

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

Tomas Pikelis

AUKŠTESNIŲJŲ ĮTAMPOS HARMONIKŲ
AKTYVIŲJŲ FILTRŲ EFEKTYVUMO TYRIMAS

Magistro darbas

Vadovas

lektorius M. Rauchas

Šiauliai, 2009

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
ELEKTROS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

_____ doc.dr. T. Šimkevičius

2009 06

AUKŠTESNIŲJŲ ĮTAMPOS HARMONIKŲ
AKTYVIŲJŲ FILTRŲ EFEKTYVUMO TYRIMAS

Magistro darbas

Vadovas

_____ lektorius M. Rauchas

2009 06

Recenzentas

Katedros vedėjas

_____ doc.dr. T. Šimkevičius

2009 06

Atliko

EM-7 gr. stud.

_____ T. Pikelis

2009 06

Šiauliai, 2009

SUMMARY

Pikelis T. - EM-7 group student of Electric engineering department of University of Šiauliai, technological faculty, 2009.

The investigation of efficiency of higher voltage harmonik's active filters: master thesis of energetic ingeneer / reseach advisor lecturer M. Rauchas.

The exchange of electrical receivers and the composition of the spread of tiristorines power schemes have a higher power receivers increases the value of harmonic voltages. In those places where the harmonic voltage damping neglected, their value close to or even exceeds the limit of the standard recommendations. Harmonic level is quite high and affect the power consumption.

Harmonics are suffering from both receivers emitting them and receivers have nothing to do with this. This work investigated the active harmonic suppression filters, settings, to propose measures to improve efficiency and provide conclusions .

Lentelių sąrašas

Lentelės Nr.	Lentelės pavadinimas	psl.
2.1	Filtrų parinkimo kriterijai	17
3.1	Skaičiuojamųjų filtrų komponentų koeficientų reikšmės	21

Paveikslų sąrašas

Lentelės Nr.	Paveikslo pavadinimas	psl.
2.1	Aktyvaus filtro veikimo principas	12
2.2	Aktyvaus filtro harmonikų filtravimo pavyzdys	13
2.3	Principinė elektrinė schema	14
2.4	Aktyviosios galios filtras įgyvendintas sujungiant du aktyvius filtrus su VSI į kaskadą	15
2.5	Kaskadinio aktyviosios galios filtro srovės kreivės	16
3.1	Beselio filtro dažninės charakteristikos	20
3.2	Batervorto filtro dažninės charakteristikos	20
3.3	Čebyševio filtro dažninės charakteristikos	21
3.4	Žemų dažnių filtro charakteristika	22
3.5	Pirmos eilės žemų dažnių filtro schema	22
3.6	Antros eilės žemų dažnių filtro schema	23
3.7	Aukštų dažnių filtro charakteristika	23
3.8	Pirmos eilės aukštų dažnių filtro schema	24
3.9	Antros eilės aukštų dažnių filtro schema	24
3.10	Juostinio filtro charakteristika	25
3.11	Juostinio filtro schema	25
3.12	Režektorinio filtro charakteristika	25
3.13	Režektorinio filtro schema	26
4.1	Sumodeliuota schema	27
4.2	100 Hz signalo slopinimas (neslopinamas)	28
4.3	1 kHz signalo slopinimas	29
4.4	1 kHz fazinė charakteristika po 2 ir po 4 eilės filtro	30
4.5	1 kHz amplitudinė-dažninė charakteristika po 2 ir po 4 eilės filtro	30
4.6	250 Hz fazinė charakteristika	31
4.7	250 Hz amplitudinė-dažninė charakteristika	32
4.8	500 Hz fazinė charakteristika	33
4.9	500 Hz amplitudinė-dažninė charakteristika	33
4.10	1,5 kHz fazinė charakteristika	34
4.11	1,5 kHz amplitudinė-dažninė charakteristika	35
4.12	Fazinių charakteristikų šeima	35
4.13	Amplitudinių-dažninių charakteristikų šeima	36
4.14	Batervorto filtro 1 kHz fazinė charakteristika	37
4.15	Batervorto filtro 1 kHz amplitudinė-dažninė charakteristika	38
4.16	Čebyševio filtro 1 kHz fazinė charakteristika	39
4.17	Čebyševio filtro 1 kHz amplitudinė-dažninė charakteristika	40
4.18	Beselio, Batervorto ir Čebyševio filtrų fazinės charakteristikos	41
4.19	Beselio, Batervorto ir Čebyševio filtrų amplitudinės-dažninės charakteristikos	41

TURINYS

IŽANGA.....	7
1. HARMONIKOS: ELEKTROS TINKLŲ TERŠĖJAI.....	9
1.1 Srovės ir įtampos aukštesniųjų harmonikų atsiradimo priežastys.....	9
1.2 Aukštesniųjų harmonikų įtaka įvairių elektros įrenginių darbui.....	10
1.3 Filtrų naudojimas aukštesniųjų harmonikų mažinimui.....	10
2. FILTRŲ TIPAI.....	11
2.1 Pasyvus filtras.....	11
2.2 Aktyvus filtras.....	11
2.3 Aktyvaus filtro harmonikų filtravimo pavyzdys.....	12
2.4 Hibridinis filtras.....	17
2.5 Filtro parinkimo kriterijai ir rekomendacijos.....	17
2.6 Aktyviųjų filtrų efektyvumą lemiančių parametų tyrimas.....	18
3. AKTYVIEJI FILTRAI.....	19
4. PRAKTINĖ (TIRIAMOJI) DALIS.....	27
4.1 Beselio filtro tyrimas.....	27
4.2 Batervorto filtro tyrimas.....	36
4.3 Čebyševio filtro tyrimas.....	38
4.4 Filtrų apžvalga.....	40
IŠVADOS.....	44
LITERATŪRA.....	45

IŽANGA

Pastaruoju metu Lietuvoje vis aktualesnė tampa elektros tinklo įtampos kokybės kontrolės problema. Ypatingai tuo suinteresuoti vartotojai, kurių prietaisai ar įrengimai yra jautrūs elektros įtampos formos iškreipimams. Iš kitos pusės tiekėjai taip pat nėra abejingi šiai problemai, nes kai kurių vartotojų prietaisai dėl savo veikos principo patys skleidžia iškreipymus ir triukšmus į tinklą. Įtampos kokybė parametrai ir jų vertės nustatyti „Elektros energijos kokybės Europos standarte EN50160“ [1]. Matematinį parametru apibrėžimą galima rasti daug kur, pavyzdžiui [Elektros energijos kokybė. Lietuvos ūkio ministerijos rekomendacija. Vilnius, 1997 lapkričio 10, 8 p.]

Tačiau statistinių duomenų, kaip jo laikomasi, praktiškai nėra. Yra keletas publikacijų [pvz. A. Čitavičius, V. Paražinskas. Žemosios įtampos elektros tinklo signalų parametru matavimas ir įvertinimas. ISSN 1392-1223, Matavimai, 1998. Nr.4(9), 7-14 psl.]. Tačiau juose pateiktus tyrimų rezultatus negalima laikyti išsamiais, ir be to jie mažai žinomi suinteresuotiems asmenims, ar organizacijoms. Todėl labai aktualūs išsamūs elektros tinklo įtampos kokybės parametru statistiniai tyrimai ir jų publikavimas plačiai prieinamoje spaudoje.

Keičiantis elektros imtuvų sudėčiai ir vis labiau plintant tiristorines elektros maitinimo schemas turintiems elektros imtuvams aukštesniųjų harmoninių įtampų vertės didėja. Tose vietose, kur harmoninių įtampų lygio slopinimu nesirūpinama, jų vertės artimos ribai arba net viršija standarto rekomendacijas. Pastarajame iškreipiu faktoriu rekomenduojama riboti 8 % verte.

Harmoniku lygis yra pakankamai aukštas ir daro įtaką elektros vartojimui. Nuo harmoniku kenčia tiek jas skleidžiantys, tiek niekuo dėti elektros imtuvai.

