

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Žilvinas Kripaitis

Elektros kokybės gerinimo priemonių tyrimas

Baigiamasis magistrinis darbas

Šiauliai, 2012

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Elektros kokybės gerinimo priemonių tyrimas

Baigiamasis magistrinis darbas

Autorius – Žilvinas Kripaitis (EM-10 gr.)

Vadovas – dr. E. V. Nevardauskas

Recenzentas – doc. dr. L. Buivis

Katedros vedėjas – doc dr. G. Valiulis

Šiauliai, 2012

Žilvinas Kripaitis, Elektros kokybės gerinimo priemonių tyrimas. Magistrinio darbo elektros energetikos inžinerijos/ mokslinių tyrimų patarėjas doc. dr. E. V. Nevardauskas; Šiaulių Universitetas, Technologijos fakultetas, Elektros inžinerijos katedra. - Šiauliai, 2012.

SANTRAUKA

Darbe analizuojama elektros kokybės gerinimo problema, kuri laikui bėgant tampa vis aktualesnė, dėl didėjančių netiesinės apkrovos imtuvų žemos įtampos tinkluose, kurie didina užterštumą aukštesniosiomis harmonikomis. Darbo tikslas ištirti įvairios paskirties objektų elektros tinklo harmonikų kiekį ir pateikti galimas objektų gerinimo priemones bei jų panaudojimo galimybes. Tyrimas buvo atliekamas remiantis prietaiso C.A. 8335 matavimų duomenimis, surinktais iš 22 objektų, kurie suskirstyti į šešias grupes. Darbo rezultate pateikiami objekto, kuriame buvo užfiksuotas vienas iš didžiausių harmonikų lygių, aukštesniųjų harmonikų filtravimo įrenginio parinkimas. Pagal atliktus skaičiavimus, šis harmonikų filtravimo įrenginys, žymiai sumažina harmonikų kiekį elektros tinkle. Atliktas tyrimas įrodo, kad kiekvieno objekto matavimo rezultatai skirtingi ir paskaičiuotas įrenginys, nebus efektyviai išnaudojamas kitame analogišrame objekte.

Reikšminiai žodžiai: gerinimo priemonės, elektros kokybės parametrai, harmonikos, filtravimo įrenginys, įtampos asimetrija.

Žilvinas Kripaitis, Investigation of Electrical Quality Amendment Devices. Masters tiesis of elektrical energy engineer/research advisor Assoc. dr. E. V. Nevardauskas; Šiauliai University, Technological Faculty, Electrical Engineering Department.-Šiauliai, 2012.

SUMMARY

The Master's final paper analyzes the power quality problem which in time becomes more acute due to the increase in nonlinear load receivers in low-voltage networks which increases the pollution of the higher harmonics. The aim of this work is to study mains harmonic content of various objects and to supply the possible measures to improve the facilities and their utilization. The investigation was carried out in accordance with the device C.A. 8335 measurement data collected from 22 sites, which are divided into six groups. The result of this work presented object, which was recorded in one of the largest harmonic levels, the higher harmonics filtering device selection. According to the calculations, the harmonic filter device significantly reduces the harmonic content of electricity network. An investigation proves that the measurement of each object and calculated results of different equipment, will not be effectively utilized in another equivalent object.

Keywords: improvement measures, power quality parametrs, harmonics, filtering device, the voltage asymmetry.

TURINYS

SANTRAUKA	2
SUMMARY	3
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	5
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	6
ĮVADAS.....	7
1. BENDRIEJI ELEKTROS TINKLO REIKALAVIMAI	8
1.1 Pagrindinės įtampų charakteristikų vertės	8
1.2 Staigieji įtampos pokyčiai	9
2. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ ANALIZĖ	13
2.1 Tiekiamos įtampos nesinusiškumas	13
2.2. Įtampos dedamųjų filtracija pagal nulinę ir atvirkštinę sekas	18
2.3 Įtampos ir srovės aukštesniųjų harmonikų sukeliama efektai	23
2.4 Harmonikų, kartotinių trimų, efektai	24
2.5 Rezonansiniai aukštesniųjų harmonikų reiškiniai	25
2.6 Harmoniniai filtrai	27
2.7 Harmonių filtrų įrengimas	33
2.8 Filtrų parinkimas ir rekomendacijos.....	35
2.9 Aukštesniųjų harmonikų filtrų skaičiavimas	36
3. TYRIMŲ TIKSLAS IR UŽDAVINIAI	41
4. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APIBENDRINIMAS.....	45
IŠVADOS.....	60
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	61

LENTELIŲ SĄRAŠAS

Lentelė 1. Iki 25 eilės harmoninių įtampų vertės tiekimo taškuose Un procentais	12
Lentelė 2. Filtrų parinkimas pagal panaudojimo sritį [9].	35
Lentelė 3. Atliktų matavimų įvairiuose objektuose suvestinė	45
Lentelė 4. Įrangos kiekis administraciniame pastate	47
Lentelė 5. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose pramonės įmonėse	51
Lentelė 6. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose administracijos pastatuose	52
Lentelė 7. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose mokymo įstaigose	52
Lentelė 8. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose gydymo įstaigose..	52
Lentelė 9. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose laisvalaikio ir pramogų centruose.....	52
Lentelė 10. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose kavinėse	53
Lentelė 11. Kondensatorių baterijos skaičiavimas filtrams.....	53
Lentelė 12. Filtrų reaktorių skaičiavimų rezultatai.....	53
Lentelė 13. Rekomenduojami filtrai tirtiems objektams	59

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Žemosios įtampos skirstomų tinklų perduodamų signalizavimo dažnių įtampų lygiai U_n	12
2 pav. Įtampos kreivės nesinusiskumas	14
3 pav. Kai kurių imtuvų srovės formos, harmonikų spektrai ir THDi.....	15
4 pav. Laikinas įtampos padidėjimas.....	17
5 pav. Asimetrinių įtampų vaizdavimas simetrinėmis dedamosiomis [12].....	19
6 pav. Neutralės formavimo procesas esant netiesinei apkrovai	24
7 pav. Rezonanso grafinė sąlyga	26
8 pav.. Pasyvaus filtro veikimo principas.....	28
9 pav. Kelių harmonikų pasyvaus filtro veikimo principas.....	28
10 pav. Aktyvaus filtro veikimo principas[18].....	29
11 pav. Aktyvaus filtro panaudojimo pavyzdys	30
12 pav. Hibridinio filtro veikimo principas	31
13 pav. Hibridinio filtro panaudojimo efektyvumas pagal [18]: a) įtampas; b) sroves.....	31
14 pav. Nuoseklaus filtro veikimo principas	32
15 pav. Lygiagretaus filtro veikimo principas.....	32
16 pav. Kompensavimo-filtravimo įrengimo būdai	33
17 pav. Elektros tinklo energijos kokybės analizatoriaus C.A.8335 komplektacija	43
18 pav. Prietaiso prijungimas prie penkialaidės tinklo sistemos	43
19 pav. Srovės replės AmpFLEX™ A193 ir MN 93A	44
20 pav. Bendras srovės harmonikų lygis THD (%) objekte	46
21 pav. Trečiosios harmonikos reikšmės (%).....	47
22 pav. Mirgėjimo aštrumas (%)	48
23 pav. Aukštesniųjų harmonikų sukelti srovės formos iškraipymai.....	49
24 pav. Harmonikų lygiai įtakoje srovės formą	49
25 pav. Aukštesniųjų harmonikų sukelti srovės formos iškraipymai.....	50
26 pav. Harmonikų lygiai įtakoje srovės formą 23 pav.....	50
27 pav. Atvirkštinės sekos srovių harmonikos	51
28 pav. Įėjimo įtampos A fazės kreivė prieš filtraciją.....	54
29 pav. Įėjimo įtampos A fazės kreivė po filtracijos.....	55
30 pav. Įėjimo įtampos A fazės THD prieš filtraciją.....	55
31 pav. Įėjimo įtampos A fazės THD po filtracijos.....	56
32 pav. Įėjimo srovės A fazės kreivė prieš filtraciją	57
33 pav. Įėjimo srovės A fazės kreivė po filtracijos	57
34 pav. Įėjimo srovės A fazės THD prieš filtraciją.....	58
35 pav. Įėjimo srovės A fazės THD po filtracijos	58

ĮVADAS

Nuolatos didėjant elektros energijos kainai, vartotojai priversti susimąstyti apie energijos taupymą bei efektyvias elektros įrenginių panaudojimo galimybes ir optimalų elektros tinklų išnaudojimą. Siekiant išvengti vartotojų nepasitenkinimo, elektros tinklai turi didesnę dėmesį skirti elektros sistemos kokybės gerinimui, tobulinant esamus skaičiavimų ir matavimų metodus bei jų pritaikymą. Elektros energija, kuri kaip prekė tiekama elektros vartotojams, turi būti kokybiška, atitinkanti elektros kokybės standartus. Kokybišką elektros tiekimą privalo užtikrinti Valstybinės energetikos inspekcijos prie Ūkio ministerijos (toliau - VEI) pareigūnai, remiantis Lietuvos Respublikos Energetikos įstatymo Nr.IX-884 18 straipsnio 4 dalies 6 punktu ir VEI nuostatų 7.7 punktu.

Elektros kokybė įvertinama atsižvelgiant į trumpalaikius įtampos kryčius, viršįtampius, įtampos ir srovės harmonikas, mirgėjimo aštrumą ir kitus faktorius. Visi šie parametrai negali viršyti nustatytų normų. Nekokybiška elektros energija skirtingai įtakoja elektros energijos vartotojus. Didžiausią įtaką elektros kokybės suprastėjimas turi vartotojams, turintiems skaitmenines ar elektronines sistemas, kurioms sutrinka normalus įrenginių darbas.

Tobulėjant naujoms technologijoms, didėja ir elektros kokybės parametrams jautrių prietaisų kiekis. Skaitmenizuojant ir automatizuojant elektros tinklų sistemas bei jų valdymą, didėja ir jautrios elektronikos aparatūros kiekis, valdančios elektros sistemas, kurių sutrikimas gali palikti šimtus ar tūkstančius vartotojų be elektros energijos. Šiandien nei vienas žmogus neįsivaizduoja savo dienos be elektros, kuri tapo žmonijos pažangos vedliu. Sutrikus elektros tiekimui 21-ojo amžiaus žmogus būtų priverstas grįžti į 19-ąjį amžių ir naujosios technologijos liktų bevertės.

Šiame darbe pateikiami ir analizuojami tyrimo metu išmatuoti elektros kokybės parametrai, turintys didelę įtaką normaliam elektros tinklų darbui. Pateikiamas gerinimo priemonių parinkimo pavyzdys, tiriamos galimos objektų gerinimo priemonės bei jų panaudojimo galimybės.

1. BENDRIEJI ELEKTROS TINKLO REIKALAVIMAI

1.1 Pagrindinės įtampos charakteristikų vertės

2001m. vasario mėnesį patvirtintas standartas LST EN 50160 "Bendrujų skirstomųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos". Šis standartas yra lietuviškoji Europos elektrotechnikos standartizacijos komiteto parengto Europos standarto EN 500160:1999 *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems* (Bendrų skirstomųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos), kurį Lietuvos standartizacijos departamentas (LST TK 45 Elektros energetika) priėmė Lietuvos standartu, versija. Standartas šiuo metu yra pagrindinis dokumentas, kuris apibūdina pagrindines įtampos charakteristikas, kurių laikantis elektros energiją galima vadinti kokybiška. Visas LST EN 50160 standartas [1] aprašo žemosios ir vidutinės tiekiamosios įtampos charakteristikas. Matavimai buvo atliekami tik žemojoje įtampos pusėje, todėl aptariamos tik žemosios tiekiamosios įtampos charakteristikų leidžiamos vertės. Standartas nustato ir apibūdina šias tiekiamosios įtampos charakteristikas: dažnį, dydį, kreivės formą, trifazės įtampos asimetriją.

Tinklo dažnis

Įprastinėmis darbo sąlygomis vidutinis sistemos pagrindinės harmonikos dažnis per 10s turi būti sinchroniškai su jungtine sistema sujungtų sistemų:

50 Hz ± 1 % (t.y. 49,5 ... 50,5 Hz) 99,5 % per metus,

50Hz+4%/-6% (t.y. 47 ... 52 Hz) 100 % visą laiką;

Vardinis tiekiamosios įtampos dažnis turi būti 50 Hz. Normaliomis darbo sąlygomis vidutinis sistemos pagrindinės harmonikos dažnis per 10 s turi būti 50 Hz $\pm 1\%$ t. y. nuo 49,5 Hz iki 50,5 Hz ir toks dažnis turi būti 99,5 % per metus.

Tiekiamosios įtampos vertė

Standartinė vardinė žemoji įtampa U_n yra: keturlaidėje trijų fazių sistemoje: $U_n=230$ V tarp fazės ir neutralės, trilaidėje trijų fazių sistemoje: $U_n= 230$ V tarp fazių.

Tiekiamosios įtampos kitimas

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;
- Visi 10 min. trukmės intervalų tiekiamosios įtampos vidutinių kvadratinių verčių vidurkiai turi būti $U_n + 10$ % / -15 % srities ribose.

Kai elektra tiekama į tolimas vietas ilgomis linijomis, įtampa gali viršyti $U_n + 10\%$ / -15% srities ribas. Vartotojai apie tai turi būti informuoti. Po 2009 metų elektros tinklo įtampa didinama iki vardinės 230V reikšmės ir nustatomos leistinos nuo -10% iki $+10\%$ darbo įtampos ribos, tai yra nuo 207 V iki 253 V .

1.2 Staigieji įtampos pokyčiai

Staigiųjų įtampos pokyčių dydis

Staigiųjų tiekiamosios įtampos pokyčių įprastinė priežastis yra arba apkrovų pokyčiai vartotojų įrenginiuose arba tinklo perjungimai. Normaliomis veikimo sąlygomis staigieji įtampos pokyčiai paprastai neviršija $5\% U_n$, tačiau keletą kartų per dieną, tam tikrais atvejais gali viršyti $10\% U_n$. Įtampos pokytis, kai įtampa tampa mažesnė nei $90\% U_n$, vadinamas staigiuoju įtampos kryčiu.

Mirgėjimo aštrumas

Normaliomis veikimo sąlygomis 95% savaitės trukmės ilgalaikio mirgėjimo aštrumas, atsiradęs dėl įtampos svyravimų, turi būti $P_{lt} < 1$. Ilgalaikis aštrumas P_{lt} apskaičiuojamas imant 12 sekantių viena paskui kitą P_{st} verčių per dvejų valandų trukmės intervalą pagal tokią išraišką:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (1.1)$$

čia: P_{st} - trumpalaikis mirgėjimo aštrumas.

Reakcija į mirgėjimą yra subjektyvi ir skiriasi priklausomai nuo mirgėjimo atsiradimo priežasties bei trukmės. Kai kuriais atvejais, kai $P_{lt} = 1$, gali prasidėti akių dirginimas, tuo tarpu kitais atvejais, net jei P_{lt} didesnis, dirginimo nebūna.

Staigieji įtampos kryčiai

Staigiuosius įtampos kryčius paprastai sukelia pažaidos, atsirandančios vartotojo įrenginiuose arba bendrame skirstomajame tinkle. Kryčiai nenuspėjami, dažnai įvyksta staiga. Per metus kryčių pasikartojimo skaičius gali labai skirtis, tai priklauso nuo skirstomojo tinklo rūšies ir stebėjimo taško. Dar daugiau, jų pasiskirstymas per metus gali būti labai netolygus. Orientacinės vertės normaliomis veikimo sąlygomis tikėtinų įtampos kryčių skaičius per metus gali būti nuo kelių dešimčių iki vieno tūkstančio. Daugumos įtampos kryčių trukmė mažesnė nei 1s ir vertė mažesnė nei 60%. Tačiau

kartais gali atsirasti didesnių ir ilgesnių kryžių. Kai kuriose vietose, jungiant apkrovas, galimi dažni kryčiai nuo 10% iki 15% U_n .

Trumpieji tiekiamosios įtampos pertrūkiai

Orientacinės vertės normaliomis veikimo sąlygomis trumpųjų įtampos pertrūkių skaičius svyruoja nuo kelių dešimčių iki kelių šimtų per metus. Maždaug 70% trumpųjų pertrūkių trukmė gali būti mažesnė kaip viena sekundė. Kai kuriuose dokumentuose trumpaisiais vadinami mažiau nei vieną sekundę trunkantys įtampos pertrūkiai. Tačiau kartais, siekiant išvengti ilgųjų įtampos pertrūkių, taikomos valdymo schemas, kurių veikos trukmės viršija tris minutes.

Ilgieji tiekiamosios įtampos pertrūkiai

Avarinius pertrūkius paprastai sukelia išoriniai veiksniai arba įvykiai, kurių tiekėjas negali numatyti, todėl neįmanoma nustatyti tipinių metinio pasikartojimų skaičiaus ir trukmės verčių. Taip yra dėl įvairiose šalyse esančių skirtingų tinklų konfigūracijų bei struktūrų, dėl nenuspėjamų trečiųjų šalių ir oro sąlygų poveikių bei reiškinių. Orientacinės vertės normaliomis veikimo sąlygomis ilgesnių nei trys minutės įtampos pertrūkių skaičius gali būti iki 10 arba iki 50 per metus, priklausomai nuo regiono. Orientacinės vertės neapima planinių pertrūkių, kadangi apie juos pranešama iš anksto.

Laikinieji pramoninio dažnio viršįtampiai tarp laidininkų ir žemės

Laikinieji pramoninio dažnio viršįtampiai atsiranda dėl pažaidų bendruose skirstomuosiuose tinkluose arba vartotojo įrenginiuose ir išnyksta pašalinus pažaidą. Paprastai viršįtampis pasiekia linijinės įtampos vertę pasislinkus neutralės taškui trifazėje sistemoje. Orientacinės vertės tam tikromis aplinkybėmis dėl pažaidų transformatoriaus aukštosios įtampos pusėje susidaro laikinieji viršįtampiai žemosios įtampos pusėje ir tęsiasi tol, kol teka pažaidos srovė. Tokių viršįtampių vidutinė kvadratinė vertė paprastai neviršija 1,5 kV.

Pereinamieji viršįtampiai tarp laidininkų ir žemės

Pereinamųjų viršįtampių amplitudės smailė paprastai neviršija 6 kV, tačiau kartais gali būti ir didesnė. Impulso kilimo trukmė keičiasi plačiame intervale nuo milisekundžių iki mažiau nei vienos mikrosekundės. Pereinamojo viršįtampio energija priklauso nuo jo atsiradimo kilmės. Žaibo sukeltas viršįtampis paprastai būna didesnės amplitudės, bet mažesnės energijos nei komutacinis viršįtampis, nes jis paprastai trunka ilgiau. Vartotojo įrenginiuose apsaugos nuo viršįtampių priemonės turi būti parinktos taip, kad atitiktų didesnės energijos komutacinių viršįtampių reikalavimus. Jos turi tiktį ir žaibo, ir komutaciniams viršįtampiams.

Tiekiamosios įtampos asimetrija

Normaliomis veikimo sąlygomis kiekvienos savaitės visų 10 min. trukmės intervalų atvirkštinės fazių sekos sando vidutinių kvadratinių verčių 95% vidurkių turi būti nuo 0% iki 2% tiesioginės fazių sekos sando vertės srityje. Kai kuriose vietose, kur vartotojo įrenginiai yra iš dalies vienfaziai arba dvifaziai, trifazė įtampos asimetrija elektros tiekimo taškuose gali pasiekti apie 3%. Šiame standarte pateikiamos tik atvirkštinės sekos sando vertės, kadangi būtent šis sandas turi įtakos prijungtiems prie tinklo prietaisams.

Harmoninė įtampa

Normaliomis veikimo sąlygomis kiekvienos savaitės visų 10 min. trukmės intervalų kiekvienos harmonikos vidutinių kvadratinių verčių 95% vidurkių turi neviršyti 1 lentelėje nurodytų verčių. Rezonansas gali padidinti atskiras harmonines įtampas. Vis tik tiekiamosios įtampos netiesinis iškreipiu faktorius (NIF, angl. THD - total harmonic distortion) turi būti mažesnis arba lygus 8% (įskaitant visas harmonikas iki 40 eilės). Netiesinių iškreipiu faktorius NIF apskaičiuojamas pagal tokią išraišką:

$$NIF = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2} \quad (1.2)$$

h=2 čia: U_h - h-tosios eilės harmonikos įtampa.

Neharmoninė įtampa

Neharmoninių įtampų lygis auga naudojant dažnio keitiklius bei panašius valdymo įrenginius. Jų lygiai dar svarstomi, laukiant didesnės patirties. Tam tikrais atvejais neharmoninės įtampos, net jei jos yra žemo lygio, gali sukelti mirgėjimą arba sutrikdyti valdymo sistemas.

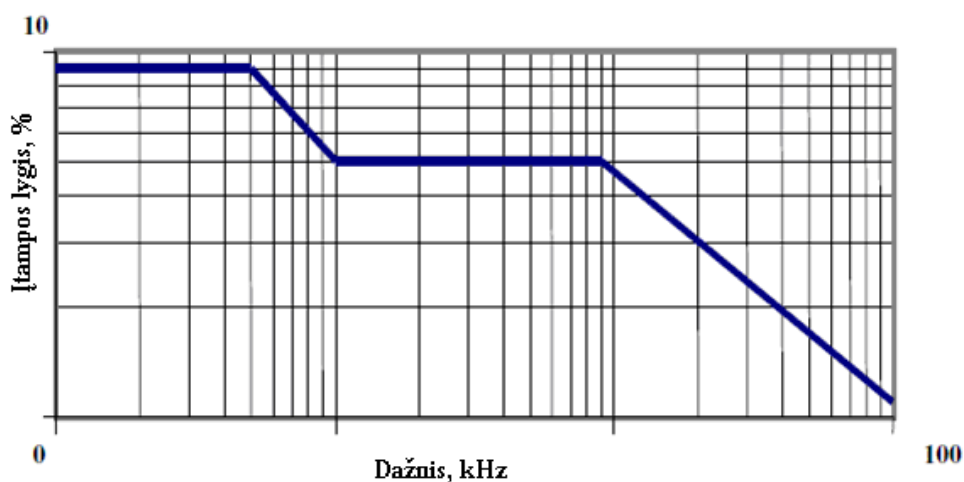
Lentelė 1. Iki 25 eilės harmoninių įtampų vertės tiekimo taškuose Un procentais

Nelyginės harmonikos				Lyginės harmonikos	
Nekartotinės trims		Kartotinės trims			
Eilė h	Santykinė įtampa, %	Eilė h	Santykinė įtampa, %	Eilė h	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				
23	1,5				
25	1,5				

PASTABA: Čia nepateikiamos aukštesnių nei 25 eilės harmoninių įtampų vertės, nes jos paprastai būna mažos ir dėl rezonanso reiškinio sunkiai skaičiuojamos.

