

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA**

Gintautas Butkus

**AUKŠTŲJŲ SROVĖS HARMONIKŲ SLOPINIMO  
ĮRENGINIŲ TYRIMAS**

**Magistro darbas**

**Vadovas**

doc. Z. Turauskas

ŠIAULIAI, 2006

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA**

**TVIRTINU**

Katedros vedėjas, doc.

\_\_\_\_\_ T.Šimkevičius

2006 06

**AUKŠTŲJŲ SROVĖS HARMONIKŲ SLOPINIMO  
ĮRENGINIŲ TYRIMAS**

Magistro darbas

**Vadovas, doc.**

\_\_\_\_\_ Z. Turauskas

2006 06

**Atliko**

EM-4 gr. stud.

\_\_\_\_\_ G. Butkus

2006 06

**Recenzentas, doc.**

\_\_\_\_\_ T.Šimkevičius

2006 06

ŠIAULIAI 2006

Butkus G. Investigation the filter of compensating devices current harmonics: Master thesis of electrical engineer/research advisor Assoc. Prof. Z. Turauskas; Šiauliai University, Technological Faculty, Electrical Engineering Department. – Šiauliai, 2006. - 71

### **SUMMARY**

The theme of the filter of compensating devices current harmonics analyzed at present on work is actual, because concrete requirements on quality of electric energy are established. One of such requirements – size of harmonics in a feeding electric network. In industrial electric networks to which converters are connected, high harmonics on size reach 20-25 %. Special devices for eliminating harmonics are used. Condensers which are used for indemnification of reactive electric energy, do not extinguish them, therefore are projected the filter – compensatory installations, using capacity of the battery of condensers as base of the power filter. Bases of designing of the filter – compensatory devices of the parameters of semi-conductor converters of the electric power intended for normalization with a power line are considered.

The purpose work of the master – the analysis of a factory electric network on the maximum harmonics and to design the filter for eliminating harmonics. The electric network has been checked up by device PQ ANALYSER. Such harmonics 3, 5, 7, 9, 11, 13 are found. The greatest on a current is third harmonic. Condensers of reactive capacity connected, network does not act on a harmonic. Compensatory installation which is made of separate filters of clearing of harmonics is designed, will strongly reduce the specified harmonics in a factory network.

## SANTRAUKA

Darbe nagrinėjama tema aukštųjų srovės harmonikų slopinimo įrenginių tyrimas yra šiuo metu aktuali, kadangi nustatyti konkretūs reikalavimai elektros energijos kokybei. Vienas iš tų reikalavimų – leistinas harmonikų dydis maitinimo tinkle. Pramonės tinkluose, prie kurių prijungti elektros keitikliai, aukštųjų harmonikų lygis gali siekti 20-25%. Naudojami specialūs harmonikų slopinimo įrenginiai. Kondensatoriai, kurie naudojami reaktyvios galios kompensavimui, nesunaikina minėtas harmonikas, bet projektuojami specialūs filtravimo-kompensavimo įrenginiai, o minėti kondensatoriai panaudojami kaip pagrindinė minėto įrenginio energetinė bazė. Išnagrinėti filtravimo-kompensavimo įrenginių projektavimo pagrindai, skirti puslaidininkinių elektros energijos keitiklių darbo suderinimui su maitinimo tinklu

Magistro darbo tikslas – ištirti įmonės elektros maitinimo tinklo harmonikų kiekį ir jų dydį ir suprojektuoti filtravimo įrenginius minėtų harmonikų sumažinimui ar panaikinimui. Minėtas tinklas buvo tirtas PQ ANALYSER prietaisu. Elektros maitinimo tinkle rastos tokios harmonikos: 3-oji, 5-oji, 7-oji, 9-oji, 11-oji, 13-oji. Didžiausia pagal srovę iš jų nustatyta 3-oji harmonika. Kadangi reaktyvios galios kondensatoriai šių harmonikų nesunaikino, todėl suprojektuotas filtravimo įrenginys, kuris sudarytas iš atskirų harmonikų slopinimo filtrų.

Šis harmonikų filtravimo įrenginys pagal skaičiavimus žymiai sumažina minėtas harmonikas įmonės elektros maitinimo tinkle.

## Turinys

<b>IŽANGA .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Elektros tinklo kokybiniai rodikliai .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Įtampos ir srovės aukštųjų harmonikų normavimas elektros tinkluose .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Tinklo įtampos kokybės kriterijai .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3. Aukštųjų harmonikų problemos šiuolaikinėse maitinimo sistemose.....</b>	<b>10</b>
<b>1.4. Efektai, kurie atsiranda dėl srovės ir įtampos aukštųjų harmonikų.....</b>	<b>10</b>
<b>1.5. Harmonikų minimizacijos principai elektros tinkluose kurie maitina keitiklius .....</b>	<b>17</b>
<b>2. Aktyvieji harmonikų filtrai .....</b>	<b>28</b>
<b>2.1. Aktyvių filtrų tipologija.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2. Reaktyvios galios parinkimas filtravimo kompensavimo įrenginiui .....</b>	<b>31</b>
<b>3. Įtampos keitiklių įtaka maitinimo tinklui ir priemonės jo poveikio sumažinimui .....</b>	<b>34</b>
<b>4. Aukštųjų harmonikų filtrų skaičiavimas .....</b>	<b>46</b>
<b>IŠVADOS .....</b>	<b>57</b>
<b>LITERATŪRA .....</b>	<b>58</b>
<b>PRIEDAI .....</b>	<b>59</b>

## Ižanga

Elektros srovės aukštųjų harmonikų problema beveik visuose pramonės įmonių energetikos sistemose reikalauja tokio pat dėmesio kaip ir problema apsaugos nuo trumpo jungimo ir viršįtampių. [1] Sistemose, kur vartotojų srovė kinta pagal sinuso dėsnį reaktyvios galios kompensacijai užtenka tradicinių reaktyvios galios šaltinių – kondensatorių baterijų, sinchroninių kompensatorių. Tinkluose, kur yra keitikliai arba kiti įrengimai, kurie sukuria srovės harmonikas, reikalingas specifinis minėtos problemos sprendimas

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. Kontūro rezonansinio dažnio charakteristika yra galingesnių keitiklių žemų dažnių srityje,. Tuo atveju, jeigu yra prijungtas elektros keitiklis, generuojantis srovių harmonikas, tai kyla rezonansinis srovės ir įtampos harmonikų sustiprinimas maitinimo tinkle. Kondensatoriai skirti pagrindinio dažnio reaktyvios galios kompensacijai, šiuo atveju tartum daro neigiamą poveikį nes dalyvauja harmonikų atsiradimo procese.

Sprendžiant šią problemą būtina panaikinti stiprių harmonikų atsiradimo galimybę, kad užtikrinti kondensatorių baterijai pagrindinės paskirties vykdymo sąlygas, t.y. kompensuoti reaktyviąją galią. Be to, pagal galimybes 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.

## 1. Elektros tinklo kokybiniai rodikliai

Pagrindiniai parametrai yra įtampa, įtampos kreivės forma, dažnis. Pirmas pagrindinis elektros kokybės parametras-įtampa. Nusistovėjusi įtampa: 0,9-1,1 vardinės įtampos priklauso nuo imtuvų pareikalaujamos reaktyvios galios dydžio, todėl elektros energijos normalizacijos klausimus būtina nagrinėti kartu su reaktyvios galios kompensacija

Reaktyvios galios sąvoka griežtai apibrėžta tik grandinėm kurių įtampos ir srovės kreivės yra sinusinės formos: daugelis darbų šioje srityje grandinėm su nelinejiniais elementais iki šiol neprivedė prie vieningos reaktyvios galios sukūrimo teorijos.

Keitiklių technikoje, nustatant energetinius keitiklio parametrus, leidžiama prielaida, kad įtampos forma keitiklio prijungimo prie maitinimo tinklo taške yra sinusinė, o vartojamos srovės –nesinusinė. Ši prielaida turi pilnai pagrįsta pagrindą, kadangi priimta, kad keitiklis yra elektromagnetiškai tapatingas pagal įtampą, jeigu jo pajungimo prie tinklo įtampos kreivės forma pajungimo taške lieka praktiškai sinusinė, tuo tarpu srovės forma - nesinusinė. Tokia priėjimo metodika leidžia panaudoti klasikinę reaktyvios galios formulę ir elektriniams tinklams, maitinantiems keitiklius [1]

$$Q_1 = UI_1 \sin \varphi_1 ; \quad (1.1)$$

čia  $Q_1$  - reaktyvioji galia, vartojama keitiklio darbinio dažnio srityje, kvar;

$U$  - tinklo įtampos reikšmė keitiklio pajungimo vietoje, V;

$I_1$  - keitiklio pagrindinės harmonikos srovė, A;

$\varphi_1$  - kampas tarp tinklo įtampos kreivės ir keitiklio pagrindinės srovės harmonikos.

Reaktyvios galios reikšmė, vartojama keitiklio pagrindinei harmonikai, paprastai naudojama skaičiuojant keitikliams filtravimo-kompensavimo įrengimus.

Antras pagrindinis kokybės parametras-įtampos kreivės forma-nusakoma įtampos sinusinės kreivės iškraipymo koeficientu. Šis koeficientas % skaičiuojamas pagal formulę:

$$K_U = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}}{U_{nom.}}, \quad (1.2)$$

čia  $U_n$  - n-tos harmonikos įtampa, V;  
 $U_{nom}$  - veikiančios įtampos nominalinė reikšmė, V;  
 $n$  - harmonikų seka.

Trečias pagrindinis elektros energijos kokybės parametras-dažnis (50Hz) nustatytas energetinės maitinimo sistemos. Atskiri imtuvai negali įtakoti šį parametą, kadangi jų galia žymiai mažesnė lyginant su energosistemos galia. Ilgalaikis dažnis: 0,99-1,01 vardinės vertės; trumpalaikis: 0,98-1,02 vardinės vertės

Harmonikos, kurių iškraipymų suma, pradedant antrąja ir baigiant penktąja harmonika, neturi viršyti 10% efektinės įtampos vertės tarp įtampingųjų laidų. Papildomai leidžiami 2% efektinės įtampos vertės tarp įtampingųjų laidų pradedant šeštąja ir baigiant trisdešimtąja [5].

**Filtravimo - kompensavimo įrenginys (FKĮ)** – daugiafunkcionalinis elektrotechninis įrenginys, skirtas keitiklio prie elektros tinklo prijungimo vietoje elektros energijos pagrindinių parametru normalizacijai pagal įtampą, reaktyvios galios kompensacijai bei srovės harmonikų generuojamų keitikliais lokalizacijai. Schema paprastai sudaro simetrinę trifazę RLC-grandinę. FKĮ sudaryta iš lygiagrečių grandinių rinkinio - filtrų, kiekvienas iš kurių paskaičiuotas keitiklio dalinio reaktyvios galios kompensavimui ir dalies srovės harmonikų spektro lokalizacijai. Teisingai parinkus FKĮ parametrus, tiesiškumas keitiklio pasireiškia tuo, kad FKĮ apkraunamas nesinusinėm srovėm ir stipriu įtampos kreivės formos iškraipymu, Sumarinė keitiklio iš tinklo pareikalaujama srovė, pasidaro praktiškai sinusinė ir prijungimo vietoje prie maitinimo tinklo normalizuoja įtampos kreivės formą.

### **1.1 Įtampos ir srovės aukštųjų harmonikų normavimas elektros tinkluose.**

Harmonikų problema beveik visuose pramoninėse energetikos sistemose reikalauja tokio pat dėmesio kaip ir problema apsaugos nuo trumpo jungimo ir viršįtampių. Harmonikų problemos ankstyvoje keitiklių įsisavinimo stadijoje pramoninėse įmonėse tapo telefoninio ryšio trukdymai, kadangi telefoninės linijos ir elektros linijos dažnai buvo arti viena kitos. Paskutiniaisiais metais telefoninė technika naudoja požeminius kabelius ir mikrobangines linijas, tai daro minimalų jėgos linijų harmonikų poveikį į ryšių sistemas.



Aukštųjų harmonikų srovės gali turėti poveikį elektros mašinų ir transformatorių perkaitimui. Tai būtina įvertinti projektuojant elektros tinklus, kurie maitina elektros keitiklius, ypačingai, kai šie panašaus galingumo.

Aukštosios harmonikos daro poveikį apsaugos ir valdymo įrenginiams ir gali sukelti klaidingą jų darbą. Patekdami į buitinius tinklus, aukštosios harmonikos pablogina televizorių vaizdo kokybę. Aukštųjų harmonikų srovės turi įtakos matavimo prietaisų parodymams. Jautrūs harmonikų įtakai prietaisai su indukciniais diskais – skaitikliai, relės ir t.t. Aukštosios srovės harmonikos sukelia elektros variklių momentinę pulsaciją, o tai gali neigiamai atsilipti technologiniams įrenginiams. Jeigu harmonikų dažnumas sutampa su mechaninio virpesių dažnumu, kas pilnai tikėtina, tai gali kilti rezonansiniai reiškiniai.

Harmonikų poveikis gali įtakoti distancinio ryšio sistemas jeigu vienos iš generuojamos harmonikos ir pagrindinis sistemos dažnis sutampa. Tokios sistemos pavyzdžiu yra linija maitinanti laikrodžius.

Liuminescencinės ir kitos dujinio išlydžio lempų maitinimo schemose yra talpio ir induktyvieji elementai, kurie gali sudaryti rezonansinį kontūrą. Jeigu šio rezonansinio kontūro dažnis sutampa su dažniu vienos iš harmonikų, tai gali įvykti šių elementų perkaitimas ir gedimas. Aukštosios harmonikos pagreitina elektros mašinų, aparatų ir kabelių izoliacijos senėjimą. Elektros tinkluose, kur reaktyvios galios kompensacijai naudojami kondensatoriai, galimas lygiagretus rezonansas vienos iš harmonikų dažnių srityje tarp kondensatorių talpio ir maitinimo šaltinio induktyviojo elemento. Tai gali sukelti įtampos padidėjimą, apsaugos suveikimą, izoliacijos pramušimą, elektros įrenginių pažeidimą.

Išsivysčiusiosiose šalyse ryšium su negatyvia harmonikų įtaka elektrotechninėms sistemoms, kreipiamas didelis dėmesys harmonikų tyrimams ir kuriamos priemonės jų panaikinimui. Kuriami ir tobulinami harmonikų prognozavimo ir skaičiavimo metodai pramoniniuose ir buitiniuose tinkluose. Nagrinėjama jų plitimo sąlygos dideliais atstumais. Tiriama harmonikų įtaka jėgos įrengimams, komutacinei rėlinei aparatūrai. Projektuojami prietaisai srovės ir įtampos harmonikų matavimui ir kontrolei. Periodiškai daromi kompleksiniai šių harmonikų matavimai pramoninėse ir energetiniuose tinkluose, vykdomas įvertinamas pagal tarptautines normas. Kompleksiniai harmonikų matavimai skirtingų įtampų tinkluose rodo, kad harmonikos gali plisti dideliais atstumais. Pastebėta, kad antros harmonikos reikšmė kurią sąlygoja televizorių darbas, buvo procentiniu atžvilgiu lygios visų rūšių tinklams.

Srovės harmonikos generuojamos keitikliais sąlyginai dalijamos į kanonines ir nekanonines. Kanonines harmonikas vadinamos tos, kurias generuoja idealus keitiklis neįvertinant realiai esančių parametru asimetrijos tarp grandinių fazių. Nekanoninėmis harmonikomis vadinamos tos, kurios atsirado dėl parametru asimetrijos tarp keitiklio ir maitinimo tinklo.

Tikslios amplitudės ir fazės srovės ir įtampos harmonikų reikšmės yra valdymo kampo ir komutacijos funkcijos.

Maksimalios kanoninių srovės harmonikų reikšmės:

$$I_{\nu} = I_1 / \nu \quad (1.3)$$

čia  $I_{\nu}$  - veikianti  $n$ -tos harmonikos srovės reikšmė, A;  
 $I_1$  - veikianti pagrindinės srovės harmonikos reikšmė, A;  
 $\nu$  - harmonikos numeris.

Kanoninių harmonikų spektras priklauso nuo keitiklio schemas pulsiškumo ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\nu = mi \pm 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (1.4)$$

čia  $m$  - keitiklio schemas pulsiškumas;  
 $i$  - kanoninės harmonikos eilės numeris.

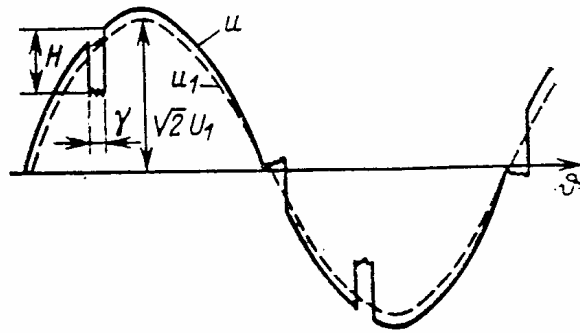
Kanoninės harmonikos 6-ą pulsų schemai yra nekanoninė dėl daugiapulsinės schemas. Rekomenduojama įvertinti jų reikšmes  $(0,1-0,25)I_{\nu 6}$ , kur  $I_{\nu 6}$  - kanoninės 6-ą pulsų schemas harmonikos.

Nekanoninės harmonikos palyginus su kanoninėm yra mažos lyginių numerių ir su kartotinumu lygų 3. Teoriškai maksimalios reikšmės šių nekanoninių harmonikų, esant nepalankiam valdymo kampų disbalansui galima pasiekti 3% nuo maksimalios pagrindinio dažnio srovės reikšmės. Dirbant keliems keitikliams, sujungtiems vieningu technologiniu procesu, sumarinės harmonikos srovės sumažėja. Šio reiškinio priežastis - neidealus nuolatinės srovės išlyginimas. Keitiklių savitarpio įtaka, šuntavimas talpio apkrovimais, nevienalaikis keitiklių darbas, demferinis transformatoriaus veikimas.