Šiame darbe stengtasi ištirti harmonikas slopinančių aktyviųjų filtru parametru.

Darbo tikslas: ištirti aktyviųjų filtru efektyvumą lemenčius parametru, pasiūlyti efektyvumą gerinančias priemones, bei pateikti išvada.

Temos aktualumas:

- asinchroninėse mašinose įtampos aukštesniosios harmonikos sąlygoja bendrosios srovės padidėjimą, dėl ko padidėja nuostoliai;
- sinchroninėse mašinose, be papildomu nuostoliu, gali atsirasti aukštesniųjų harmoniku sukeltos pavojingos vibracijos;
- dėl papildomu nuostoliu magnetolaidyje didėja ir nuostoliai transformatoriuose, tame tarpe ir pastočių transformatoriuose, dėl ko sumažėja pastotės vardinė galia;
- aukštesniosios harmonikos gali sąlygoti rezonansinius reiškinius pastatu instaliacijoje.

Aktyviųjų filtru sudarymo metodai:

- pasyvusis RC filtras jungiamas nuosekliai su operaciniu stiprintuvu;

- pasyvieji RC filtrai jungiami į operacinio stiprintuvo teigiamo ar neigiamo grįžtamojo ryšio grandinę.

Aktyviųjų harmonikų filtrų tyrimo kryptys:

- kelių tipų aktyviųjų filtrų (pav. Beselio [Bessel], Batervorto [Butterworth], Čebyševio [Chebyshev] ir k.t.) efektyvumą lėmenčių parametrų tyrimas ir rezultatų palyginimas;
- sumodeliuoto aktyvaus filtro parametrų tyrimas OrCAD 16.0 programinės įrangos terpėje;
- aktyvaus filtro efektyvumą gerinančių priemonių siūlymas, tyrimo išvadų formulavimas.

1. HARMONIKOS: ELEKTROS TINKLŲ TERŠĖJAI

Žemos ir vidutinės įtampos tinklus vis labiau teršia srovės ir įtampos harmonikos.

Harmonikos yra generuojamos, esant nelinejinėms apkrovoms, kurios šiuolaikiniuose tinkluose pasitaiko vis dažniau. Tokiomis nelinejinėmis apkrovomis yra dažnio keitikliai, nuolatinės srovės reguliatoriai, indukcinės krosnys, nepertraukiamo maitinimo šaltiniai (UPS), energiją tausojantis apšvietimas, dujų išlydžio lempos ir kt.

Egzistuoja keli baziniai harmonikų įtaką mažinantys metodai, tame skaičiuje šie:

- tinklą teršiančios apkrovos yra perkeliamos į tiekiamos įtampos pusę;
- tinklą teršiančios apkrovos yra grupuojamos kartu;
- yra atskiriami energijos šaltiniai;
- panaudojami harmonikų filtrai (pasyvūs, aktyvūs);
- naudojami transformatoriai su specialiai suprojektuotomis apvijų jungimo grupėmis;
- su transformatoriumi yra naudojami indukciniai komponentai;
- naudojama atitinkama įžeminimo sistema.

Šios srovės ir įtampos harmonikos gali sukelti transformatoriuose (ar kituose įrenginiuose) žymų elektrinio lauko stiprio padidėjimą ir netgi gali jį sugadinti.

1.1 Srovės ir įtampos aukštesniųjų harmonikų atsiradimo priežastys

Fazių nesimetrija atsiranda dėl nevienodos apkrovos, netiesiniai iškreipiai – dėl apkrovos kai kurių elementų voltamperinių charakteristikų netiesiškumo, dėl vartotojų apkrovos varžos netiesiškumo atsiranda aukštesniosios harmonikos.

Pavyzdys - dienos šviesos lempos. Keičiantis srovei dienos šviesos lemposje, keičiasi joje esančių dujų jonizacijos laipsnis ir tuo pačiu lempos varža. Kuo didesnė srovė, tuo daugiau jonų ir tuo mažesnė lempos varža. Todėl ir prireikia nuosekliai su tokia lempa jungti droselį, kuris ribotų srovę. Esant sinusinei tinklo įtampai, per dienos šviesos lempą tekės nesinusinė srovė; momentinė srovės vertė bus mažesnė už ekvivalentinės galios tiesinės apkrovos srovės momentinę vertę, kai įtampa nedidelė ir didesnė, kai įtampa artima amplitudinei. Esant sinusinei tinklo įtampai, srovė tekės nesinusinė, t.y. tokia apkrova tampa aukštesniųjų srovės harmonikų šaltiniu.

Tvirtinama, kad visos šalys, priklausomai nuo jų techninio išsivystymo lygio, anksčiau ar vėliau susiduria su vis didėjančio žemosios įtampos tinklų užteršimo aukštesniosiomis harmonikomis problema.

Iš kur jos atsiranda, jei jų nėra elektrinių tiekiamoje elektros energijoje?

Jos atsiranda dėl vartotojų apkrovos varžos netiesiškumo. Kadangi tinklo varža baigtinė, susidaro įtampos kritimai joje ir praktiškai sinusinė generatoriaus sukurta įtampa generuojama

aukštesniosiomis harmonikomis. Tokiu būdu, įtampos aukštesniosios harmonikos pasklinda aplink vartotoją, kurio apkrova netiesinė, tarsi savotiška tarša, sąlygojanti papildomus nuostolius ir tiems vartotojams, kurių apkrova aukštesniųjų harmonikų negeneruoja. Todėl visa atsakomybė už netiesinius įtampos iškreipius tenka vartotojams tiek Lietuvoje, tiek ir pav. Rusijoje.

1.2 Aukštesniųjų harmonikų įtaka įvairių elektros įrenginių darbui.

Asinchroninėse mašinose įtampos aukštesniosios harmonikos sąlygoja bendrosios srovės padidėjimą, dėl ko padidėja nuostoliai. Sinchroninėse mašinose, be papildomų nuostolių, gali atsirasti aukštesniųjų harmonikų sukeltos pavojingos vibracijos dėl aukštesniųjų harmonikų sukuriamų momentų ženklo kitimo, kurio dažnis lygus harmonikų dažnio ir pagrindinio dažnio sumai ir skirtumui, priklausomai nuo aukštesniųjų harmonikų sukuriamų besisukančių magnetinių laukų sukimosi krypties. Dėl papildomų nuostolių magnetolaidyje didėja ir nuostoliai transformatoriuose, tame tarpe ir pastočių transformatoriuose, dėl ko sumažėja pastotės vardinė galia. Be to, aukštesniosios harmonikos gali sąlygoti rezonansinius reiškinius pastatų instaliacijoje. Fazinis kampas tarp atskirų fazių įtampų ir srovių aukštesniosioms harmonikoms tiek kartų didesnis už 120° , koks yra harmonikos eilės numeris. Todėl trečioji harmonika sudarys nulinę seką, penktoji - atvirkštinę, septintoji – tiesioginę ir t.t. Trečiosios harmonikos srovė nuliniame laide, jei ši srovė visose fazėse vienodo dydžio, trigubai didesnė už fazinę srovę. Tai galioja visoms aukštesniosioms harmonikoms, kurių numeriai kartotini trims. Esant pakankamai dideliame netiesinių iškreipimų faktoriui srovė nuliniame laide, kuris neapsaugotas jokia apsauga nuo perkaitimo, gali būti žymiai didesnė už srovės faziniuose laiduose. Jei abu srovės pusperiodžiai vienodi, lyginės harmonikos nepasireiškia.

Dažniausiai žemosios įtampos tinkluose ir yra būtent šis atvejis. Atskirų harmonikų srovės gali labai išaugti dėl rezonanso.