Elektros tinklo signalizavimo įtampa

Kai kuriose šalyse elektros tiekėjas bendrą skirstomąjį tinklą gali naudoti signalams perduoti. Paros visų 3s trukmės intervalų signalų įtampų daugiau nei 99 % vidurkių turi būti lygūs arba neviršyti 1.1 paveiksle nurodytų verčių. Elektros tinklais perduodami 95kHz - 148,5kHz dažnio signalai gali būti naudojami vartotojo įrenginiuose. Nors signalus tarp vartotojų perduoti bendruoju tinklu neleistina, reikia įvertinti tokių dažnių iki 1,4V vidutinės kvadratinės vertės įtampą bendruose skirstomuosiuose tinkluose. Kadangi galima kaimyninių signalų perdavimo įrenginių savitarpio įtaka, vartotojui gali tekti naudoti apsaugines priemones arba šiai įtakai atsparias sistemas.



1 pav. Žemosios įtampos skirstomų tinklų perduodamų signalizavimo dažnių įtampų lygiai Un

2. INFORMACIJOS ŠALTINIŲ ANALIZĖ

Darbe aptariama dalis informacijos elektros energijos kokybės klausymais, kurią pavyko rasti informacijos šaltiniuose. Dėka naujai išrastų technologijų, kas keletą mėnesių pagaminamas naujas elektros įrenginys. Dėl to iškyla visa eilė problemų. Efektyviai pritaikomi konkurenciniai naujos technikos pavyzdžiai yra imlūs elektros kokybės parametrams. Pastarieji ne visada atitinka priimtus standartus ir reikalavimus. Didelis LESTO (Lietuvos elektros skirstomųjų tinklų operatorių) darbuotojų krūvis, o neretai ir kvalifikacijos bei tyrimų stoka, neleidžia jiems pilnai atlikti taikomųjų tyrimų, didžiąją laiko dalį laiko skiriant materialiniam apsirūpinimui ir einamiems plėtros bei dalinio modernizavimo projektams.

Elektros energijos kokybės užtikrinimas yra aktuali problema, ji reikalauja elektros energijos kokybės skaičiavimo ir matavimo metodų kūrimo ir tobulinimo. Elektros energijos kokybės tyrimai apima eksperimentinę plėtrą, kuri suprantama kaip sistemingas darbas, kuris atliekamas remiantis tyrimų ir praktinės veiklos metu įgytomis žiniomis. Tyrimų tikslas yra kurti naujas metodines medžiagas, produktus ar įrenginius. Įdiegti naujus arba tobulinti jau sukurtus ir įdiegtus procesus, sistemas ir paslaugas.

2.1 Tiekiamos įtampos nesinusiškumas

Lietuvoje šiuo metu vis aktualesnė tampa elektros tinklo kokybės kontrolės problema, ypatingai atsiradus vėjo jėgainių parkams, saulės elektrinėms, naudojantiems galios keitiklius ir vis daugiau elektroninės aparatūros, turinčios svarią įtaką elektros tinklo kokybiniam parametrams. Ypatingai suinteresuoti vartotojai, kurių prietaisai ar įrengimai yra jautrūs elektros įtampos formos iškreipymams. Tiekėjai taip pat nėra abejingi šiai problemai, nes kai kurių vartotojų prietaisai dėl savo veikos principo patys skleidžia iškreipymus ir triukšmus į elektros tinklą.

Tiekiamos įtampos asimetrija - tai trifazės sistemos būseną, kai fazių įtampų vidutinės vertės arba fazių tarpusavio kampai nelygūs. Kai kuriose vietose, kur vartotojo įrenginiai yra iš dalies vienfaziai, trifazė įtampos asimetrija elektros tinklo nuosavybės ar eksploatavimo atsakomybės ribos taškuose gali siekti 3%. Tiekiamos įtampos netiesinių iškreipymų faktorius (įtampos nesinusiškumas) turi būti mažesnis arba lygus 8% (įskaitant visas harmonikas iki 40). Įtampos nesinusiškumo normuojamieji rodikliai [9]:

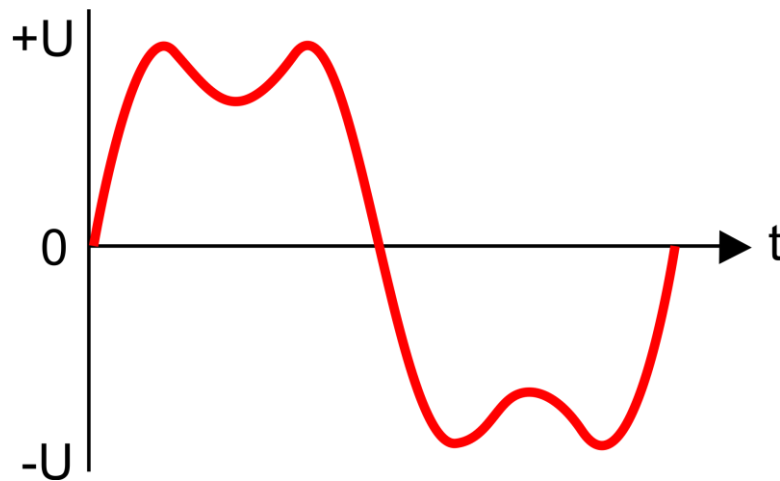
- įtampos kreivės sinusiškumo iškreipymo koeficientas;
- įtampos n -sios harmoninės dedamosios koeficientas.

Nenormalių rodiklių priežastys šiuo atveju yra įvairių nelinejinių elektros energijos imtuvų

panaudojimas:

- lygintuviniai keitikliai;
- galios elektros įrenginiai su tiristoriniu valdymu;
- lankinės ir indukcinės krosnys;
- liuminescencinės lempos;
- lankinio ir kontaktinio suvirinimo įrenginiai;
- dažnio keitikliai;
- buitinė technika (kompiuteriai, televizoriai ir kt.)

Darbo proceso metu šie įrenginiai naudoja pagrindinio dažnio energiją, kuri eikvojama ne tik naudingam darbui ir nuostolių padengimui, bet ir aukštesniųjų harmonikų srauto sudarymui, kuris teršia išorinį tinklą.

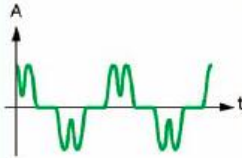

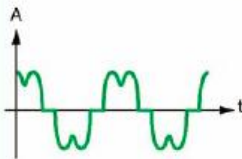
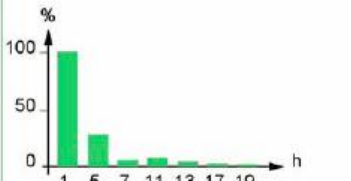



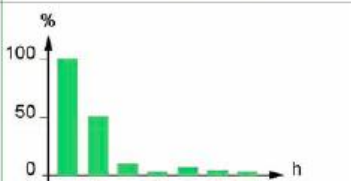


2 pav. Įtampos kreivės nesinusiškumas

Įtampos nesinusiškumas charakterizuojamas įtampos kreivės iškreipymo koeficientu K_U , %, kuris nustatomas aukštesniųjų harmonikų įtampų U_v santykiu su pagrindinio dažnio įtampa U_1 arba vardine įtampa [10]:

$$K_u = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_{NOM}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

čia U_v - v-sios harmonikos įtampos efektinės reikšmės, V; n – paskutinė įskaitinė harmonika.

NETIESINĖS APKROVOS	SROVĖS KREIVĖS FORMA	SPEKTRAS	THDi
REGULIUOJAMO GREIČIO ELEKTROS PAVARA			44 %
LYGINTUVAL PAKROVĖJAI			28 %
DUOMENŲ APDOROJIMO ĮRANGA			115 %
FLUORESCENCINĖS LEMPOS			53 %

3 pav. Kai kurių imtuvų srovės formos, harmonikų spektrai ir THDi

Plečiantis trifaziams kintamos srovės tinklams atsiranda būtinybė plačiau nagrinėti jų asimetrinius režimus. Dabar tie režimai tampa ne tik avariniai, bet ir darbiniai. Asimetriniai režimai apskaičiuojami naudojant simetrinių dedamųjų metodą [11], kuris leidžia nustatyti srovės ir įtampas kintamosios srovės mašinose, t.y. tokiuose įrengimuose, kurių įėjimo varžos priklauso nuo maitinimo tinklo fazių sekos. Nors asimetriniams režimams priskiriami ir daugelis kitų elektros tinklo parametrų pokyčių, tačiau literatūroje jie ne kartą nagrinėti ir jų priežastinė kilmė aiški. Todėl šiame darbe tikslinga sutelkti dėmesį į įtampos ir srovės nesinusiškumo, harmoninės taršos problemas ir priemones joms spręsti.

Tiekiamos ir gaminamos elektros įtampa nuo 2009 metų elektros tinklo įtampa didinama iki vardinės 230V reikšmės ir nustatomos leistinos nuo -10% iki +10% darbo įtampos ribos, tai yra nuo 207V iki 253V. Kai kurie energetikos specialistai nepakankamai įsisąmoninę šio klausimo svarbos. Elektros energija naudojama visose žmogaus gyvybinės veiklos sferose, kadangi, turėdama aibę specifinių savybių, tiesiogiai dalyvauja kitų produkcijos rūšių kūrime, įtakodama jų kokybę. Kiekvienas elektros imtuvas skirtas darbui su tam tikrais elektros energijos parametrais, t.y. vardiniu dažniu, įtampa ir t.t., todėl normaliam jo darbui turi būti užtikrinta reikalinga elektros energijos kokybė. Elektros energijos kokybės problemos svarba kyla kartu su plačiai gamyboje diegiamais ventiliniais keitikliais ir įvairiais labai technologiškais įrenginiais tokiais, kaip lankinės krosnys,

suvirinimo įrenginiai ir kt. Buityje pastaruoju metu plačiai naudojami televizoriai, kompiuteriai ir kiti įrenginiai naudojantys nuolatinę srovę per antrinius maitinimo šaltinius ir bloginantys elektros tinklo kokybę. Iki 2012 m. rugsėjo mėnesio Europos Sąjungos (ES) šalyse dar leidžiama pardavinėti kaitrines lemputes iki 60W. Buitiniuose ir kitose objektuose vis daugėja kompaktinių fluorescencinių lempučių, kurios pakeičia šias uždraustas kaitrines lempas. Kompaktinių lempų srovėje yra labai daug aukštesniųjų harmonikų. Matuojamų harmonikų iki 21 eilės imtinai, gaunamas srovės harmonikų koeficiento dydis – 137%. Realiai aukštesniųjų harmonikų yra kur kas daugiau kompaktinių lempų srovėje, tačiau didžioji jų dalis yra didesnė negu 21 harmonika. Kompiuterių maitinimo šaltinių srovės harmonikų kiekis yra ribojamas nors jų galia šimtai vatų (vidutiniškai apie 600W), o kompaktinių lempų, kurių galia keliasdešimt vatų, neribojama nors jų kiekiai didesni.[16]. Kompaktinės fluorescencinės lemputės dirba 40 kHz dažniu, kuris gali daryti įtaka ligoninių įrangai ir jų rezultatams. Naujų technologijų, kurios ekonomiškai ir technologiškai efektyvios, panaudojimas neigiamai veikia elektros energijos tinklų kokybę. Žalą, kurią patiria vartotojai ir energetinė sistema dėl pablogėjusios elektros kokybės, galima skirstyti į elektromagnetinę ir technologinę. Elektromagnetinės žalos formos būtų tokios:

- generavimo, perdavimo ir vartojimo procesų efektyvumo sumažėjimas dėl nuostolių tinklo elementuose padidėjimo;
- elektros įrenginių gedimai ir tarnavimo laiko sumažėjimas dėl nenormalių režimų ir izoliacijos senėjimo;
- relinės apsaugos, automatikos ir ryšių sistemos gedimai ir normalaus darbo pažeidimai.

Visa tai iššaukia energijos tiekimo sistemos patikimumo sumažėjimą. Technologinei žalos formai priskiriama:

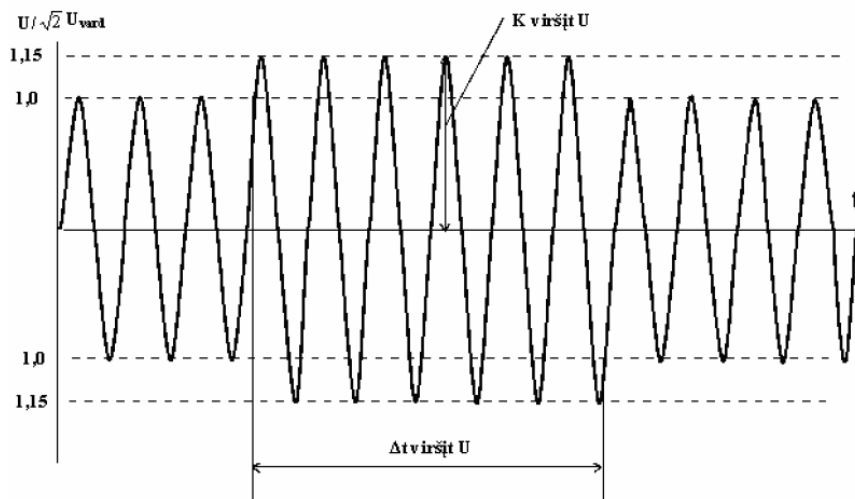
- gamybos sumažėjimas,
- technologinės įrangos sugadinimai,
- bloginantys produkcijos kokybę ir kiekybę.

Įtampos nuokrypiai žymiai veikia elektros variklių darbą. Esant sumažėjusiai įtampai, sumažėja įmagnetinimo reaktyvioji galia, prie tos pačios pareikalaujamos galios padidėja variklio srovė, dėl ko perkaista izoliacija. Padidintas izoliacijos susidėvėjimas trumpina variklio amžių. Esant žyminiam įtampos sumažėjimui ant asinchroninio variklio gnybtų, galimas jo "pervertimas" dėl sukimo momento sumažėjimo, rotoriaus sukimosi dažnio sumažėjimo. Įtampos pažemėjimas pablogina ir paleidimo sąlygas, nes sumažėja paleidimo momentas. Įtampos padidėjimas ant variklio gnybtų padidina jo reaktyvinę galią, kurią reikia kompensuoti. Įtampos nuokrypiai (svyravimai, fluktuacijos) apskaičiuojami pagal formulę:

$$\delta U_t = \frac{U_i - U_{ai+1}}{U_{vard}} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

čia δU_i - įtampos svyravimai procentais, %; U_i - akimirkinė įtampa laikotarpiu, t; U_{ai+1} - akimirkinė sekancio a intervalo įtampa, V.

Esant staigiems srovinės apkrovos pokyčiams, vyksta tokie pat staigūs elektros įrenginių ekvivalentinių parametrų pokyčiai, dėl ko atsiranda amplitudžių ir fazių priverstinių momentinės srovės dedamųjų moduliacija laike tarp pagrindinės ir jai kartotinių aukštesniųjų dažnių harmonikų. Kai kuriais atvejais [12] galimas laisvų dedamųjų pasirodymas. Visa tai didina suminius aktyvinius nuostolius tinkle. Įtampos svyravimai pažeidžia normalų elektroninės aparatūros darbą, trumpina jos tarnavimo laiką: genda telefono, interneto, televizijos ir radijo aparatūra, tarnybinė ir buitinė technika. Esant žymiems įtampos svyravimams sutrinka normalus elektros variklių darbas bei atsiranda galimybė atsijungti magnetinių paleidiklių kontaktams ir atjungti dirbančius variklius. Įtampos svyravimai (10 - 15) % gali sugadinti kondensatorines baterijas, lygintuvinius keitiklius indukcinės krosnis, elektrolizinius įrenginius (greičiau sudyla jų anodai). Fazinės įtampos svyravimai sukelia elektros variklių vibracijas ir mechaninių konstrukcijų, ant kurių jie tvirtinami, nuovargį, sutrumpindami jų tarnavimo laiką [7]. Dažnas reiškinys energetiniuose žemos įtampos tinkluose yra laikini įtampos padidėjimai virš standartinių reikšmių (1,15 karto amplitudinės reikšmės). Tai pasitaiko kaimo ir nutolusiose nuo transformatorių vietovėse, kai atsijungia pakankamai didelės galios vartotojai.



4 pav. Laikinas įtampos padidėjimas

Daugeliu atveju neįmanoma greitai sureguliuoti įtampos paviršio keičiant transformatorių transformacijos koeficientą ar keičiant fazių sekas.

Įtampų svyravimo kaltininkai yra vartotojai, sukeltys staiga kintančią apkrovą. Jos kompensavimui naudojami greitai veikiantys reaktyvinės galios šaltiniai, galintys kompensuoti

reaktyvinės galios pokyčius. Staiga kintančios apkrovos įtakos sumažinimui jautriems elektros įrenginiams naudojamas atskyrimo būdas, kai staiga kintanti ir jautri įtampos svyravimams apkrova prijungiama prie skirtingų transformatorių. Šiam tikslui naudojami transformatoriai su atskirtine apvija ir sudvejinti reaktoriai [11]. Įtampos kryptis dėl reaktoriaus apvijų elektromagnetinio ryšio sumažėja 50-60%. Jautriems įrenginiams taip pat rekomenduojama įrengti atskirą elektros tinklą kuris sumažins įtampos svyravimus.

2.2. Įtampos dedamųjų filtracija pagal nulinę ir atvirkštinę sekas

Trifazė simetrinė sistema charakterizuojama tuo, kad įtampų kreivės pagal formą visose fazėse vienodos, bet perstumtos vienu trečdaliu periodo ($2\pi/3$). Pagrindinę įtampų harmoniką galima išreikšti trijų lygčių sistema [12].

$$u_{1A} = U_{1m} \sin \omega t \quad (2.3)$$

$$u_{1B} = U_{1m} \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (2.4)$$

$$u_{1C} = U_{1m} \sin(\omega t + 2\pi/3) \quad (2.5)$$

Fazinės įtampos lygčių sistema k-ioms harmonikoms skiriasi nuo ankstesnių tuo, kad sinusinės funkcijos argumentas padidintas k kartų:

$$u_{kA} = U_{km} \sin k\omega t \quad (2.6)$$

$$u_{kB} = U_{km} \sin(3n\omega t - 2\pi n) = U_{km} \sin 3n\omega t \quad (2.7)$$

$$u_{kC} = U_{km} \sin(3n\omega t + 2\pi n) = U_{km} \sin 3n\omega t \quad (2.8)$$

Imamos harmonikos, kartotinės trims, t.y. $k = 3n$, čia n - sveikas skaičius:

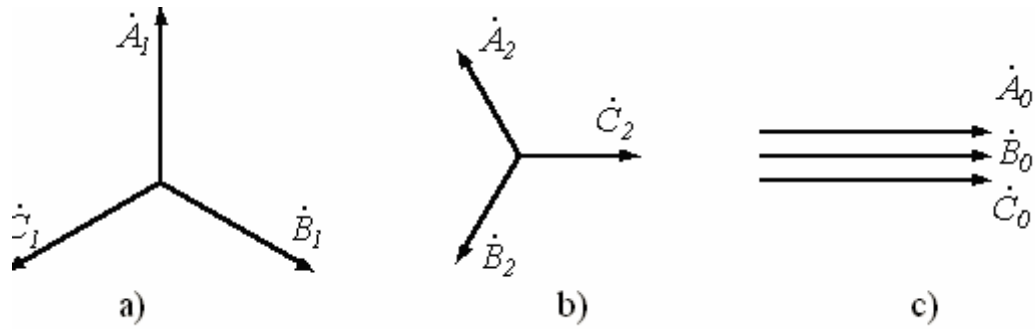
$$u_{kA} = U_{km} \sin 3\omega t \quad (2.9)$$

$$u_{kB} = U_{km} \sin(3n\omega t - 2\pi n) = U_{km} \sin 3n\omega t \quad (2.10)$$

$$u_{kC} = U_{km} \sin(3n\omega t + 2\pi n) = U_{km} \sin 3n\omega t \quad (2.11)$$

Įtampos visose fazėse vienodos ir sutampa faze, kadangi poslinkis visu periodu (arba sveiku periodų skaičiumi $2\pi n$) tolygus poslinkio nebuvimui [12].

Harmonikos, kartotinės trims, t.y. 3, 6, 9, 12 ir t.t. sudaro nulinės sekos simetrinę sistemą.



5 pav. Asimetrinių įtampų vaizdavimas simetrinėmis dedamosiomis [12]

5 pav. (a) įtampos harmonikos, kartotinės trims, parodytos trimis vienodais vektoriais, sutampančiais pagal kryptį. Jei $k = 3n + 1$, tai įtampa U_B atsilieka pagal fazę U_A $2\pi/3$ kampu, o U_C tokiu pat kampu. Pavyzdžiui, fazinių įtampų ketvirtosios harmonikos ($k=4$) išreiškiamos lygtimis [12]:

$$u_{4A} = U_{4m} \sin 4\omega t \quad (2.12)$$

$$u_{4B} = U_{4m} \sin\left(4\omega t - \frac{2\pi n(3+1)}{3}\right) = U_{4m} \sin\left(4\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.13)$$

$$u_{4C} = U_{4m} \sin\left(4\omega t + \frac{2\pi n(3+1)}{3}\right) = U_{4m} \sin\left(4\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.14)$$

Harmonikos 1, 4, 7, 10, 13 ir t.t. sudaro tiesioginės sekos simetrinę sistemą. 5 pav. (b) parodyta vektorinė šių harmonikų diagrama.