## 1.2 Tinklo įtampos kokybės kriterijai.

Tinklo įtampos kokybė nustatoma jos formos nuokrypiu nuo sinusinės ir jos pasikeitimų nuo esamos jos reikšmės.

Paveikslėlyje 1.1 parodyta tipinė tinklo įtampos kreivė, maitinanti keitiklį.



1.1 pav. Įtampos iškreipimų kreivės pavyzdys dėl komutacijos procesų vykstančių tiristoriuose (vienfaziamе lygintuve):  $u$ -iškreiptos įtampos kreivė;  $u_1$ -pagrindinė įtampos harmonika;  $\gamma$ -įtampos dingimo tarpas lygus komutacijos kampui;  $H$ -įtampos sumažėjimas.

Šia įtampos kreive galima charakterizuoti sekančiais dviem būdais:

Nurodant  $\gamma$  plotį ir didžiausias įtampos sumažėjimo dydį  $H$ ;

Nurodant  $v$  eilės numerį ir veikiančią  $U_v$  aukštųjų harmonikų, kurios yra tinklo įtampos kreivėje dėl iškreipymo komutacinių įtampos sumažėjimo pavidale ir kitų periodinių pasikeitimų.

Pažymėsim  $h$  atitinkama maksimalų momentinės įtampos reikšmės nukrypimą nuo momentinės pagrindinės harmonikos reikšmės:

$$h = H / \sqrt{2} U_1 \quad (1.5)$$

Harmonikų kiekio koeficientas lygus:

$$k_v = U_v / U, \quad (1.6)$$

čia  $U$  - iškraipytos įtampos momentinė reikšmė, V;

$U_\nu$  - veikiančios nurodyto numerio aukštesniosios harmonikos įtampa, V.

Pilnas esamų harmonikų koeficientas nustatomas veikiančiu visų aukštųjų harmonikų reikšmės santykiu su veikiančios įtampos reikšme:

$$k_h = \left[ \sum_{\nu=2}^{\infty} U_\nu^2 \right]^{1/2} / U \quad (1.7)$$

Veikiančios įtampos reikšmės pokyčiai. Jie išskyla, pvz., dėl reaktyvios galios vartojimo pakitimų esant periodiniams keitiklio valdymo kampo pakitimams. Pažymėsim veikiančios įtampos reikšmės pakitimus  $\Delta U$  tada santykinis veikiančios įtampos reikšmės pakitimas lygus

$$\Delta u = \Delta U / U . \quad (1.8)$$

1.1 lentelėje nurodytos maksimalios šių keturių parametru reikšmės.

1.1 lentelė

### Parametrai apytiksliam tinklo įtampos kokybės įvertinimui

Parametrai	Maksimali leistina reikšmė, %			
	Bendro naudojimo paskirstymo tinklas		Pramoninis tinklas	
	Žema įtampa	Vidutinė įtampa	Žema įtampa	Vidutinė įtampa
$h(1.5)$	20	20	30	20
$k_h(\nu \leq 25)(1.7)$	5	4	10	7
$\Delta U(1.8)$	5	3	7	5
$k_\nu(1.6)$	1 kreivė	2 kreivė	3 kreivė	4 kreivė

### **1.3 Aukštųjų harmonikų problemos šiuolaikinėse maitinimo sistemose**

Įrengimų sudėtingumo lygis kompiuterinės technologijos sferoje pastoviai auga. Todėl sistemos, užtikrinančios tiekiamos elektros kokybę, turi būti sukurtos tokios, kad galėtų išspręsti platų problemų spektrą; t. y. įtampų svyravimai, aukšto dažnio trikdžiai, impulsiniai trikdžiai ir net aprūpinimas elektros maitinimu dingus pramoninio tinklo įtampai. Viena iš tokių problemų yra įtampos formos iškraipymai, kuriuos sukelia harmoninių srovių spektras, tekantis nelinijine apkrova. Didesnioji kompiuterinės ir kitos įstaigų aparatūros priklauso šios rūšies apkrovai. Sumarinis efektas šių apkrovų pasireiškia tuo, kad sukelia įtampos iškraipymus, kurie veikia kitus įrengimus, kurie maitinami iš tų pačių šaltinių. Tai gali sukelti perkaitimą kituose įrengimuose, sutrikimus komunikacijų ir davinių perdavimo tinkluose, sukelti aparatūros gedimus ir kitus nepageidautinus reiškinius.

### **1.4 Efektai , kurie atsiranda dėl srovės ir įtampos aukštųjų harmonikų**

Juos galima suskaidyti į momentinio ir ilgalaikio pobūdžio efektus.

Momentinio pobūdžio problemas sudaro:

- maitinimo įtampos formos iškraipymas;
- įtampos kritimas paskirstymo tinkluose;
- harmonikų, efektas, kai harmonikų kartotinumumas 3 { trifaziuose tinkluose};
- rezonansiniai reiškiniai aukštųjų harmonikų srityje;
- indukcija telekomunikacijos ir valdymo tinkluose;
- padidėjęs akustinis triukšmas elektromagnetiniuose įrenginiuose;
- vibracija elektromašininėse sistemose;
- įšilimas ir papildomi nuostoliai transformatoriuose ir elektros mašinose;
- kondensatorių įkaitimas;
- kabelių įkaitimas paskirstymo tinkluose.

Panagrinėsime priežastis sukeliančios nurodytus efektus ir galimus jų sprendimo kelius.

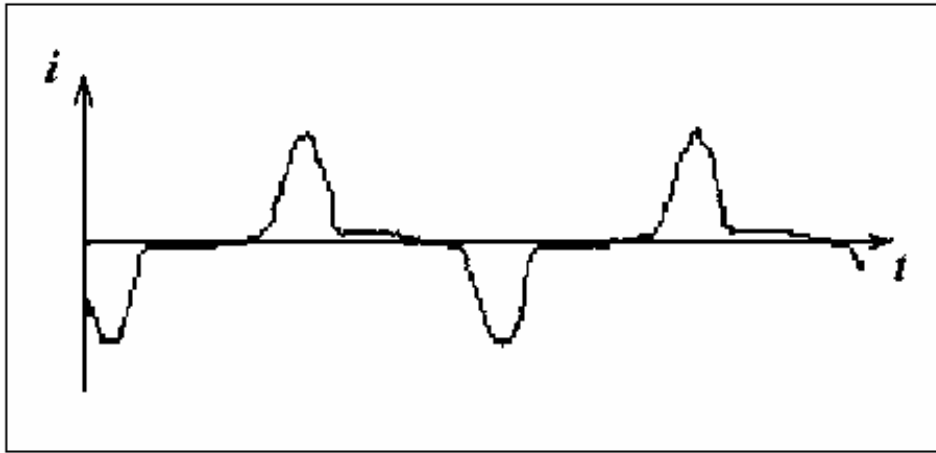
**Maitinančios įtampos forma.** Padidėjusi amplitudės reikšmė parodo, kad yra didelis vartojamos srovės pikas tinklo dažnio pusperiodžio metu. Kuo didesnė pikinė srovės reikšmė ir mažesnė jos trukmė per pusperiodį, tuo didesni jos iškraipymai. Duoto apkrovimo amplitudinės srovės koeficientas keičiasi priklausomai nuo maitinimo šaltinio, tuo tarpu paties šaltinio galimybė dirbti esant apkrovai su dideliu amplitudės koeficientu priklauso nuo vidinės šaltinio varžos ir jo galimybės užtikrinti pareikalaujamos didžiausios srovės reikšmės piko momentu.

Daugumai įrengimų, atliekančių maitinimo šaltinio funkcijas, tokia užduotis gali būti pasiekta padidinant šio įrenginio nominalinius parametrus. Dalinai šiuolaikiniuose kintamos srovės generatoriniuose įrenginiuose superlaidi reaktyvioji varža sudaro apie 15%, o tai neigiamai atsiliepia įtampos formai. Tam išvengti naudojamos specialios apvijos arba parenkamas didesnio galingumo generatorius.

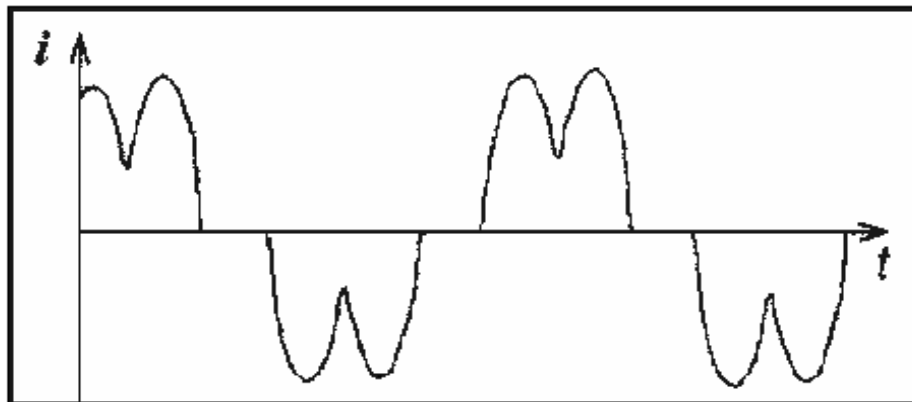
Šiuolaikiniai *nepetraukiamo maitinimo šaltiniai (NMS)* gali kontroliuoti įtampos formą kiekviename sinusoidės pusperioodyje. Šiuo laiku daugumoje nepetraukiamo maitinimo sistemose praktiškai naudojami įvairūs galios inventoriai su lauko tranzistoriais su izoliuotu užtvaru, kurie valdomi plačiajuosčiu impulsiniu metodu. Tokios maitinimo sistemos gali normaliai dirbti, kai apkrovimo srovės amplitudės koeficientas yra 3 ir daugiau, nes vykdo perjungimus esant aukštam dažniui ir koreguoja įtampos formą kiekviename pusperioodyje. Aukšto pikinio dydžio srovės tiekimas gali privesti prie to, kad įtampos forma išėjime su dvigubu energijos keitimu yra geresnė negu pramoninės sistemos tinklo įėjime.

**Įtampos kritimas paskirstymo tinkle.** Dauguma nepetraukiamo maitinimo šaltinių gali maitinti apkrovimą su aukšta amplitudine koeficiento reikšme, tačiau sinusinės iškraipymo koeficientas neviršija 3 – 6%. Šis iškraipymo lygis yra gaunamas ant maitinimo šaltinio gnybtų, o ne apkrovimo pajungimo vietose.

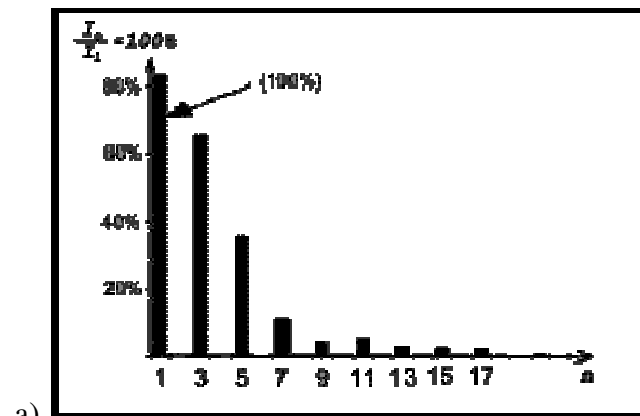
Tenka įvertinti, kad srovės forma dėl aukštos procentinės aukštųjų harmonikų sudėties stipriai skirsis nuo sinusinės. Srovių forma vienfaziam (1.2 pav. ) ir trifaziam (1.3 pav. ) lygintuvams charakterizuojama atitinkamu procentiniu turimu nelyginių aukšto dažnio harmonikų (lentelė 1.2). Atitinkamas spektras tokių srovių pavaizduotas 1.4 paveiksle.

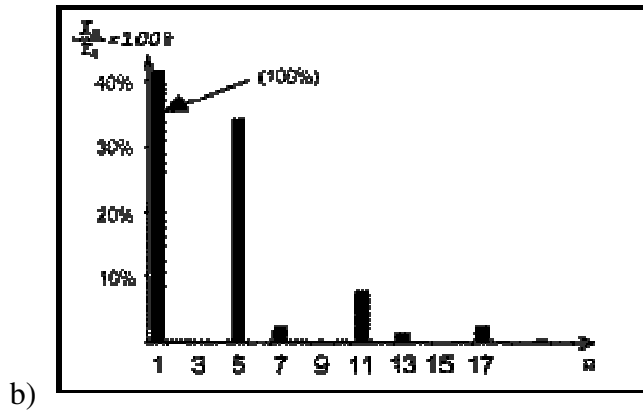


1.2 pav. Vienfazio lygintuvo srovės forma



1.3 pav. Trifazio lygintuvo srovės forma





1.4 pav. Lygintuvų išėjimo srovių spektrai; a) vienfazio, b) trifazio

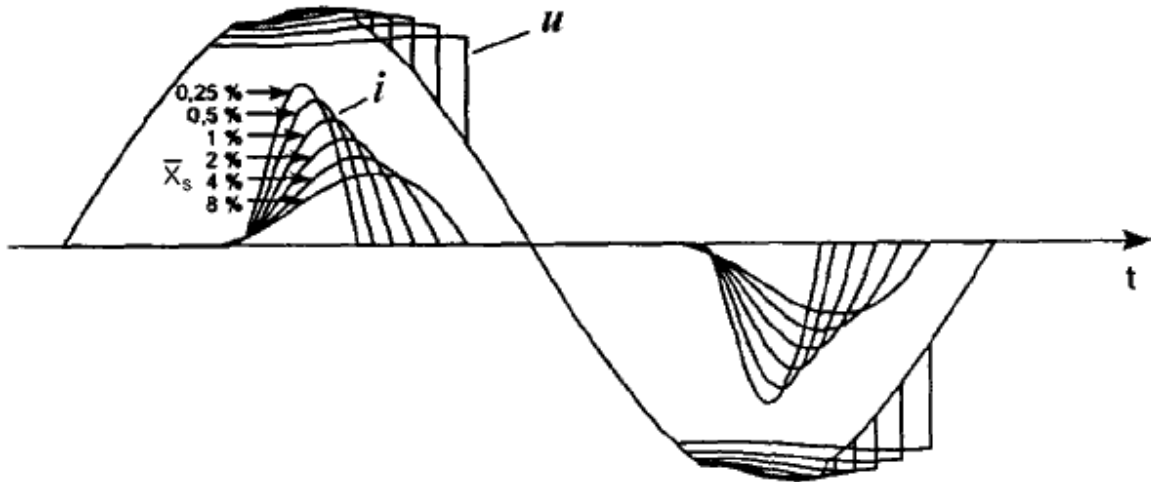
1.2 lentelė

**Spektrinė srovės sudėtis nepertraukiamo maitinimo šaltinio įėjime (pvz. – prie 100% apkrovimo dėl NMŠ esant filtrui įėjime ir galios koeficiento korektorius)**

N Harmonikos numeris	Vienfazis NMŠ, $I_n/I_1$ (%)	Trifazis NMŠ, $I_n/I_1$ (%)
1	100	100
3	65,7	-
5	37,7	33
7	12,7	2,7
9	4,4	-
11	5,3	7,3
13	2,5	1,6
15	1,9	-
17	1,8	2,6

Pilna paskirstymo tinklo varža yra daugiau induktyvinio pobūdžio. Esant dideliame harmonikų kiekiui, įtampos kritimas kabeliuose ir laiduose būna didesnis negu leistina, o tipiniuose paskirstymo tinkluose ilgesniuose negu 100m gali vykti dideli įtampos iškreipimai apkrovimo grandinėse. Tokių iškreipimų pavyzdys gali būti srovės ir įtampos vienfazio lygintuvo įėjimo grafikai priklausomai nuo įėjimo kabelio reaktyvios varžos dydžio arba vidinės lygintuvo maitinimo šaltinio varžos (1.5 pav.). Mažiausią įtampos kritimą turime tuomet, kai tinklo induktyvinė varža turi mažiausią reikšmę. Didėjant minėtai varžai, didėja įtampos kritimas, be to, keičiasi srovės ir įtampos kreivės forma. Iš grafiko matyti, kad srovės maksimalioji reikšmė labai priklauso nuo induktyviosios varžos dydžio ir jos maksimalioji reikšmė pasiekama prie didesnės fazės kampo reikšmės.





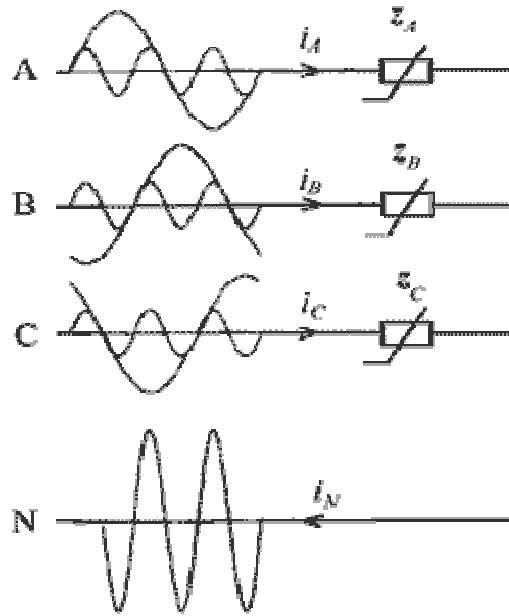
1.5 pav. Įtampos ir srovės formos betrasformatorinio vienfazio lygintuvo išėjime priklausomai nuo įėjimo fiderio sąlyginės reaktyvios varžos dedamosios.