1.3 Filtrų naudojimas aukštesniųjų harmonikų mažinimui.

ES standartas [1] riboja tiek bendrą netiesinių iškreipimų faktorių, kuris neturi viršyti 8 %, tiek ir atskirų harmonikų amplitudžių santykį su pirmosios harmonikos amplitude (3 – 5 %, 5 – 6 %, 7 – 5 %, 9 – 1,5 %, 11 – 3,5 % ir t.t., iki 25 harmonikos, nurodant, kad aukštesniųjų harmonikų lygis paprastai būna nežymus ir sunkiai išmatuojamas).

Išmatavus, iškreipimų faktorius įstaigoje dieną siekia 8% vertę, daugiabučiame name vakare siekia 6%, o įmonėje, kurioje veikia tvarkingi harmonikų slopinimo filtrai – tik 3%. Analizuojant matavimų duomenis, pastebima, kad labai dažnai būtent trečioji harmonika apsprendžia bendrą harmonikų koeficientą ir naudojant šią harmoniką slopinančius filtrus galima ženkliai sumažinti bendrą harmonikų koeficientą.

2. FILTRŲ TIPAI

Priklausomai nuo apkrovos, dėl kurios susidaro harmonikos, tipo, gali būti naudojami trijų tipų filtrai:

- pasyvus filtras;
- aktyvus filtras;
- hibridinis filtras.

2.1 Pasyvus filtras

Tipinės panaudojimo sritys:

- pramoninės instaliacijos, 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), lygintuvai ir kt.);
- instaliacijos, reikalaujančios reaktyviosios energijos kompensacijos;
- įtampos iškraipymų lygio mažinimas, kurio tikslas yra apsaugoti jautrius imtuvus;
- srovės iškraipymų lygio mažinimas, kurio tikslas yra išvengti perkrovų.

Pasyvus filtras yra paprastai suderinamas su tos eilės harmonika, kuri turi būti panaikinta. Jeigu reikia stipriai sumažinti keletos harmonikų dedamųjų keliamą iškraipymų lygį, gali būti naudojami keli filtrų atšakų kontūrai.

2.2 Aktyvus filtras

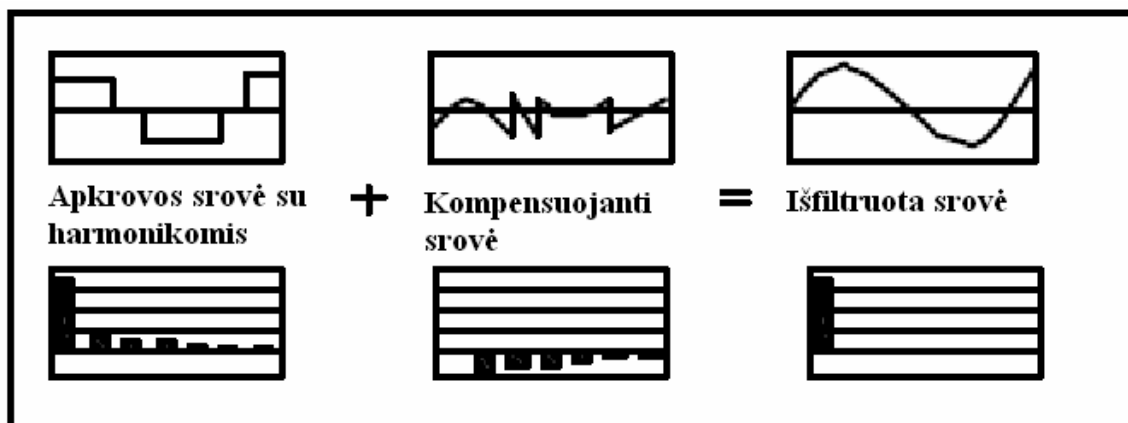
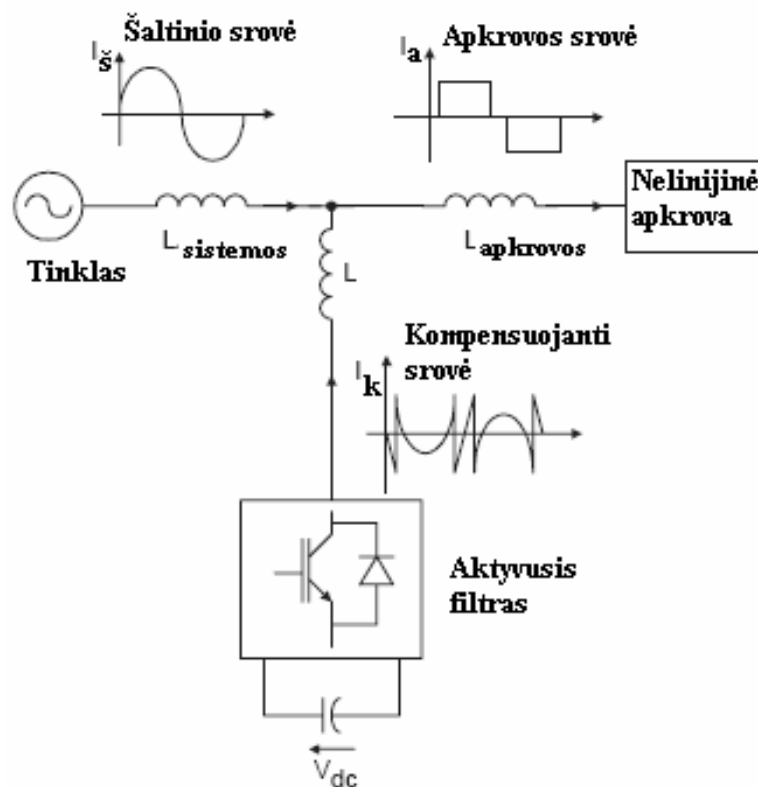
Tipinės panaudojimo sritys:

- instaliacijos gyvenamajame sektoriuje, prekybos ir paslaugų sektoriuje (apibendrintai vadinamame "tretiniame" 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.);
- srovės iškraipymų lygio mažinimas, kurio tikslas yra išvengti perkrovų.

Veikimo principas:

Aktyvų filtrą sudaro elektroninė galios sistema, jungiama nuosekliai arba lygiagrečiai su nelinejine apkrova. Jo tikslas yra kompensuoti harmonikų srovę, kurią sukelia apkrovos generuojamos harmonikos.

2.1 paveikslėlyje yra parodytas aktyvaus filtro, kompensuojančio harmonikų srovę $I_{\text{har}} = - I_{\text{akt}}$, panaudojimo pavyzdys.