Diagramos vektoriai sutartinai sukami prieš laikrodžio rodyklę kampiniu greičiu $k\omega$, sekos tvarka tokia: už vektoriaus U_A eina U_B , po to U_C . Priėmus $k = 3n - 1$, gausime, kad įtampa U_B pralenkia U_A pagal fazę kampu $2\pi/3$, o U_C atsilieka nuo U_A tokiu pat kampu. Pavyzdžiui, fazinių įtampų penktosios harmonikos ($k = 5$) išreiškiamos taip: 2,5,8,11,14 ir t.t. harmonikos formuoja atvirkštinės sekos simetrinę sistemą. Vektorių sekos tvarka 5 pav. (c), sukant juos prieš laikrodžio rodyklę yra atvirkščia: už vektoriaus U_A seka U_C ir toliau U_B (vektorių seka tiesiogine tvarka $U_A \rightarrow U_B \rightarrow U_C$ atitinka jų sukimą priešinga nei laikrodžio rodyklės kryptimi). Jei fazinės įtampos turi vienodas nuolatines dedamąsias, tai jų visumą galima laikyti kaip nulinės sekos dedamąją prie nulinio dažnio. Pagal simetrinių dedamųjų metodą [12] linijinės simetrinės įtampos ir srovių dedamosios aprašomos taip:

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{AB} + a \cdot \underline{U}_{BC} + a^2 \cdot \underline{U}_{CA}) \quad (2.15)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{AB} + a^2 \cdot \underline{U}_{BC} + a \cdot \underline{U}_{CA}) \quad (2.16)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot e^{j\varphi_2} \quad (2.17)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_A + a \cdot \underline{I}_B + a^2 \cdot \underline{I}_C) \quad (2.18)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_A + a \cdot \underline{I}_B + a^2 \cdot \underline{I}_C) \quad (2.19)$$

$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) \quad (2.20)$$

čia $\underline{U}_1, \underline{I}_1$ - linijinių simetriųjų dedamųjų tiesioginės sekos kompleksinės įtampos ir srovės fazėje; $\underline{U}_2, \underline{I}_2$ - atvirkštinės sekos simetriųjų dedamųjų kompleksinės įtampos ir srovės; \underline{I}_0 - nulinės sekos simetriųjų dedamųjų srovė; $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}, \underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ - kompleksiniai linijinių srovių ir įtampų dydžiai; ε_2 - atvirkštinės sekos įtampos kompleksinės asimetrijos koeficientas; φ_2 - atvirkštinės sekos asimetrijos kompleksinio koeficiento argumentas; a - fazinis operatorius ($a = e^{j120^\circ}$)

Fazinės įtampos ir srovių simetrisinės dedamosios nustatomos pagal formules:

$$\underline{U}_{1\phi} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + a \cdot \underline{U}_B + a^2 \cdot \underline{U}_C) \quad (2.21)$$

$$\underline{U}_{2\phi} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + a^2 \cdot \underline{U}_B + a \cdot \underline{U}_C) \quad (2.22)$$

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) \quad (2.23)$$

$$\underline{\varepsilon}_0 = \frac{U_0}{U_1} \cdot e^{j\varphi_0} \quad (2.24)$$

$$\underline{I}_{1\phi} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{AB} + a \cdot \underline{I}_{BC} + a^2 \cdot \underline{I}_{CA}) \quad (2.25)$$

$$\underline{I}_{2\phi} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{AB} + a^2 \cdot \underline{I}_{BC} + a \cdot \underline{I}_{CA}) \quad (2.26)$$

čia $\underline{U}_{1f}, \underline{I}_{1f}$ - tiesioginės sekos simetriųjų dedamųjų kompleksinės įtampos ir srovės fazėje; $\underline{U}_{2f}, \underline{I}_{2f}$ - atvirkštinės sekos simetriųjų dedamųjų kompleksinės įtampos ir srovės fazėje; \underline{U}_0 - nulinės sekos simetriųjų dedamųjų įtampa; $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C, \underline{I}_{AB}, \underline{I}_{BC}, \underline{I}_{CA}$ - fazinės įtampos ir srovės; ε_0 - nulinės sekos asimetrijos koeficientas; φ_0 - nulinės sekos asimetrijos koeficiento argumentas.

Linijinių simetriųjų dedamųjų santykis su fazinėmis, kaip žinoma yra $\sqrt{3}$. Apskaičiavimui

kiekvienos iš įtampų ir srovių simetrinių dedamųjų trifaziam tinkle pagal lygtis (2.15) - (2.20) reikalauja išankstinio trijų vektorių (trijų modulių ir trijų fazių), t.y. šešių dydžių matavimų. Tai nėra patogiu ir gaunami netikslūs matavimo rezultatai [12].

Praktikoje eksploatuojant elektros tinklus, linijinės įtampos ir srovės matuojamos voltmetrais ir ampermetrais. Matavimai fiksuoja efektines, bet ne kompleksines reikšmes, todėl reikia apžvelgti būdus kaip nustatyti simetrines dedamąsias matuojant realiuose elektros tinkluose [11,14].

Esantys simetrinių dedamųjų nustatymų būdai yra šie: grafinis, nomogramų, lentelių. Analitiniai dar skirstomi į tikslus, kuriems reikia skaičiavimo technikos ir apytikrius.

Tiksliam metodui skiriamos lygtys, rekomenduojamos [11] šaltinyje. Pagal šį metodą įtampų tiesioginės U_1 ir atvirkštinės U_2 sekos efektyvinės reikšmės nustatomos pagal šia formulę;

$$U_{1,2} = \left\{ \frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot U_{AB} \pm \sqrt{4 \cdot U_{BC}^2 - \left[\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} + U_{AB} \right]^2} \right)^2 + \left(\left[\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} \right]^2 \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (2.27)$$

čia U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} - tarpfazinių įtampų efektyvinės reikšmės, V.

Duotoji lygtis tiksli, tačiau ribota naudojimo sritis: esant ribinei asimetrijai, kai $U_{AB}=0$ ir $U_{BC} = U_{CA}$, trupmena pošaknyje teikia neapibrėžtumą:

$$\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} = \frac{0}{0} \quad (2.28)$$

Beto, lygtis (2.28) skirta daliniam atvejui, kai linijinių įtampų vektoriai sudaro uždara trikampį, t.y. vykdomos sąlygos:

$$\left. \begin{aligned} U_{CA} + U_{BC} &\geq U_{AB} \\ U_{AB} + U_{BC} &\geq U_{CA} \\ U_{CA} + U_{AB} &\geq U_{BC} \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

Į jas būtina atsižvelgti, nes praktikoje pasitaiko netikslumų nuskaitant matavimo prietaisus. Tai liečia apskaičiuojant tiesioginės ir atvirkštinės sekos srovę pagal analogines (2.27) lygtis:

$$I_{1,2} = \left\{ \frac{1}{12} \left[\left(\sqrt{3} \cdot I_A \pm \sqrt{4 \cdot I_B^2 - \left[\frac{I_B^2 - I_C^2}{I_A} + I_A \right]^2} \right)^2 + \left(\left[\frac{I_B^2 - I_C^2}{I_A} \right]^2 \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.30)$$

čia I_A, I_B, I_C - fazinių srovių efektinės reikšmės, A.

Nustatant efektyvinę nulinės sekos įtampos reikšmę [1] rekomenduojama išraiška:

$$U_0 = \frac{1}{6} \left\{ \left[\frac{U_{BC}^2 - U_{CA}^2}{U_{AB}} - \frac{U_B^2 - U_A^2}{U_{AB}} \right]^2 + \left[\sqrt{4 \cdot U_{BC}^2 - \left(U_{AB} + \frac{U_{BC}^2 + U_{CA}^2}{U_{AB}} \right)^2} - 3 \cdot \sqrt{4 \cdot U_B^2 - \left(U_{AB} + \frac{U_B^2 + U_A^2}{U_{AB}} \right)^2} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.31)$$

čia U_A, U_B, U_C - fazinių įtampų efektinės reikšmės, V; U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} - linijinių įtampų reikšmės, V.

Kaip matyti iš aukščiau pateiktų formulių ir esant kuriai nors linijinių įtampų lygioms nuliui ($U_0, \varphi_{AB}, \varphi - U_{AB} = 0$) formulė skaičiuoja dalyba iš nulio, tai ne visada galima taikyti.

Naudojančios elektros energiją technologijos vis darosi sudėtingesnės. Todėl elektros energijos tiekimas turi būti toks, kad galėtų susidoroti su plačiu problemų spektru, t.y. įtampos kryčiais, trūkiais, viršįtampiais, aukšto dažnio triukšmais, impulsiniais trikdžiais ir net nesant maitinimo iš tinklo. Viena iš tokių problemų - įtampos formos iškraipymai, sukelti srovės harmonikų dedamųjų dėl netiesinės vartotojų apkrovos.

Dažnai kompiuterinė įranga ir taupiosios lemputės yra netiesinės elektrinės apkrovos kaltininkai, sudarantys maitinimo tinklo iškraipymus. Suminis šių apkrovų efektas iškraipo įtampos formą, kuri veikia kitą įrangą, gaunančią maitinimą iš to paties šaltinio. Tai aktyvuoja kitų įrenginių perkaitimą ir desinchronizaciją, komunikacijų ir duomenų perdavimo tinklų bei aparatūros gedimus, kitus nepageidaujamus efektus [11].

2.3 Įtampos ir srovės aukštesniųjų harmonikų sukeliama efektai

Akimirkinio (momentinio) tipo efektai yra tokie [18]:

- maitinimo įtampos formos iškreipimai;
- įtampos kritimai skirstomajame tinkle;
- harmonikų, kartotinių 3 efektas (trifaziam tinkle);
- rezonansiniai aukštesniųjų harmonikų dažnių reiškiniai;
- infiltracijos telekomunikaciniuose ir valdymo sistemų tinkluose;
- padidintas akustinis triukšmas elektromagnetinėje įrangoje;
- vibracijos elektros mašinų sistemose.
- Ilgalaikės problemos:
- įšilimas ir papildomi nuostoliai transformatoriuose ir elektros mašinose;
- kondensatorių įšilimas;
- kabelių skirstomuose tinkluose įšilimas.

Efektų atsiradimo priežastys ir galimi jų sprendimai

Padidinta amplitudės koeficiento reikšmė rodo, kad yra didelis vartojamos srovės pikas per tinklo dažnio pusperiodį. Kuo didesnė pikinė srovės reikšmė ir mažesnė jos trukmė per tinklo įtampos pusperiodį, tuo didesnis jos iškreipimas. Duotosios apkrovos srovės amplitudės koeficientas keičiasi priklausomai nuo maitinimo šaltinio charakterio, o paties šaltinio galimybės maitinti apkrovą su pakankamai dideliu amplitudės koeficientu ribojamos jo pilnosios varžos. Daugeliui įrenginių, atliekančių maitinimo šaltinių funkcijas, tokia savybė gali būti pasiekta tik pakeitus šios įrangos vardinius parametrus. Šiuolaikiniai nenutrūkstamo maitinimo šaltiniai (NMŠ), (angl. UPS- *uninterruptible power supply*) kontroliuoja įtampos formą kiekvienu sinusoidės pusperiodžiu [12]. Šiuo metu NMŠ naudojami inventoriai su bipoliariniais tranzistoriais ir yra valdomi aukštadažniu platuminiu - impulsiniu būdu. Tokios sistemos maitina apkrovas esant aukštiesiems srovės amplitudės koeficientams (3 ir daugiau). Tai todėl, kad perjungimai vyksta koreguojant įtampos formą kiekvienu periodu ir esant aukštiesiems dažniams. Ši srovės atidavimo savybė (su aukštomis pikinėmis vertėmis) priveda prie to, kad NMŠ išėjime įtampos forma žymiai geresnė negu pramoninio tinklo sistemos įėjime. Dauguma NMŠ maitina apkrovas esant aukštam amplitudės koeficientui ir įtampos sinusiškumo iškreipimo koeficientas neviršija 3-6% (šaltinių išėjimo gnybtuose) [18]. Tačiau apkrovos prijungimo vietose kiek kitaip: dėl didelės procentinės aukštesniųjų harmonikų dalies srovės forma smarkiai skiriasi nuo sinusinės.

2.4 Harmonikų, kartotinių trims, efektai

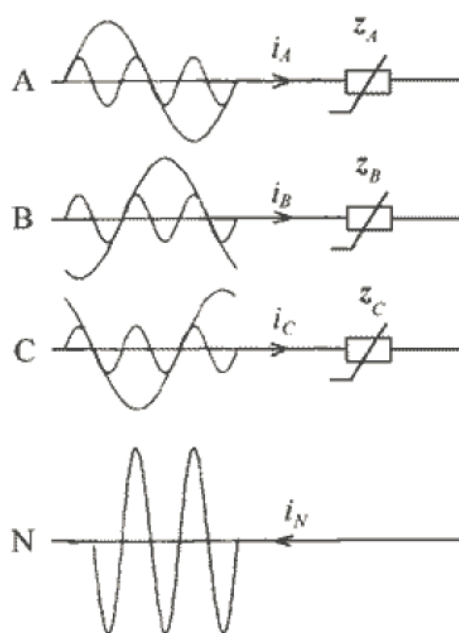
Aukštesniosios harmonikos, kartotinos trims (t.y. 3,9,15,21 ir t.t.) nustatančios aukštas amplitudės koeficiento reikšmes ir generuojamos vienfazių apkrovų, turi specifinį poveikį trifazėse sistemose [18]. Subalansuotoje (simetrinėje) trifazėje sistemoje harmoninės (sinusinės) srovės visose trijose fazėse perstumtos 120° viena kitos atžvilgiu, dėl to neutraliam laide srovių suma lygi nuliui. Tad neutralėje nėra ir įtampos kritimo. Šis tvirtinimas yra teisingas daugumai harmonikų. Tačiau kai kurios iš jų turi srovės vektoriaus sukimosi kryptį į tą pačią pusę, kaip ir pagrindinė harmonika (pirmoji, 50 Hz), t.y. jos yra tiesioginės sekos. Kitos sukasi į priešingą pusę ir yra atvirkštinės sekos. Tai nepriskiriama harmonikoms, kartotinioms trims:

$$n = 3(2k + 1), \text{čia } k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.32)$$

Trifazėse grandinėse jos perstumtos 360° viena kitos atžvilgiu, sutampa faze, sudaro nulinę seką. Nelyginės harmonikos, kartotinės trims, sumuojasi neutralės laide, dėl to jos sudaro didžiąją dalį fazinių srovių vertės ir bendra neutralės srovė gali viršyti fazines sroves [18]:

$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} \quad (2.33)$$

I_N – bendra neutralės srovė, A.



6 pav. Neutralės formavimo procesas esant netiesinei apkrovai

Blogai suprojektuotos kabelinės linijos trifaziam tinkle gali perkaisti ir net užsidegti. Todėl kompiuterinės technikos maitinimo kabeliai turi turėti didesnio diametro neutralų laidininką. Harmonikos, kartotinės trečiai, iššaukia įtampos kritimą ne tik neutralėje, bet ir faziniuose laidininkuose ir tuo būdu iškraipo įtampos formą kitose apkrovose, prijungtose prie šio tinklo. Be to, linijinėse trifazio tinklo įtampose nebus harmonikų, kartotinių trimis, dėl to santykis tarp linijinių ir fazinių įtampų, esant nesinusinėms srovėms bus mažesnis negu $\sqrt{3}$.

2.5 Rezonansiniai aukštesniųjų harmonikų reiškiniai

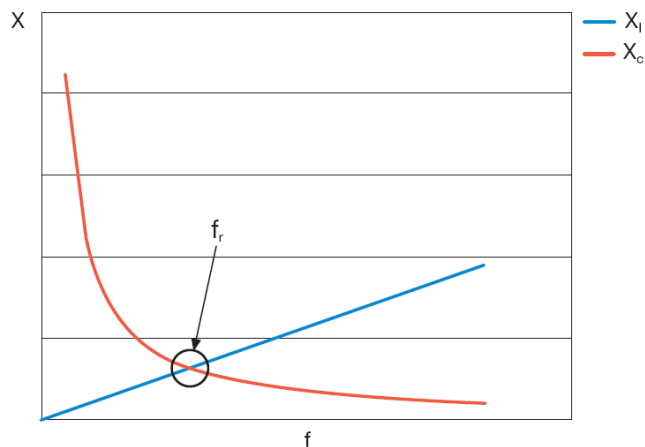
Esant aukštesniųjų harmonikų tinkluose su sutelktiniais ir išskirtiniais parametrais gali vykti rezonansiniai reiškiniai [12]. Atsiradus rezonansiniam ar jam artimam režimui, kurioje nors srovės ar įtampos harmonikoje, jos dedamoji tampa didesnė negu pirmosios harmonikos amplitudė grandinės dalyse; tai gali neigiamai paveikti atskirus sistemos mazgus ar jų elementus. Rezonansas siejamas su galios transformatorių ir reaktyvinės galios kompensatorių darbu. Tai gerai žinoma elektrotechnikoje rezonansinio kontūro susiformavimo schema - lygiagreti LCR grandinė - joje įvyksta rezonansas, kai $X = X_L - X_C = 0$, arba $X_L = X_C$, t.y.

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (2.34)$$

Iš to matome, kad rezonansas visuomet gali įvykti, esant tam tikriems talpių ir induktyvumų dydžiams :

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.35)$$

L – induktyvumas, H; C – talpa, F.



7 pav. Rezonanso grafinė sąlyga

Kad išvengtų rezonansinių reiškinių, išmatavus energetinio tinklo parametrus, reikia gerai išanalizuoti reaktyvinių dedamųjų $Q_i +$; $Q_i -$, $Q_C +$ ir $Q_C -$ reikšmes ir iš jų apskaičiuoti L ir C reikšmes, sudaryti elektrinę schemą ir apskaičiuoti, ar gali prie duotųjų L ir C reikšmių įvykti rezonansas standartiname 50 Hz tinkle [12].

Praeinant telekomunikaciniams arba valdymo tinklams arti jėgos tinklų, kuriais teka aukštesniųjų harmonikų srovės, juose gali indukuotis trikdžiai ir iškreipti informacinį signalą [18]. Iškreipimo dydis priklauso nuo aukštesniųjų harmonikų dažnio, tinklo lygiagrečiųjų atkarpų ilgio ir atstumo tarp jų.

Atsiradus aukštesniosioms harmonikoms maitinimo įtampos tinkle indukciniai elektros varikliai dirbs nenormaliais režimais, nes jų magnetiniame sraute atsiras aukštesniųjų harmonikų dedamosios, kurios indukuosis elektros variklio rotoriuje ir aukštesniųjų harmonikų srovės [18]. Šios harmonikos sąveikaus su pagrindiniu magnetiniu srautu, sukurdamos papildomus mechaninius momentus ant variklio veleno ir sukimo momento harmonines pulsacijas. Sudėtingais atvejais gali kilti rotoriaus vibracijos, ypač jei rotoriaus masė pasieks rezonansą su aukštesniųjų harmonikų sukeltu efektu. Tai sukeltų veleno metalo nuovargį ir jis galėtų trūkti [18].

Papildomi nuostoliai, esant aukštesniosioms harmonikoms, iššaukiantys transformatorių perkaitimą, atsiranda dėl „skin effect“ apvijose (aktyvinės varžos padidėjimo didėjant dažniui) ir padidėjusių histerezės sukūrinių srovių magnetolaidyje nuostolių [12].

Elektros mašinose, šalia analogiškų nuostolių statoriuje dėl didelio magnetinių laukų sukimosi greičių skirtumo, sukuriama aukštesniųjų harmonikų ir rotoriaus sukimosi greičio, atsiranda papildomi nuostoliai rotoriaus dempferinėse apvijose ir mašinos magnetolaidyje.

Papildomi nuostoliai, veikiant aukštesniosioms harmonikoms, sąlygojami „kampo nuostoliais“ dielektrike ir kondensatoriaus efektinės srovės didėjimo [18]. Perkaitimas gali sukelti dielektriko pramušimą. Be to, kondensatoriai jautrūs perkrovoms, sukeltoms dėl aukštesniųjų harmonikų efekto.

Lygintuvinis keitiklis (plačiai naudojamas vėjo jėgainėse), dirbantis pagal šešiafazę schemą į išorės tinklą generuoja harmonikas $n = (6n+1)$ eilės; didžiausios pagal amplitudes yra 5-oji ir 7-oji harmonikos, įrengus rezonansinius filtrus, suderintus šių harmonikų dažniui, jos į maitinimo tinklą nebepatenka [18].

Asimetrinės apkrovos srovės, tekančios elektros tiekimo sistemos elementais, sudaro juose asimetrinius įtampos kritimus. Dėl to elektros įrenginio išvaduose atsiranda asimetrinė įtampų sistema. Įtampos nuokrypis jo perkrautoje fazėje gali viršyti leistinas reikšmes. Be įtampos režimo pablogėjimo elektros įrenginyje prie asimetrinio režimo pablogėja pačio elektros įrenginio darbo sąlygos, tarp visų tinklo elementų. Tai sumažina elektros įrangos darbo ir visos sistemos patikimumą. Kokybiškai skiriasi darbo režimai populiariausių trifazių elektros įrenginių - asinchroninių elektros variklių. Atvirkštinės sekos asinchroninių elektros variklių varža apytikriai 5 kartus mažesnė už tiesioginės sekos varžą. Todėl net nedidelė įtampų asimetrija iššaukia žymias atvirkštinės sekos sroves, o tai papildomai kaitina statorių ir rotorų [18]. Visa tai greitina izoliacijos senėjimą ir mažina variklio galią.