**Harmonikų efektas , kurių kartotinumais trims.** Aukštosios srovės harmonikos, kurių kartotinumais trims ( t.y. 3, 9, 15, 21 ir t.t. ), kurios turi didelės įtakos amplitudės koeficientui ir generuojamos vienfazės apkrovos, turi ir specifinį poveikį trifazėse sistemose. Subalansuotoje (simetrinėje ) trifazėje sistemoje harmoningos (sinusoidinės) srovės visose trijuose fazėse perstumtos  $120^\circ$  viena kitos atžvilgiu, todėl srovių suma nuliniame laide lygi nuliui. Nėra įtampos kritimo neutraliniame kabelio laide.

Ši nuostata yra teisinga daugumai harmonikų. Dalis iš jų turi srovės vektoriaus sukimosi kryptį į tą pačią pusę kaip ir pagrindinė (pirmoji, “pagrindinė “ , t.y. 50 Hz ), t.y. tiesioginė seka. Kitos sukasi priešinga kryptimi ir turi atbulinę seką. Tai netinka harmonikom, kurių kartotinumais tris:

$$n = 3(2k + 1), \text{ kur } k = 0, 1, 2, \dots (2.9)$$

Trifaziuose tinkluose jos nustumtos  $360$  laipsniu viena atžvilgiu kitos sutampa pagal fazę ir sudaro nulinę seką . Neporinės harmonikos kartotinės trim , sumuojasi neutraliniame laidininke (1.6 pav.).



1.6 pav. Nulinio laido srovės formavimo procesas esant netiesiniam apkrovimui.

Ryšium su tuo, kad tos harmonikos sudaro didžiąją dalį esamos srovės reikšmės, bendra srovė neutralėje gali viršyti fazinės srovės dydį.

$$I_N = 3\sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + \dots} \quad (1.10)$$

Trifazio tinklo, kurio laidais teka 37 A srovė ir esant 150 Hz dažnumui, neutralės srovė sudaro 55 A. Neteisingai suprojektuoti keturlaidžiai kabeliai trifazių tinklų gali perkaisti net užsidegti, tai parodo, kad būtina padidinti skerspjūvį neutralės laidininko keturgysliuose kompiuterinių tinklų maitinimo kabeliuose. Harmonikos, kurių kartotinumai lygūs 3, sudaro įtampos kritimą kaip neutraliame taip ir faziniuose laiduose, sukelia įtampos formos iškreipimus kituose imtuvuose, prijungtuose prie šio tinklo.

**Aukštųjų harmonikų reiškiniai rezonansinio dažnio intervale.** Esant aukštosiomis harmonikom elektros tinkluose su sukonzentruotais ar paskirstytais parametrais, kokiais gali būti padaryti maitinimo sistemos blokai, mazgai ir paskirstymo tinklai, susidaro pavojus, kad gali atsirasti rezonansiniai reiškiniai. Atsiradus kurios nors aukštosios srovės arba įtampos harmonikos rezonansiniam arba artimam jam režimui, ši dedamoji susidaro didesnė, negu amplitudinė pirmos srovės harmonikos (įtampos) reikšmė tose pat grandinės dalyse. Tai gali neigiamai atsiliiepti į darbą atskirų elementų arba sistemos mazgų.

**Telekomunikacijos ir valdymo tinkluose indukuoti trikdžiai.** Telekomunikacijos ir valdymo tinklai gali būti prakloti arti jėgos tinklų, kuriais prateka aukštųjų harmonikų srovės. Minėtose tinkluose indukuojamos trikdžių srovės, kurios gali iškreipti informacinį signalą. Iškraipymo dydis priklausys nuo aukštųjų harmonikų dažnio, lygiagrečių ruožų ilgio ir atstumo tarp jų.

**Akustinis triukšmas.** Transformatoriuose, droseliuose ir kitose elektromagnetiniuose elementuose, aukštosios srovės harmonikos, sudarydamos elektrodinaminę jėgą, sukelia papildomus akustinius triukšmus.

**Vibracija elektromašininėse sistemose.** Indukcinių variklių maitinimo įtampoje aukštųjų harmonikų egzistavimas yra ta priežastis, dėl kurios susidaro aukšto dažnio harmonikos magnetiniame lauke, kurios indukuos EVJ rotorius apvijose aukšto dažnio harmonikų sroves. Šios harmonikos sąveikaudamos su pagrindiniu magnetiniu lauku, sudarydamos papildomus mechaninius momentus ant elektros mašinos veleno. Dėl šios priežasties susidaro veleno sukimo momento pulsacijos. Ekstremaliomis sąlygomis gali kilti besisukančios rotoriaus vibracijos prie rezonansinio dažnio, kuri sukelia metalo nuovargį ir galimas variklio veleno sugadinimą.

**Įšilimas ir papildomi nuostoliai transformatoriuose ir elektros mašinose.** Papildomi nuostoliai, sukiantis transformatorių perkaitimą, esant aukštosiomis harmonikom, kyla dėl skin – efekto varinėje apvijoje (aktyvinės apvijos varžos padidėjimas didėjant dažniui), o taip pat nuostolių padidėjimas dėl histerizės ir sūkurinių srovių transformatoriaus magnetolaidyje.

Elektros mašinose, be analogiškų nuostolių statoriuje (nuostoliai varėje ir magnetolaidyje) dėl žymaus skirtumo besisukančių magnetinių laukų susidaro papildomi nuostoliai rotoriaus demferio apvijoje ir elektros mašinos magnetolaidyje.

**Kondensatorių įšilimas.** Papildomi nuostoliai, kai atsiranda aukštųjų harmonikų kondensatoriuose, yra dėl padidėjusio “nuostolių kampo“ dielektrike ir augančios srovės reikšmės kondensatoriuje. Atsirandantis perkaitimas kondensatoriuje gali pramušti dielektriką. Be to, kondensatoriai jautrūs perkrovimams dėl atsiradusių harmonikų.

**Paskirstymo tinklo kabelių įšilimas.** Papildomi nuostoliai jėgos tinklų kabeliuose, sukiantis temperatūros pakilimą laidininkuose, esant aukštųjų harmonikų srovėms susidaro dėl sekančių priežasčių

- padidėjusi neharmoninės srovės reikšmė.
- padidėjusi aktyvinė varža dėl skin-efekto
- padidėję kabelio izoliacijos dielektriko nuostoliai.

Galimi visokie metodai, kad susilpninti aukštųjų harmonikų srovių įtaką, esant apkrovimams aukštai amplitudės koeficiento reikšmei [10].

### 1.5 Harmonikų minimizacijos principai elektros tinkluose kurie maitina keitiklius.

Įtampos kreivės iškraipymo sumažinimui, keitiklio prijungimo prie tinklo vietoje, naudojami daugiapulsinės keitiklių schemas. Keitiklio ribinis galingumas, kuriam esant įtampos sinusinės kreivės iškraipymo koeficientas pajungimo prie tinklo vietoje neviršija leistinos reikšmės priklauso nuo santykio schemas pulsiškumo ir trumpo jungimo galios prijungimo prie tinklo taške  $S_{tr}$  su galios  $S_p$ .

$$STJ = \frac{S_{tr.j.}}{S_p} \quad (\text{santykinis trumpasis jungimas}) \quad (1.11)$$

Keitiklio schemas pulsiškumas nusakomas išlygintos įtampos pulsacijų skaičiumi per vieną pagrindinio dažnio periodą. Trifazio tiltelio schemą yra šešių pulsacijų padidinto pulsiškumo schemas atliekamos kelių tiltų pagrindu, kurių įėjimo įtampos pastumtos pagal fazę. Dvylikos pulsacijų schemai reikalingi du tiltai ir įtampa pastumta pagal fazę  $30^\circ$ , 24 pulsacijos schemai – keturi tiltai ir postūmis pagal fazę  $15^\circ$ , 36 pulsacijų schemai – šeši tiltai ir postūmis pagal fazę  $10^\circ$ . Įtampos postūmis pagal fazę atliekamas specialiais fazę pastumiančiais transformatoriais arba viename daugiaapvijiniame transformatoriuje sujungtame pagal specialią schemą Apytiksliai STJ minimali reikšmė keitikliams su įvairiom pulsiškumo schemom su sąlyga, kad sinusinės įtampos kreivės iškraipymo koeficientas pajungimo prie tinklo taške lygus 4 % ir srovė keitiklio lygi nominalinei, parodyti 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė

Schemas pulsiškumas	STJ
6	90
12	65
24	38
36	15

Jeigu reikšmė STJ mažesnė negu nurodyta 1.3 lentelėje tai įtampos harmonikų sumažinimui iki normatyvinio lygio būtina naudoti filtravimo kompensavimo įrenginius.

FKĮ (*filtravimo - kompensavimo įrenginiai*) galima suskirstyti pagal tai, kiek prijungta šių filtro grupių. Amerikos inžinierių elektriku instituto rekomendacijos siūlo parenkant grupės skaičių orientuotis į trumpo jungimo galios keitiklio prijungimo prie tinklo vietoje pagal 1.4 lentelę.

1.4 lentelė

Galia TJ MV·A	Filtrų skaičius pagal derinamos harmonikos numerį			
	5	7	11	13
250	1			
251-750	1	1		
751-1500	1	1	1	
1500 ir aukščiau	1	1	1	1

Kiti faktoriai, kuriuos reikalinga įvertinti parenkant filtravimo kompensavimo įrenginio schemą, yra: reaktyvios FKĮ, keitiklio schema ir galia, elektros tinklo darbo sąlygos iki keitiklio prijungimo, dalinai įvertinti kondensatorių baterijų esamą kiekį, kitų šaltinių harmonikas ir t.t.

Paprasčiausia FKĮ schemą galima skaityti kondensatorių bateriją, pajungta tiesiogiai prie tinklo be reaktorių. Pagrindinė kondensatorių paskirtis – reaktyvios galios kompensacija keitiklio prijungimo prie tinklo vietoje. Iš kitos pusės, kondensatoriai yra aukštų srovės harmonikų filtrai, kadangi jų varža mažėja augant dažniui. Išnaudoti šią natūralią kondensatorių varžos charakteristiką galima tik esant atitinkamom sąlygom. Žinoma, kad maitinančio tinklo dažnio charakteristika atžvilgiu vietos, kur kondensatoriai prijungti prie tinklo, turi lygiagreto rezonanso išraišką (tarp kondensatorių talpio ir induktyviojo imtuvo 1.7 pav.).

*Sąlyginis rezonansinis dažnumas (SRD)* šiam kontūrai apskaičiuojamas pagal formulę:

$$SRD = \frac{\sqrt{S_{tr,j}}}{Q_K} \quad (1.12)$$

čia  $S_{tr,j}$  – galia trumpo jungimo, kVA;

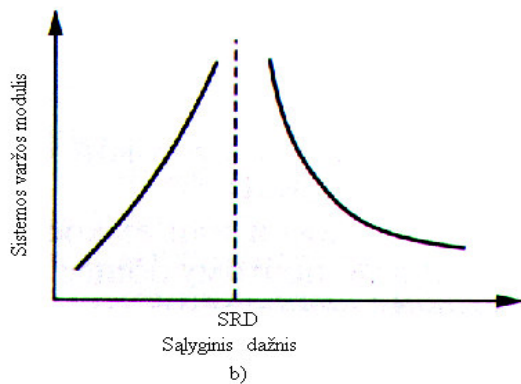
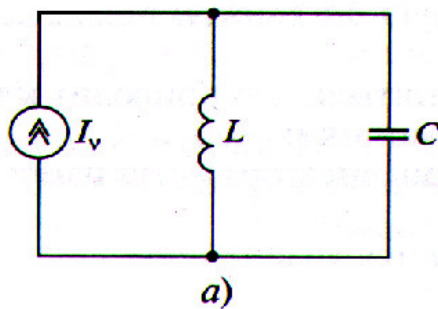
$Q_K$  – kondensatorių galia, kvar.

Jeigu santykinis rezonansinis dažnis sutampa su vienos stipriausiai pasireiškiančios srovės harmonika, generuojamu keitiklio, įvyksta srovės ir įtampos rezonansinis sustiprinimas maitinimo tinkle, kad sumažinti šio rezonanso srovės ir įtampos sinusinės kreivės iškraipymus, pageidautina turėti kontūrą kitų harmonikų srityje, neviršijančių pagal numerį kanoninės eilės

žemiausią harmoniką. Parenkant kondensatorių galią pagal keitiklio reaktyvios galios kompensaciją, tai rezonansinis dažnis būna tarp 5-13 harmonikų, tai yra stiprių srovės harmonikų srityje. Tam, kad išvengti tinklo įtampos iškreipymų ir kondensatorių perkrovimų tenka, riboti pajungiamų keitiklių galią.

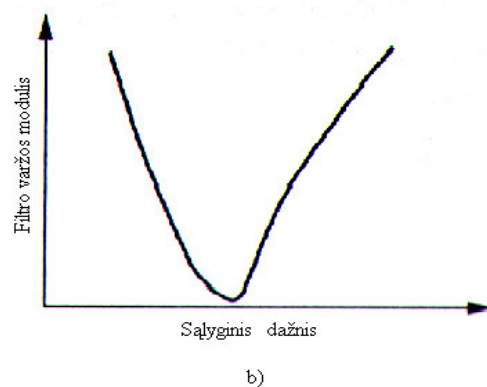
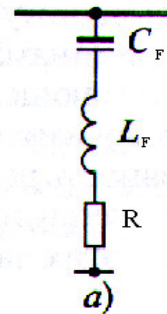
Tokiu atveju, keitiklio egzistavimas maitinimo tinklo sistemoje, nėra pakankama priežastis, kad atsisakyti tiesioginio kondensatorių pajungimo prie maitinimo tinklo. Perėjimas prie bet kokios kitos schemos surištas su papildomom išlaidom turi būti pagrįstas. Rekomenduojama įvertinti galimybę tiesioginio kondensatorių panaudojimo sistemai, kurioje keitikliai sudaro 20% viso apkrovimo.

Populiariausios schemos su vienos grupės FKĮ yra siaurajuosčiai filtrai suderinti srovės keitiklio harmonikai (1.8 pav.). Šie filtrai skirti galingų keitiklių kanoninių harmonikų minimizacijai, paprastai prasideda nuo 5 harmonikos.



**1.7 pav. Lygiagretus rezonansas pajungus kondensatorių baterijas prie tinklo:**

a – skaičiuojamoji schema; b – dažnio charakteristika;  $I_v$  - keitiklis, srovės harmonikų šaltinis;  $L$  – tinklo induktyvumas;  $C$  – kondensatorių baterijų talpis.



**1.8 pav. Siaurajuostis filtras:**

a – vienlinijinė schema; b - dažnio charakteristika.

Reaktyvių filtrų galia turi būti nustatyta pagal reaktyvios galios kompensacijos sąlygas keitiklio prie tinklo prijungimo vietoje. Kiti filtrų parametrai paskaičiuojami pagal formules:

1) filtrų talpa:

$$C_f = \frac{s^2 - 1}{s^2} \frac{Q_f}{\omega U^2}, \quad (1.13)$$

čia  $s$  – derinamo filtro dažnumas (harmonikos numeris);

$Q_f$  – reaktyvinis filtro galingumas prie pagrindinio dažnio, kvar;

$\omega$  - pagrindinės harmonikos kampinis dažnis;

$U$  – veikianti nominalinės tinklo įtampos reikšmė  $V$ ;

2) filtrų induktyvumas:

$$L_f = \frac{1}{\omega_s^2 C_f}, \quad (1.14)$$

čia  $\omega_s$  - derinamo filtro kampinis dažnis;

3) derinamo dažnio filtrų induktyvioji varža:

$$x_{fs} = \omega_s L_f = \frac{1}{\omega_s C_f} = \sqrt{\frac{L_f}{C_f}}; \quad (1.15)$$

4) filtro kokybė:

$$d = \frac{x_{fs}}{R}, \quad (1.16)$$

čia  $r$  – aktyvioji filtro varža pagal derinamą dažnį,  $\Omega$ .

Esant idealiems parametrams pilna filtro varža prie derinamo dažnio lygi  $R$ . Praktiškai filtras retai būna tiksliai suderintas harmonikos dažniui, kurią jis turi nuslopinti, dėl sekančių priežasčių:

- 1) maitinamo tinklo dažnis gali kisti, o tai proporcingai sukelia harmonikos dažnio pakitimus;
- 2) kondensatoriaus talpinė reikšmė ir reaktoriaus induktyvumas gali proporcingai kisti eksploatacijos procese.

Šių parametų nukrypimai įvertinami pagal lygtį:

$$\delta = \frac{\Delta \varpi}{\varpi_s} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L_f} + \frac{\Delta C}{C_f} \right), \quad (1.17)$$

čia  $\Delta \varpi, \Delta L_f, \Delta C_f$  - absoliutinės nukrypimo reikšmės kampinio dažnio, induktyvumo, talpumo idealių parametų.

Iš (1.17) seka, kad induktyvumas ar talpinis nukrypimas 1% atitinka dažnio nukrypimą 0.5%, todėl bendrą parametų pasikeitimą galima vertinti ekvivalentiniam dažnio nukrypimui.

Iš (1.18) išraiškos galima nustatyti optimalią filtro kokybės reikšmę, pagal kurią filtro varža bus minimali, esant maksimaliai dažnio nukrypimo laipsniui.

