3. Siekiant išspręsti įmonės šviesos mirgėjimo problemą ir atlikus matavimus, nustatyta, jog apšvietimo sistemoje charakteringos yra 3, 5, 7, 9 bei 11 harmonikos. MatLAB Simulink programoje sukurtu modeliu atlikus signalo Furjė transformaciją nustatyta, kad didžiausią įtaką srovės kreivei daro 7, 9 ir 11 harmonikos. Šias harmonines sroves galima pašalinti diegiant aktyvius harmonikų filtrus. Aprašytosios harmonikos įtampos kreivę iškraipo minimaliai – kaip minėta, maksimalus užfiksuotas NIF_U siekė 2,7%.
4. Dėl mažo įtampos netiesinių iškreipymų faktoriaus (NIF_U) daroma išvada, kad aukštesniosios harmonikos apšvietimo sistemoje šviesos mirgėjimui įtakos neturi. Išanalizavus MH švietuvus ir jų lempų veikimo principą nustatyta, kad šviesos mirgėjimas gali atsirasti mažėjant lempos resursui, kai silicio vamzdelyje išdega metalų halidai. Tokiu atveju lankinis išlydis, įvykstantis tarp dviejų elektrodų, esančių minėtame

silicio vamzdelyje, pradeda slopti, dėl ko regimas šviesos mirgėjimas. Šis reiškinys gali pasireikšti lempą eksploatuojant 7 – 9 tūkst. valandų. Tyrime analizuotos mirgančios MH lempos buvo naujos arba veikusios iki 100 valandų, todėl šviesos mirgėjimo priežastimi laikomas gamyklinis brokas.

Literatūros sąrašas

1. Baghini, A. *Handbook of power quality*. Chichester: Wiley, 2008. 618 p.
2. Fuchs, E. F. *Power Quality in Electrical Machines and Power Systems*. 635 p.
3. Grigsby, L. L. *Electric power generation, transmission, and distribution*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. 500 p.
4. Nevardauskas, E. V. *Mažų generuojančių šaltinių įtaka sistemos patikimumui ir valdymui: ataskaita*. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2005. 86 p.
5. Svinkūnas, G.; Navickas, A. *Elektros energetikos pagrindai: mokomoji knyga*. Kaunas: Technologija, 2013. 228 p.
6. Norminiai teisės aktais nustatytų energijos kokybės reikalavimų laikymosi kontrolės metodiniai nurodymai [interaktyvus] [žiūrėta 2015-11-22] Prieiga per internetą: <http://www.vei.lt/index.php?id=582>
7. El Mofty, A.; Youssef K. *Industrial Power Quality Problems*, Alexandria Electricity Company, Alexandria – Egypt, CIRED2001, 18-21 June 2001, Conference Publication No. 482 IEE 2001, 7 p.
8. Torres A.; Rueda M. T.; Reyes D. *Bayesian Networks for Power Quality Analysis in the Industrial Sector*, 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, KTH, Stockholm, Sweden – June 11-15, 2006, 6 p.
9. Dumitrescu, M. *Analysis and Software Computation to Increase the power Quality in an Industrial Electrical Network*, Electrical Engineering Department, Galati University Romania, 4 p.
10. Įtampos svyravimo priežastys ir tipai [žiūrėta 2016-02-23] Prieiga per internetą: http://www.eso.lt/lt/verslui/elektra_99/vartoju-elektra/ka-daryti-dingus-elektrai-ar-pastebejus-itampos-svyravima/itampos-svyravimai/itampos-svyravimo-priezastys-ir-tipai.html
11. Aranz, S. R.; Romero-Cadaval, E.; Romera, E. G.; Montero, M. I. M. *Study of Spread of Harmonics in an Electric Grid*, Badajoz, Spain, Power Electrical and Electronic Systems, University of Extremadura, 6 p.
12. Harmonics and IEEE 519 [žiūrėta 2016-04-16] Prieiga per internetą (<http://www.researchgate.com>): <https://goo.gl/ipPMF0>
13. LST EN 50160 standartas [žiūrėta 2016-03-20] Prieiga per internetą: <http://www.lsd.lt/standards/catalog.php?ics=0&pid=628998>
14. Klempka, R.; Hanzelka, Z.; Varetsky *Bank Harmonic Filters Operation in Power Supply System – Cases Studies. Chapter 8*. <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/44197.pdf>

15. Metal Halide Lamps. Use and application. [žiūrėta 2016-04-11] Prieiga per internetą:
<https://www.osram.com/media/resource/HIRES/339014/3238365/metal-halide-lamps.pdf>
16. Mirgėjimo faktorius [žiūrėta 2016-04-18] Prieiga per internetą:
http://www.davidsatz.com/aboutflicker_en.html
17. Pramoninis apšvietimas [Žiūrėta 2016-03-09] Prieiga per internetą:
<http://lt.lt.allconstructions.com/portal/categories/14/1/0/1/article/16706/pramoninis-apsvietimas-kaip-issirinkti-tinkama>
18. Flesch, P. *Light and light sources: high-intensity discharge lamps*. Springer, 2006
 ISBN 3-540-32684-7, 45–46 p.
19. Ranade, S. J.; Xu, W. *An Overview of Harmonics Modeling and Simulation*, Chapter 1, University of Alberta, Edmonton, Canada, 7 p. [Žiūrėta 2016-03-22] Prieiga per internetą: http://calvin.edu/~pribeiro/IEEE/ieee_cd/chapters/pdffiles/c1pdf.pdf
20. Power Quality Basics: Voltage Fluctuation and Flicker [žiūrėta 2016-04-28] Prieiga per internetą: <http://www.powerqualityworld.com/2011/09/voltage-fluctuations-flicker.html>
21. Masiokas, S. *Elektrotechnika*, Kaunas, „Candela“, 1994, 405 p.
22. Aukštesniųjų harmonikų filtravimas [žiūrėta 2016-04-21] Prieiga per internetą:
http://www.electrical-installation.org/enwiki/Harmonic_filtering
23. Analizatorius Janitza UMG 604 [žiūrėta 2016-04-22] Prieiga per internetą:
<http://www.janitza.com/umg-604-en.html>
24. ELSPEC, *General Overview of Harmonics in Power Networks*, Caesarea Industrial Park, Israel, 8 p.
25. Pillay, P.; Manyage, M. *Definitions of Voltage Unbalance*, Clarkson university, potsdam NY, 2 p. [žiūrėta 2016-05-03] Prieiga per internetą:
<http://users.encs.concordia.ca/~pillay/16.pdf>