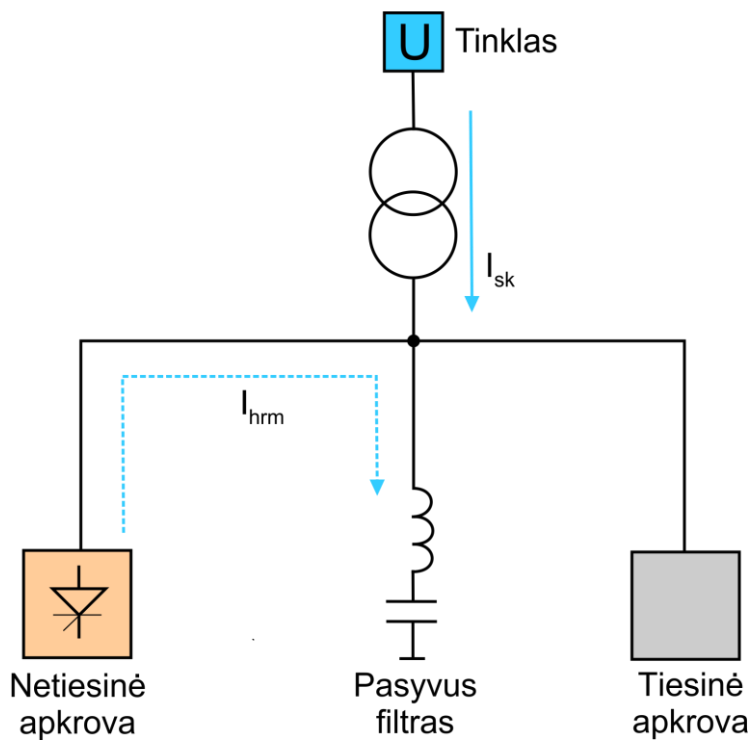
Esant atvirkštinės ir nulinės sekos srovėms padidėja suminės srovės atskiruose tinklo elementuose, todėl padidėja suminiai galios (energijos) nuostoliai ir atsiranda išalimo pavojus. Žymios nulinės sekos srovės, tekančios nuliniu laidininku gali jį smarkiai įkaitinti, ypač jei laidininko skerspjūvis nepakankamas. Yra užfiksuota daug atvejų, kai kilo gaisrai dėl nepakankamo nulinio laidininko skerspjūvio, sudarančio 25-50% fazinio laido skerspjūvio. Nuolat pratekant nulinės sekos srovėms per žemintuvus, jų aplinka išsausėja, o varža padidėja. Tai neigiamai atsiliepiama relinei apsaugai ir geležinkelio blokruotėms. Įtampų asimetrija pablogina daugiafazių lygintuvų darbą, nes padidėja išlygintos įtampos pulsacijos, pablogėja impulsinio - fazinio valdymo sistemos darbas tiristoriniuose keitikliuose. Kondensatoriniai įrenginiai, esant įtampų asimetrijai netolygiai apkraunami reaktyviaja galia fazėse, todėl negalima pilnai išnaudoti jų instaliuotos galios. Šiuo atveju kondensatorinės baterijos sustiprina jau egzistuojančią asimetriją, nes aktyviosios galios atidavimas į tinklą fazėje su mažiausia įtampa bus mažesnis negu kitose fazėse [18]. Norint išvengti įtampų ir srovių nesinusiškumo, patariama [18] naudoti harmonikų filtrus.

2.6 Harmoniniai filtrai

Pasyvaus filtro tipinės panaudojimo sritys

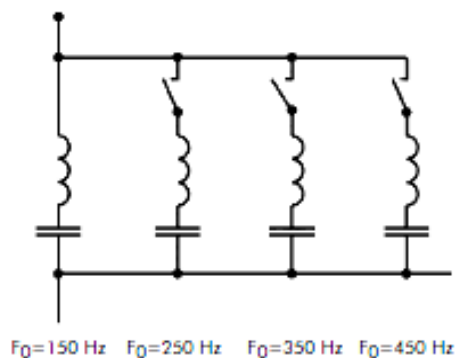
Pasyvus filtras naudojamas pramoninėse instaliacijose, turinčiose daug harmonikų dedamųjų generavimo šaltinių, kurių bendroji galia viršija 200 kVA (tai gali būti variklių greičio reguliatoriai arba dažnio keitikliai, nepertraukiamo maitinimo šaltiniai (UPS), lygintuvai ir kt.). Pasyvus filtras tai pat naudojamas instaliacijose, reikalaujančiose reaktyviosios energijos kompensacijos bei įtampos

iškraipymų lygio mažinimui, kuriuo siekiama apsaugoti jautrius imtuvus. Filtras naudojamas srovės iškraipymų lygio mažinimui, kuriuo siekiama išvengti perkrovų. Filtro kilpos kontūras (LC) yra suderintas su kiekvienos harmonikos dažniu ir, tuo pačiu metu, su harmonikų dedamosios generatoriumi. Filtro atšakos kontūras absorbuoja harmonikas ir neleidžia joms cirkuluoti energijos tiekimo pusės tinkle. Pasyvus filtras yra paprastai suderinamas su tos eilės harmonika, kuri turi būti panaikinta.



8 pav.. Pasyvaus filtro veikimo principas

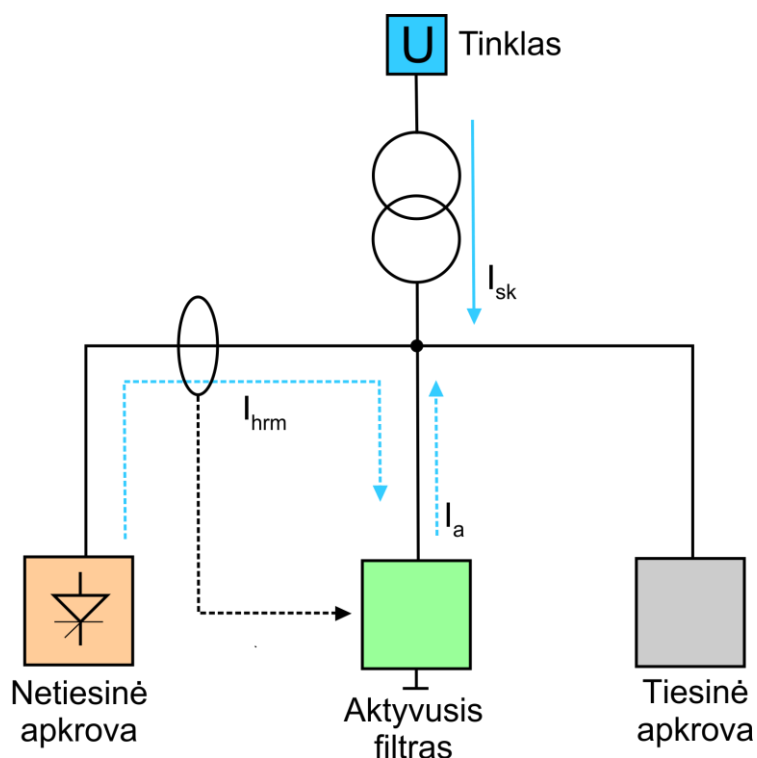
Jeigu reikia stipriai sumažinti kelių harmonikų dedamųjų keliamą iškraipymų lygį, gali būti naudojami keli filtrų atšakų kontūrai.



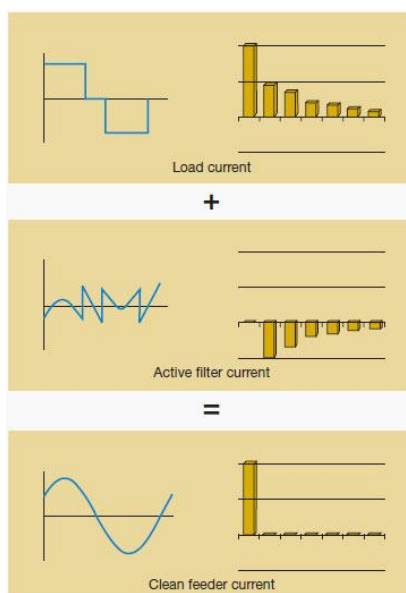
9 pav. Kelių harmonikų pasyvaus filtro veikimo principas

Naudojamos instaliacijose gyvenamajame sektoriuje, prekybos ir paslaugų sektoriuje, turinčios daug harmonikų dedamųjų generavimo šaltinių, kurių bendroji galia viršija 200 kVA (tai gali būti variklių greičio reguliatoriai arba dažnio keitikliai, nepertraukiamo maitinimo šaltiniai (UPS), biuro įrenginiai ir kt.). Aktyvųjį filtrą sudaro elektroninė galios sistema, jungiama nuosekliai arba lygiagrečiai su nelinejine apkrova. Jo tikslas yra kompensuoti elektrostatinio lauko stiprį, kurį sukelia apkrovos generuojamos harmonikų srovės.

Aktyvusis filtras į apkrovos grandinę įveda tos pačios eilės, tik priešingos fazės, harmonikas ir tokiu būdu panaikina egzistuojančias harmonikas.



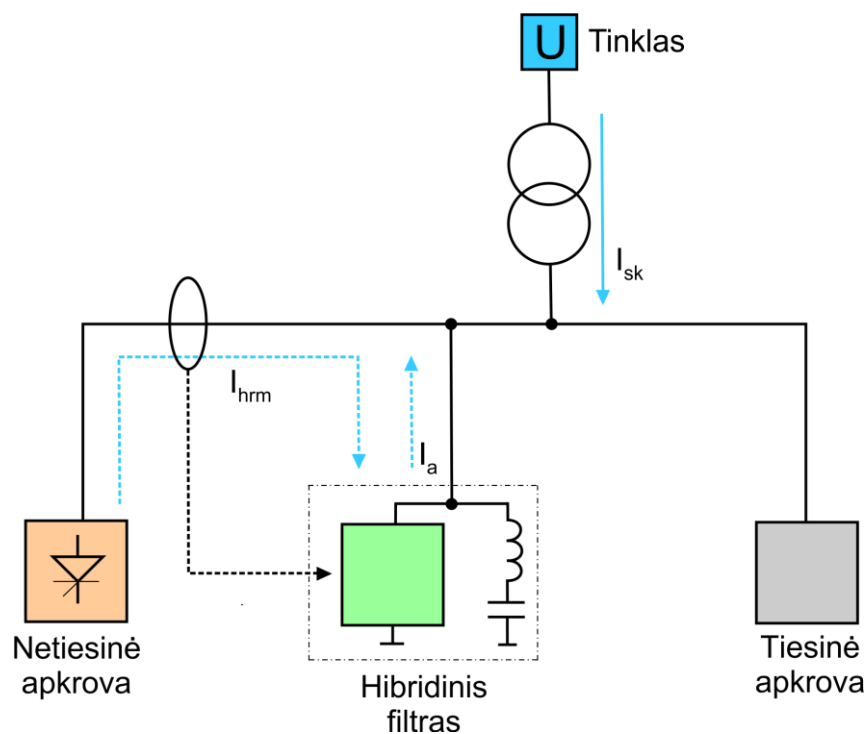
10 pav. Aktyvaus filtro veikimo principas[18]



11 pav. Aktyvaus filtro panaudojimo pavyzdys

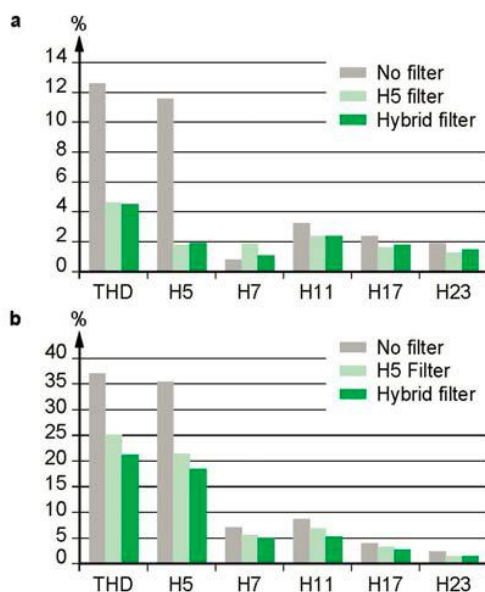
Hibridinis filtras

Hibridinis filtras naudojamas pramoninėse instaliacijose, turinčiose daug harmonikų dedamųjų generavimo šaltinių, kurių bendroji galia viršija 200 kVA. Taip pat naudojamas instaliacijose, reikalaujančiose reaktyviosios energijos kompensacijos. Įtampos iškraipymų lygio mažinimui, kurio tikslas yra apsaugoti jautrius imtuvus. Srovės iškraipymų lygio mažinimui, kurio tikslas yra išvengti perkrovų. Hibridinis filtras yra aktyvaus ir pasyvaus filtrų junginys.



12 pav. Hibridinio filtro veikimo principas

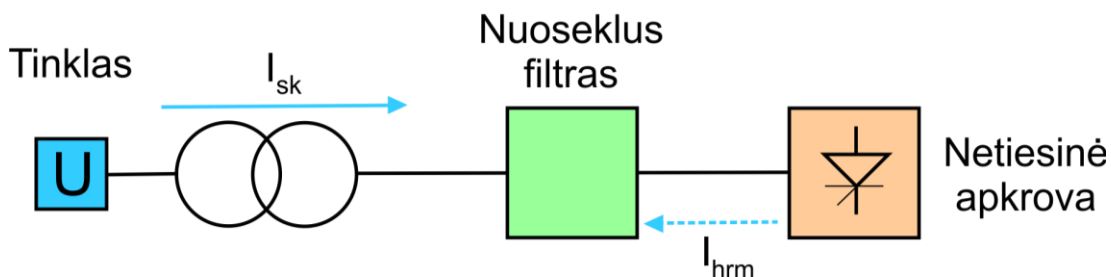
Hibridinio filtro harmonikų filtravimo sprendimas pasižymi visais egzistuojančių sprendimų privalumais ir gali būti taikomas plačiam transformatorių galios ir panaudojimo sričių spektrui. Iš 12 pav. galima pastebėti, kad hibridinio filtro efektyvumas daug didesnis nei pasyvaus penktos harmonikos filtro. Hibridinis filtras labiau absorbuoja srovines nei įtampines harmonikas.



13 pav. Hibridinio filtro panaudojimo efektyvumas pagal [18]: a) įtampas; b) sroves

Nuoseklieji filtrai

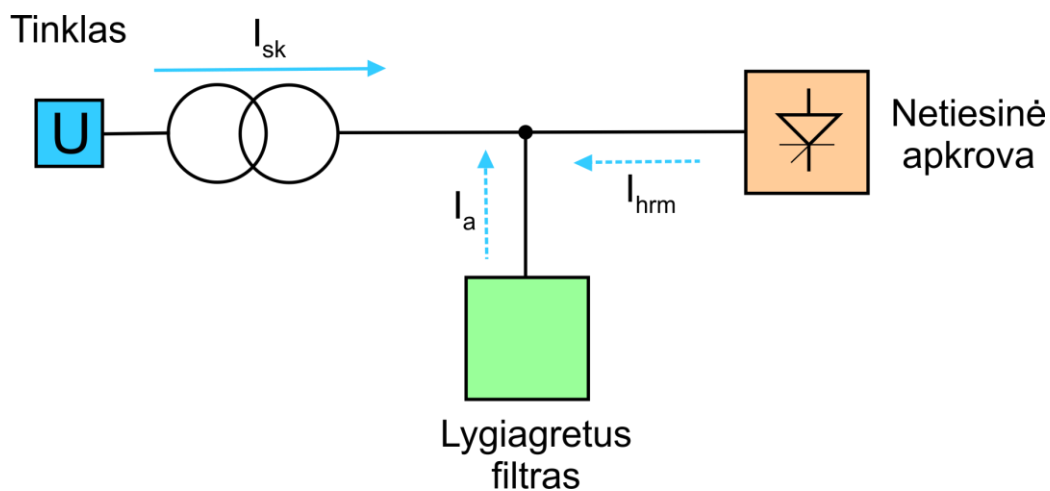
Šie filtrai yra sujungti nuosekliai paskirstymo tinkle, jie kompensuoja generuojamos apkrovos harmoninės srovės ir įtampos iškreipimus jau esančius maitinimo sistemoje. Šis sprendimas iš techninės pusės primena linijinį filtrą ir turi būti parinktas išeinant iš pilno apkrovimo.



14 pav. Nuoseklaus filtro veikimo principas

Lygiagretūs filtrai

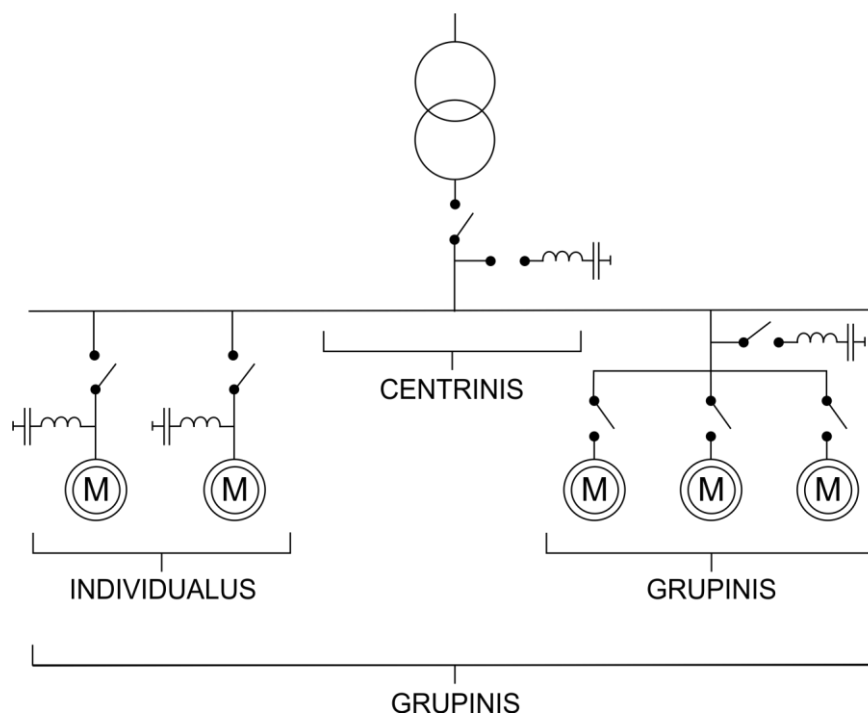
Lygiagretūs filtrai, dar vadinami šuntuojančiais, sujungiami lygiagrečiai kintamos srovės linijoms ir turi būti parinkti tik srovės harmonikoms susidariusioms nelinejiniėje apkrovoje.



15 pav. Lygiagretaus filtro veikimo principas

2.7 Harmonių filtrų įrengimas

Sprendžiant elektros tinklo kokybės gerinimo problemą būtina panaikinti aukštųjų harmonikų atsiradimo galimybę, kad užtikrinti kondensatorių baterijai pagrindinės paskirties vykdymo sąlygas, t.y. kompensuoti reaktyviają galią. Taip pat reikalinga sudaryti srovės harmonikų lokalizacijos sąlygas keitiklio pajungimo prie tinklo vietoje, panaudojant kondensatorių baterijos elementus, kaip pagrindinę energetinio filtro bazę. Elektrotechniniai įrenginiai, skirti praktiniam šios problemos sprendimui vadinami kaip filtravimo–kompensavimo įrenginiai. Jų paskirtis yra užtikrinti reaktyvios galios kompensavimą ir tuo pačiu laiku vykdyti aukštųjų harmonikų filtraciją. Kondensatoriai parenkami atsižvelgiant į gebėjimą prisitaikyti prie galios, aukštesniųjų harmonikų filtracijos poreikį, valdymo ir veikimo greitį. Kompensavimo-filtravimo įrenginys parenkamas dviem būdais: pagal žinomus elektros energijos kokybės parametrus arba teoriškai. Pats tiksliausias ir teisingiausias metodas yra įvertinus elektros energijos kokybinius parametrus. Šis metodas visada naudojamas jau esamose elektros sistemose išanalizavus tinklo parametrus. Teorinis būdas naudojamas naujai projektuojamuose elektros tinkluose.



16 pav. Kompensavimo-filtravimo įrengimo būdai

Kompensavimo įrenginio įrengimo metodai:

- Individualus įrenginių kompensavimas-filtravimas, tai kaip prie kiekvieno įrenginio įrengiamas šiam įrenginiui būdingų charakteristikų įrenginys. Šis įrenginys ne tik

kompensuoja jo reaktyviają galią, bet ir filtruoja harmonikas. Pasirenkant tinkamiausią reaktyvios galios kompensavimo ir filtravimo schemą reikia įvertinti įrenginių veikimo laiką, apkrautumą, harmonikas ir kt. parametrus. Daugelyje įmonių yra įrenginių, kurie dirba tik kelias valandas per dieną, tokiems įrenginiams individualus kompensavimo-filtravimo būdas netinka, dėl kainos ir atsiperkamumo laikotarpio. Individualus kompensavimas-filtravimas yra efektyviausias, kai reaktyviają galią naudoja nedaug įrenginių, bet jos sunaudojama daug ir ilgą laiką. Individuali kompensacija-filtracija, tai pats paprasčiausias sprendimo būdas. Toks kompensavimo-filtravimo būdas labiausiai tinka variklių reaktyviai galiai ir harmonikoms kompensuoti. Jeigu yra vienas probleminis įrenginys elektros sistemos dalyje, tai yra pats geriausias ir pigiausias pasirinkimas.

- Grupinis kompensavimo-filtravimo būdas naudojamas jeigu tam tikroje elektros tinklo dalyje yra susitelkę įrenginiai, kurie skleidžia daug harmoninių dedamųjų ir reaktyviosios galios. Šio kompensavimo būdo įrangos kaina yra pigesnė.
- Centrinis kompensavimo-filtravimo būdas labiausiai paplitęs ir naudojamas Lietuvoje. Šis būdas apima visą įmonės ar elektros tinklo dalį. Centralizuota kompensacija naudojama kai svyruoja apkrovos ir reaktyviosios galios sunaudojimas. Šiame kompensavimo-filtravimo įrenginyje naudojamas kompensavimo įrenginys su automatiniu valdymu.