Filtro išderinimo įtakos į varžos dydį darbo taške įvertinimui, dažnio charakteristika parodoma, kaip pilnos filtro varžos dydžio priklausomybė nuo ekvivalentinio dažnio nukrypimo.

$$|Z_f| \approx R \sqrt{1 + 4\delta^2 d^2} = x_{fv} \sqrt{d^2 + 4\delta^2}. \quad (1.18)$$

Iš (1.18) išraiškos galima rasti filtro kokybės optimalią reikšmę, esant maksimaliam dažnio nukrypimo laipsniui, kuriam esant filtro varža bus minimali. Ši kokybės reikšmė priklauso nuo maitinančio tinklo parametų. Jeigu įvertinti blogiausią filtro išderinimo variantą – suderinimo tašką perstumti į lygiagreto su tinklu rezonanso būklę, tai lygtis (1.18) bus:

$$|Z_f| \approx x_{fv} (d^{-1} + 4\delta^2 d), \quad (1.19)$$

Randame optimalią kokybės reikšmę, minimaliam  $z_f$  dydžiui lygiagreto rezonanso taške:

$$d_{opt} = \frac{1}{2\delta_{max}} \quad (1.20)$$

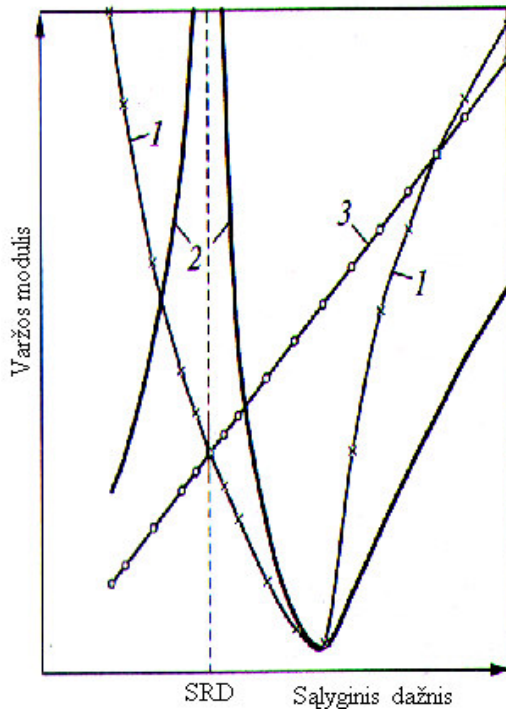
ir

$$|Z_f|_{min} = 4x_{fv} \delta_{max} \quad (1.21)$$



Formulė (1.20) duoda žemas kokybės reikšmes. Tai esant  $\delta_{\max} = 0,1d_{opt} = 5$ . Praktikoje reikšmė  $d$  parenkama 30-60 ribose.

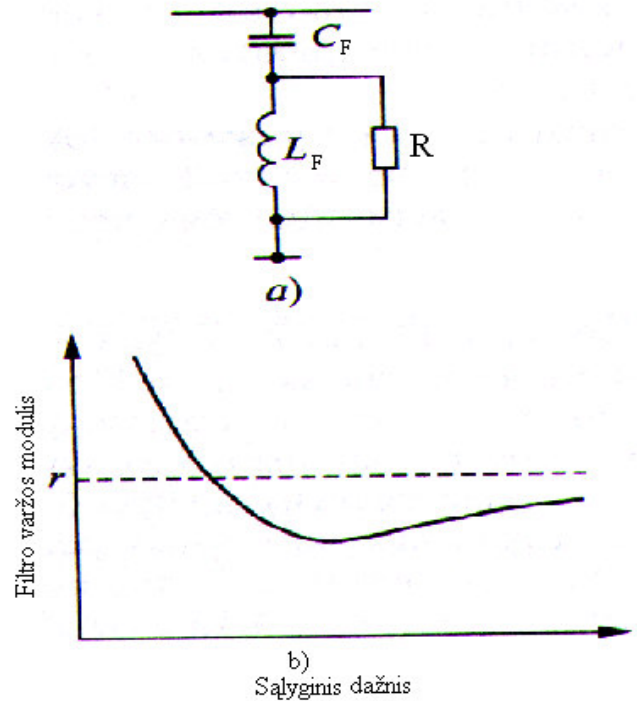
Siaurajuostis filtras sumažina šoninių dažnių harmonikų įtaką jo praleidimo juosta sąlyginai apsiriboja dažniais kuriems esant  $|Z_f| = \sqrt{2r}$ . Praleidimo juosta padidėja su filtro reaktyvios galios padidėjimu.



**Pav. 1.9. Dažnio charakteristikos lygia-gretauso rezonanso atveju prijungus prie tinklo siaurajuostį filtrą:**

1- filtras; 2 – sistema; 3 – tinklas.

Siaurajuosčio filtro pilnos varžos reaktyvioji dedamoji dažnio intervale nuo 0 iki derinamo dažnio vyrauja talpinė dedamoji, o nuo derinamo dažnio iki begalybės - induktyvioji. Sąlyginis rezonansinis kontūro dažnis, priklausomai nuo tinklo induktyvios ir talpinės filtro reikšmės, visada žemesnis negu suderinto filtro dažnis nepriklausomai nuo sistemos induktyvios reikšmės (1.9 pav.). Jeigu filtras prijungtas nuolatinės srovės variklio pavaros reguliatoriaus su aukšto stabilumo koeficientu keitiklio įėjime, rekomenduojama optimalų rezonansinį dažnį suderinti



**Pav. 1.10. Plačiajuostis filtras:**

a) vienlinijinė schema; b) dažnio charakteristika.

taip, kad viršytų pagrindinės harmonikos dažnį 3,85 – 4,15 kartų, nes tai padeda išvengti nestabilių pavaros darbą. Tas tikslas pasiekiamas keičiant filtrų talpį.

Kaip viena grandis iš filtravimo kompensavimo įrenginių naudojami plačiajuosčiai ir demferiniai filtrai (1.10 pav.).

Plačiajuosčių filtrų parametrų skaičiavimas pagal formules:

1) Filtro talpis:

$$C_f = \frac{s^2 - 1}{s^2} \frac{Q_f}{\omega U^2}; \quad (1.22)$$

2) Filtro induktyvumas:

$$L_f = \frac{1}{\omega_v^2 C_f}; \quad (1.23)$$

3) Derinamo dažnio induktyvioji reaktoriaus varža:

$$x_{fv} = \omega_v L_f = \frac{1}{\omega_v C_f} = \sqrt{\frac{L_f}{C_f}}; \quad (1.24)$$

4) Filtro kokybė:

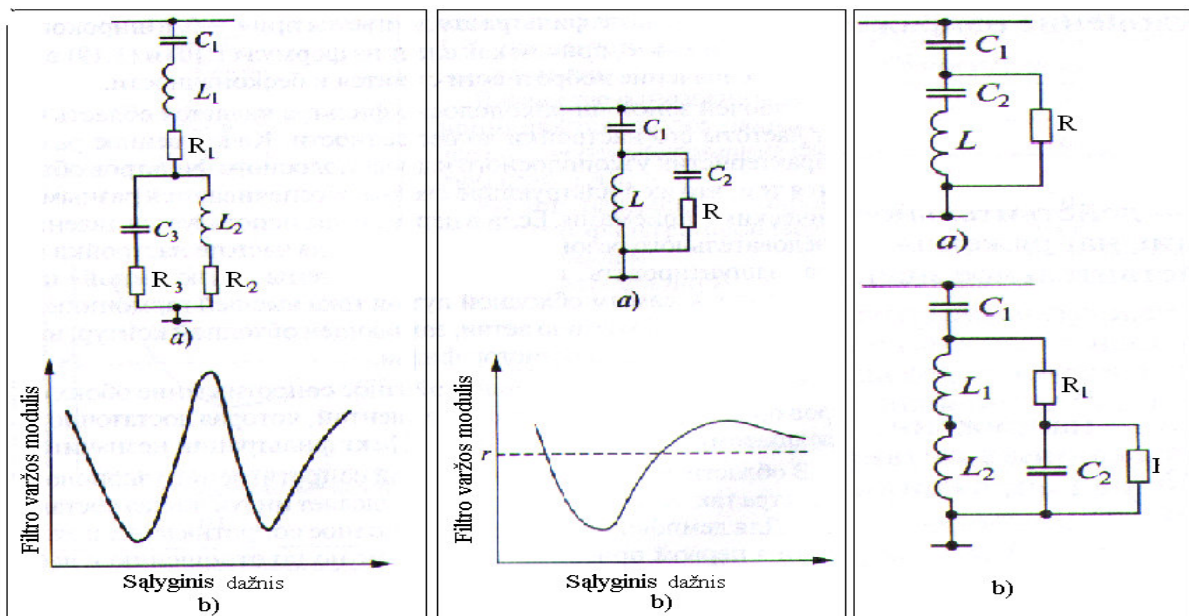
$$d = \frac{R}{x_{fv}}. \quad (1.25)$$

Šios formulės analogiškos tom, kurios naudojamos siaurajuosčių filtrų skaičiavimui, išskyrus formulę (1.25) kuri atvirkštinė formulei (1.16). Ši tartum priešprieša tampa pilnai paaiškinama, jeigu nagrinėti filtro kokybės sąvoką, kaip dažnio charakteristikos nukrypimą nuo idealios. Idealios dažnio filtro charakteristikos požymiu galime skaityti jos pilnos varžos dydį derinimo taške lygu 0. Siaurajuosčiams filtrams tai pasiekama esant  $R=0$ , o plačiajuosčiuose -  $R \rightarrow \infty$ , kadangi pagal formules (1.16) ir (1.25) abiem atvejais kokybės reikšmė eina prie begalybės. Plačiajuosčio filtro darbo zona yra dažnio sritis nuo derinamo dažnio iki begalybės. Siaurajuosčio ir plačiajuosčio filtro charakteristikų kokybės skirtumai paaiškinami tuo, kad filtravimo savybės pasiekiamos skirtingais techniniais sprendimais. Jeigu pirmu atveju naudojama nuoseklaus rezonanso savybė leidžianti filtro derinimo dažnio srityje šuntuoti sistemos varžą žema varžine grandine, tuo sudarydama apėjimo kelia aukštų harmonikų srovei,

tai antru atveju funkcijos šakojimosi grandinė, užsidarantis apėjimo kontūras, atlieka filtro šuntuojantis rezistorius.

Dažnio srityje, kurie yra žemiau rezonansinio, pilna abiejų filtrų varža nustatoma talpio komponente, kuri pakankamai didelė, todėl duotos zonos dažnio srityje filtracijos efektas nežymus.

Dažnio srityje, kuri yra aukščiau rezonansinio dažnio, siaurajuosčio filtro varža taip pat didelė, kadangi ji priklauso nuo induktyvios dedamosios. Kai filtras turi demferį, pilna varža šioje srityje apytikriai dažnio atžvilgiu nusakoma pagal rezistoriaus varžą. Todėl filtras su demferiu yra plačiaujustis dažnių srityje nuo rezonansinio dažnio iki begalybės.



**1.11 pav. Filtras su dvigubu demferiu:**

a – vienlinijinė schema; b - dažnio charakteristika.

**1.12 pav. Trečios eilės demferinis filtras:**

a – vienlinijinė schema; b - dažnio charakteristika.

**1.13 pav. Demferinis filtras su mažais nuostoliais.**

a – C-filtras; b – filtras su dvigubu demferiu.

Plačiaujustiai filtrai nejautrūs dažnių nukrypimams, todėl plačiaujustio filtro kokybė parenkama ne pagal sąlygas jo darbo stabilumo išlaikymui esant maksimaliam išderinimui, kaip tai yra siaurajuosčiame filtre, o išeinant iš pakankamo harmonikų filtravimo efektyvumo pagal visas rezonansinio dažnio reikšmes. Praktiškai plačiaujustių filtrų kokybės reikšmės lygios 0,5-2.

Be pagrindinių siaurajuosčių ir plačiajuosčių žinomų filtrų schemas su sudėtingesne struktūra: siaurajuosčiai filtrai su dvigubu derinimu (1.11 pav.) trečios eilės filtrai su demferiu (1.12 pav.), dvigubi filtrai su demferiu (1.13 pav.). Pagrindiniai šių filtrų privalumai – mažesni nuostoliai, negu bazinių schemų, trūkumai – būtinybė įvairaus tipo įrengimų, sudėtingas jų derinimas.

Sudėtingos filtro schemas pritaikomos kai kuriose nuolatinės srovės perdavimo pastotėse. Pramoninių įmonių keitiklių pastotėse jos praktiškai nenaudojamos dėl pažymėtų trūkumų.

Jeigu vienos grandies filtravimo kompensavimo įrenginiai negali užtikrinti reikalaujamo įtampos sinusinės kreivės iškraipymo koeficiento reikšmės pajungimo keitiklio prie tinklo vietoje, naudojami daugiagrandžiai filtravimo kompensavimo įrenginiai. Žinoma daug filtravimo kompensavimo daugiagrandžių įrenginių schemų, bet praktiškai naudojamas ribotas kiekis schemų.

Daugiagrandžio FKĮ schema paprastai turi atitinkamą kiekį lygiagrečių siaurajuosčių filtrų, suderintų kanoninės eilės harmonikom, pradedant penktąja. Bendras grandinių skaičius yra nuo 1 iki 8, priklausomai nuo sistemos parametrų ir harmonikų filtracijos reikalavimų. Dažnai FKĮ komplekte numatomas aukšto dažnio filtras, kurio neapima siaurajuosčiai filtrai. Aukštų dažnių filtras gali atstoti filtrai su demferiu arba kondensatoriai, turintis daugiagrandžių FKĮ savybės aukštų dažnių srityje. Geriausias aukštiems dažniams filtras yra kondensatorius, kadangi jo varža, didėjant dažniui, mažėja. Varža filtrų su demferiu didėjant dažniui artėja prie rezistoriaus varžos, siaurajuosčio filtro didėja artėja prie reaktoriaus varžos. Iš čia seka, kad geriausias aukšto dažnio grandis FKĮ būtų kondensatoriaus panaudojimas, tačiau toks sprendimas retai naudojamas praktinėse FKĮ schemose, kadangi yra pavojus lygiagretaus rezonanso aukštesnėje dažnio srityje, kuriam suderintas paskutinis siaurajuostis filtras.

**Trifazio tinklo simetrinio darbo sąlygų užtikrinimas.** Pirmoje eilėje, kiek leidžia galimybės, reikalinga subalansuoti elektros tinklo apkrovimą. Tuomet neutralės laidininke teka minimali srovė ir minimalų harmonikų kiekį turės nepertraukiamo maitinimo *šaltinio* (NMS) išėjimo įtampą.

Atitinkamos kontrolės ir valdymo schemas palaikys nominalinę išėjimo įtampos reikšmę o taip pat bus išlaikoma sinusinė įtampos forma. Ne visuomet galima tuo pačiu laiku įvykdyti abi šias funkcijas. Nesubalansuota apkrovą turi įtakos įtampai, sukelia jos iškraipymus. Ši įtaka maža pagal dydį, tačiau tai papildomai prisideda prie bendrų kabelio iškraipymų kurie buvo generuojami tinkle.

Vienas iš racionaliausių būdų sudaryti simetrinį vienfazį apkrovimą trifazėje sistemoje yra panaudojimas maitinimo šaltinių su dvigubu energijos keitimu esant trifaziam įėjimui ir viengubam išėjimui. Šiuo atveju nukraunama neutralė, kadangi ji nedalyvauja trifazio lygintuvo NMŠ įėjime, kuris yra normaliaame įtampos keitimo režime. Šis efektas prapuola vedant NMŠ į padėtį apeiti.

**Įjungimas į sistemą skiriamojo transformatoriaus su apvijom „trikampis žvaigždė“.** Šis metodas buvo naudojamas praktikoje, bet ne visada sėkmingai. Buvo prielaida, kad šiuo atveju transformatorius nepraleidžia harmonikas, kurių kartotinumas 3. Nėra nulinio laido grandinėje, todėl neturime įtampos kritimo jame. Toks tvirtinimas dėl harmonikų buvo teisingas tik dalinai.

Subalansuotos harmonikos su kartotiniu 3 indukuoja atitinkamus magnetinius laukus transformatoriaus šerdyje ir jeigu jie lygus pagal dydį ir sutampa pagal fazę, tai įtampos indukuotos pirminėje grandinėje bus sukompensuotos.

Bet koks transformatorius turi sklaidos srautą, kuris prisideda prie pilno paskirstymo tinklo įėjimo varžos dydžio. Tai gali sudaryti apkrovimo srovės amplitudės koeficiento ir sumarinės sinusinės srovės formos iškraipymo koeficiento sumažėjimo efektą. Pasirodo, įtampos iškraipymai padidėja, o pasiekta maksimali nuolatinės srovės įtampos reikšmė sumažėja.

**Filtrų panaudojimas harmonikų slopinimui.** Trečioji harmonika yra dominuojanti pagal savo nepalankų poveikį vienfaziuose tinkluose. Įjungus į schemą filtrą, kuris turi mažą pilną varžą šios harmonikos dažnių srityje, sumažina nelinejinės apkrovos generuojamą įtampą. Tokių filtrų panaudojimas nepertraukiamo maitinimo sistemose yra naudinga nesubalansuotų apkrovų atveju, kuris turi tendenciją generuoti aukšto lygio harmonikas. Filtrai gali būti sumontuoti nepertraukiamom maitinimo šaltinio viduje, taip pat išėjimo kabelio pradžioje. Tuomet 3-os harmonikos srovės cirkuliuoja tarp apkrovos ir filtro, dalinai sumažindamos sumarinę srovę neutralės laidininke.