2.1 pav. Aktyvaus filtro veikimo principas

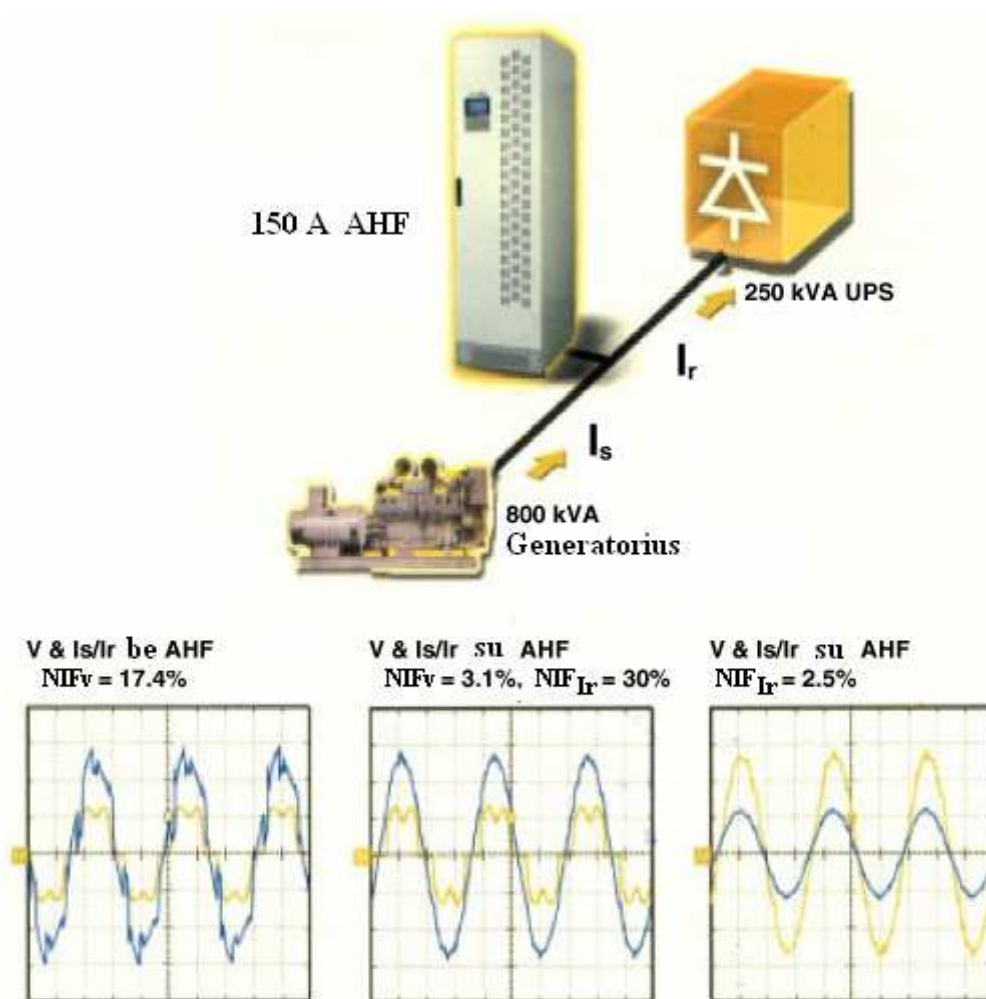
Aktyvus filtras į apkrovos grandinę įveda tos pačios eilės, tik priešingos fazės, harmonikas ir tokiu būdu panaikina egzistuojančias harmonikas.

2.3 Aktyvaus filtro harmonikų filtravimo pavyzdys

Didelis 3 fazių nepertraukiamo maitinimo šaltinis (UPS) su 6 impulsų lygintuvu sukuria (iššaukia) sunkų 30 - 40% harmonikų iškreipimą (NIF), kuris atsiliepia pagrindinio tinklo ar avarinio generatoriaus darbui. Tai gali sukelti įtampos iškreipimus arba generatoriaus gedimą. Aktyvus harmonikų filtras skirtas darbui su UPS ir sumažina harmonikas iki mažiau nei 5 %.

Elektros energijos kokybės Europos standarte EN50160 [1] iškreipčių faktorių rekomenduojama riboti 8 % verte.

2.2 paveiksle pavaizduotas koks yra didžiulis skirtumas nenaudojant ir naudojant aktyvų harmonikų filtrą. Kaip matome, įtampos netiesinių iškreipčių faktorius (NIF) be filtro siekė net 17,4 %, o su filtru sumažėjo iki 3,1 %. Srovės netiesinių iškreipčių faktorių sumažino net iki 2,5 %. Taigi skirtumas akivaizdus.



2.2 pav. Aktyvus filtro harmonikų filtravimo pavyzdys

Čia:

AHF – aktyvus harmonikų filtras;

UPS – nepertraukiamo maitinimo šaltinis;

NIF – netiesinių iškreipčių faktorius;

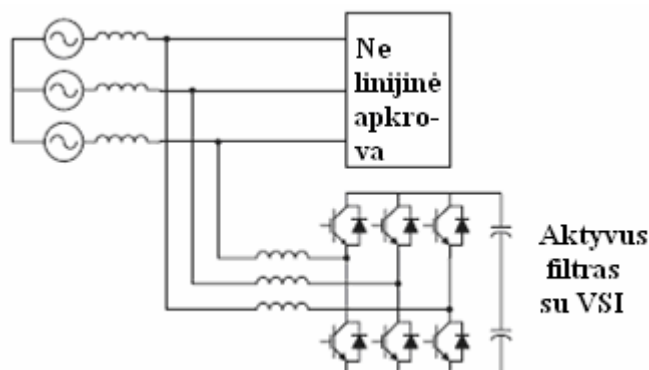
I_s – generatoriaus (šaltinio) srovė;

I_r – srovė tekanti per lygintuvą;

NIF_V – įtampos iškraipymas procentais;

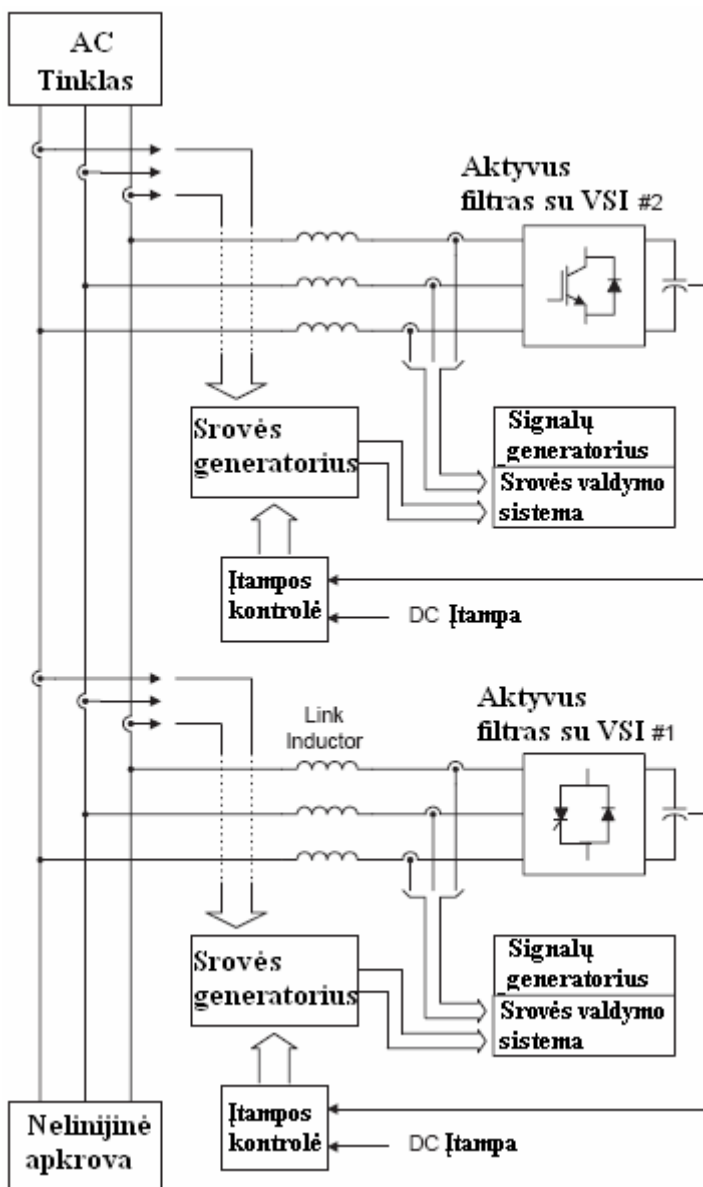
NIF_{I_r} – srovės iškraipymas procentais.

2.3 paveiksle pavaizduota tipinė principinė elektrinė schema su lygiagrečiai sujungtu aktyviųjų harmonikų filtru su įtampos šaltinio inverteriu (VSI).