Kompensavimo įrenginio su filtrais pasirinkimas pagerina elektros kokybę ir patikimą įrenginių veikimą. Minimalus šio įrenginio tarnavimo laikas yra 10 metų, tačiau dažnai pasitaiko ir trumpesnių eksploatavimo laikotarpių. Eksploatavimo laiką įtakoja šie veiksniai: gamybinės patalpos kurioje sumontuotas kompensavimo-filtravimo įrenginys temperatūros palaikymas (geriausia įrenginio darbo temperatūra yra 70C), aukštesniųjų harmonikų poveikis, padidėjęs įsijungimų dažnis ir padidėjusios apkrovos, įtampos svyravimai, pigių kondensatorių naudojimas. Viena iš didžiausių įmonių problemų yra energetinio personalo kompetencijos trūkumas. Pasikeitus ar padidėjus technologiniams įrenginiams reikalingas ir kompensavimo-filtravimo įrenginio perskaičiavimas ir modifikavimas.

Reaktyvios galios kompensavimui ekonomiškiausia priemonė yra kondensatorių baterijos. Tenka įvertinti tai, kad kondensatorių prijungimas keičia tinklo įėjimo varžą, todėl kondensatorių talpinė ir tinklo induktyvioji varžos gali sukurti rezonansinį kontūrą. Kondensatorių baterijų perjunginėjimus gali vykdyti tiristoriai arba kontaktoriai. Nuo perjungėjų pasirinkimo priklauso viso įrenginio veikimo greitis ir kompensavimo rezultatas. Taip pat būtina įvertinti pakopų ir filtrų įsijungimą ir atsijungimą. Tikslus šių parametrų įvertinimas didina kompensavimo-filtravimo įrenginio našumą. Naudojant tiristorinius perjungiklius kondensatorių perjungimo laikas yra apie 60 ms. Tai užtikrina pereinamųjų procesų tikimybės sumažinimą iki minimumo. Kontaktoriai

perjungikliai tokiomis perjungimo greičių charakteristikomis nepasižymi, bet jie užtikrina suveikimą. Ši suveikimą fiksuoja kondensatoriaus patvirtinimo rezistoriai. Šis procesas užtrunka neilgiau kaip dvi minutes. Šiuo atveju kondensatoriai negali išvengti galios lūžių. Taip pat jie yra labai jautrūs dažnam perjunginėjimui, dėl kurio reikia juos tvarkyti ar keisti naujais. Kondensatoriaus iškrovimas lemia įrenginių efektyvumą. Todėl tarp kondensatorių baterijų įstatomi iškrovos moduliai.

2.8 Filtrų parinkimas ir rekomendacijos

Pasyvus filtras kompensuoja reaktyviają energiją ir pasižymi žymiu srovės filtravimo pajėgumu [3,4]. Įrengimas, kuriame turi būti statomas filtras, turi dirbti pakankamai stabiliai, su labai nedideliais apkrovos svyravimais. Jeigu didžiąją tiekiamos energijos dalį sudaro reaktyvioji energija, mažos apkrovos laikotarpiais pasyvų filtrą reikia išjungti. Analizuojant galimybę panaudoti pasyvų filtrą, reikia atsižvelgti ir į egzistuojančias kompensacijos kondensatorių baterijas, nes po pasyvaus filtro pastatymo jas gali tekti pašalinti.

Aktyvus filtras filtruoja harmonikas plačiame dažnių diapazone. Jis tinka naudoti prie visų apkrovų, tačiau jo apsaugos nuo harmonikų galia yra ribota.

Hibridinis filtras apjungia pasyvaus ir aktyvaus filtrų privalumus.

Lentelė 2. Filtrų parinkimas pagal panaudojimo sritį [9].

Panaudojimo sritis	Pasyvusis filtras	Aktyvusis filtras	Hibridinis filtras
Pastatas su tarnybinėmis patalpomis (kompiuteriai, oro kondicionavimo sistemos, apšvietimas, liftai)	*	***	**
Popieriaus, kartono, plastmasių pramonė (konvejerių sistemos, popieriaus vyniojimo ir išvyniojimo mašinos)	***	*	**
Vandens pramonė (pumpavimo stotys, valymo stotys)	**	***	***
Krovinių kėlimas ir pervežimas, krovininiai liftai	**	*	***

Paaiškinimai:

- *** - Pilnai tinkamas;
- ** - Pilnai tinkamas techniškai, tačiau toks sprendimas nėra rentabilus;
- * - Patenkinamas.

Kondensatorių baterijose srovės harmonikos taip pat sukelia papildomus energijos nuostolius. Dėl to kondensatoriai kaista ir gali sugesti. Kondensatoriai gali sugesti, jei tinkle susidarytų harmonikų rezonansas. Harmonikos gali sutrikdyti apsaugos įrenginių darbą ar pabloginti jų charakteristikas. Pažeidimo charakteris priklauso nuo įrenginių darbo principų. Labiausiai paplitę klaidingi suveikimai, kurie tikėtini apsaugos sistemose, dirbančiose varžų matavimo principu. Harmonikų poveikis indukciniams prietaisams, skirtiems galios matavimams ir energijos apskaitai taip pat akivaizdus - matavimo rezultatų paklaidas didina. Harmonikos turi įtakos galios grandinėms, interneto, telefono, bei kitoms ryšio linijų signalams [3]

2.9 Aukštesniųjų harmonikų filtrų skaičiavimas

Kompensavimo įrenginys parenkamas pagal objekto naudojamą maksimalią reaktyvinę galią. Norint tiksliai nustatyti, kaip kinta reaktyvinės galios dydis, koks yra tinklo įtampos netiesinių iškreipimų faktorius, rekomenduojama atlikti keletą matavimų elektros tinklo analizatoriumi. Kiekvienai srovinei harmonikai parenkamas filtras pagal maksimalias netiesinių iškreipimų faktorius (THD) vertes. Kai reaktyvinės galios vartojimas būna mažai kintantis (t.y. palyginti pastovus dydis, per ilgą laiko periodą), tada reaktyvinės galios skaičiavimas gali būti atliekamas pagal komercinės apskaitos reaktyvinės energijos parodymus.

Kondensatorių baterijos parinkimas filtrams

Apytikslė kondensatorių baterijos filtrams galia, kuri nustatoma pagal srovės harmonikas.

$$Q_A = \sqrt{3} \cdot 1,3 U_{\xi} I_V \quad (2.36)$$

čia U_{ξ} - Pastotės šinų vardinė įtampa, V; I_V - Srovės harmonikų skaičiuojamieji dydžiai, A.

Kiekvienam filtrui priimama kondensatorių baterijos galia Q_s , kvar.

Harmonikų slopinimo efektyvumo koeficientas priimtai kondensatorių baterijai sąlyginiais vienetais:

$$k_p = \frac{Q_s}{S_{tr.j.}} \quad (2.37)$$

čia $S_{tr.j.}$ - Trifazio trumpo jungimo pilnoji galia pastotės šinose, VA.

Koeficientas, kuris charakterizuoja įtampos padidėjimą kondensatoriams skaičiuojamas darbiniam dažniui lyginant su nominaline šynų įtampa sąlyginiais vienetais:

$$\alpha_p = \frac{v^2}{v^2 - 1} \quad (2.38)$$

Koeficiento, kuris charakterizuoja kondensatorių baterijas pagal įtampos atsarga, įvertinant baterijos nominaline ir tinklo įtampa:

$$k_{ats} = \frac{U_s}{\sqrt{3} \cdot U_{nom.b}} \quad (2.39)$$

čia $U_{nom.b}$ - Nominali kondensatorių baterijos įtampa, V.

Kondensatorių baterijos patikrinimas pagal viršįtampius, nusistovėjusiame režime:

$$\alpha_p \cdot k_{ats} \leq 1 \quad (2.40)$$

Koeficiento, kuris įvertina dažnio charakteristikos netiesiškumą, filtru įtaką jos deformacijai ir nuokrypis filtru parametru įtakai, dydžiui atitinkančiam rezonansiniam suderinimui:

$$\eta_v = \frac{\alpha}{k_1 \cdot k_p \cdot v^2} \quad (2.41)$$

Apkrovimo koeficiento nustatymas pagal v -tos harmonikos

$$k_{iv} = \frac{1}{1 + \eta_v} \quad (2.42)$$

Kondensatorių baterijos galios patikrinimas pagal sąlygą, išvengiančia kondensatorių perkrovimo pagal srovę:

$$Q_{pa.} = \frac{3U_{nom.b} \cdot I_v \cdot k_{iv}}{1,6 - (\alpha_p \cdot k_{ats})^2} \quad (2.43)$$

čia $Q_{pa.}$ - kondensatorių baterijos reaktyvioji galia, kvar.

Reaktyvi galia, kuri sukuria filtrų kondensatorių baterijos, kvar

$$Q_{su.} = Q_{pri.} (\alpha_p k_{ats.})^2 \quad (2.44)$$

čia $Q_{su.}$ - filtrų baterijos reaktyvioji galia, kvar.

Filtrų reaktorių parinkimo skaičiavimas

Kondensatorių baterijos vienos fazės talpinės varžos nustatymas, Ω

$$x_{cv} = \frac{3U_{nomb}^2}{Q_{pri}} \quad (2.45)$$

Induktyviosios reaktorių varžos nustatymas pagal rezonanso sąlygas, Ω

$$x_{rv} = \frac{x_{cv}}{v^2} \quad (2.46)$$

Nominalinė reaktoriaus srovė, A

$$I_{nomr} \geq \frac{Q_{pri}}{\sqrt{3}U_{\xi}} \quad (2.47)$$

Reaktyvioji reikšmė, %

$$x_r = \frac{\sqrt{3}I_{nomr}x_{rv}}{10U_{nomr}} \quad (2.48)$$

Reaktoriaus induktyvumas, mH;

$$L_v \geq \frac{x_v}{2\pi f v} \quad (2.49)$$

Vijų skaičius, n

$$n_v = \sqrt{\frac{L_v}{\lambda D \cdot 10^{-4}}} \quad (2.50)$$

Laido skerspjūvio plotas, mm²

$$S_v = \frac{I_{nom,r}}{\rho} \quad (2.51)$$

Eilių skaičius. Tarpas tarp eilių $c = 4,5 \cdot 10^{-3}$

$$r = \frac{h + c}{c} \quad (2.52)$$

Vijų skaičius horizontalinėje plokštumoje.

$$k_v = \frac{n_v}{r} \quad (2.53)$$

Ritės apvijų laidų išdėstymas.

$$\begin{aligned} b_v &= a \cdot k_v \\ D_1 &= D - b_v \\ D_2 &= D + b_v \end{aligned} \quad (2.54)$$

čia $D = 0,1$

Atstumas tarp gretimų vijų eilių $a = 3,5 \cdot 10^{-3}$

Filtrų kokybės skaičiavimas

Vidutinis apvijos ilgis, m

$$l = \pi D \quad (2.55)$$

čia $\pi = 3,14$

Bendras vijų ilgis atskiroms harmonikoms, m

$$L_v = l \cdot n_v \quad (2.56)$$

Aktyviojo filtro varža pagal harmonikos ilgį, Ω

Vario tankis $\rho = 0,018 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$

$$R_v = \rho \frac{L_v}{S_v} \quad (2.57)$$

Filtro kokybė

$$d_v = \frac{x_{rv}}{R_v} \quad (2.58)$$

3. TYRIMŲ TIKSLAS IR UŽDAVINIAI

Tyrimo tikslas – naudojant įvairių objektų elektros tinklo kokybinius parametrų rodmenis ir elektros tinklo analizatorių, išmatuoti ir išanalizuoti elektrinius parametrus, taip pat įvertinti išanalizuoto elektros tinklo įtampos asimetrija, sinusiškumą, aukštesniųjų harmonikų, reaktyvios galios įtakas tinklo kokybei. Gautus elektros tinklo parametrus palyginti su elektros kokybę reglamentuojančiais standartais siekiant patvirtinti arba paneigti prielaidas dėl elektros energijos kokybės ir jos įtakos įrenginių darbui. Netenkinantiems numatytų standartų elektros tinklams, pasiūlyti elektros tinklų kokybės gerinimo būdus. Būdingoms elektros tinklo charakteristikoms parinkti tinklo kokybės gerinimo filtrus.

Tyrimo uždaviniai:

1. Surinkti ir išanalizuoti literatūrą elektros energijos kokybės gerinimo priemonių efektyvumo klausimu.
2. Atlikti elektros tinklo kokybinius ir energetinius matavimus prieinamuose įvairios paskirties objektuose.
3. Atlikti svarbiausių energetinio tinklo kokybės parametrų - įtampų ir srovių nesinusiškumo matavimus
4. Nustatyti asimetrijos ir aukštesniųjų harmoninių dedamųjų atsiradimo energetiniame tinkle priežastys, jų dėsningumus ir būdus jiems sumažinti.
5. Tinklo kokybės gerinimui parinkti filtrus būdingoms elektros tinklo charakteristikoms.

Tyrimo objektas - įvairios paskirties ir pajėgumų pramoninių, maitinimo, administracinių, mokymo įstaigų, laisvalaikio ir pramogų centrai, gyvenamųjų namų 0,4 kV elektros skirstomųjų tinklų įvada, kuriais maitinama visa reikalinga technologinė įranga. Atlikti matavimai elektros tinklo analizatoriumi, bei elektros tinklų kokybinių ir kiekybinių parametrų statistiniai rodmenys, surinkti iš kitų šaltinių.

Pagal informacijos šaltinių apžvalgą elektros tinklų parametrai skaičiuojami gana įvairiai. Tai siejama su tam tikrais sunkumais išmatuojant parametrus - nesinusiškumą ir harmoninių dedamųjų sekas. Tai parametrai, kurių negalima išmatuoti tiesioginio matavimo prietaisais arba jie yra greitaveikiai ir ilgesniam matavimo periodui reikia sudėtingos aparatūros su didele vidine atmintimi. Nulinėms ir atvirkštinėms harmoninėms dedamosioms užfiksuoti reikalingos fazinės ir linijinės srovės ir įtampos. Tuo tarpu senesni elektros tinklo analizatoriai pritaikyti matavimams keturlaidėje sistemoje su nuliniu tašku, todėl linijinės įtampos yra apskaičiuojamos prietaiso procesoriaus (taip pat ir nulinio laidininko srovė) [18]. Todėl praktiniams darbams pritaikomos matematinės išraiškos, leidžiančios pakankamu tikslumu apskaičiuoti srovių ir įtampų harmonines dedamąsias. Kadangi nesinusiškumą sukelia netiesinių charakteristikų įrenginiai, generuojantys

aukštesniašias harmonikas, o asimetriją netolygiai apkrautos fazinės linijos, tai šių parametru fiksavimas ir apskaičiavimai buvo pagrindiniai. Eksperimentui buvo pradėtas naudoti elektros tinklo analizatorius Metrel MI2192.. Tačiau norint fiksuoti visus parametrus vienu metu iškilo didelė problema su aparato vidine atmintimi kuri buvo maža.

Buvo pradėta matuoti su didesnę vidinę atminti turinčiu tinklo analizatoriumi. Pradėtas naudoti elektros tinklo analizatorius C.A. 8335. Juo galima nustatyti ir užregistruoti elektros energijos paskirstymo sistemų parametrus, juos analizuoti ir saugoti su gamintojo pateikiam Power Analyser programine įranga bei atlikti matavimus realiame laike. Specialaus registravimo režimo pagalba aparato ekranėlyje galima stebėti tiriamosios maitinimo sistemos signalų formas, jos kokybę, parametrus, kurie palyginami su EN 50160 standartu, taip pat dažniausiai pasitaikančius trikdžius, bei išsaugoti iki 50 ekrano vaizdų. Lyginant šį aparatą su Metrel MI2192, kurio vidinė atmintis buvo 3 MB, elektros tinklo analizatorius C.A. 8335 turi 2 GB.

Vartotojas gali pasirinkti visus duomenų registravimo režimus:

- periodinį registravimo režimą
- signalų kreivių registravimo režimą
- trumpalaikių trikdžių registravimo režimą
- greitąjį registravimo režimą
- EN 50160 registravimo režimą

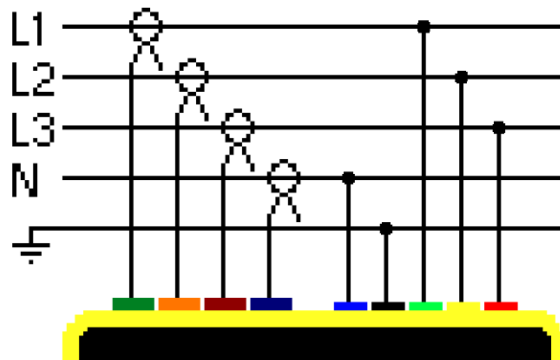
Prietaiso tikslumas: įtampos matavimui paklaida $\pm 0,5\%$ nuo nuskaitymo, srovės matavimui $\pm 0,5\%$ nuo nukrypimo, srovės replių paklaida įvertinama atliekant matavimus. Gamintojas pateikia visų galimų replių ir matavimo prietaiso paklaidas, bei formules kaip jos įvertinamos [19].

Duomenų registravimą, kiekvienam registravimo režimui galima vykdyti rankiniu būdu (vartotojas pats paleidžia duomenų registravimo funkciją ir pats ją sustabdo) arba automatiškai (registravimas pradedamas ir užbaigiamas vartotojo nustatytu laiku). Duomenų registravimo trukmė priklauso nuo pasirinkto integravimo periodo (galima pasirinkti nuo 1 s iki 30 min.). Gauti registravimo rezultatai yra išsaugomi analizatoriaus C.A. 8335 vidinėje atmintyje. Atliekant duomenų registravimą, išsaugojimą bei analizavimą, naudojant elektros tinklo kokybės analizatorių C.A. 8335, buvo naudojamos priemonės, kurios pavaizduotos 15 pav. Tinklo kokybės analizatorius, krepšys, matavimo laidai 9 vnt., kontaktinės įtampos replės 5 vnt., maitinimo blokas ir laidas, USB kabelis ryšiui su kompiuteriu, programinė įranga „Power Analyser and control“, vartotojo instrukcija. Srovės replės į bazinę komplektaciją neįeina jas reikia įsigyti atskirai.



17 pav. Elektros tinklo energijos kokybės analizatoriaus C.A.8335 komplektacija

Matavimams atlikti buvo pasirinktas EN 50160 standarto registravimo režimas, tai pat kai kuriems tinklo parametrams užfiksuoti rankiniu būdu buvo pasirenkami kiti registravimo režimai. Didžioji dalis duomenų registravimo buvo vykdoma automatinio būdu. Duomenų registravimo laikas pasirinktas 10 minučių intervalu, matuojant 1 paros laikotarpyje. Matavimų metu buvo registruojami šie parametrai: kiekvienai fazei U_1 , U_2 , U_3 , I_1 , I_2 , I_3 , galios dydžiai (W , VA , var , DF , DPF , $\cos \varphi$, $\tan \varphi$) kiekvienai fazei, energijos dydžiai (Wh , $varh$, VAh) THD, harmonikos (3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 21). Matavimams pasirinkta penkialaidė pajungimo schema, pavaizduota 16 pav. [19]. Naudotos srovės replės AmpFLEX™ A193 450mm (30-6500 A) ir MN93A (0.1A iki 120AAC, 0.05A iki 5AAC). Matavimo tikslumas pagerintas, naudojant mažesnės vertės srovės replės, kurios turi dvi matavimo tikslumo pakopas. AmpFLEX™ A193 tipo replės buvo pasirinktos dėl didelio kabelių skerspjūvio aprėpimo bei kitų faktorių.



18 pav. Prietaiso prijungimas prie penkialaidės tinklo sistemos



19 pav. Srovės replės AmpFLEX™ A193 ir MN 93A

Atliekant matavimus, duomenys buvo registruojami keletą kartų įvairiais laikotarpiais: 1 parą arba vieną savaitę, taip pat buvo keičiamas duomenų registravimo intervalas, priklausomai nuo norimo užfiksuoti proceso pobūdžio. Vidutiniškai fiksuojama apie 10000 matavimo rezultatų vienam objektui. Elektros tinklo energijos kokybės analizatoriaus užregistruoti duomenys programiškai perkeliama į kompiuterį, naudojant „Power Analyser“ programą. „Power Analyser“ duomenys buvo apdoroti pagal gamintojo pateiktus būdus. Po to duomenis buvo perkelti į „Microsoft office Excel“ programinį paketą, kuriame buvo atlikti statistiniai analiziniai skaičiavimai bei grafika. Prieš matuojant, prietaise pasirenkami fiksavimo parametrai, pradžios ir pabaigos laikas.

Tyrimams buvo pasirenkami įvairios paskirties objektai, kurie maitinami tiesiogiai iš pastotės. Matavimams atlikti buvo reikalingi leidimai. Privačių įmonių savininkai nebuvo suinteresuoti sužinoti matavimų rezultatus, nes pastebėjus didelius srovės ar įtampos harmonikų rodmenis, elektros skirstomųjų tinklų operatorius gali pareikalauti įsirengti harmoninius filtras. Atliekant matavimus, iškilo problema prisijungiant prie įvadų dėl kompaktiškai paklotų kabelių, nes prietaiso srovės replės gana masyvios ir netelpa elektros spintoje. Visa matavimo įranga taip pat užima daug vietos. Dėl didelių įrangos gabaritų nuspręsta matuoti tik tuos objektus, kurie turi tiesioginį maitinimą iš pastotės. Taip išspręsta ir įrangos palikimo ilgesniam laikui ir leidimų atlikti matavimus problema.

Elektros tinklo analizei buvo pasirenkami objektai, turintys vienokių ar kitokių elektros tinklo problemų: netinkamos įtampos dydžio, didelių nulinio laidininko srovių ar galimai gausių harmoninių dedamųjų. Šie tyrimo objektai buvo suskirstyti į keletą grupių: pramonės įmonės, administraciniai pastatai, gydymo įstaigos, kavinės, laisvalaikio ir pramogų centrai, mokymo įstaigos.

Apžvelgiant eksperimentinio tyrimo matavimų rezultatus, galima daryti išvadą, kad nesinusiškumo dėl aukštesniųjų harmonikų įtakos problema šiuolaikiniuose elektros tinkluose darosi vis labiau aktualesnė.

4. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APIBENDRINIMAS

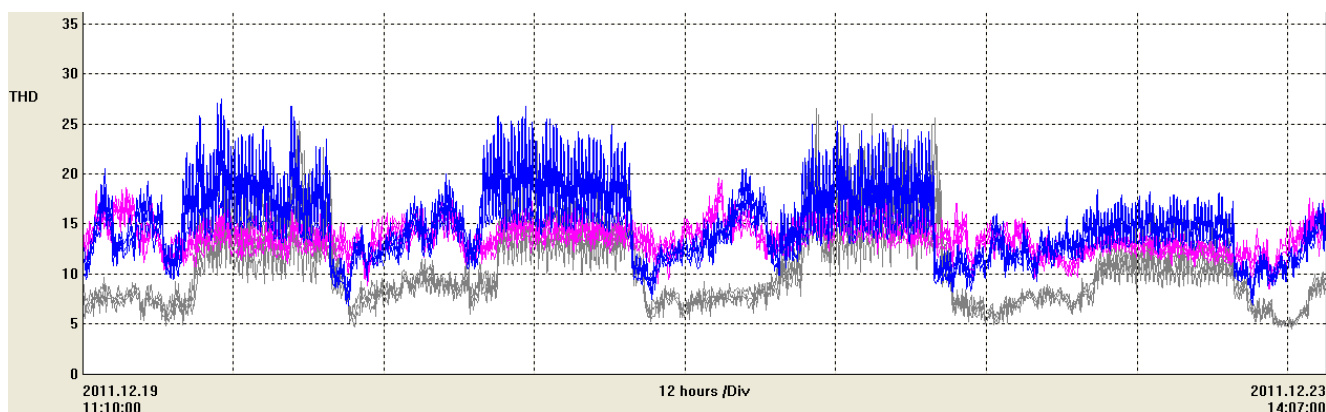
Matavimams atlikti buvo ieškoma suinteresuotų įmonių, kurioms būtų aktualus elektros kokybės parametrų tyrimas, bei galimybė šiais tyrimais pasinaudoti savo elektros tinklo efektyvumo gerinimui. Šie tyrimai padėtų išigyti įvairios paskirties prietaisus apsaugančius nuo galimų pavojų. Kadangi tokių suinteresuotų įmonių neatsirado, atliekant tyrimą, buvo bendradarbiaujama su Lietuvos skirstomųjų tinklų operatoriaus (LESTO) dispečerinio valdymo departamento darbuotojais.

Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti 22-iuose įvairiuose objektuose, kurie buvo suskirstyti į šešias grupes. Viena iš grupių - pramonės įmonės, kuriose vykdoma skirtinga veikla, gamyba arba surinkimas. Šių tirtų pramonės įmonių deklaruojama vartojama galia yra apie 100 kW. Pasirinktose pramonės objektuose dominavo reaktyvioji galia bei tinklo asimetrija. Dauguma pasirinktų įmonių naudojo sena ar jau pasenusią įrangą atsivežtą iš kitų šalių, kuri yra neefektyviai išnaudojama. Antroji analizuojama grupė buvo administraciniai pastatai, kuriuose daugiausiai vyrauja netiesiniai imtuvai, tokie kaip: kompiuterizuotos darbo vietos, vėdinimo ir kondicionavimo sistemos, fluorescenciniai šviestuvai ir kita biuro įranga. Ištirtuose laisvalaikio ir pramogų centruose, kurių darbas nėra pastovus, nes čia dažniausiai dirbama poilsio dienomis, vyrauja daug apšvietimo įrenginių su elektroniniu uždegimu, puslaidininkinių lygintuvų ir srovės keitiklių bei kitos įrangos. Išanalizuotų mokymo įstaigų pagrindiniai elektros imtuvai yra fluorescenciniai ir dujų išlydžio šviestuvai, kompiuterinė įranga ir kiti elektros imtuvai, naudojami mokymo tikslams. Kavinėse naudojamą elektros įrangą sudaro: apšvietimo įrenginiai, indukcinės krosnys, vėdinimo ir kondicionavimo sistemos bei kita įranga. Gydytojų įstaigose dominuoja labai jautrūs įtampos kokybei įrenginiai, kurie naudojami medicininiais tikslams bei kita elektros įranga, kuri reikalinga normaliam įstaigos funkcionalumui užtikrinti. Apibendrinti aktualiausi tyrimo rezultatai pateikiami lentelėse ir grafikuose.

Lentelė 3. Atliktų matavimų įvairiuose objektuose suvestinė

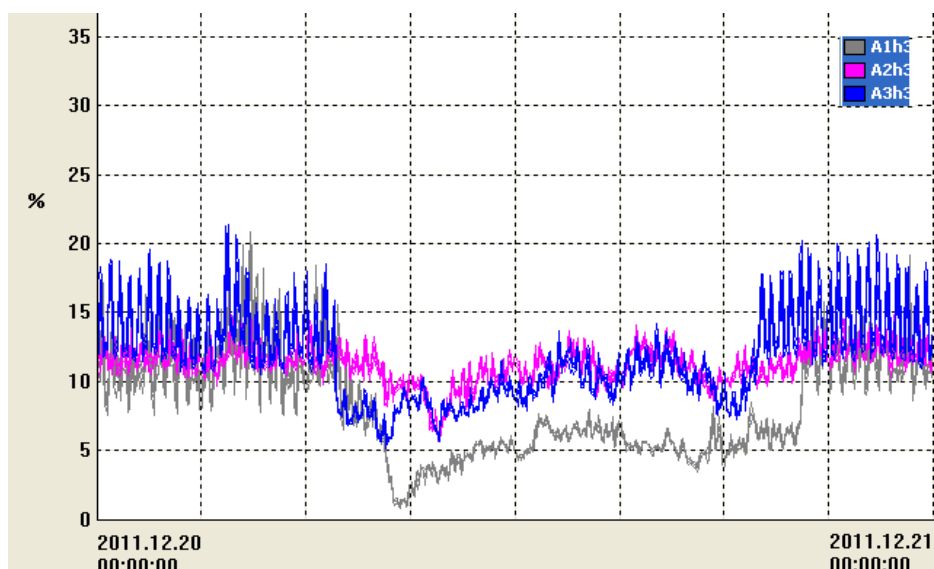
Objektai	Objektų skaičius
Pramonės įmonės	4
Administracijos pastatai	4
Laisvalaikio ir pramogų centrai	3
Mokymo įstaigos	4
Kavinės	3
Gydytojų įstaigos	4

Matavimo prietaisas, kuriuo buvo matuojami elektros kokybiniai parametrai, turėjo galimybę užfiksuoti matavimo rezultatus ilgą laiką. Prietaise buvo pasirinktas pakankamai mažas 1s integravimo periodas. Norint užregistruoti reikiamus elektros kokybinius parametrus, šis C.A. 8335 prietaisas, turėdamas 2 GB vidinę atmintį, gali įrašinėti duomenis 1s intervalu apie 2 savaites. Atliekant matavimus, dažnai buvo fiksuojami mažo pokyčio parametrai, kurie neturėjo didelės reikšmės tyrimo rezultatams.



20 pav. Bendras srovės harmonikų lygis THD (%) objekte

18 pav. pateiktame administracinio pastato grafike, aukštesnės eilės harmonikų užfiksuojama gana daug ir dažnai. Bendrame srovės harmonikų lygio 5 parų matavimo grafike pastebimas akivaizdus bendras harmonikų lygio išaugimas virš leistinų ribų. Fazių vidutinis THD_{avg} $I_1=10,4\%$, $I_2=13,6\%$, $I_3=14,8\%$, nors leistina yra $THD \leq 8\%$. Maksimalios netiesinių iškreipimų faktoriaus vertės THD_{max} $I_1=26,6\%$, $I_2=19,7\%$, $I_3=27,6\%$. Galima pastebėti, kad didžiausios netiesinių iškreipimo faktoriaus vertės buvo pasiektos nedarbo metu, kai tinklas buvo mažiausiai apkrautas. Darbe analizuotoje literatūroje buvo pastebėta, kad daugelis tyrimų buvo atlikta darbo valandomis, todėl nepavykdavo užfiksuoti didelių netiesinių iškreipimo faktoriaus verčių.



21 pav. Trečiosios harmonikos reikšmės (%)

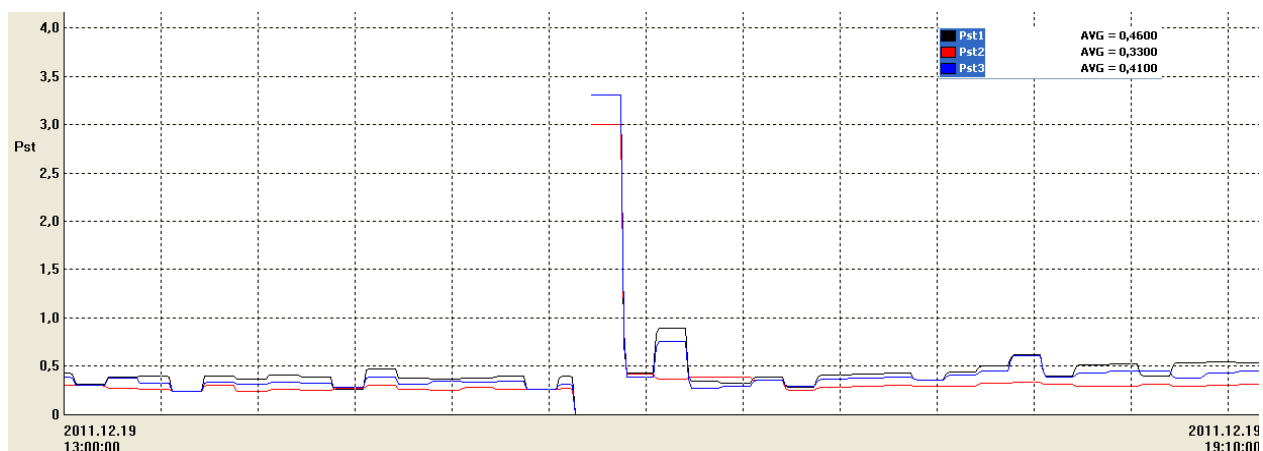
Administraciniame objekte užfiksuota didelė trečios harmonikos įtaka bendrajam netiesinių iškreipymų faktoriui 19 pav.. Trečiosios harmonikos leistinos ribos yra viršijamos kelis kartus. Kaip pastebima 4 lentelėje, šiame administraciniame pastate yra daug netiesinės apkrovos įrenginių. Taip pat didelę įtaka gali turėti blogas pastato izeminimo kontūro įrengimas, o galbūt visiškai jo nebuvimas įvadinime skyde.

Lentelė 4. Įrangos kiekis administraciniame pastate

Eil. Nr.	Įrangos pavadinimas	Kiekis objekte	Vidutine vieno įrenginio galia, kW
1	Kompiuterinė darbo vieta	147	0,55
2	Spausdintuvai, kopijuokliai	109	0,9
3	Serverinė	1	20
4	Fluorescencinių lempų šviestuvų	238	0,144
5	Šaldytuvai	6	0,75
6	Elektrinė orkaitė	2	2,8
7	Kita valgyklos įranga	5	2
8	Kondicionieriai	24	2,5
9	Kompaktinės taupančios lemputės	114	0,017

Kadangi komerciniuose objektuose vyrauja mažos galios harmoninių dedamųjų generavimo apkrovos, iš pateiktos 4 lentelės galima pastebėti, kad administraciniame pastate didžiausią apkrovą sudaro kompiuterizuotos darbo vietos. Šių darbo vietų bendroji galia 80,85 kW, kurią sudaro:

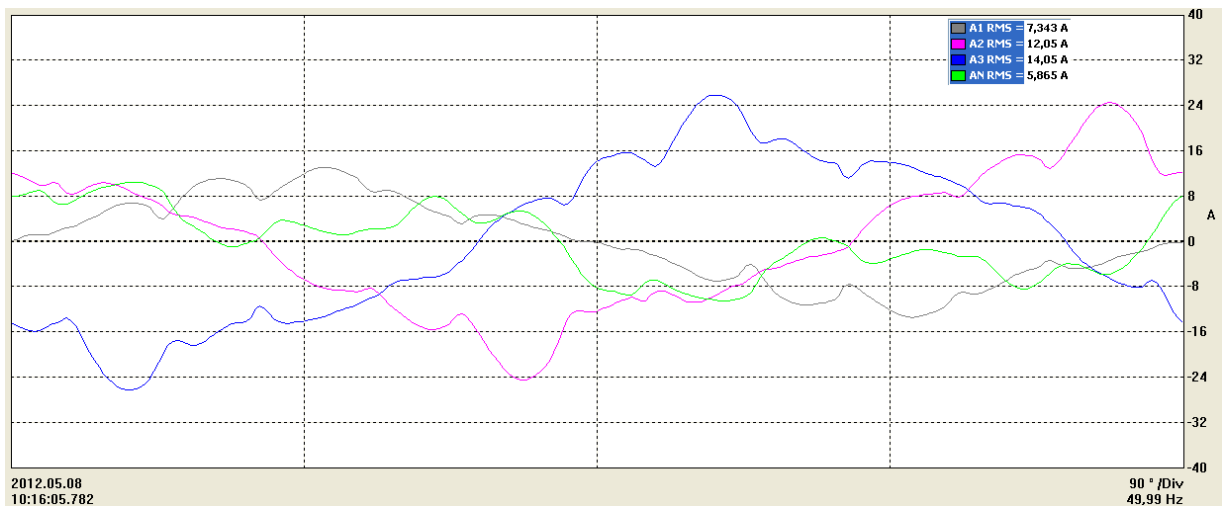
kompiuteris, monitorius ir garso kolonėlės. Taip pat didelę įtaką turi apšvietimas ir kondicionieriai. Administraciniame pastate buvo užfiksuotas trumpalaikis mirgėjimas, jis pateiktas 20 pav..



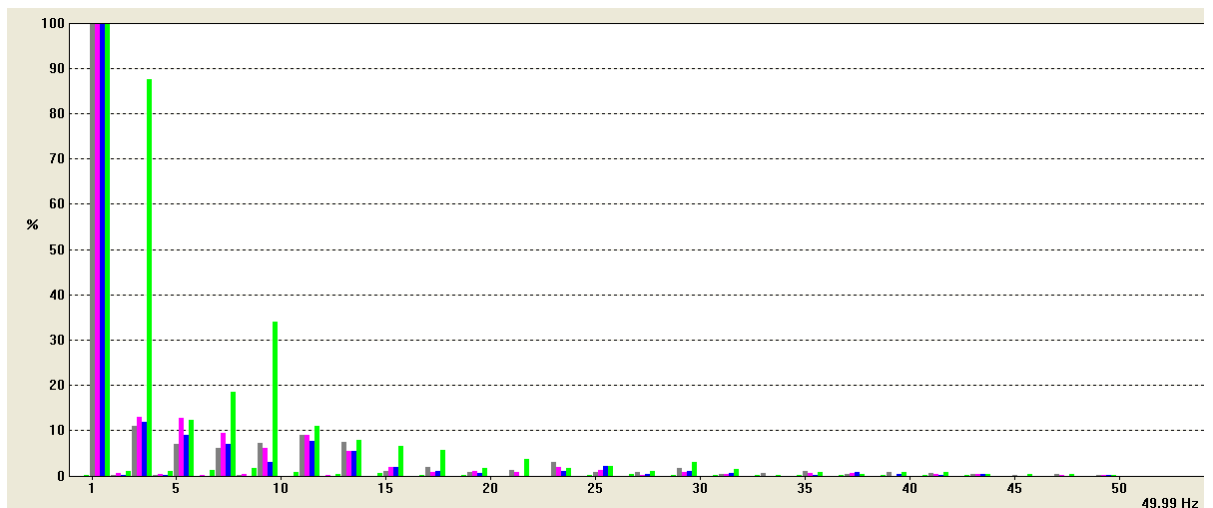
22 pav. Mirgėjimo aštrumas (%)

Analizuojant kodėl įvyko šis mirgėjimas, paaiškėjo, kad rajoninėje pastotėje dėl šiluminės rėlės suveikimo atsijungė 110/10 kV transformatorius. Kol suveikė ARI šis mirgėjimas turėjo būti jaučiamas ne vien tik šiame objekte, o visuose kuriuos maitino ši rajoninė pastotis. Dėl šio mirgėjimo, kuris truko apie 5 min., buvo įtakojamas įmonių darbas: sustojo gamyba, išsijungė kompiuteriai ir elektronikos prietaisai, atsirado trumpalaikės darbuotojų prastovos.

Atliekat matavimus, norint užfiksuoti sinusinę kreivę, reikia pasinaudojant aparate esančia funkcija fotografuoti ekranėlyje rodomus parametrus. Tačiau čia pastebimas vienas trūkumas - kritinėse parametrų ribose kreivės negalima užfiksuoti automatiniu būdu. Ši nuotrauka savyje išsaugo visus kreivės parametrus ir harmonikas, kurie lėmė kreivės formą. 21 pav. pateikiama viena iš daugelio kreivių, kurioje užfiksuota pramonės įmonės srovės nesinusiškumo kreivė. Šios kreivės nesinusiškumo parametrai, kurie įtakojo jos formą, pateikiami 22 pav.. Grafike pastebima akivaizdi trečios, penktos, septintos ir dešimtos harmonikos įtaka. Pilka spalva pateikiami pirmos, rožinė - antrosios, mėlyna - trečiosios ir žalia - nulinio laido srovės netiesinių iškraipymo faktoriaus parametrų reikšmės.



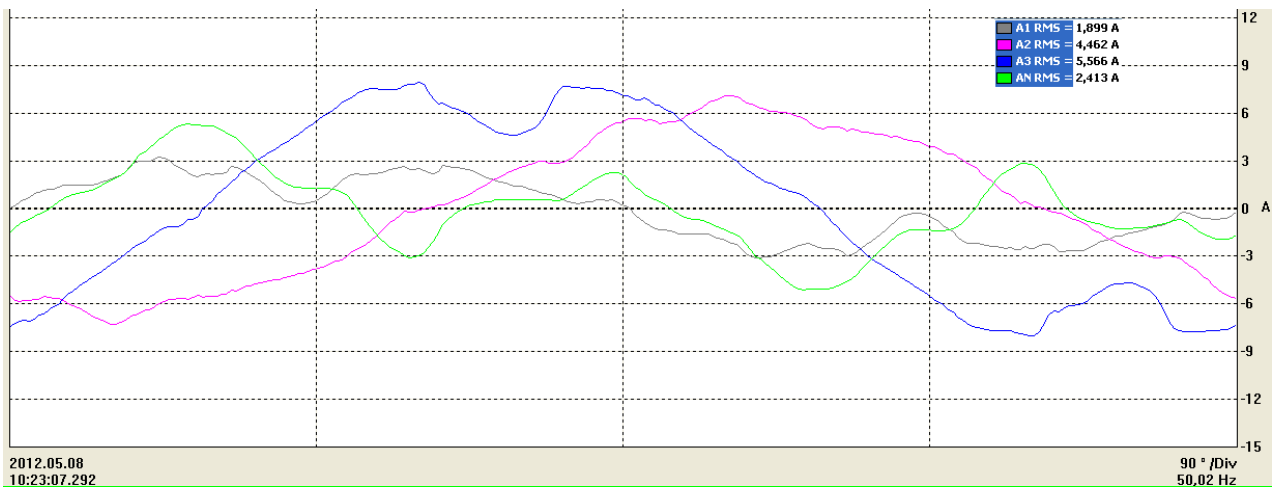
23 pav. Aukštesniųjų harmonikų sukelti srovės formos iškraipymai



24 pav. Harmonikų lygiai įtakoje srovės formą

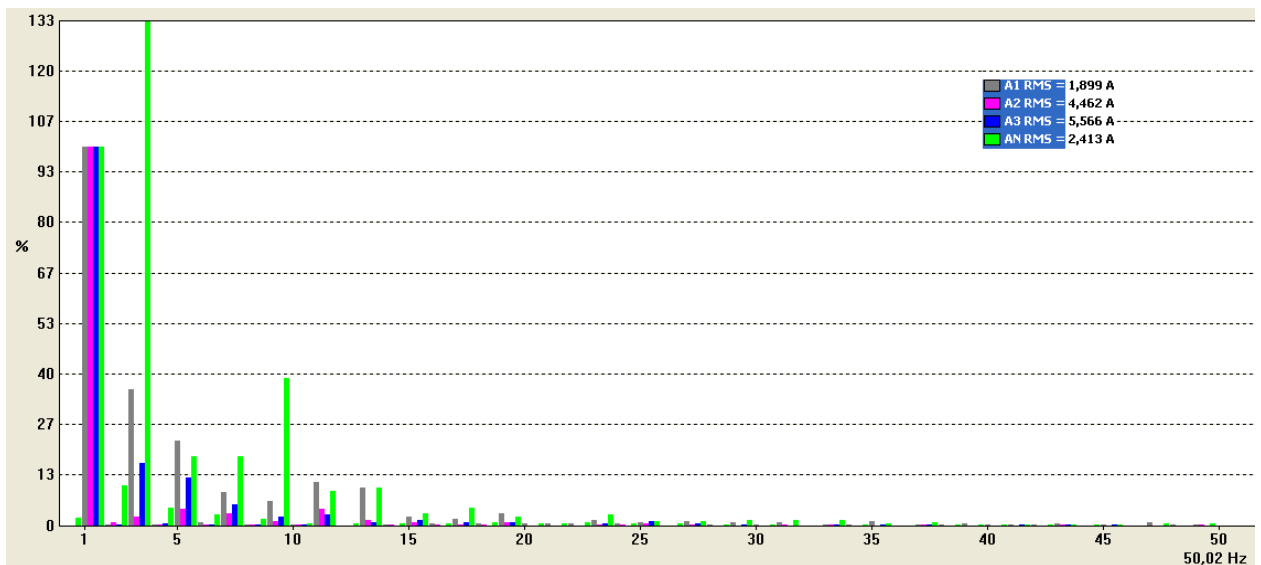
Lyginant analogiškos įmonės, kuri užsiima tokia pačia veikla, srovės nesinusiškumo kreives, pastebimas skirtumas. Ant šios įmonės stogo yra sumontuota saulės jėgainė. Iš 23 pav. grafiko matyti, kad šiame objekte yra daug srovės harmonikos dedamųjų. Grafike 24 pav. pastebima, kad nuliniame laide labiausiai pasireiškia harmonikos. Didžiausią įtaką turi 3, 5 ir 7 harmonikos. Šios harmonikos aktyviai pastebimos iki 40 harmonikos. Nors ir nedidelis kiekis yra didesnių nei 49 harmonika. Pagal standartą [1] yra susitarta matuoti iki 40 harmonikos, bet matavimuose buvo fiksuojamos harmonikos iki 50 eilės. Pastebėta, kad yra vyrauja ir didesnės eilės harmonikos, tik procentinės jų dalys nėra didelės.