Toks pajungimas neduoda galutinio problemos sprendimo, jei nepertraukiamo maitinimo šaltinio išėjime pajungtos paskirstytos apkrovos. Tokiu būdu pajungtas filtras apsaugo tik dalį apkrovos, prie kurios ji tiesiogiai pajungta. Pajungimo schema turi būti tokia, kad filtras apsaugotų visą apkrovą, o ne jos dalį. Tai gali sukelti sunkumus pagal įrenginio kainą ir pagal būtiną plotą, kai bus pajungiami papildomi įrenginiai keliose vietose paskirstymo tinklo skirtingose pastato aukštuose. Ypatingą reikšmę turi filtrai, kurie pastatyti NMŠ įėjime.

Šešių pusperiodžių lygintuvai, kurie naudojami trifaziuose NMŠ sukuria maitinimo tinkle aukštą 5-os harmonikos srovę. Harmoninių srovių sumažinimui ir galios koeficiento padidinimui

į fazinius laidus įjungia induktyvines varžas. Geresnį aukštųjų srovės harmonikų slopinimo efektą duoda filtro įjungimas į NMŠ įėjimą suderinto 5-ai harmonikai.

Įėjimo srovės kitimo pagal sinusoidę iškraipymo koeficiento dydžio sumažinimui trifazės srovės NMŠ iki lygio mažiau kaip 10% panaudojami 12-os pusperiodžių lygintuvai

**Paskirstymo tinklo pilnos varžos sumažinimas.** Tai vienas iš efektyvių metodų nelinejinių iškraipymų sumažinimui. Kabeliai ir surenkamos šynos turi varžą, kuri tiesiogiai surišta su linijos ilgiu. Padidinimas kabelių, laidų skerspjūvį sumažėja aktyvioji paskirstymo tinklo varža, bet nesumažėja induktyvioji. Maksimalus efektinis kabelių, laidų skerspjūvis sudaro 95mm<sup>2</sup>. Su tolimesnių kabelių skerspjūvio padidinimu, induktyvioji varža beveik nesikeičia. Efektyviausias būdas būtų lygiagrečiai sujungtų kabelių panaudojimas. Esant galimybei decentralizuoti NMŠ sistemos panaudojimą, reikėtų išnagrinėti visų instaliuotų įrenginių (t. y. įrenginių kuriuos norima apsaugoti nuo harmonikų) perskirstymą pagal sekcijas, kurių kiekviena būtų užmaitinta nuo atskiro NMŠ.

Reikia atsiminti, kad profilaktinių remonto ir panašių darbų atveju NMŠ sistemos turi ir gali būti perjungtos į apėjimo režimą. Tuomet gali padidėti iškraipymų lygis, kadangi nelinejinė apkrova bus tiesiogiai pajungta prie pirminio kintamos įtampos šaltinio (generatoriaus, transformatoriaus). Tinklo įtampos forma dažnai būna iškraipyta dėl kitų apkrovų, nepriklausančių kritinei, bet turinčiom charakteristikas, panašias į kompiuterines arba įstaigos įrenginių. Maitinimo įtampos formos iškraipymai, generuojami kitų įrenginių, prisidės prie iškraipymų nuo kompiuterinės apkrovos, kuri buvo perjungta maitinimui tiesiogiai iš tinklo (profilaktikos laikotarpiui ar NMŠ remontui) sudarydami tai didesnius iškraipymo lygius.

## 2. Aktyvieji harmonikų filtrai

Šiuo metu didžioji dalis pramoninės, komercinės ir apkrovimas namuose yra nelinejiniai ir iškraipymų lygis žemos įtampos paskirstymo tinkluose kelia didelį rūpestį. Galimos problemos, kurios gali būti iššauktos esant stipriai harmoninei įtampai elektros tiekimo sistemoje, buvo žinomi jau seniai, todėl viso to apribojimui buvo įdiegiamos atitinkamos technologijos ir standartai. Šis procesas buvo teigiamas tik tame plane, kad problemos beveik visada kyla dėl sąlygų, kurios susidaro vartotojų atsakomybės ruože ir retai būna iš tinklo. Jeigu ši situacija tęsis, vartotojai turės riboti harmoninės srovės kiekį, kurį sukuria jų įrengimai. Todėl vartotojai turi užtikrinti filtraciją harmoninių dedamųjų ten, kur tai būtina. Tam yra trys prieinami būdai, kiekvienas su atitinkamai teigiamom ir neigiamom savybėm:

- pasyvių filtrų panaudojimas;
- transformatoriniai sprendimai – izoliacija, sujungimas apvijos į zigzagą, grupinis apvijų sujungimas;
- aktyvių filtrų panaudojimas.

Įrengimai harmonikų sumažinimui gali būti patiekti tiesiog elektros energijos tiekėjams pagal jų pageidavimą visai linijai arba problemos sprendimui kuriam nors vartotojų ruože. Įrengimų parinkimas ir išdėstymas priklausys nuo konkrečių aplinkybių ir kaip taisyklė, reikalauja detalaus harmoninių iškraipymų tinkle situacijos tyrimo. Naudojant įrengimus informacinėm technologijom, bus visos neporinės harmonikos sudarančios tokias problemas kaip neutralės perkrovimas t.y. trigubas nulis dėl tiesioginės harmonikos (t.y. neporinė, kurios kartotinumai 3). Tos rūšies problemos gali būti pašalintos projektavimo eigoje, parenkant teisingai kabelių nominalus. Dažnai funkcinės pastatų paskirties ar išplanavimo pakeitimai sudaro prielaidą, kad aukščiau nurodytos problemos kyla eksploatacijos pasėkoje. Maitinimo srovės, kurios buvo “švarios”, prisipildo įvairiom harmonikom t.y. jų įvairovei turi įtakos įvairių įrengimų prijungimas, o taip pat prijungtų įrengimų perkėlimas į naujas vietas. Šie pakeitimai dažnai vykdomi neįvertinant visų pakeitimų įtakos į bendrą elektros tiekimo infrastruktūrą.

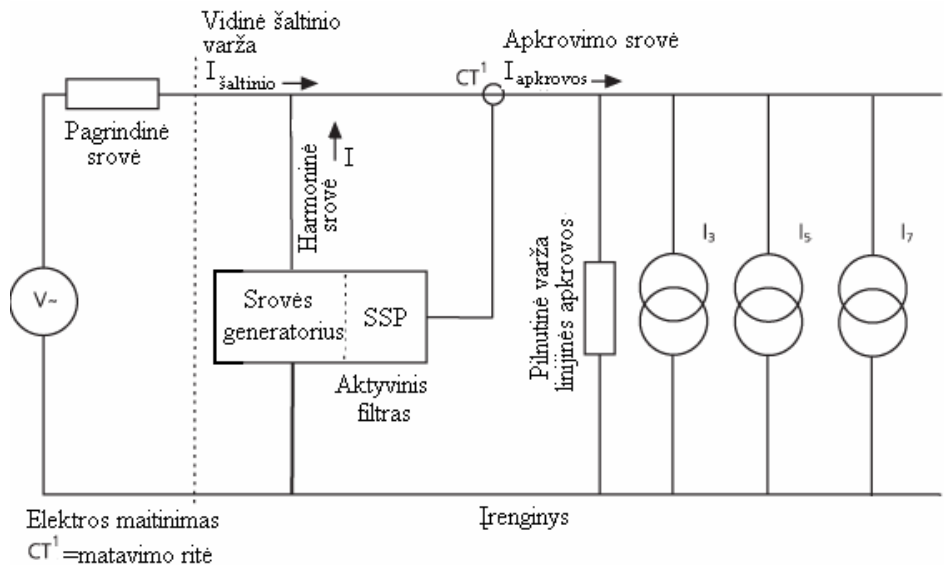
Kabelių keitimas eksploatuojamuose pastatuose gali būti labai brangi priemonė, todėl naudojami korekcijos metodai. Vienas iš jų yra pasyvių filtrų panaudojimas. Suprojektuoti efektyvų, pasyvų šuntuojantį filtrą 3-ai harmonikai yra sudėtinga. Bet koks pasyvus filtras panaudojamas tik tom harmonikom, kuriom buvo suprojektuotas, todėl kitiems dažniams bus

reikalingi individualus filtrai atitinkamiems dažniams. Bet koku atveju keičiantis harmonikų sudėčiai, pasyvus filtrai turi būti keičiami arba papildomi. Transformatoriai su apvijų sujungimo zigzago būdu efektyvus prieš tokias harmonikas. Geriausias šiuo atveju sprendimo atvejis yra aktyvių filtrų (AHF) panaudojimas.

## 2.1 Aktyvių filtrų topologija

Aktyvių filtrų idėja nėra naujiena, bet efektyvių technologijų nebuvimas pagal priimtinas kainas stabdė jų panaudojimą daugelį metų. Šiandien plačiai prieinami bipoliariniai tranzistoriai su izoliuotu užtvaru ir skaitmeninių signalo procesoriumi (SSP) panaudojimas išsprendė šią problemą.

Šių filtrų panaudojimo principas labai paprastas. Jėgos elektronika panaudojama harmoninių srovių generavimui būtinu maitinti nelinejinės apkrovos tokiu metodu, kad srovė išlaikytų maksimaliai taisyklingą sinusoidės formą. 2.1 pav. pavaizduota principinė schema tokio įrenginio pajungimui.



2.1 pav. Lygiagretus aktyvinis harmonikų filtras

Apkrovimo srovė matuojama rite-transformatoriumi. Ši informacija naudojama srovės generatoriaus gamybai, kad galėtų į tinklą paduoti tokios harmoninės srovės (pagal amplitudę, formą ir fazę), kuri būtina, kad kompensuoti apkrovos iškraipymus sekančiame srovės cikle. Praktiškai harmoninė srovė sumažėja 90%.



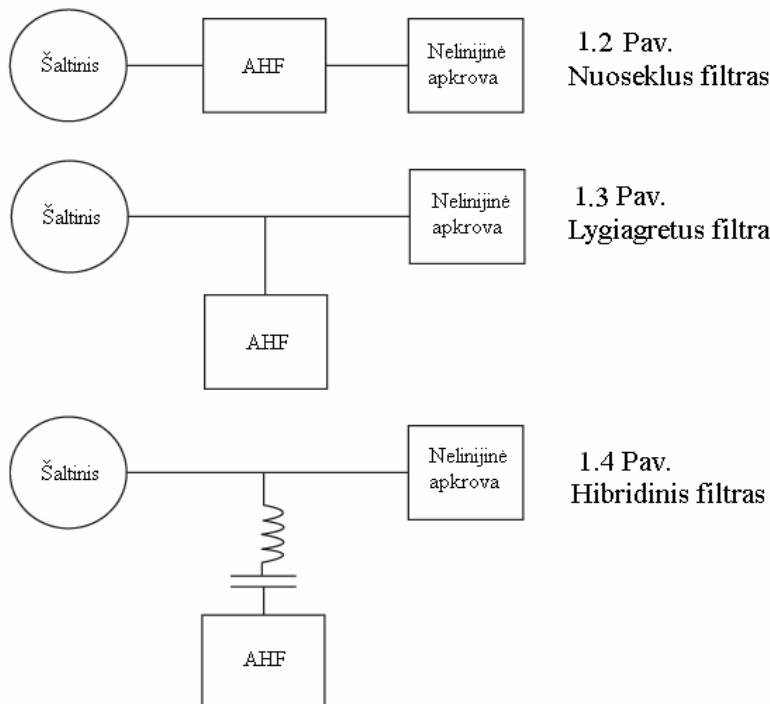
AGF valdomi pagal davinius kurie gaunami nuo ritės-transformatoriaus dinamiškai reaguoja į harmonikų kaitas apkrovoje. Analizės procesai ir generavimas kontroliuojami programinės įrangos pagalba, todėl įrenginys lengvai programuojamas kompensacijai atskirų harmonikų su tikslu užtikrinti maksimalų naudingumo koeficientą įrenginio galimų charakteristikų ribose.

Pasiūlytas didelis kiekis skirtingų topologijų, kai kurios bus aprašytos žemiau. Kiekvienai topologijai nurodoma būtinų parametru specifika, atskirų elementų bei viso įrenginio parinkimas tom apkrovom, kurios turi būti sukompensuotos.

**Nuoseklieji filtrai.** Šis filtrų tipas, sujungtas nuosekliai paskirstymo tinkle, kompensuoja kaip generuojamos apkrovos harmoninės srovės taip ir įtampos iškraipymus jau esančius maitinimo sistemoje. Šis sprendimas iš techninės pusės primena linijinį filtrą ir turi būti parinktas išeinant iš pilno apkrovimo.

**Lygiagretūs filtrai.** Lygiagretūs filtrai, dar vadinami šuntuojančiais, sujungiami lygiagrečiai kintamos srovės linijom ir turi būti parinkti tik srovės harmonikom susidariusiom nelinejinėje apkrovoje.

**Hibridinis filtras.** Šis sprendimas sujungiantis savyje aktyvų ir pasyvų filtrą, gali būti nuoseklaus arba lygiagretaus tipo. Kai kuriais atvejais tai gali būti naudingas sprendimas, pasyvus filtras vykdo pagrindinę filtraciją (pvz. 5-os harmonikos) o aktyvus, dėka savo dinamiško metodo aprėpia kitas harmonikų eiles.



## 2.2 Reaktyvios galios parinkimas filtravimo kompensavimo įrenginiui

FKĮ remiantis reaktyvios galios normatyviniais dokumentais nustatantis reaktyvios galios koeficiento reikšmę keitiklio prijungimo prie tinklo taške:

$$Q_{f.K} = P(\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2), \quad (2.1)$$

čia  $P$  - keitiklio aktyvioji galia, W;

$\operatorname{tg} \varphi_1, \operatorname{tg} \varphi_2$  - reaktyvios galios koeficientai prieš ir po FKĮ pajungimo.

Jeigu keitiklis turi kintamą reaktyvios galios naudojimo grafiką, pvz. naudojamas elektros pavarom, tai reaktyvi FKĮ galia turi būti parenkama pagal maksimalios reaktyvios galios panaudojimą. Šiuo atveju būtina užtikrinti tokį šios galios kompensacijos laipsnį, kad įtampos reikšmės nukrypimai keitiklio prijungimo prie tinklo vietoje neišeitų už normos ribų. Įtampos nukrypimai procentais paskaičiuojami pagal formulę:

$$\delta U = \frac{U - U_{nom.}}{U_{nom.}} \cdot 100, \quad (2.2)$$

čia  $U$  – įtampos esanti reikšmė, V;

$U_{nom.}$  – nominalinė įtampos reikšmė, V.

Tikroji įtampos reikšmė nustatoma sekančiai:

$$U = U_{\xi} - \Delta U, \quad (2.3)$$

čia  $U_{\xi}$  – maitinimo šaltinio įtampa, V;

$\Delta U$  - įtampos kritimas nuo maitinimo šaltinio iki keitiklio prijungimo vietos, V.

Įtampos kritimas paskaičiuojamas pagal formulę:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U} = \Delta U_p + \Delta U_q, \quad (2.4)$$

čia  $X$  – reaktyvinė linijos varža iki keitiklio prijungimo vietos;  
 $\Delta U_p$  ir  $\Delta U_q$  – aktyvinė ir reaktyvinė įtampos dedamosios, V.

FKĮ pajungimo atveju reaktyvinė įtampos kritimo dedamoji  $\Delta U_q$  sumažėja. Kadangi pramoninių įmonių tinkluose  $X \gg R$ , tai  $\Delta U$  pagrindinai turi įtakos  $\Delta U_q$  dedamoji. FKĮ panaudojimas sumažina įtampos nukrypimus. Reaktyvios galios reguliavimui į FKĮ kompleksą turi būti įjungta atitinkama aparatūra. Yra dvi reaktyvios galios reguliavimo kryptys: laiptuotas ir švelnus.

Esant laiptuotam reguliavimui FKĮ pagal reaktyvią galią išskaidoma į kelis laipsnius. Laipsniai komutuojami mechaniniais arba tiristoriniais išjungikliais.

Esant švelniam reguliavimui lygiagrečiai FKĮ įsijungia valdomas reaktyvios energijos vartotojas. Reaktyviojo balasto vietoje gali būti naudojami:

1. prisotinti reaktoriai;
2. prisotinami reaktoriai – transduktoriai;
3. fazinio valdymo reaktoriai, tai yra reaktoriai, kurių srovė reguliuojama nuosekliai įjungta tiristorine schema.
4. reaktyvios galios tiristoriniai šaltiniai.

2.1 lentelė

Valdymo būdas	Apytikrė vertė
Nevaldomas FKĮ	1
Laipsninis tiristorinis valdymas	8
Lygiagretus rektoriaus pajungimas: fazinis valdymas prisotintas	9 15

Šiuo metu daugiausiai paplitusios schemas su fazinio valdymo reaktoriais, palyginus su prisotintais reaktoriais įrenginiai jų pagrindu turi geresnes dinamines charakteristikas, gamybos technologija paprastesnė kaina ir nuostoliai mažesni.

Tiristoriniai reaktyvios galios šaltiniai sudaryti iš lygintuvų, prie kurio prijungtas kondensatorius arba reaktorius, todėl jie generuoja daug harmonikų kaip bet koks keitiklis. Dėl šios priežasties jų panaudojimas valdomose FKĮ schemose ribotas.

Įvairių reaktorių galingumo įrenginių iki 30 MVA valdymo būdų paliginamoji vertė duota 2.1 lentelėje, kur už bazinį dydį priimta vertė nevaldomo FKĮ .