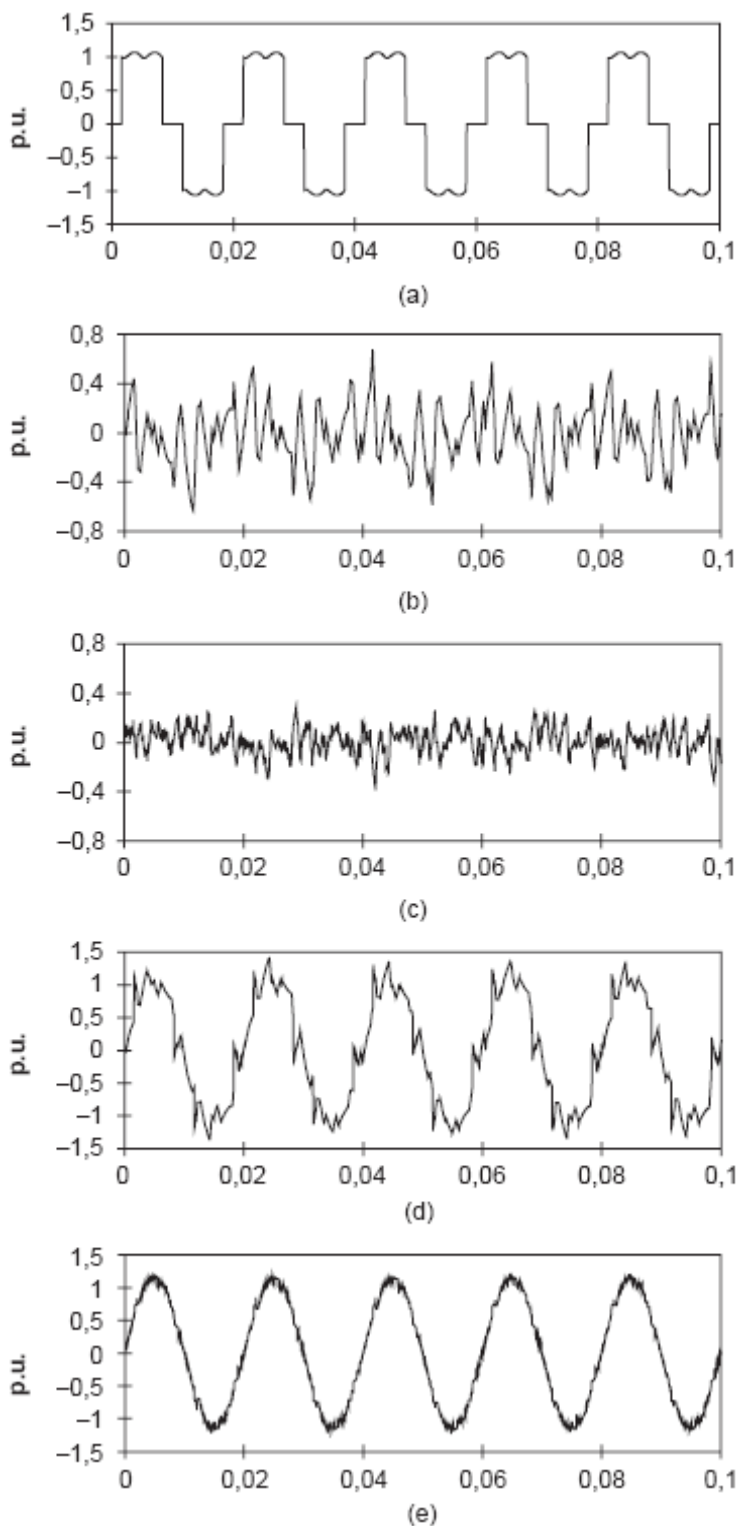
2.3 pav. Elektrinė schema

Naudoti aktyvius filtras su įtampos šaltinio inverteriu (VSI) sujungtus į kaskadas yra įdomi alternatyva kompensuoti didelės galios nelinejiniai apkrovai. Naudojant du filtras su VSI su skirtingomis nominaliomis galiomis leidžia panaudoti įvairius perjungimo dažnius, mažinant komutacinius „stresus“ ir komutavimo nuostolius bendroje kompensavimo sistemoje. Galios grandinės konfigūracija tokia sistema yra parodyta 2.4 pav..



2.4 pav. Aktyviosios galios filtras įgyvendintas sujungiant du aktyvius filtras su VSI į kaskadą

Pirmasis elementas kompensuoja galios koeficiento poslinkį ir žemesnio dažnio srovės harmonikas (2.5 pav.b), tuo tarpu antras elementas kompensuoja tiktais aukšto dažnio srovės harmonikas. Pirmasis konverteris reikalauja didesnės nominalios galios negu antras ir gali veikti prie mažesnio perjungimo dažnio. Kaskadinio aktyviosios galios filtro kompensavimo charakteristikos parodytos 2.5 pav.



2.5 pav. Kaskadinio aktyviosios galios filtro srovės kreivės: a) apkrovos srovės, b) srovės generuojamos aktyvaus filtro su VSI Nr. 1, c) srovės generuojamos aktyvaus filtro su VSI Nr. 2, d) elektros energijos sistemos srovės tarp dviejų inverterių ($NIF_1 = 13,7\%$) ir e) elektros energijos sistemos srovės ($NIF_1 = 4,5\%$).

2.4 Hibridinis filtras

Tipinės panaudojimo sritys:

- pramoninės instaliacijos, 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), lygintuvai ir kt.);
- instaliacijos, reikalaujančios reaktyviosios energijos kompensacijos;
- įtampos iškraipymų lygio mažinimas, kurio tikslas yra apsaugoti jautrius imtuvus;
- srovės iškraipymų lygio mažinimas, kurio tikslas yra išvengti perkrovų;
- laikymasis griežtų harmonikų emisijų reikalavimų.

2.5 Filto parinkimo kriterijai ir rekomendacijos

- **Pasyvus filtras** kompensuoja reaktyviąją energiją ir pasižymi žymiu srovės filtravimo pajėgumu. Įrengimas, kuriame turi būti statomas filtras, turi dirbti pakankamai stabiliai, su labai nedideliais apkrovos svyravimais. Jeigu žymią 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 harmonikų galia yra ribota.
- **Hibridinis filtras** apjungia pasyvaus ir aktyvaus filtrų privalumus.

2.1 lentelėje yra nurodyti kriterijai, pagal kuriuos galima parinkti reikiamo tipo filtrą įvairiems panaudojimo atvejams:

2.1 lentelė: Filtrų parinkimo kriterijai

Panaudojimo sritis	Pasyvus filtras	Aktyvus 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 (kėlimo įrenginiai, kroviniai liftai)	**	*	***

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

2.6 Aktyviųjų filtrų efektyvumą lemenčių parametrų tyrimas

Tyrimui pasirinkti žymiai efektyvesni, bei turintys platesnes reguliavimo, pritaikymo galimybes aktyvūs filtrai.

Ištyrinėjus kelių tipų aktyviųjų filtrų (pvz. Beselio [Bessel], Batervorto [Butterworth], Čebyševio [Chebyshev] ir k.t.) efektyvumą lemenčių parametrus būtų artėjama prie tikslo, kaip galima labiau priartėti prie idealios filtro charakteristikos ir prisidėti prie aukštesniųjų harmonikų mažinimo.

3. AKTYVIEJI FILTRAI

Harmonikų mažinimas didina elektros tinklo „pajėgumą“ ir stabilizuoja elektros sistemą, o galios koeficiento pataisos didina energijos vartojimo efektyvumą ir sumažina elektros išlaidas.

Tam tikro dažnio signalams nuslopinti arba sustiprinti naudojami filtrai. Šiuo metu, kai masiškai gaminami operaciniai stiprintuvai (OS), labai plačiai pradedami taikyti aktyvieji filtrai. Jie sudaryti iš aktyviųjų elementų – operacinių stiprintuvų, ir pasyviųjų elementų - RC grandinių. Aktyviųjų filtrų pranašumas labai ryškus žemųjų dažnių diapazone, kai pasyviųjų LC filtrų ričių ir kondensatorių matmenys, masė ir kaina sudaro daug problemų. Aktyvieji RC filtrai yra mažų matmenų, lengvi, mechaniškai tvirti ir palyginti pigūs. Jų įėjimo varžos didelės, išėjimo varžos mažos, todėl juos galima jungti nuosekliai be didesnių problemų. Be to, juos derinant, vieno filtro parametrai mažai veikia kito filtro parametrus.