Daugėjant saulės elektrinių prisijungimui prie elektros tinklų jų skleidžiamų harmoninių dedamųjų įtaka elektros tinklui darosi vis aktualesnė. 24 pav. matyti, kad objekte, kuriame yra prijungta saulės elektrinė nulinės sekos harmoninės dedamosios reikšmė siekia 133%.



25 pav. Aukštesniųjų harmonikų sukelti srovės formos iškraipymai.

Iš prietaiso parodymų dažnai pastebima, kad fazės šiuose objektuose apkrautos nevienodai. Harmonikų dydžiai fazėse taip pat yra skirtingi. Tai galima teigti, kad elektros imtuvai fazėse paskirstyti ne vienodai ir nėra tolygaus netiesinių imtuvų išdėstymo.

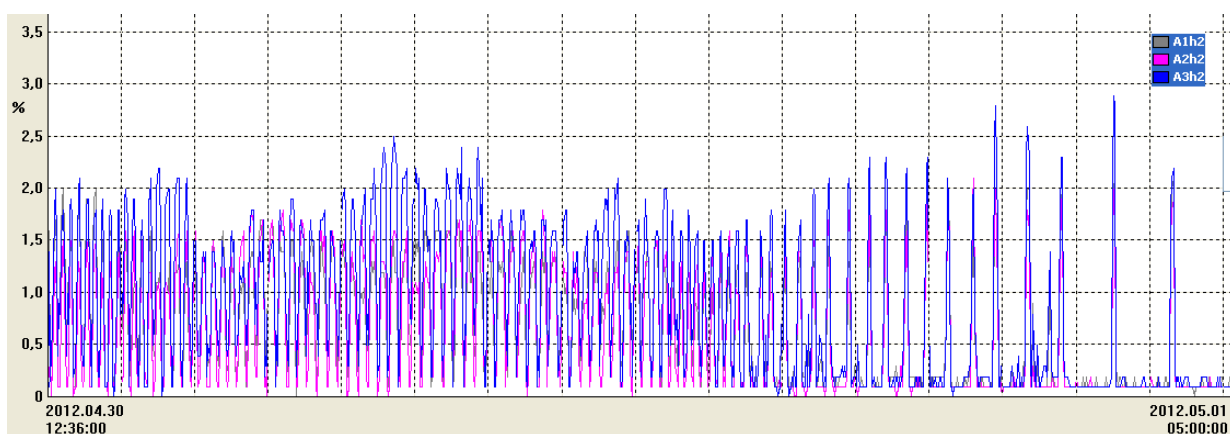


26 pav. Harmonikų lygiai įtakoje srovės formą 23 pav.

Saulės elektrinių ir kitų mažų generavimo šaltinių daromas poveikis elektros tinklų srautams, įtampos režimams, apsaugų darbui ir kitiems veiksniams dar nėra pakankamai ištirtas. Sparčiai daugėjant mažų generavimo šaltinių kiekiui, ši gamybos rūšis turi užtikrinti elektros srovės dažnio pirminį reguliavimą. Srovės harmonikų dedamųjų didelis akyvumas kelia grėsmę visiems įrenginiams, todėl būtina imtis rimtesnių veiksmų, tokių kaip harmoninių filtrų naudojimas, netiesinių imtuvų kiekio mažinimas, įžeminimų rekonstravimas ir kt. Didelę įtaką elektros tinklo darbui taip pat turi atvirkštinės sekos harmonikos.

Esant galingam energetiniam tinklui įtampos svyravimai jaučiami silpniau ir nesudaro didesnių problemų beveik visuose tirtuose objektuose. Kaip ir buvo tikėtasi visuose pramonės objektuose vyrauja reaktyvioji galia. Buvo pastebimos nelyginių įtampos ir srovės harmonikų vertės. Šios harmonikos, kėlė kitokią fluorescencinių lempų dažninį mirgėjimą, taip pat kenkė ir indukciniais prietaisams bei elektriniams įrenginiams ir jų darbui.

Atvirkštinės sekos (2 eilės) harmonikų didelių reikšmių nepavyko užfiksuoti. Grafike 25 pav. matyti, atvirkštinės sekos harmonikos rėžiai.



27 pav. Atvirkštinės sekos srovių harmonikos

Lentelėse 5-10 pateikiamos įtampos vidutinės aukštesniųjų harmonikų reikšmės (%) matuotose objektuose.

Lentelė 5. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose pramonės įmonėse

Obj. Nr.	Harmonikų eilės numeris									
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
1	6,05	6,42	3,64	2,02	2,15	1,18	0,63	0,97	0,95	0,74
2	8,53	7,21	4,14	2,45	2,09	1,03	0,56	0,73	0,79	0,62
3	5,97	6,01	5,21	2,73	2,29	1,17	0,61	0,58	0,57	0,46
4	9,12	8,89	7,75	6,54	4,12	2,01	0,97	0,95	0,91	0,87

Lentelė 6. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose administracijos pastatuose

Obj. Nr.	Harmonikų eilės numeris									
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
1	11,4	7,9	3,9	1,8	1	0,8	0,3	0,4	0,3	0,2
2	10,2	8,1	3,91	2,03	1,02	0,8	0,41	0,38	0,32	0,17
3	10,9	8,6	4,02	2	0,98	0,74	0,35	0,3	0,3	0,26
4	9,7	7,8	3,56	1,94	1	0,77	0,4	0,32	0,27	0,2

Lentelė 7. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose mokymo įstaigose

Obj. Nr.	Harmonikų eilės numeris									
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
1	8,7	7,5	3,62	1,7	1,13	0,9	0,48	0,44	0,21	0,1
2	9,1	7,3	4,04	2	1,2	1	0,6	0,52	0,25	0,14
3	8,5	7	4,2	2,1	1,1	1	0,5	0,41	0,2	0,11
4	8,9	7,7	3,8	1,9	0,9	0,7	0,4	0,31	0,14	0,1

Lentelė 8. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose gydymo įstaigose

Obj. Nr.	Harmonikų eilės numeris									
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
1	6,2	3,3	2,7	1,1	1	0,9	0,7	0,7	0,5	0,6
2	7,1	3,5	2,9	1,1	0,9	0,8	0,6	0,5	0,41	0,4
3	6	3,9	3	1,4	1	0,8	0,6	0,5	0,5	0,6
4	5,8	4	2,7	1	0,9	0,7	0,7	0,6	0,4	0,3

Lentelė 9. Vidutinės aukštesniųjų įtampos harmonikų reikšmės (%) matuotose laisvalaikio ir pramogų centruose

Obj. Nr.	Harmonikų eilės numeris									
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
1	3,4	3	2,8	1,7	1,1	0,9	0,61	0,4	0,2	0,1
2	3	2,8	2,2	1,2	1	0,8	0,7	0,3	0,3	0,15
3	2,8	2,7	2,8	1,5	1	0,7	0,5	0,42	0,26	0,12

Lentelė 10. Vidutinės aukštesniųjų įtampų harmonikų reikšmės (%) matuotose kavinėse

Obj. Nr.	Harmonikų eilės numeris									
	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
1	5,8	4,2	3,1	2,2	1,1	0,9	0,45	0,32	0,3	0,25
2	5,6	3,95	3,3	2	1,4	0,8	0,38	0,4	0,23	0,18
3	6	4,6	4	1,8	1	0,84	0,4	0,25	0,3	0,2

Tyrimo metu atliekamas kondensatorių baterijos filtrų skaičiavimas administraciniam pastatui, kurio elektros kokybės parametrai buvo prasčiausi. Kompensavimo-filtravimo skaičiavimas yra labai imlus laikui procesas bei reikalaujantis įvertinti įvairius elektros tinklo parametrus. Šie skaičiavimai buvo atliekami remiantis 2.36-2.58 formulėmis. Buvo naudojama Mathcad programinė įranga, kuri leidžia keisti duomenis ir iškart matyti pakitusi rezultatą. Šie rezultatai leidžia greičiau ir efektyviau pritaikyti filtrus pasirinktai elektros sistemai. Pasirinktų objektų atlikti skaičiavimų rezultatai pateikiami 11, 12 lentelėse.

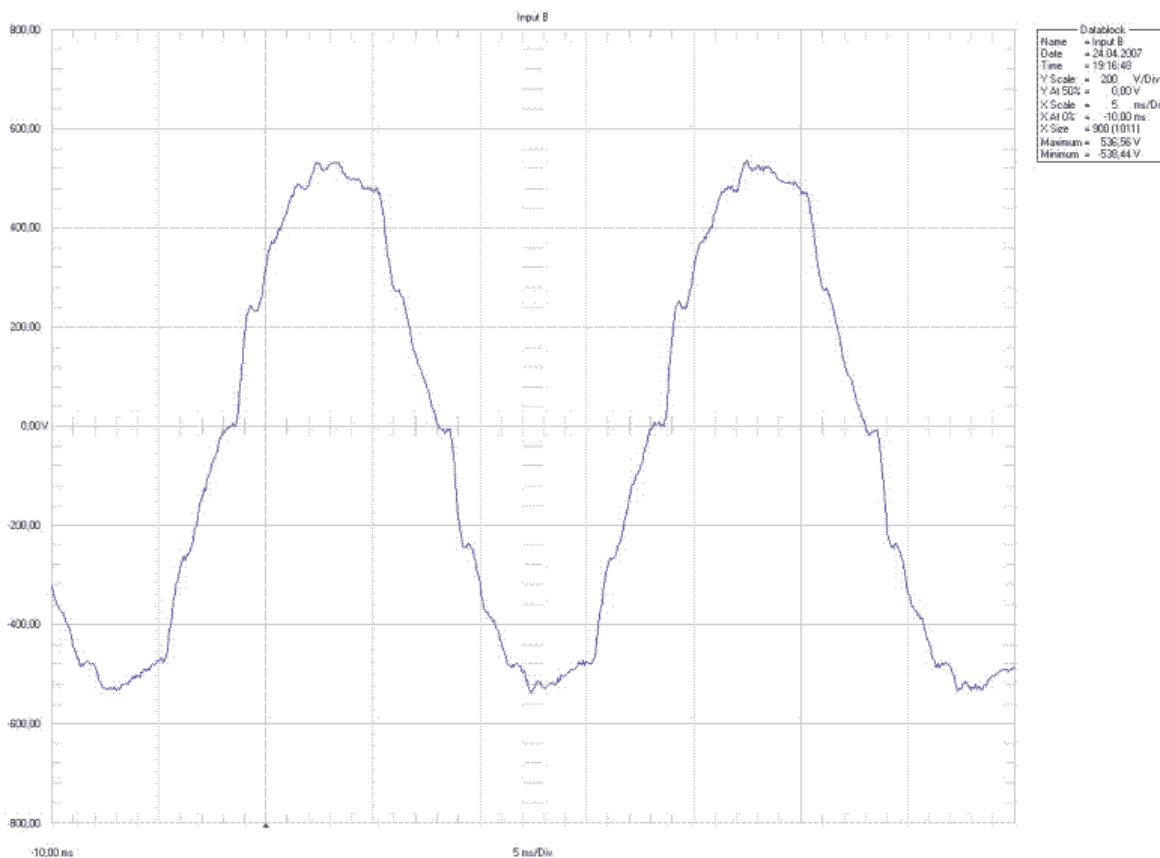
Lentelė 11. Kondensatorių baterijos skaičiavimas filtrams

Eil. Nr.	I _v	Q _A	Q _S	k _p	α _p	k _{ats}	H	η _v	k _{iv}	Q _{pa}	Q _{su}
3	15,3	13,78	16,7	0,16x10 ⁻²	1,125	0,577	0,65	-1,389	-2,571	-49,69	10,86
5	11,7	10,54	12,5	0,13x10 ⁻²	1,042		0,6	-0,615	2,597	36,46	7,5
7	10,5	9,46	10	0,1x10 ⁻²	1,021		0,589	-0,408	1,689	21,05	5,89
9	4,1	3,69	5	0,05x10 ⁻²	1,012		0,585	-1,235	-4,255	-20,63	2,93
11	4	3,60	5	0,05x10 ⁻²	1,008		0,582	-0,826	5,747	27,10	2,91
13	1,9	1,71	2,5	0,05x10 ⁻²	1,004		0,58	-0,592	2,451	5,48	2,9
15	1,3	1,17	2,5	0,05x10 ⁻²	1,004		0,58	-0,444	1,799	2,75	2,9

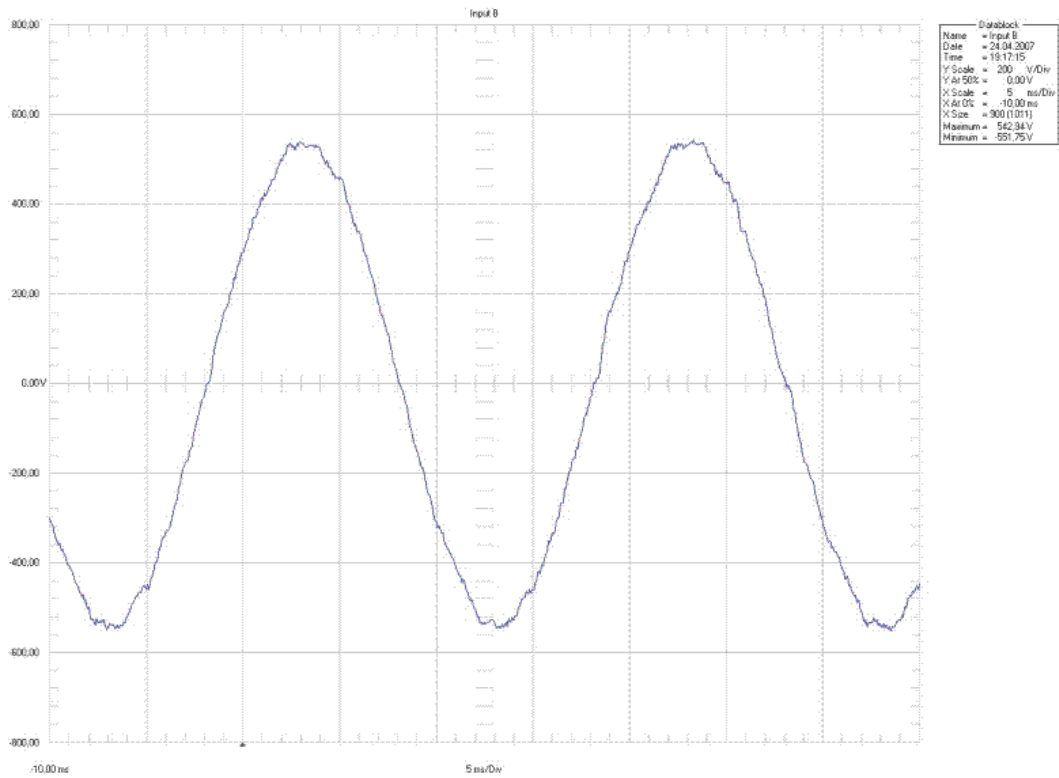
Lentelė 12. Filtrų reaktorių skaičiavimų rezultatai

Eil. Nr.	x _{cv}	x _{rv}	I _{nom,r}	x _r	L _v	n _v	S _v	k _v	b _v	D ₁	D ₂	l	L _v	R _v	d _v
3	28,74	3,19	24,10	33,29	3,39	222	16,1	9,65	0,033	0,067	0,133	0,314	69,71	0,08	39,88
5	38,4	1,54	18,04	12,03	9,81	378	12,03	16,43	0,058	0,042	0,152		118,69	0,13	11,85
7	48	0,98	14,43	6,12	0,45	81	9,62	3,52	0,012	0,088	0,112		25,43	0,05	19,6
9	96	1,19	7,22	3,72	0,42	78	4,81	3,39	0,012	0,088	0,112		24,49	0,07	17
11	96	0,79	7,22	2,47	0,23	58	4,81	2,52	0,009	0,091	0,109		18,21	0,06	13,17
13	96	0,57	7,22	1,78	0,14	45	4,81	1,96	0,007	0,093	0,107		14,13	0,04	14,25
15	96	0,43	7,22	1,34	0,09	36	4,81	1,57	0,006	0,095	0,105		11,30	0,03	14,33

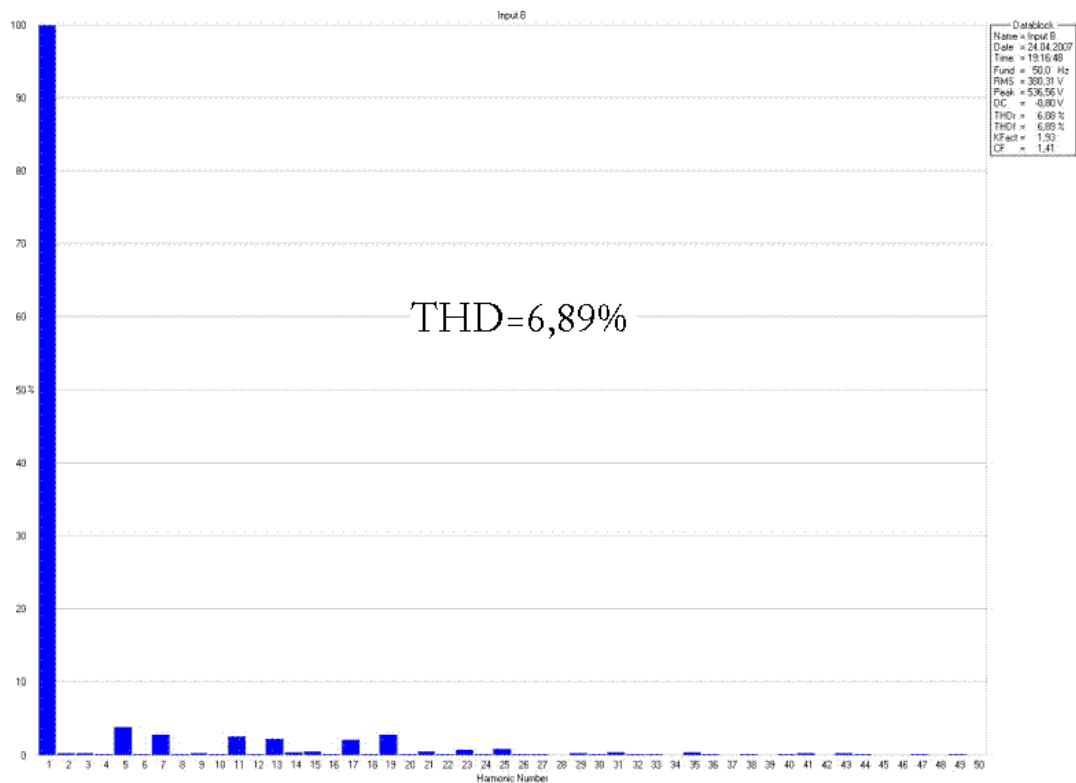
Bendradarbiaujant su įmone gaminančia ir diegiančia automatikos ir valdymo sistemas buvo gauti matavimai įmonės, kurioje buvo projektuojamas kompensavimo filtravimo įrenginys. Šie matavimai buvo atlikti prieš parenkant kompensavimo-filtravimo įrenginį. Remiantis 28 pav. ir 32 pav. pateiktais elektros tinklo matavimo rezultatais buvo pastebėta dideli įtampos ir srovės formos iškraipymai. Pagal 30 pav. ir 34 pav. buvo pastebėtas ryškus 5, 7, 11, 13, 17, 19 įtampos aukštesniųjų harmonikų poveikis. Taip pat buvo ryškus visų nelyginių aukštesniųjų srovės harmonikų poveikis. Atsižvelgus į šiuos elektros tinklo kokybinius parametrus buvo parenkamas kompensavimo-filtravimo įrenginys. Pritaikius įrenginį šiai elektros sistemai matavimai buvo atliekami pakartotinai norint įsitikinti kompensavimo-filtravimo įrenginio efektyvumu. Po antrų matavimų 29 pav. ir 31 pav. matomi akivaizdūs įtampos kreivės pokyčiai. Įrenginio dėka matavimų rezultatuose nebėra dominuojančių įtampos harmonikų, jos sumažėjusios iki minimumo ir pasiskirsčiusios tolygiai.