Bendras reaktyvios galios su lygiagrečiu balastiniu reaktorium reguliavimo schemas trūkumas – didelė reaktoriaus galia, palyginus su FKĮ kondensatorių reaktyvios galios dalimi. Todėl kainos sumažinimui valdomo FKĮ naudojamos kombinuotos schemos, kuriose reaktyvios galios dalis keičiama laipsniškai, o kita – švelniai, tai leidžia sumažinti reaktoriaus galią ir esant atitinkamam valdymo algoritmui gauti sistemą su švelniu reaktyvios galios valdymu visame diapazone.[11]

### 3. Įtampos keitiklių įtaka maitinimo tinklui ir priemonės jo poveikio sumažinimui

Keitiklis gali daryti neigiamą įtaką tinklui, nes gali pakeisti tinklo įtampos kokybę, t. y.; keitiklį maitinančio tinklo kreivės forma gali skirtis nuo sinusinės ventilių komutacijos proceso metu;

esant staigiam reaktyvios galios pareikalavimui, gali keistis veikianti maitinimo tinklo reikšmė keitiklio pajungimo taške.

Jei iškraipymai ir maitinimo tinklo svyravimai viršija leistina, reikalinga panaudoti priemones nurodytas 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė

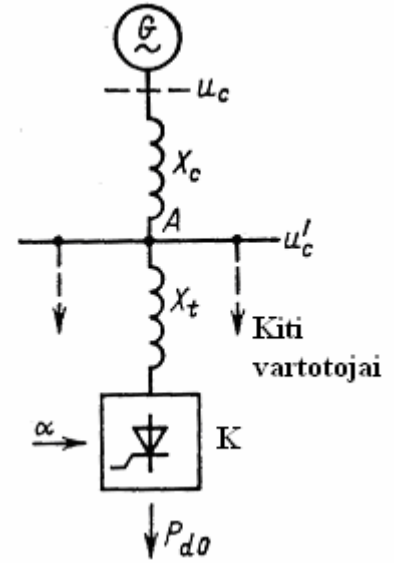
#### Priemonės naudojamos sumažinti keitiklių įtaka maitinimo tinklui

Priemonės	Tikslas	Trūkumai
Pulsacijos skaičiaus padidinimas	Aukštųjų harmonikų sumažinimas	Keitiklio kainos padidėjimas
Sutampantis arba priešpriešinis dviejų valdomų keitiklių pajungimas	Pareikalaujamos reaktyvios galios pagal pirmą harmoniką sumažinimas	Padidėjęs aukštųjų harmonikų kiekis srovėje kuri naudojama iš tinklo
Tinklo trumpojo jungimo dydžio padidinimas	Tinklo įtampos svyravimo ir kreivės formos iškraipymo sumažinimas	Pakila įrengimo kaina, padidėja trumpo jungimo srovės
Keitiklio transformatoriaus induktyvios sklaidos arba nuosekliai įjungto srovę ribojančio reaktoriaus padidinimas	Tinklo iškraipymo sumažinimas, trumpo jungimo srovės sumažinimas	Reaktyvios galios komutacijos padidėjimas; apkrovimo charakteristikos pasvirimo padidėjimas
Vietoj fazinio reguliavimo išplėstinis impulsinis išėjimo įtampos reguliavimas esant dažniui žemesniam už tinklo	Aukštųjų harmonikų likvidavimas tinklo srovėje	Galima tik apkrovimui su didele laiko pastoviaja; galimybė atsirasti periodiniams tinklo pakitimams (fliker-efektas)
Lygiagrečiai kompensuojančių kondensatorių įjungimas	Postūmio koeficiento pagerinimas, įtampos pasikeitimo sumažinimas	Aukšta kaina, pavojus rezonanso atsiradimui tinkle, esant atitinkamam dažniui
Rezonansinių LC kontūrų prijungimas kurie suderinti pagal keitiklio harmonikos dažnį	Postūmio koeficiento pagerinimas, tinklo įtampos kreivės sumažinimas	Padidėjusi kaina

**Tinklo įtampos iškreipymai keitiklio pajungimo vietoje.** 3.1 pav. parodyta ekvivalentinė keitiklio schema, kuris prijungtas prie vienfazio arba trifazio tinklo. Generatorius G užtikrina sinusinės formos įtampą. Keitiklio P prijungimo taškas A sujungtas su generatoriumi prie tinklo su reaktyvia varža  $X_t$  tinklo dažnis; iškreipymus įtampos  $U_t'$  kreivėje šiame taške galime paaiškinti sekančiu būdu.

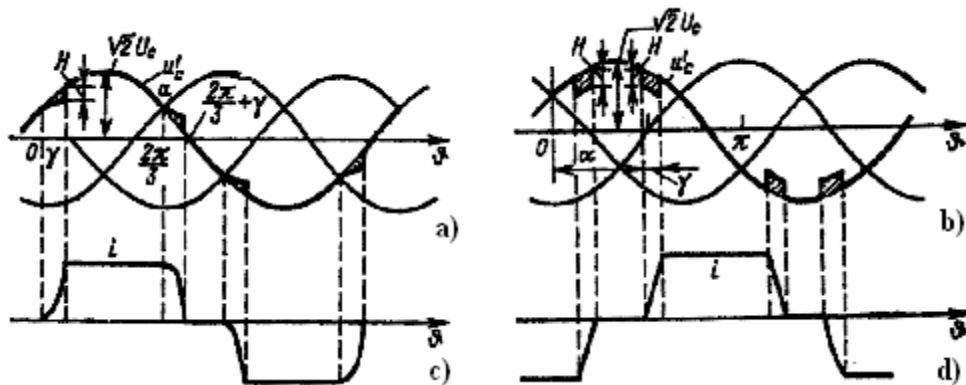
3.1 pav. Ekvivalentinė schema vienfazio arba trifazio tinklo su prijungtu keitikliu:

$X_c, X_t$  – tinklo ir keitiklio transformatoriaus induktyvioji varža.



Esant nevaldomui lygintuvui (3.2 pav. a ir b) intervale nuo  $0 \leq \vartheta \leq \gamma$  vartojama keitiklio srovė išauga ryšium su tuo dėl įtampos kritimo varžoje  $X_t$  ir įtampa  $u_t'$  gaunama mažesnė negu  $u_t$ . Tarpkomutaciniam intervale srovė i pastovi ir įtampa  $u_t'$  keičiasi pagal sinusoidę pakartodama įtampa  $u_c$  keičiasi pagal sinusoidę, pakartodama įtampą  $u_t$ . Intervale  $2\pi/3 \leq \vartheta \leq 2\pi/3 + \gamma$  srovė I krenta iki nulio dėl  $X_t$  įtampa  $u_t'$  išauga palyginus su  $u_t$ .

Didžiausi įtampos šuoliai yra esant valdymo kampui  $\alpha = 90^\circ$  (arba esant  $\alpha = 90^\circ - \gamma/2$ ) kas matyti iš paveiksluko 3.2 b ir d.



3.2 pav. Įtampos kreivės formos iškreipymai pajungimo taške A keitikliui, išpildyto pagal trifazę tilto schemą :

$u_c'$ , i- tinklo įtampa taške A ir keitiklio vartojama srovė įvertinant induktyvines  $X_c, X_t$ ; a ir c – esant  $\alpha = 0$ ; b ir d – esant  $\alpha = \pi/2 - \gamma/2$

**Keitiklių įtaka tinklui nesant kompensuojančių kondensatorių.** Padarysim sekančią prielaidą:

Tinkle iš kurio maitinamas keitiklis, nėra kondensatorių ir elektros variklių arba jie pajungti taip toli kad neturi įtakos keitiklio poveikiui į tinklą; keitiklis sujungtas pagal trifazio tilto schemą sujungiant transformatoriaus apvijas pagal schemą žvaigždė- žvaigždė arba esant tinkle nuosekliai sujungtų reaktorių; po lyginimo srovė pilnai išlyginta. Šiuo atveju keitiklio įtaka į tinklą aprašoma toliau sekančiu santykiu (3.1-3.7) priklauso nuo galingumo  $P_{d0}$  išlygintos srovės pusėje, tinklo trumpo jungimo galingumo  $S_k$ , transformatoriaus keitiklio įtampos trumpo jungimo induktyvinės komponentės  $u_{xt}$  arba reaktoriaus induktyvumu, įjungto tinklo pusėje ir valdymo kampo  $\alpha$ .

Pažymėsim per  $K_p$  (pajungimo koeficientas) santykį:

$$K_p = P_{d0} / S_k; \quad (3.1)$$

Nevaldomas lygintuvas. Įtampos sumažėjimo trukmė įtampos kreivėje:

$$\cos \gamma_0 = 1 - (u_{xt} + K_p); \quad (3.2)$$

Įtampos sumažėjimo dydis:

$$h_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{K_p}{u_{xt} + K_p} \sin \gamma_0; \quad (3.3)$$

Harmonikų dalinis koeficientas:

$$k_v = K_p I_v / I_{vi}; \quad (3.4)$$

čia  $I_v / I_{vi}$  funkcijoje  $d_{xt}$  nustatomas pagal paveikslą 3.12 [žiur.(3.6)] pilnas harmonikų koeficientas nustatomas pagal kreives paveikslą 3.3a [santykis (4.3)].

Valdomas lygintuvas esant nulinei išlygintai įtampai, tai yra esant  $\alpha_1 = \pi/2$  (arba tiksliau esant  $\alpha_1 = \pi/2 - \gamma/2$ ). Įtampos sumažėjimo trukmė nustatoma perdengimo kampų  $\gamma_1$ :

$$\sin(\gamma_1/2) = (u_{xt} + K_p)/2; \quad (3.5)$$

Įtampos dalinio dingimo reikšmė:

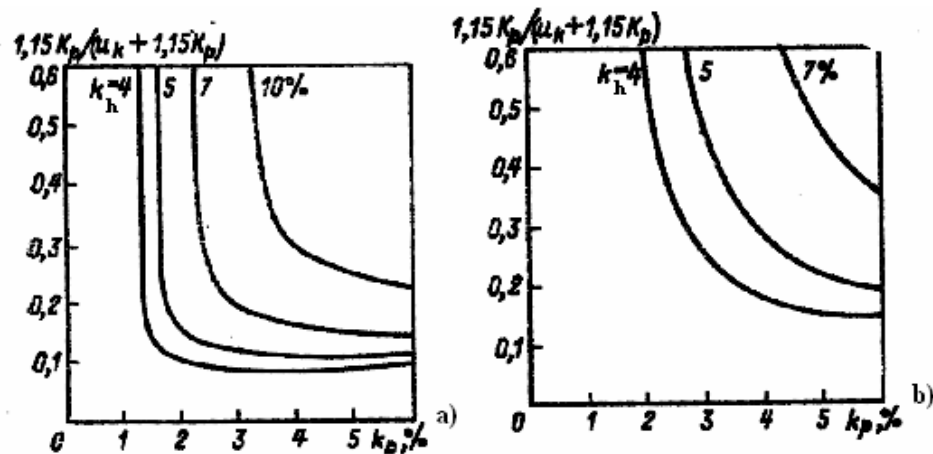
$$h_i = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{K_p}{u_{xt} + K_p}; \quad (3.6)$$

Koeficientas  $k_v$  nustatoma pagal (3.4).

Koeficientas  $k_h$  galime įvertinti pagal paveikslą 3.3b.

Atitinkamą įtampos  $\Delta u$  pakitimo reikšmė bus:

$$\Delta u = 1,1K_p; \quad (3.7).$$



3.3 pav. Kreivės pilnam harmonikų koeficiento  $K_h$  nustatymui funkcijoje priklausomai nuo pajungimo koeficiento  $K_p$  ir sąlyginės trumpo jungimo įtampos  $u_k$ :  
a – esant  $\alpha = 0$ ; b – esant  $\alpha = \pi/2 - \gamma/2$

**Keitiklių įtakos kompensacija jėgos kondensatorių pagalba.** Jeigu keitiklio įtaka tinklui yra didelė ir negali būti panaudoti kiti būdai nurodyti lentelėje 3.1, tai šią įtaką galima sumažinti pajungus lygiagrečiai keitikliui galios kompensuojančius kondensatorius. Šis būdas



nagrinėjamas žemiau, čia priskiriamas atvejis kai kompensaciniai kondensatoriai pajungiami keitiklio postūmio koeficiento pagerinimui arba galios koeficiento pagerinimui kitam vartotojui maitinamam iš to paties tinklo. Būtina įvertinti kad kondensatorių C talpis sukuria su maitinimo tinklo  $L_t$  lygiagrečių kontūrą, kurio rezonansinio dažnio kartotinumą pagal tinklo įtampą:

$$\nu_{rez} = 1/\omega_t(L_t C)^{1/2}; \quad (3.8)$$

taip, kad

$$C = Q_c / (3\omega_t U_c^2); \quad (3.9)$$

ir

$$L_t = 1,1 \cdot 3U_t^2 / \omega_t S_K; \quad (3.10)$$

tai galima užrašyti

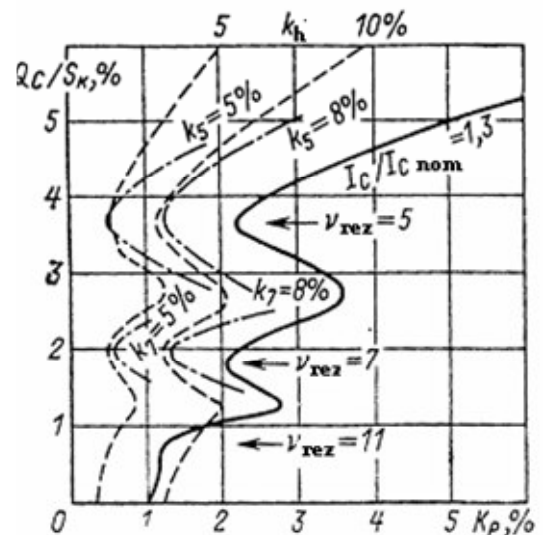
$$\gamma_{rez} = 1/(1,1Q_c / S_K)^{1/2} \quad (3.11)$$

Pereinamieji procesai, kurie susidaro keitiklyje komutuojant puslaidininkius, sudaro sąlygas atsirasti tinkle aukštų harmonikų srovėm  $\nu_t$ . Jeigu kontūro dažnumas kuris sudarytas kintamo srovės tinklo ir kompensacinių kondensatorių,  $\nu_{rez}$  ir kokios nors keitiklio srovės harmonikos  $\nu_t$  dažnumas artimas arba sutampa srovė atitinkamos harmonikos išauga ir to pasėkoje įtampos tinklo iškreipymai viršija leistinas reikšmes. Gali įvykti kompensuojančių kondensatorių perkrovimas. Paprastai galios kondensatoriams leistina ilgalaikė perkrova pagal srovę 30% ir pagal įtampą 10%.

3.4 pav. Apibendrinta diagrama rezultatų skaičiavimui, esant lygiagrečiai kondensatorių kompensacijai trifaziam lygintuvo filtrui :

$Q_c$  –reaktyvioji kondensatorių galia;  $I_c/I_{cnom}$  – ribinė pagal išilimo santykinės kondensatorių srovės charakteristika;  $k_h, k_5, k_7$  – ribinės charakteristikos pilnam ar daliniam harmonikų koeficientams. Diagrama teisinga diapazone

$$50^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ; 0,2 \leq 1,5K_p / (u_{st} + 1,15K_p) \leq 0,5$$



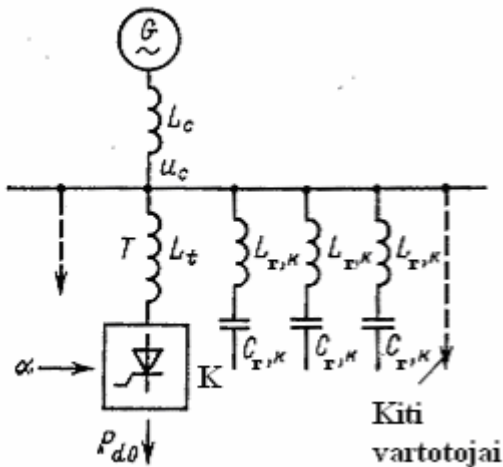
Iš (3.11) seka kad esant  $\nu_{rez} = \nu_I = 5; 7; 11$  ir t.t. rezonansas atsiranda esant  $Q_t / S_K = 3,6; 1,9; 0,75\%$  ir t.t. 3.4 pav. pavaizduota priklausomybė leistinų  $Q_t / S_K$  nuo pajungimo koeficiento  $K_P = P_{d0} / S_K$  kuriom esant nebus viršytos nurodytos pav. 3.4 reikšmės:

pilno harmonikų koeficiento (paskaičiuoto  $\nu < 25$ );

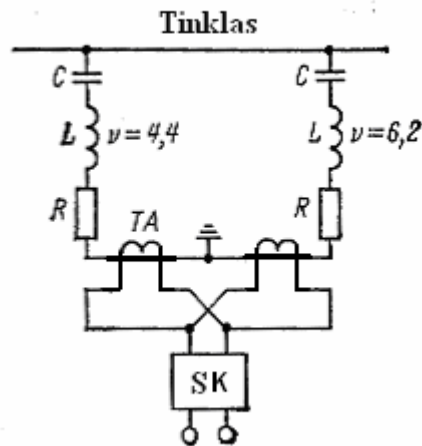
daliniai koeficientai  $k_5$  ir  $k_7$ ;

leistinos kondensatoriaus srovės  $I_C$ .

**Kompensacija rezonansinių kontūrų pagalba.** Kaip matyti iš 3.4 pav. kompensuojančių kondensatorių panaudojimas labai ribotas dėl rezonanso susidarymo galimybės.



3.5 pav. Rezonansinių kontūrų pajungimo schema.



3.6 pav. Apsauginis įrenginys dviem rezonansiniams kontūrams: TA- srovės transformatorius; SK- signalo keitiklis.