Aktyvieji filtrai gali būti sudaromi dviem metodais. Pirmuoju atveju pasyvusis RC filtras jungiamas nuosekliai su OS, atliekančiu buferio vaidmenį. Šio tipo aktyviesiems filtrams būdingas charakteristikų stabilumas. Tačiau, didinant filtro kokybę – jungiant tokius filtrus nuosekliai, didėja filtro eilė, o svarbiausia – proporcingai jai didėja filtro elementų skaičius. Tai vienas iš pagrindinių pirmojo metodo trūkumų. Sudarant aktyviuosius filtrus antruoju metodu, pasyvieji RC filtrai jungiami į OS teigiamo ar neigiamo grįžtamojo ryšio grandinę. Kai RC filtras yra teigiamo grįžtamojo ryšio grandinėje jungiamas rezistorinis daliklis, nustatantis tam tikrą įtampos stiprinimo koeficiento reikšmę.

Bendru atveju žemų dažnių n -tosios eilės filtro perdavimo funkcija gali būti užrašyta šitokiu pavidalu:

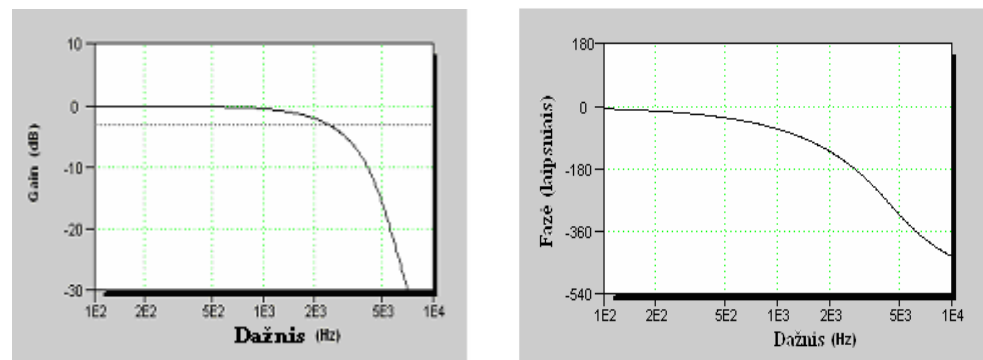
$$K(P) = \frac{K_F}{1 + a_1 P + \dots + a_{n-1} P^{n-1} + a_n P^n}; \quad (3.1)$$

Čia: K_F – perdavimo koeficientas pralaidumo juostoje, a_1, \dots, a_n – koeficientai, $P = p/\omega_{rib}$ – normuotas kompleksinis kintamasis, ω_{rib} – ribinis dažnis.

Parenkant perdavimo funkcijos vardiklio polinomą, siekiama kaip galima labiau priartėti prie idealios filtro charakteristikos. Žinomi ir plačiai taikomi trijų tipų aktyvieji filtrai: Beselio, Batervorto, Čebyševio.

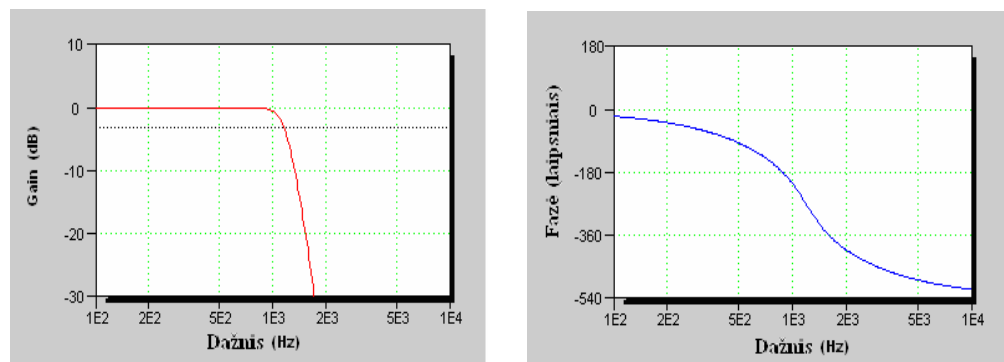
- **Beselio** filtras turi optimalią amplitudinę-dažninę charakteristiką – svyravimų beveik nėra, nes fazės charakteristika pralaidumo juostoje yra tiesinė, t.y. filtras visas harmonikas vėlina tiek pat.

Amplitudės charakteristikos nuolydis už ribinio dažnio palaipsniui pasidaro tiesinis. 3.1 paveiksle pavaizduotos 6-tos eilės Beselio filtro amplitudinė - dažninė ir fazinė – dažninė charakteristikos.



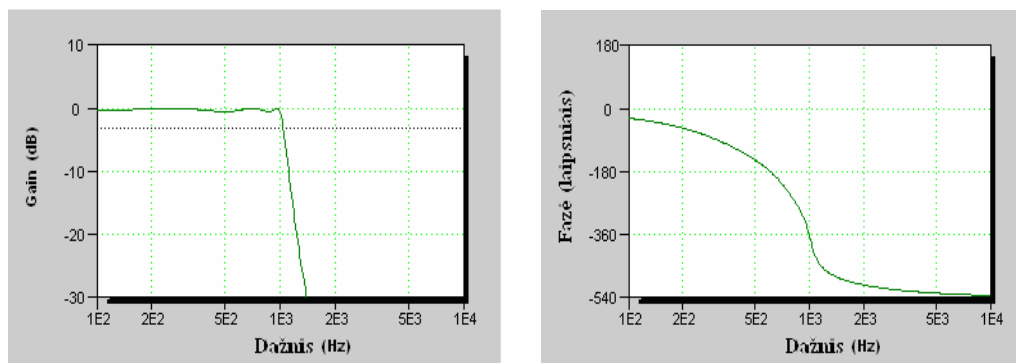
3.1 pav. Beselio filtro dažninės charakteristikos

- **Batervorto** filtro amplitudės charakteristikos iki ribinio dažnio turi palyginti ilgą horizontalios dalies atkarpą ir pastovų nuolydį už ribinio dažnio. Amplitudinei-dažninei charakteristikai būdingi gana greitai nuslopstantys svyravimai. Kuo aukštesnės eilės filtras, tuo didesnė svyravimų amplitudė. 3.2 paveiksle pavaizduotos 6-tos eilės Batervorto filtro amplitudinė - dažninė ir fazinė – dažninė charakteristikos.



3.2 pav. Batervorto filtro dažninės charakteristikos

- **Čebyševio** filtro amplitudės charakteristika pralaidumo juostoje yra banguota, o tuoj už ribinio dažnio staigiai krinta žemyn. Amplitudinės-dažninės charakteristikos svyravimų amplitudė didesnė ir užgęsta jie netaip sparčiai kaip Batervorto filtro. 3.3 paveiksle pavaizduotos 6-tos eilės Čebyševio filtro amplitudinė - dažninė ir fazinė – dažninė charakteristikos.



3.3 pav. Čebyšovo filtro dažninės charakteristikos

Plačiai naudojami antros eilės žemų ir aukštų dažnių aktyvieji filtrai. Aukštesnės eilės filtrai sudaromi šitaip: trečios eilės filtras sudaromas nuosekliai sujungus pirmosios ir antrosios eilės filtrus, ketvirtos eilės filtras sudaromas iš nuosekliai sujungtų dviejų antros eilės filtrų, penktosios – iš antrosios ir trečiosios eilės filtrų ir t.t. Kiekvienam filteriui komponentų vertės skaičiuojamos atskirai pagal 3.1-oje lentelėje duotas koeficientų reikšmes.