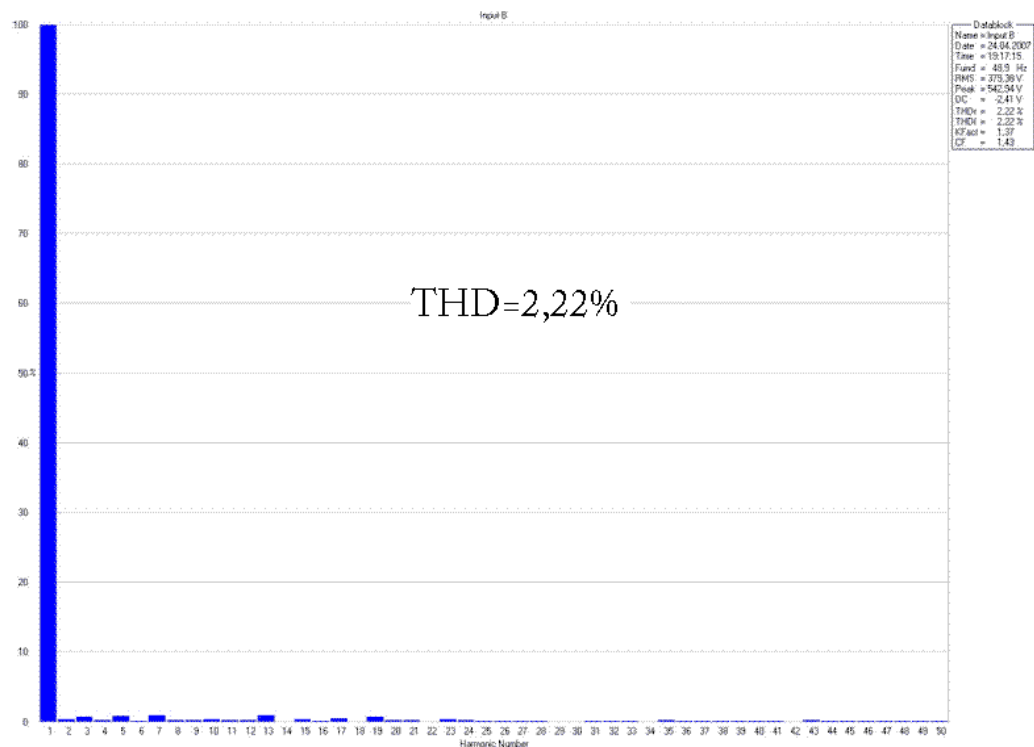
28 pav. Įėjimo įtampos A fazės kreivė prieš filtraciją



29 pav. Įėjimo įtampos A fazės kreivė po filtracijos

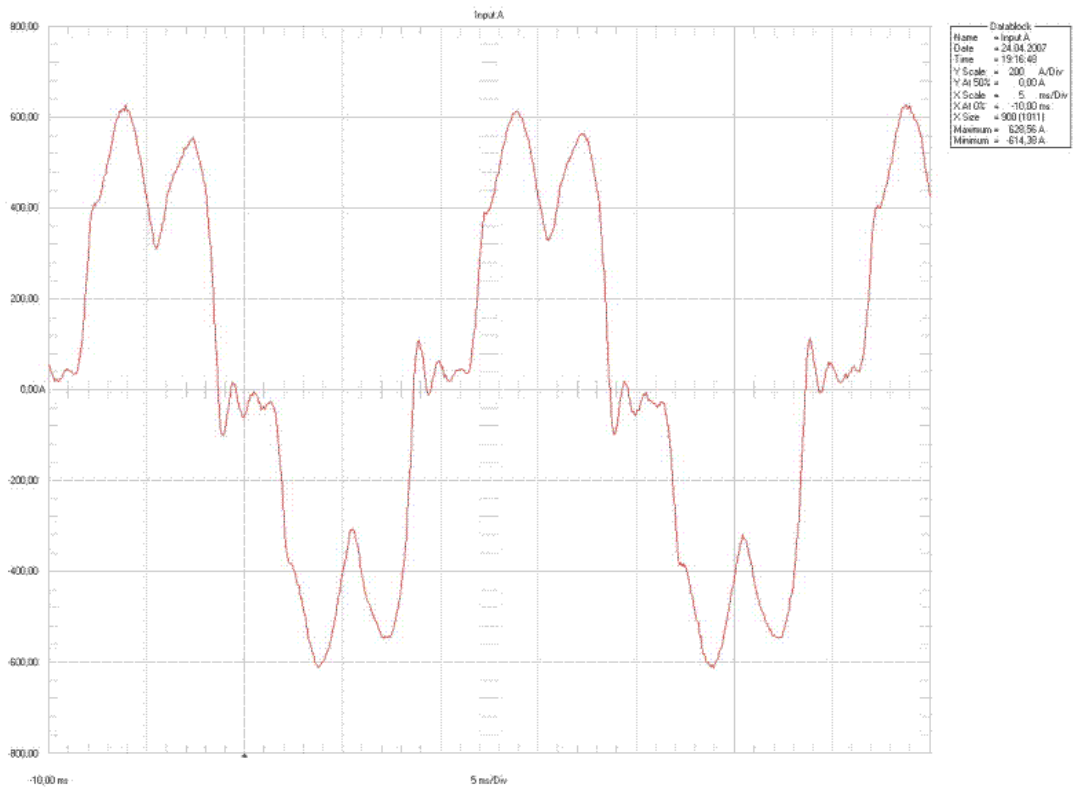


30 pav. Įėjimo įtampos A fazės THD prieš filtraciją

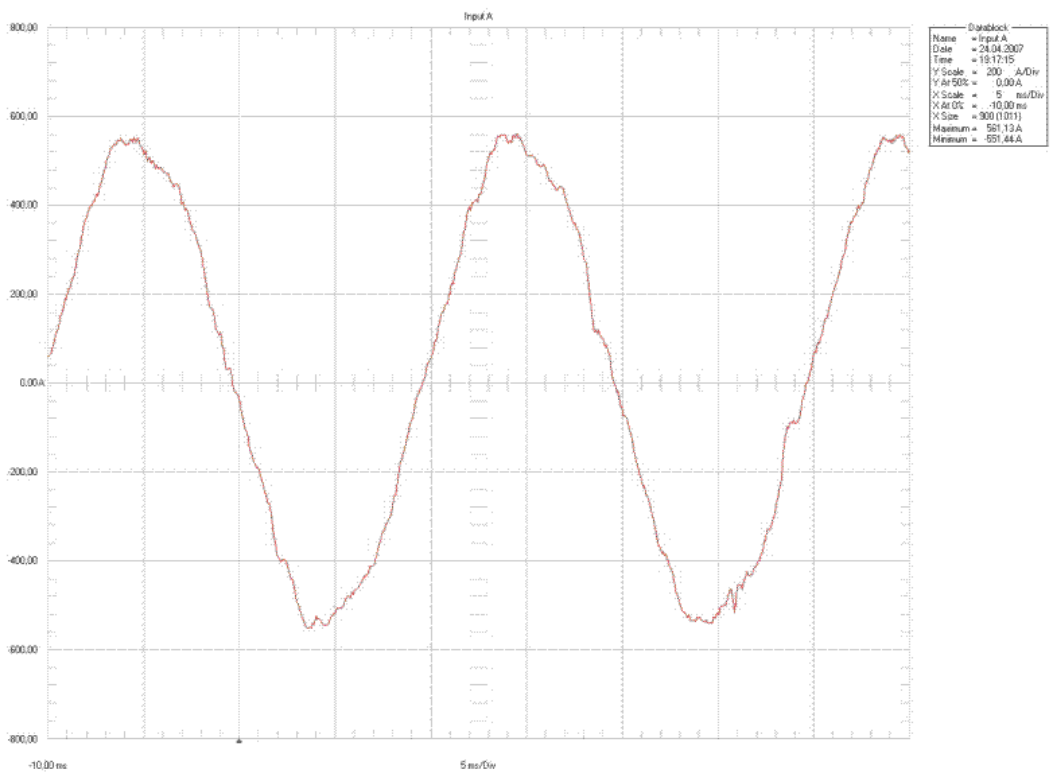


31 pav. Įėjimo įtampos A fazės THD po filtracijos

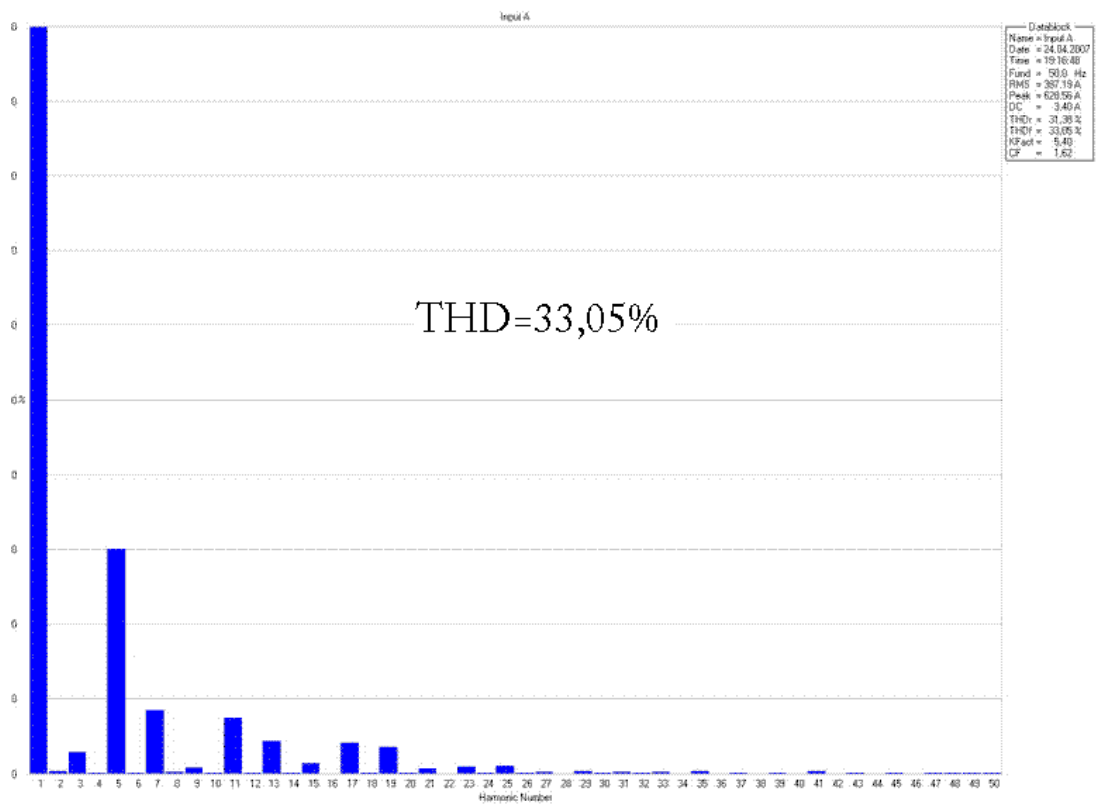
Elektros tinklo kokybę labiausiai įtakoja srovės harmonikos. 32 pav. matyti ryškūs penktosios harmonikos poveikis srovės kreivei. Šią penktąją harmoniką skleidė elektros tinklo sistemoje esantys dažnio keitikliai. Panaudotas kompensavimo-filtravimo įrenginys sumažina aukštesniųjų harmonikų dedamųjų poveikį, tačiau visiškai jų nepanaikina. Šiuo atveju buvo pasirinktas centralizuotas kompensavimo-filtravimo būdas. Rezultatai būtų pasiekti geresni, jeigu kompensavimui-filtravimui būtų pasirinktas individualus arba grupinis būdas. Šiuo atveju yra daug įvairių reaktyvios galios vartotojų ir harmoninių dedamųjų skleidėjų, todėl individualus ir grupinis kompensavimo-filtravimo būdas būtų daug brangesnis, bet efektyvesnis.



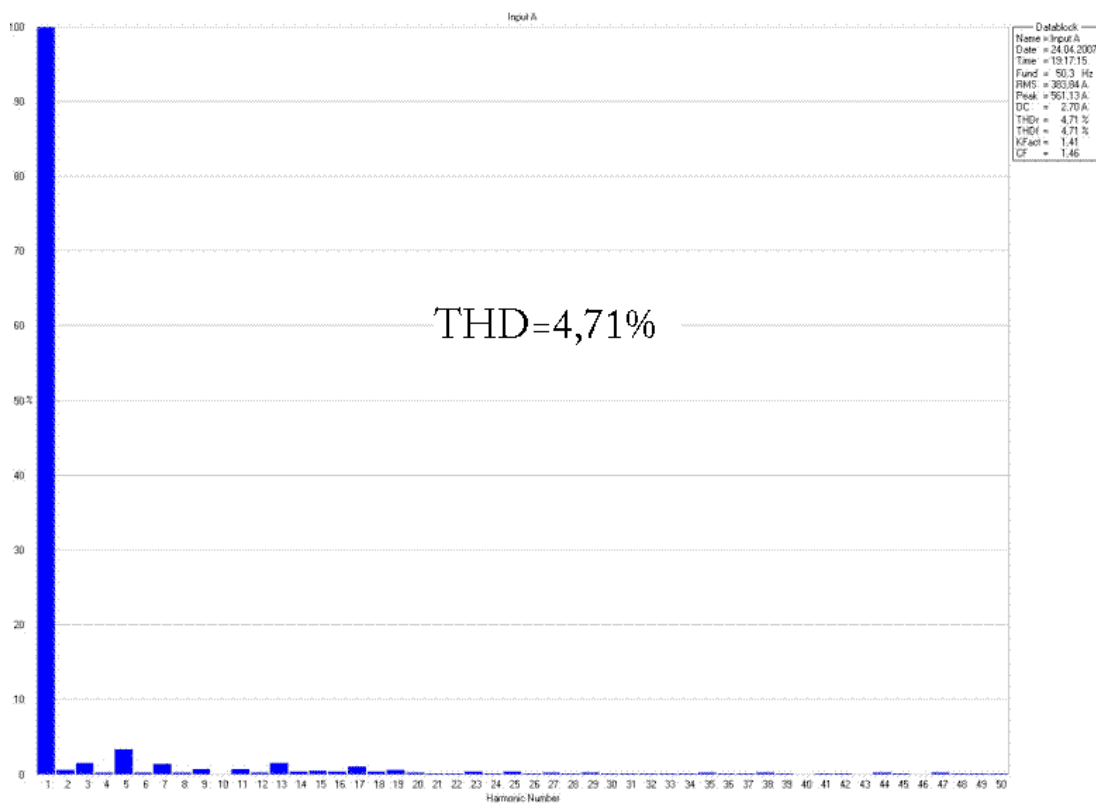
32 pav. Įėjimo srovės A fazės kreivė prieš filtraciją



33 pav. Įėjimo srovės A fazės kreivė po filtracijos



34 pav. Iejimo srovės A fazės THD prieš filtrāciju



35 pav. Iejimo srovės A fazės THD po filtrāciju

Įvertinus matavimų rezultatus ir atlikus duomenų analizę konkrečioms objektų grupėms, kiekvienai grupei buvo parenkami tinkami filtrai. Tyrimo metu išanalizavus parinkimo kriterijus ir rekomendacijas buvo pastebėta, kad tos pačios grupės veiklos panašios, bet įrenginiai gali skirtis. Taigi ir filtrų tipai kiekvienam objektui turi būti projektuojami autentiškai norint pasiekti maksimalų rezultatą. Lentelėje 11 pateikiami rekomenduojami filtrai visoms ištirtoms objektų grupėms.

Lentelė 13. Rekomenduojami filtrai tirtiems objektams

Panaudojimo sritis	Pasyvusis	Aktyvusis	Hibridinis
Pramonės įmonės	***	*	**
Administracijos pastatai	*	***	**
Laisvalaikio ir pramogų centrai	*	***	***
Mokymo įstaigose	*	**	***
Kavinės	*	***	**
Gydymo įstaigose	*	**	***

Paaškinimai:

*** - Pilnai tinkamas;

** - Pilnai tinkamas techniškai, tačiau toks sprendimas nėra rentabilus;

* - Patenkinamas.

Srovės harmonikos sukelia papildomus energijos nuostolius ir kondensatorių baterijose. Dėl šio reiškinio kondensatoriai kaista ir gali sugesti, taip pat sugestų jei tinkle susidarytu harmonikų dedamųjų rezonansas. Harmonikų poveikis indukciniam matavimo prietaisams, skirtiems elektros energijos apskaitai akivaizdus – matavimo rezultatus paklaidas didina. Elektros skirtomųjų tinklų operatoriai pakeitus indukcinį matavimo prietaisą elektroniniu, elektros suvartojimas vidutiniškai vartotojams padidėja apie 10%. Iš šio fakto galima teigti kad pažabojus harmonines dedamąsias elektros tinklų nuostoliai sumažėtų ir pagerėtų elektros įrenginių darbas. Kadangi dauguma įmonių nesuinteresuotos kompensuoti reaktyviosios galios ir statyti harmoninius filtrus tai turėtų užtikrinti elektros tinklai.

IŠVADOS

1. Nuolatiniai elektros kokybės matavimai elektros tinkluose nėra atliekami dėl aukštos įrangos ar paslaugos kainos.
2. Visuose tirtuose objektuose, srovės netiesinių iškraipymų faktorius elektros sistemose kito labai didelėse ribose.
3. Daug netiesinių apkrovų turinčiuose objektuose buvo užfiksuotas didelis harmonikų lygis. Pastebėta, kad harmoninėmis dedamosiomis labiausiai užteršia kompiuterinė ir biuro įranga bei liuminescencinių lempų apšvietimas.
4. Aukštesniųjų harmonikų įtakai mažinti būtina naudoti harmoninius filtrus.
5. Patikimam elektronikos prietaisų darbui bei užtikrinant individualių šildymo ir karšto vandens ruošimo sistemų nenutrūkstamą ir kokybišką elektros energijos tiekimą būtina naudoti nepertraukiamo maitinimo šaltinius (UPS).
6. Remiantis ankštesnių tyrimų rezultatais šiuo klausimu pastebėta, kad elektros kokybė blogėja todėl būtina šį klausimą spręsti.
7. Tyrime buvo pastebėtas trumpalaikis mirgėjimo aštrumas, kuris turėjo įtakos normaliam elektros vartotojų įrenginių darbui.
8. Ištirtose pramonės įmonėse, administraciniuose objektuose, mokymo bei gydymo įstaigose reikalingas reaktyvios galios kompensavimo įrenginys, kuris sumažintų reaktyviąją galią ir aukštesniųjų harmoninių dedamąsias.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. LST EN 61000-4-30. Elektromagnetinis suderinamumas (EMS). 4-30 dalis. Bandymų ir matavimo metodai. Elektrinio maitinimo kokybės charakteristikų matavimo metodai
2. LST EN 61000-3-2. elektromagnetinis suderinamumas (EMS). 3-2 dalis. Ribinės spinduliavimo vertės. Ribinės harmoninių srovių spinduliuojamos energijos vertės (įrenginių maitinimo vienos fazės srovė ne stipresnė kaip 16 A) (IEC 61000-3-2:2000, modifikuotas).
3. LST EN 61000-4-7. Elektromagnetinis suderinamumas (EMS). 4-7 dalis. Bandymų ir matavimo būdai. Bendrasis elektros tiekimo sistemų ir prie jų prijungtų įrenginių harmonikų bei tarpinių harmonikų matavimo ir aparatūros vadovas (IEC 61000-4-7:2002)
4. LST EN 61000-4-15. Elektromagnetinis suderinamumas (EMS). 4-15 dalis. Bandymų ir matavimo būdai. Mirgėjimo matuoklis. Funkciniai ir projektavimo reikalavimai (IEC 61000-4-15:2010)
5. ISODA, Gediminas. *Elektros technologijos žinynas*. Vilnius, 2008. 852 p. ISBN 978-9955-590-73-6
6. CHAUVIN ARNOUX, *Manual C.A 8335 QUALISTAR PLUS*. [interaktyvus]. 2009. [žiūrėta 2011 m. Spalio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.elfa.spb.ru/uploads/tdpdf/okCA8335_manual_en.pdf>.
7. ISODA, Gediminas. *Elektros instaliacija*. Vinius, 2006. 457 p. ISBN 9955-590-23-8
8. Белоусов В. Н., Энговатов В. И., Никифорова В. Н. Опыт контроля качества электрической энергии. Материалы семинара «Средства измерения качества электрической энергии». Москва. МЭИ. 28—29 января 2003.
9. RAUCHAS Modestas, NEVARDAUSKAS Enrikas Vilimantas , TURAUSKAS Zigmantas, Aukštesniųjų harmonikų vertės elektros tinkluose ir jų įtaka energijos matavimui. *Jaunujų mokslininkų darbai*. 2001.
10. C. DUGAN Roger; F. MCGRANAGHAN Mark; SANTOSO Surya; BEATY H. Wayne.

11. *Electrical Power Systems Quality, Second Edition*. Columbus, 2002. 528 p. ISBN: 007138622X
12. BAGGINI Angelo, *Handbook of power quality*. West Sussex, 2008. 618 p. ISBN 978-0-470-06561-7
13. BUGENIS Saulius Jonas, KRIKŠTAPONIS Laimutis, SKUČAS Ipolitas, *Aukštesniosios harmonikos žemos įtampos tinkluose*. Vilniaus technikos kolegija. [interaktyvus], [žiūrėta 2011 m. Vasario 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.e-library.lt/resursai/Mokslai/VIKO/EIF_051118/Bugenis_Krikstaponis_Skucas.pdf>.
14. DUSSANT M, DETROZ T., Ilgalaikis energijos kokybės matavimas, stebėjimas ir registravimas. *Elektros erdvės*. 2004, nr. 4(6), p. 4-5.
15. BAČAUSKAS Anzelmas, DIČIUS Rimvydas. Kad Lietuvoje kuo trumpiau būtų tamsu. *Elektros erdvės*. 2007, nr. 3(17), p. 6-9
16. BUGENIS S. J., LUKOŠIENĖ D., VANAGAS J.. Problemos dėl taupiujų lempučių masiško naudojimo. *Elektros erdvės*. 2011, nr. 1(24), p. 16-20.
17. BUGENIS Saulius Jonas, KRIKŠTAPONIS Laimutis, SKUČAS Ipolitas. Tarša žemosios įtampos tinkluose. *Elektros erdvės*. 2005. nr. 4(10), p. 8-14.
18. ABB, *Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants*. [interaktyvus]. Italija, 2008 [žiūrėta: 2011 m. Kovo 10 d.]. Prieiga per internetą <[http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/18aa8879b8cc0186c125761f005035b7/\\$file/Vol.8.pdf](http://www04.abb.com/global/seitp/seitp202.nsf/0/18aa8879b8cc0186c125761f005035b7/$file/Vol.8.pdf)>.
19. Chauvin arnou, *Three-phase electrical networks analyser C.A. 8335 QUALISTAR PLUS*. [interaktyvus]. 2009 [žiūrėta: 2012 m. sausio 17 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.elfa.spb.ru/uploads/tdpdf/okCA8335_manual_en.pdf>.