Situacija galima pagerinti įjungus kondensatorius į įtampos rezonanso kontūro sudėtį. Tam būtina nuosekliai su kondensatorium (talpumas  $C_{r,K}$  ir galia  $Q_{r,K}$ ) įjungti reaktorių  $L_{r,K}$  (pav. 3.5.). Tokia slopinimo grandinė turi rezonansinį dažnį kurio kartotinumą pagal tinklo dažnį :

$$\nu_{r,K} = \frac{1}{\omega_c (L_{r,K} C_{r,K})^{1/2}}; \quad (3.12)$$

Slopinimo grandinė ir maitinančio tinklo induktyvumas  $L_t$  taip pat sudaro rezonansinį kontūrą kurio dažnio kartotinumai:

$$v_r = \frac{v_{r,K}}{(1,1v_{r,K}^2(Q_{r,K}/S_K)+1)^{1/2}} \quad (3.13)$$

Atsiradus papildomam induktyvumui  $L_{r,K}$  pajungtas kondensatorių galingumas sumažėja  $v_{r,K}^2/(v_{r,K}^2-1)$  karto ir tiek pat karto padidėja jo įtampa.

Tikslinga kontūro dažnumo kartotinumą su įtampos rezonansu parinkti diapazone  $4,4 \leq v_{r,K} \leq 4,7$ ; tada  $v_{r,K}^2/(v_{r,K}^2-1)=1,05$  ir kompensuojantis kondensatorius bus panaudotas pagal įtampą pilnai. Pagal (3.13)  $v_r$  visada mažiau  $v_{r,K}$ , pavojus rezonanso kilimui esant šešiapulsinei lyginimo schemai rezonansui kilti pavojaus nėra.

Tolimesnis neigiamos keitiklio įtakos į tinklą sumažinimas pasiekiamas lygiagrečiai pajungus keleta LC grandinių su skirtingais suderintais rezonansiniais dažniais (3.5 pav.).

Optimalios rezonansinio dažnumo kartotinumai šiom grandinėm reikšmės sudaro: dviem grandinėm 4,4 ir 6,2; trim 4,4; 6,2 ir 10. Aukštesnės eilės harmonikas galime panaikinti užtrumpinę jas specialaus aukštų dažnumų filtrų pagalba.

Panašių kompensuojančių filtrų apsaugai nuo avarinių srovių naudojami saugikliai galingiems filtrams galima numatyti kaip parodyta paveiksle 3.6 apsaugos įrenginį kuris išduoda signalą pasikeitus srovėms nuo nominalinės reikšmės abiejose filtrų pusėse.

Keitiklių įtaka gyvenamųjų namų ir buitinių patalpų žemos įtampos tinklams. Dauguma buitinių prietaisų maitinami iš tinklo turinčius daugeli atvejų sekančias induktyvias varžų reikšmes, omiais (nustatytu esant dažniui 50Hz):

Tarp fazinio ir neutralės laido (fazės varža):

$$\underline{Z}_1 = (0,4 + j0,25); \quad (3.14)$$

tarp dviejų fazių (linijinė varža):

$$\underline{Z}_3 = (0,24 + j0,15); \quad (3.15)$$

Jeigu keitiklyje arba įtampos reguliatoriuje kuris panaudojamas buitiniame prietaise panaudojamas fazinis valdymas ir reikalaujama kad harmonikų koeficientas  $k$  neviršytu nurodytu pagal lentelę 3.2 reikšmių tai vartojama srovė atitinkamos prijungus prietaisą fazinei įtampai 230V neturi būti daugiau negu

$$I_{v \max} = k_v \cdot 230 / |Z_1|, \quad (3.16)$$

3.2 lentelė

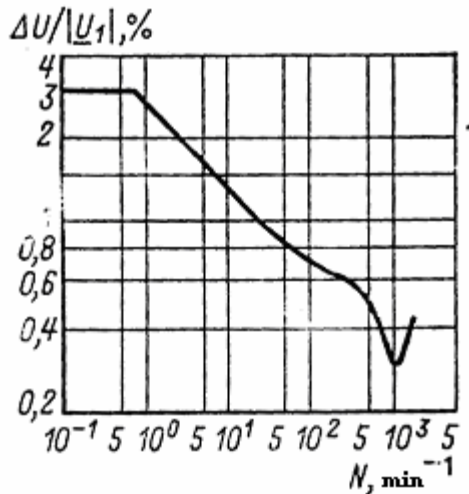
**Maksimalios leistinos harmonikų reikšmės pajungus buitinius prietaisus į tinklą 230-400V.**

Harmonikų eilės numeris	3	5	7	9	11	13	15-19
%	0.85	0.65	0.6	0.4	0.4	0.3	0.25

O pajungus trifazius prietaisus į tinklą su įtampa 230-400V –ne daugiau kaip:

$$I_{v \max} = k_v \cdot 230 / |Z_3|; \quad (3.17)$$

Šias ribines reikšmes galime nustatyti matavimo pagalba arba skaičiuojama.



3.7 pav. Maksimaliai leistinas santykinis tinklo įtampos pasikeitimas priklausomai nuo apkrovos srovės impulsų skaičiaus per minutę  $N$ .

Jeigu prietaise naudojamas platuminis impulsinis reguliavimas žemo dažnio tinklo įtampa keisis  $U_1$ , kai srovė neteka, iki  $U_2$ , kai srovė teka  $I$  ir santykinis įtampos pasikeitimas  $\Delta U / |U_1|$  sudarys pajungus prietaisą fazinė įtampa 220V;

$$\frac{\Delta U}{|U_1|} = \frac{|Z_1 I + U_2| - |U_2|}{|Z_1 I + U_2|}; \quad (3.18)$$

O prijungus trifazi prietaisą į tinklą 220V/380V:

$$\frac{\Delta U}{|U_1|} = \frac{|Z_3 I_1 + U_2| - |U_2|}{|Z_3 I_1 + U_2|}; \quad (3.19)$$

Paveikslėlyje 3.7 pavaizduota maksimaliai leistina įtampos santykinė pokyčio priklausomybė nuo maitinančios įtampos paketų skaičiaus paduodamos į prietaisą per minutę.

UAB „Armetlina”, kuri gamina elektros įrengimus, turi pramoninio objekto ir administracinio pastato 04kV elektros maitinimo tinklą. Apšvietimui naudojamos liuminescencinės lempos, be to, yra įrengimų, kur naudojami puslaidininkiniai prietaisai, taip pat kompiuterinė technika, kuri daro įtaką aukštųjų harmonikų atsiradimui.

Su prietaisu PQ ANALYSER buvo išmatuotos UAB „Armetlinos” elektros tiekimo linijos įvado srovės ir įtampos. Matavimo tikslas -pamatyti srovės ir įtampos kreivės formą, taip pat nustatyti esančių aukštesniųjų harmonikų dydį ir jų kiekį. Buvo nustatyta, kad perdavimo tinkle yra aukštesniųjų srovės harmonikų, kurios iškraipo sinusinę kreivės formą. Rastos sekančios harmonikos: 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13. Bandymų rezultatai pateikti priede. 3.3 ir 3.4 lentelėse pateikti srovės ir įtampos harmonikų duomenys gauti bandymo metu.

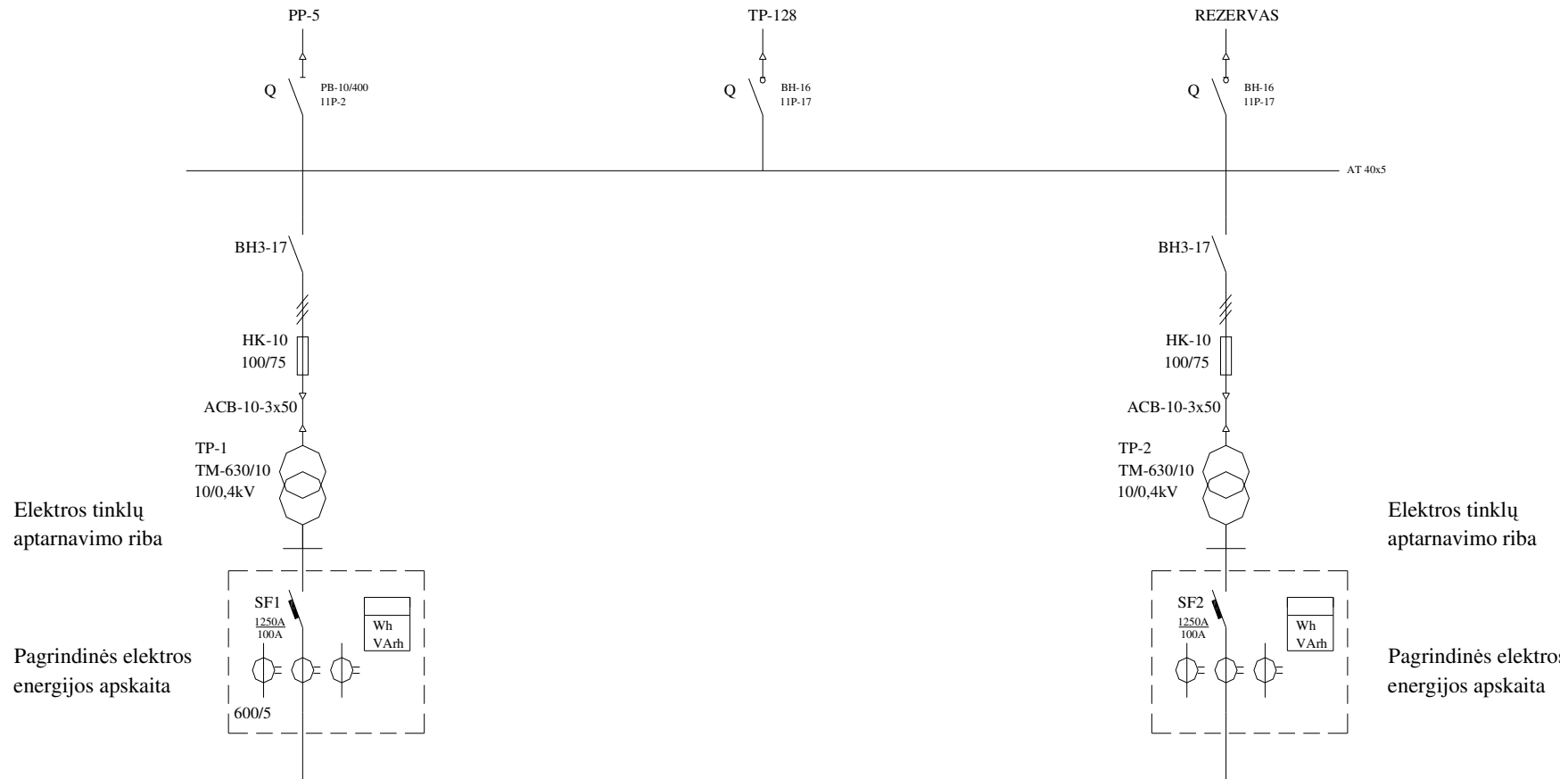
3.3 lentelė

Harmonikos	Fazės srovės (A)		
	A	B	C
H3	7	<b><u>11,6</u></b>	5,2
H5	6,6	6,4	<b><u>7</u></b>
H7	5,3	10	<b><u>10,2</u></b>
H9	2,8	<b><u>3,6</u></b>	2,5
H11	<b><u>3,6</u></b>	2,7	3,4
H13	0,9	1,3	<b><u>1,4</u></b>

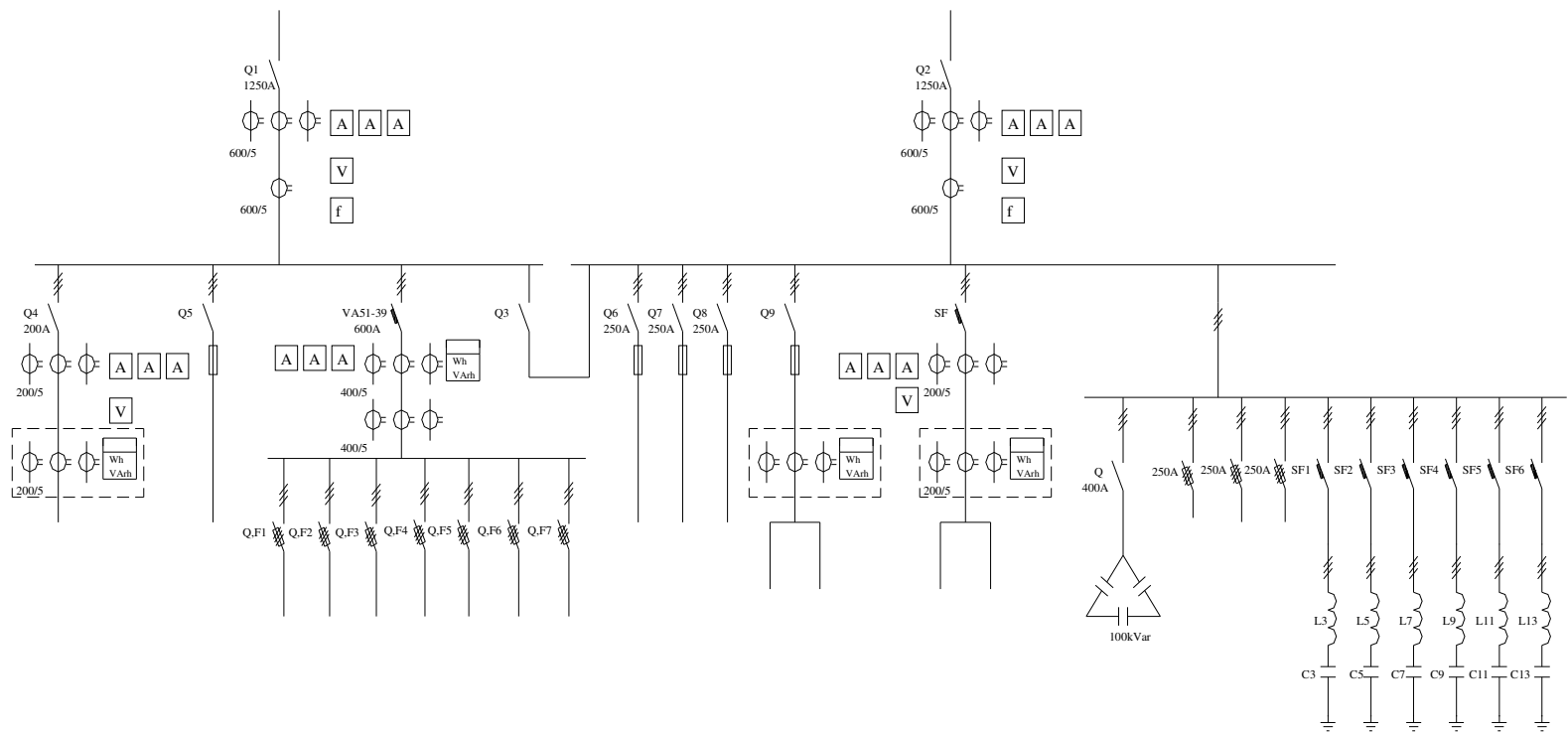
3.4 lentelė

Harmonikos	Fazės įtampos (V)		
	A	B	C
H3	3,8	6,6	4,5
H5	2,2	1,9	2,4
H7	1,5	2,3	2,1
H9	2,3	2,28	2,2
H11	0,7	0,6	1
H13	0,17	0,21	0,33

Iš 3.3 lentelės galima matyti, kad didžiausios srovės yra  $H3=11,6$ ;  $H5=7$ ;  $H7=10,2$ ;  $H9=3,6$ ;  $H11=3,6$ ;  $H13=1,4$ . Iš bandymo rezultatų buvo atlikti sekantys skaičiavimai.



4.8 pav. Gamyklos elektros tiekimo pajungimo prie tinklo schema



4.9 pav. Gamyklos elektros tinklo skirstymo schema



#### 4. Aukštųjų harmonikų filtrų skaičiavimas

Trifazis trumpo jungimo galia ant pastotes šynų  $S_{tr,j}=9,86$  MV A. Šynų vardinė įtampa  $U_{\xi}=0,4$  kV. Nominalinė kondensatorių įtampa  $U_{V,K}=0,4$  kV.

Srovės harmonikų skaičiuojamieji dydžiai  $I_v$ , A;

$$I_3 = 11,6 \text{ A};$$

$$I_5 = 7 \text{ A};$$

$$I_7 = 10,2 \text{ A};$$

$$I_9 = 3,6 \text{ A};$$

$$I_{11} = 3,6 \text{ A};$$

$$I_{13} = 1,4 \text{ A}.$$

Pilna kondensatorių baterijos galia reaktyvios galios kompensavimui  $Q_K=115$  kvar.