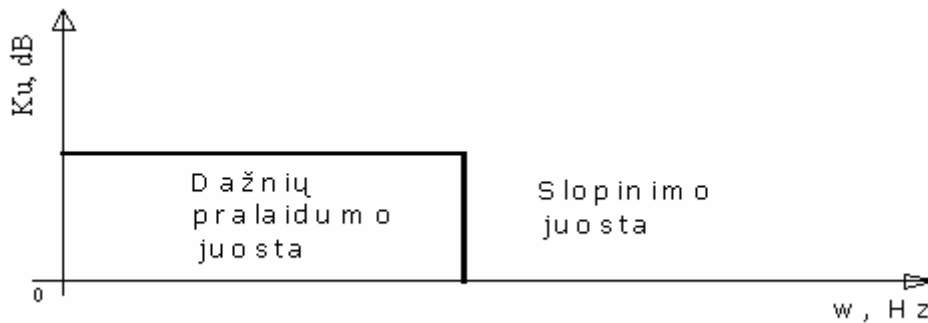
3.1 lentelė: Skaičiuojamųjų filtrų komponentų koeficientų reikšmės

Laipsnis	Beselio		Batervorto		Čebyšovo					
					Dažninės charakteristikos nelygumas					
	0,1dB		1dB		3dB					
	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
2	0,9066	0,6799	1,414	0,7071	1,638	0,6955	2,218	0,6061	3,103	0,4458
4	0,7351	0,6746	1,082	0,9241	1,901	1,241	3,125	1,269	4,863	1,049
	1,012	0,39	2,613	0,3825	4,592	0,2409	7,546	0,1489	11,74	0,0943
6	0,6352	0,6098	1,035	0,966	2,553	1,776	4,41	1,904	7,012	1,607
	0,7225	0,4835	1,414	0,7071	3,487	0,4917	6,024	0,3117	9,572	0,2002
	1,073	0,2561	3,863	0,2588	9,531	0,111	16,46	0,0642	26,15	0,04
8	0,5673	0,5539	1,091	0,9809	3,27	2,323	5,756	2,538	9,217	2,156
	0,609	0,4861	1,202	0,8313	3,857	0,689	6,792	0,4435	10,87	0,2866
	0,7257	0,359	1,8	0,5557	5,773	0,2398	10,15	0,1395	16,27	0,0873
	1,116	0,1857	5,125	0,195	16,44	0,0629	28,94	0,0357	46,34	0,0222
10	0,5172	0,5092	1,012	0,9874	4,011	2,877	7,125	3,17	11,44	2,704
	0,5412	0,4682	1,122	0,8908	4,447	0,877	7,897	0,568	12,69	0,3681
	0,5999	0,3896	1,414	0,7071	5,603	0,8756	9,952	0,1962	15,99	0,1231
	0,7326	0,2792	2,202	0,454	8,727	0,3353	15,5	0,0805	24,91	0,0501
	1,151	0,1437	6,389	0,1563	25,32	0,1419	44,98	0,0227	72,31	0,0141

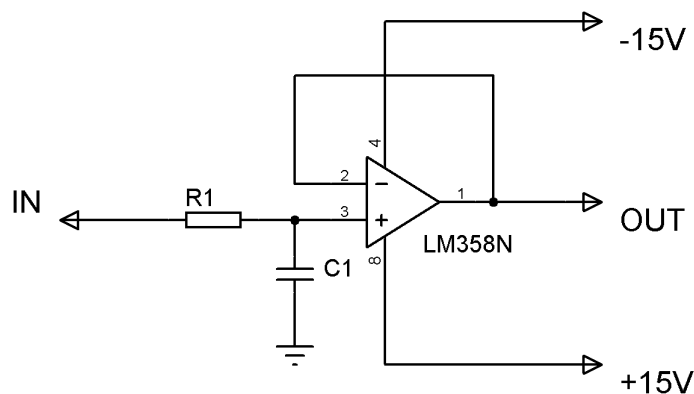
Pagal dažnių juostos charakteristikas filtrai skirstomi į:

- **Žemų dažnių** filtrus.

Šie filtrai praleidžia signalus iki tam tikro – apskaičiuoto dažnio ω_k . Visų aukštesnių už ω_k dažnių signalus, filtras slopina.



3.4 pav. Žemų dažnių filtro charakteristika



3.5 pav. Pirmos eilės žemų dažnių filtro schema

Pirmos eilės filtro elementų parametrus apskaičiuojame taip:

$$T = R_1 C_1 \quad (3.2)$$

$$\omega_k = \frac{1}{T} \quad (3.3)$$

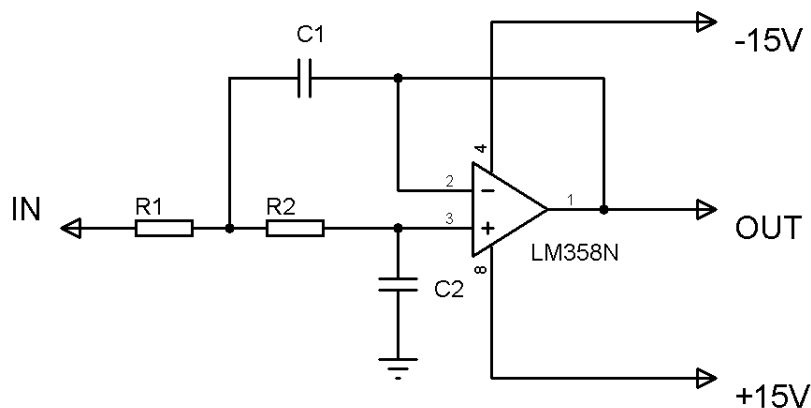
Čia:

T – laiko pastovioji;

R_1 – aktyvinė varža, Ω ;

C_1 – talpumas, F;

ω_k – apskaičiuotas dažnis, Hz.



3.6 pav. Antros eilės žemų dažnių filtro schema

Antros eilės filtro elementų parametrus apskaičiuojame taip. Parenkame varžas R_1 ir R_2 . Jos gali būti, tarkime $10\text{ k}\Omega$. Apskaičiuojame ω_k pagal formulę:

$$\omega_k = 2\pi f_k \quad (3.4)$$

Pagal reikiamą filtro (polinomų aproksimacijos) tipą (Beselio, Batervorto ar Čebyševio) parenkame koeficientus iš 3.1 lentelės. Apskaičiuojame filtro kondensatorių C_1 ir C_2 talpumus pagal formulę:

$$C_x = \frac{K_f}{\omega_k \cdot R} \quad (3.5)$$

Čia:

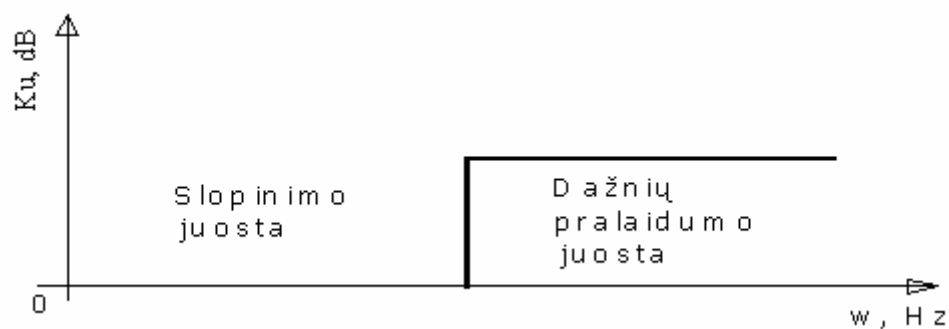
K_f – filtro koeficientas parenkamas iš 3.1 lentelės;

ω_k – apskaičiuotas dažnis, Hz;

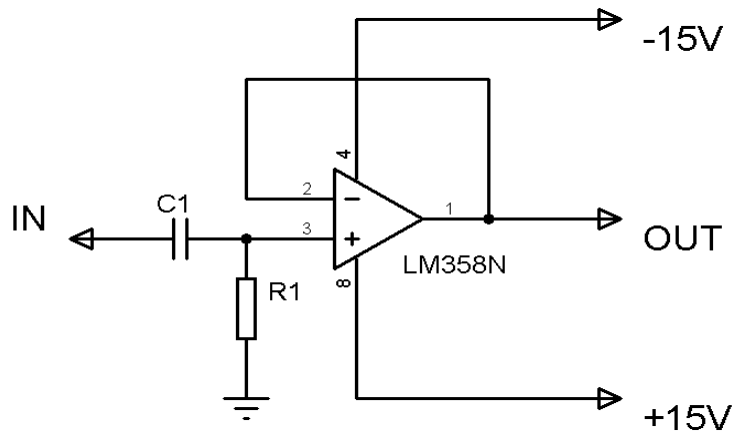
R – aktyvinė varža, Ω .