#### Kondensatorių baterijos parinkimas filtrams

Apytikslis kondensatorių baterijos filtrams galia, kuri nustatoma pagal srovės harmonikas,

$$Q_A = \sqrt{3} \cdot 1,3 U_{\xi} I_v \text{ kvar.}$$

$$Q_{A3} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 0,4 \cdot 11,6 = 10,45 \text{ kvar};$$

$$Q_{A5} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 0,4 \cdot 7 = 6,3 \text{ kvar};$$

$$Q_{A7} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 0,4 \cdot 10,2 = 9,19 \text{ kvar};$$

$$Q_{A9} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 0,4 \cdot 3,6 = 3,24 \text{ kvar};$$

$$Q_{A11} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 0,4 \cdot 3,6 = 3,24 \text{ kvar};$$

$$Q_{A13} = \sqrt{3} \cdot 1,3 \cdot 0,4 \cdot 1,4 = 1,26 \text{ kvar}.$$

Priimta kondensatorių baterijos galia, kvar.

$$Q_{S3} = 12 \text{ kvar};$$

$$Q_{S5} = 9 \text{ kvar};$$

$$Q_{S7} = 12 \text{ kvar};$$

$$Q_{S9} = 4 \text{ kvar};$$

$$Q_{S11} = 4 \text{ kvar};$$

$$Q_{S13} = 4 \text{ kvar}.$$

Harmonikų slopinimo efektyvumo koeficientas priimtai kondensatorių baterijai sąlyginiais vienetais:

$$k_p = \frac{Q_s}{S_{ir.j}};$$

$$k_{p3} = \frac{12000}{9860000} = 0,12 \cdot 10^{-2};$$

$$k_{p5} = \frac{9000}{9860000} = 0,09 \cdot 10^{-2};$$

$$k_{p7} = \frac{12000}{9860000} = 0,12 \cdot 10^{-2};$$

$$k_{p9} = \frac{4000}{9860000} = 0,04 \cdot 10^{-2};$$

$$k_{p11} = \frac{4000}{9860000} = 0,04 \cdot 10^{-2};$$

$$k_{p13} = \frac{4000}{9860000} = 0,04 \cdot 10^{-2}.$$

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

$$\alpha_p = \frac{v^2}{v^2 - 1};$$

$$\alpha_{p3} = \frac{3^2}{3^2 - 1} = 1,125;$$

$$\alpha_{p5} = \frac{5^2}{5^2 - 1} = 1,042;$$

$$\alpha_{p7} = \frac{7^2}{7^2 - 1} = 1,021;$$

$$\alpha_{p9} = \frac{9^2}{9^2 - 1} = 1,013;$$

$$\alpha_{p11} = \frac{11^2}{11^2 - 1} = 1,008;$$

$$\alpha_{p13} = \frac{13^2}{13^2 - 1} = 1,006.$$

Koeficiento, kuris charakterizuoja kondensatorių baterijas pagal įtampos atsargą, įvertinant baterijos nominalinę ir tinklo įtampą, skaičiavimas:

$$k_{ats.} = \frac{U_s}{\sqrt{3}U_{nom.b}} = \frac{0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 0,58.$$

Kondensatorių baterijos patikrinimas pagal viršįtampius, nusistovėjusiame režime:

$$\alpha_p k_{ats.} \leq 1;$$

$$H3 = 1,125 \cdot 0,58 = 0,65 \leq 1;$$

$$H5 = 1,042 \cdot 0,58 = 0,6 \leq 1;$$

$$H7 = 1,021 \cdot 0,58 = 0,59 \leq 1;$$

$$H9 = 1,013 \cdot 0,58 = 0,588 \leq 1;$$

$$H11 = 1,008 \cdot 0,58 = 0,585 \leq 1;$$

$$H13 = 1,006 \cdot 0,58 = 0,583 \leq 1.$$

Koeficiento, kuris įvertina dažnio charakteristikos netiesiškumą, filtrų įtaka jos deformacijai ir nuokrypis filtrų parametrų įtakai, dydžiui atitinkančiam rezonansiniam suderinimui:

$$\eta_v = \frac{\alpha}{k_1 k_p \nu^2}$$

$k_1=1$ ,  $\alpha = -0,02$  dėl H3, H5 ir H7;  $k_1=2$ ,  $\alpha = -0,01$  dėl H9, H11 ir H13

$$\eta_3 = \frac{-0,02}{0,12 \cdot 10^{-2} \cdot 3^2} = -1,85;$$

$$\eta_5 = \frac{-0,02}{0,09 \cdot 10^{-2} \cdot 5^2} = -0,89;$$

$$\eta_7 = \frac{-0,02}{0,12 \cdot 10^{-2} \cdot 7^2} = -0,34;$$

$$\eta_9 = \frac{-0,1}{0,04 \cdot 10^{-2} \cdot 9^2 \cdot 2} = -1,54;$$

$$\eta_{11} = \frac{-0,1}{0,04 \cdot 10^{-2} \cdot 11^2 \cdot 2} = -0,9;$$

$$\eta_{13} = \frac{-0,1}{0,04 \cdot 10^{-2} \cdot 13^2 \cdot 2} = -0,74.$$

Apkrovimo koeficiento nustatymas pagal  $\nu$ -tos harmonikos

$$k_{i\nu} = \frac{1}{1 + \eta_\nu};$$

$$k_{i3} = \frac{1}{1 - 1,85} = -1,1;$$

$$k_{i5} = \frac{1}{1 - 0,89} = 9,09;$$

$$k_{i7} = \frac{1}{1-0,34} = 1,52 ;$$

$$k_{i9} = \frac{1}{1-1,54} = -1,85$$

$$k_{i11} = \frac{1}{1-0,9} = 10 ;$$

$$k_{i13} = \frac{1}{1-0,74} = 3,85 .$$

Kondensatorių baterijos galios patikrinimas pagal sąlygą, išvengiančia kondensatorių perkrovimo pagal srovę, kvar.

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

$$Q_{pa.3} = \frac{3 \cdot 0,4 \cdot 11,6 \cdot (-1,1)}{1,6 - (0,65)^2} = -13 \text{ kvar};$$

$$Q_{pa.5} = \frac{3 \cdot 0,4 \cdot 7 \cdot 9,09}{1,6 - (0,6)^2} = 61,6 \text{ kvar};$$

$$Q_{pa.7} = \frac{3 \cdot 0,4 \cdot 10,2 \cdot 1,52}{1,6 - (0,59)^2} = 14,68 \text{ kvar};$$

$$Q_{pa.9} = \frac{3 \cdot 0,4 \cdot 3,6 \cdot (-1,85)}{1,6 - (0,588)^2} = -6,4 \text{ kvar};$$

$$Q_{pa.11} = \frac{3 \cdot 0,4 \cdot 3,6 \cdot 10}{1,6 - (0,585)^2} = 34,3 \text{ kvar};$$

$$Q_{pa.13} = \frac{3 \cdot 0,4 \cdot 1,4 \cdot 3,85}{1,6 - (0,583)^2} = 5,1 \text{ kvar}.$$

Reaktyvi galia, kuri sukuria filtrų kondensatorių baterijos, kvar

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

$$Q_{su.(H3)} = 12(1,125 \cdot 0,58)^2 = 5 \text{ kvar};$$

$$Q_{su.(H5)} = 9(1,042 \cdot 0,58)^2 = 3,29 \text{ kvar};$$

$$Q_{su.(H7)} = 12(1,021 \cdot 0,58)^2 = 4,21 \text{ kvar};$$

$$Q_{su.(H9)} = 4(1,013 \cdot 0,58)^2 = 1,38 \text{ kvar};$$

$$Q_{su.(H11)} = 4(1,008 \cdot 0,58)^2 = 1,37 \text{ kvar};$$

$$Q_{su.(H13)} = 4(1,006 \cdot 0,58)^2 = 1,36 \text{ kvar}.$$

### Filtrų reaktorių parinkimas

Kondensatorių baterijos vienos fazės talpinės varžos nustatymas,  $\Omega$ ;

$$x_{cv} = \frac{3U_{nom.b}^2}{Q_{pri}};$$

$$x_{c3} = \frac{3 \cdot 0,4^2 \cdot 10^3}{12} = 40 \Omega;$$

$$x_{c5} = \frac{3 \cdot 0,4^2 \cdot 10^3}{9} = 53,3 \Omega;$$

$$x_{c7} = \frac{3 \cdot 0,4^2 \cdot 10^3}{12} = 40 \Omega;$$

$$x_{c9} = \frac{3 \cdot 0,4^2 \cdot 10^3}{4} = 120 \Omega;$$

$$x_{c11} = \frac{3 \cdot 0,4^2 \cdot 10^3}{4} = 120 \Omega;$$

$$x_{c13} = \frac{3 \cdot 0,4^2 \cdot 10^3}{4} = 120 \Omega.$$

Induktyvios reaktorių varžos nustatymas pagal rezonanso sąlygas,  $\Omega$ ;

$$x_{rv} = \frac{x_{cv}}{\nu^2};$$

$$x_{r3} = \frac{40}{3^2} = 4,44 \Omega;$$

$$x_{r5} = \frac{53,3}{5^2} = 2,13 \Omega;$$

$$x_{r7} = \frac{40}{7^2} = 0,82 \Omega;$$

$$x_{r9} = \frac{120}{9^2} = 1,48 \Omega;$$

$$x_{r11} = \frac{120}{11^2} = 0,99 \Omega;$$

$$x_{r13} = \frac{120}{13^2} = 0,71 \Omega.$$

Nominalinė reaktoriaus srovė, A;

$$I_{r.nom.} \geq \frac{Q_{pri}}{\sqrt{3}U_s};$$

$$I_{r.nom.3} \geq \frac{12}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 17 \text{ A};$$

$$I_{r.nom.5} \geq \frac{9}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 13 \text{ A};$$

$$I_{r.nom.7} \geq \frac{12}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 17 \text{ A};$$

$$I_{r.nom.9} \geq \frac{4}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 5,77 \text{ A};$$

$$I_{r.nom.11} \geq \frac{4}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 5,77 \text{ A};$$

$$I_{r.nom.13} \geq \frac{4}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = 5,77 \text{ A};$$

Reaktoriaus reaktyvioji reikšmė %;

$$x_r = \frac{\sqrt{3}I_{r.nom.}x_{r,v.}}{10U_{r.nom.}};$$

$$x_{r3} = \frac{\sqrt{3} \cdot 17 \cdot 4,44}{10 \cdot 0,4} = 32,6 \text{ \%};$$

$$x_{r5} = \frac{\sqrt{3} \cdot 13 \cdot 2,13}{10 \cdot 0,4} = 12 \text{ \%};$$

$$x_{r7} = \frac{\sqrt{3} \cdot 17 \cdot 0,82}{10 \cdot 0,4} = 6 \text{ \%};$$

$$x_{r9} = \frac{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 1,48}{10 \cdot 0,4} = 3,8 \text{ \%};$$

$$x_{r11} = \frac{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,99}{10 \cdot 0,4} = 2,6 \text{ \%};$$

$$x_{r13} = \frac{\sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,71}{10 \cdot 0,4} = 1,8 \text{ \%}.$$

Reaktoriaus induktyvumas mH;

$$L_v = \frac{x_v}{2\pi f v};$$

$$L_3 = \frac{4,44}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 3} = 4,7 \text{ mH};$$

$$L_5 = \frac{2,13}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 5} = 1,4 \text{ mH};$$

$$L_7 = \frac{0,82}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 7} = 0,4 \text{ mH};$$

$$L_9 = \frac{1,48}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 9} = 0,5 \text{ mH};$$

$$L_{11} = \frac{0,99}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 11} = 0,3 \text{ mH};$$

$$L_{13} = \frac{0,71}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 13} = 0,2 \text{ mH}.$$

Vijų skaičius;

$$n = \sqrt{\frac{L_v}{\lambda D \cdot 10^{-4}}};$$

$$n_3 = \sqrt{\frac{4,7}{6,87 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4}}} = 262;$$

$$n_5 = \sqrt{\frac{1,4}{6,87 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4}}} = 143;$$

$$n_7 = \sqrt{\frac{0,4}{6,87 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4}}} = 76;$$

$$n_9 = \sqrt{\frac{0,5}{6,87 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4}}} = 85;$$

$$n_{11} = \sqrt{\frac{0,3}{6,87 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4}}} = 66;$$

$$n_{13} = \sqrt{\frac{0,2}{6,87 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4}}} = 54.$$

Laido skerspjūvio plotas  $\text{mm}^2$ ;

$$S_v = \frac{I_{r,nom}}{\rho};$$

$$S_3 = \frac{17}{1,5} = 11\text{mm}^2;$$

$$S_5 = \frac{13}{1,5} = 9\text{mm}^2;$$

$$S_7 = \frac{17}{1,5} = 11\text{mm}^2;$$

$$S_9 = \frac{5,77}{1,5} = 4\text{mm}^2;$$

$$S_{11} = \frac{5,77}{1,5} = 4\text{mm}^2;$$

$$S_{13} = \frac{5,77}{1,5} = 4\text{mm}^2.$$

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

$$r = \frac{h + c}{c};$$

$$r = \frac{0,1 + 4,5 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^{-3}} = 23$$

Vijų skaičius horizontalinėje plokštumoje.

$$k_v = \frac{n_v}{r};$$

$$k_3 = \frac{262}{23} = 11;$$

$$k_5 = \frac{143}{23} = 6;$$

$$k_7 = \frac{76}{23} = 3;$$

$$k_9 = \frac{85}{23} = 4;$$

$$k_{11} = \frac{66}{23} = 3;$$

$$k_{13} = \frac{54}{23} = 2.$$



Ritės apvijų laidų išdėstymas. Atstumas tarp gretimų vijų eilių  $a=3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

$$b_v = a \cdot k_v ;$$

$$D_1 = D - b_v ;$$

$$D_2 = D + b_v ;$$

$$b_3 = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 11 = 0,04 \text{ m} ;$$

$$D_1 = 0,1 - 0,04 = 0,06 \text{ m} ;$$

$$D_2 = 0,1 + 0,04 = 0,14 \text{ m} ;$$

$$b_5 = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 6 = 0,02 \text{ m} ;$$

$$D_1 = 0,1 - 0,02 = 0,08 \text{ m} ;$$

$$D_2 = 0,1 + 0,02 = 0,12 \text{ m} ;$$

$$b_7 = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3 = 0,01 \text{ m} ;$$

$$D_1 = 0,1 - 0,01 = 0,09 \text{ m} ;$$

$$D_2 = 0,1 + 0,01 = 0,11 \text{ m} ;$$

$$b_9 = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 4 = 0,014 \text{ m} ;$$

$$D_1 = 0,1 - 0,014 = 0,086 \text{ m} ;$$

$$D_2 = 0,1 + 0,014 = 0,114 \text{ m} ;$$

$$b_{11} = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3 = 0,01 \text{ m} ;$$

$$D_1 = 0,1 - 0,01 = 0,09 \text{ m} ;$$

$$D_2 = 0,1 + 0,01 = 0,11 \text{ m} ;$$

$$b_{13} = 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 0,007 \text{ m} ;$$

$$D_1 = 0,1 - 0,007 = 0,093 \text{ m} ;$$

$$D_2 = 0,1 + 0,007 = 0,107 \text{ m} .$$



Aktyvioji filtro varža pagal harmonikos ilgį, vario tankis  $\rho = 0,018 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$ ;

$$R_v = \rho \frac{L_v}{S_v};$$

$$R_3 = 0,018 \cdot \frac{82}{10} = 0,15\Omega;$$

$$R_5 = 0,018 \cdot \frac{45}{10} = 0,08\Omega;$$

$$R_7 = 0,018 \cdot \frac{24}{10} = 0,04\Omega;$$

$$R_9 = 0,018 \cdot \frac{27}{4} = 0,12\Omega;$$

$$R_{11} = 0,018 \cdot \frac{21}{4} = 0,09\Omega;$$

$$R_{13} = 0,018 \cdot \frac{17}{4} = 0,08\Omega.$$

Filtro kokybė;

$$d_v = \frac{x_{rv}}{R_v};$$

$$d_3 = \frac{4,44}{0,15} = 30;$$

$$d_5 = \frac{2,13}{0,08} = 26;$$

$$d_7 = \frac{0,82}{0,04} = 21;$$

$$d_9 = \frac{1,48}{0,12} = 12;$$

$$d_{11} = \frac{0,99}{0,09} = 11;$$

$$d_{13} = \frac{0,71}{0,08} = 9.$$

**Išvados:**

1. Panaudoti siaurajuosčiai filtrai, suderinti vienos harmonikos dažnumui, nes plačiąjuosčiui filtrui reikia daugiau elementų, sudėtingas jų derinimas.
2. Išnagrinėtas ir pasiūlytas filtravimo kompensavimo įrenginys iš dalies yra reaktyvinis galingumo šaltinis, kuris turi atlikti savo funkcijas, naudoja minimalų aktyvinio galingumo kiekį. Šių schemų privalumas yra minimalūs filtravimo įrenginio nuostoliai, schemos paprastumas derinimui ir panaudojimas konkrečios harmonikos sumažinimui.
3. Siaurajuostis kontūras stipriau slopina harmonikas, nes varža esant rezonansiniam dažnumui stipriai sumažėja ir šuntuoja harmonika, kuriai tas kontūras suderintas yra nuslopinamas, o plačiąjuostis filtras žymiai mažiau slopina negu siaurajuostis.
4. Filtrams parinkti standartiniai kondensatoriai, o filtrų induktyvumai suprojektuoti kiekvienam filtrui pagal skaičiavimo gautas reaktyvias varžas.
5. Filtro kokybės rodikliai tenkina literatūros rekomenduojamas vertes arba yra artimos joms.

**LITERATŪRA**

1. Л. А. Добрусин Фильтро-компенсирующие устройства для преобразовательной техники. Москва, 2003. 83с.
2. Juozas Sveikata. Grandinių teorija. Kaunas. 2000. 243p.
3. Stanislovas Masiokas. Elektrotechnika. Vilnius. 1989. 423p.
4. Mašinų sauga. Mašinų elektros įranga. 1dalis. Bendrieji reikalavimai (IEC 60204:1997). Europos standartas EN 60204-1. 1997m. gruodis +AC.
5. В.П.Ильяшов. Конденсаторные установки промышленных предприятий. Москва, 1983. 153с.
6. В. А. Лабунцова. Энергетическая электроника. Москва, 1987. 464с.
7. Ю.Г.Барыбина. Справочник по проектированию электроснабжения. Москва, 1990. 576с.
8. В.Г. Герасимова. Электротехнический справочник. Москва, 1986. 711с.
9. Z. Ramonas. Technologijos fakulteto studijų darbų parengimo tvarka. Šiauliai, 2004. 44p.
10. [www.colan.ru](http://www.colan.ru)
11. [www.abok.ru](http://www.abok.ru)

## **Priedai**