- **Aukštų dažnių filtras.**

Šie filtrai praleidžia signalus, aukštesnio už tam tikrą – apskaičiuotą dažnį ω_k . Visų žemesnių už ω_k dažnių signalus, filtras slopina.

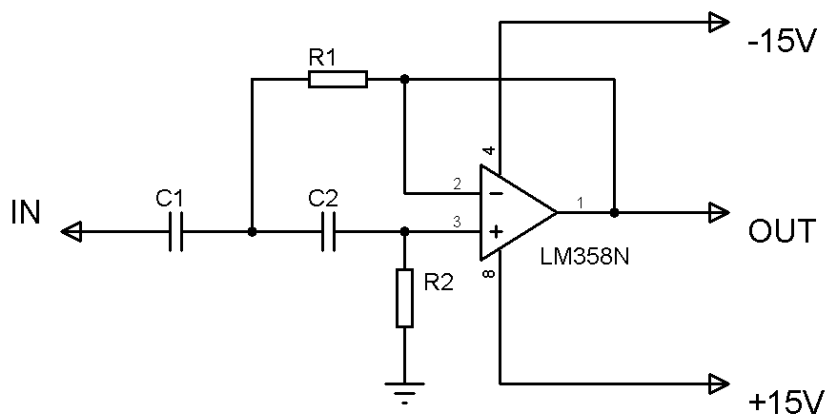


3.7 pav. Aukštų dažnių filtro charakteristika



3.8 pav. Pirmos eilės aukštų dažnių filtro schema

Aukštų dažnių filtro elementų skaičiavimai atliekami analogiškai žemų dažnių filtro elementų skaičiavimams.



3.9 pav. Antros eilės aukštų dažnių filtro schema

- **Juostinius** filtrus.

Šie filtrai praleidžia signalus, kurių dažnis yra aukštesnis už ω_z , bet žemesnis už ω_a . Kitaip tariant tam tikros dažnių juostos signalus:

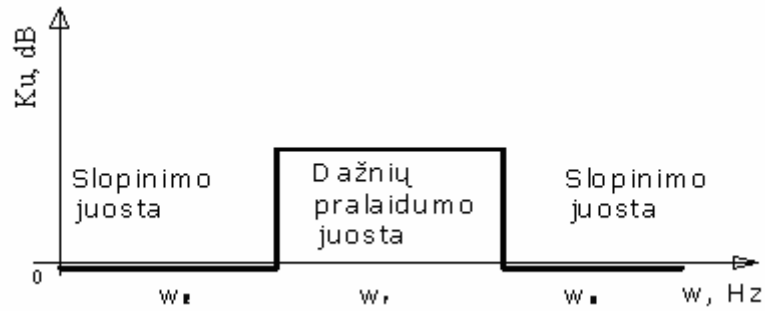
$$\Delta f = \omega_a - \omega_z \quad (3.6)$$

Čia:

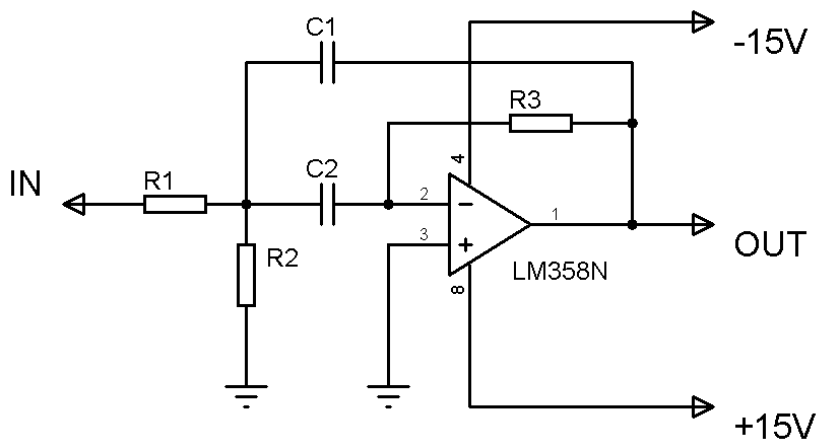
ω_a – dažnis aukštesnis už vidutinį filtro dažnį ω_f ;

ω_z – dažnis žemesnis už vidutinį filtro dažnį ω_f .

Vidutinis filtro dažnis – ω_f . Žemesnio už ω_z ir aukštesnio už ω_a dažnio signalai yra slopinami. Juostiniai filtrai naudojami išskirti tam tikro dažnio signalą iš plataus diapazono.



3.10 pav. Juostinio filtro charakteristika

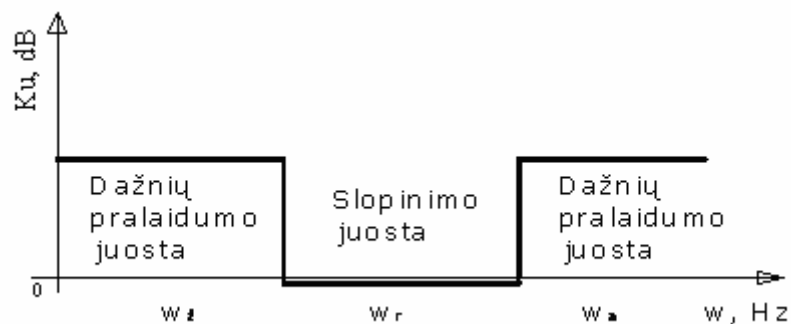


3.11 pav. Juostinio filtro schema

- **Režektorinius filtras.**

Režektoriniai filtrai slopina signalus, kurių dažnis yra aukštesnis už ω_z , bet žemesnis už ω_a . Kitaip tariant tam tikros dažnių juostos signalus:

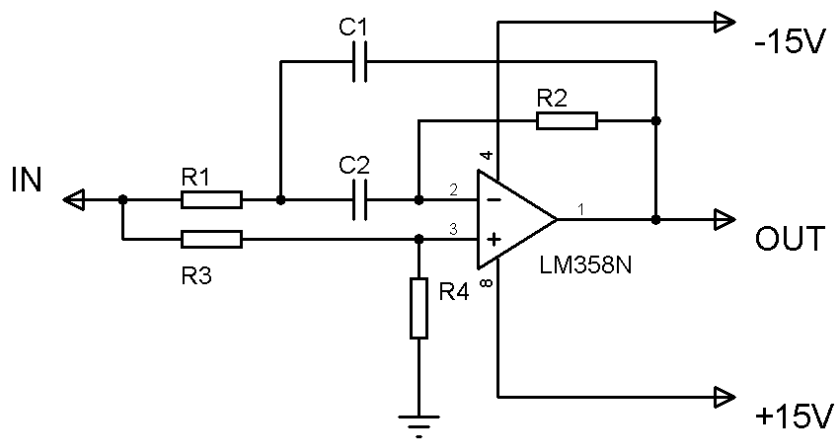
$$\Delta f = \omega_a - \omega_z$$



3.12 pav. Režektorinio filtro charakteristika

Vidutinis filtro dažnis – ω_r . Žemesnio už ω_z ir aukštesnio už ω_a dažnio signalai yra praleidžiami. Režektorinio filtro kokybės koeficientas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$Q = \frac{\omega_r}{\Delta f} \quad (3.7)$$



3.13 pav. Režektorinio filtro schema

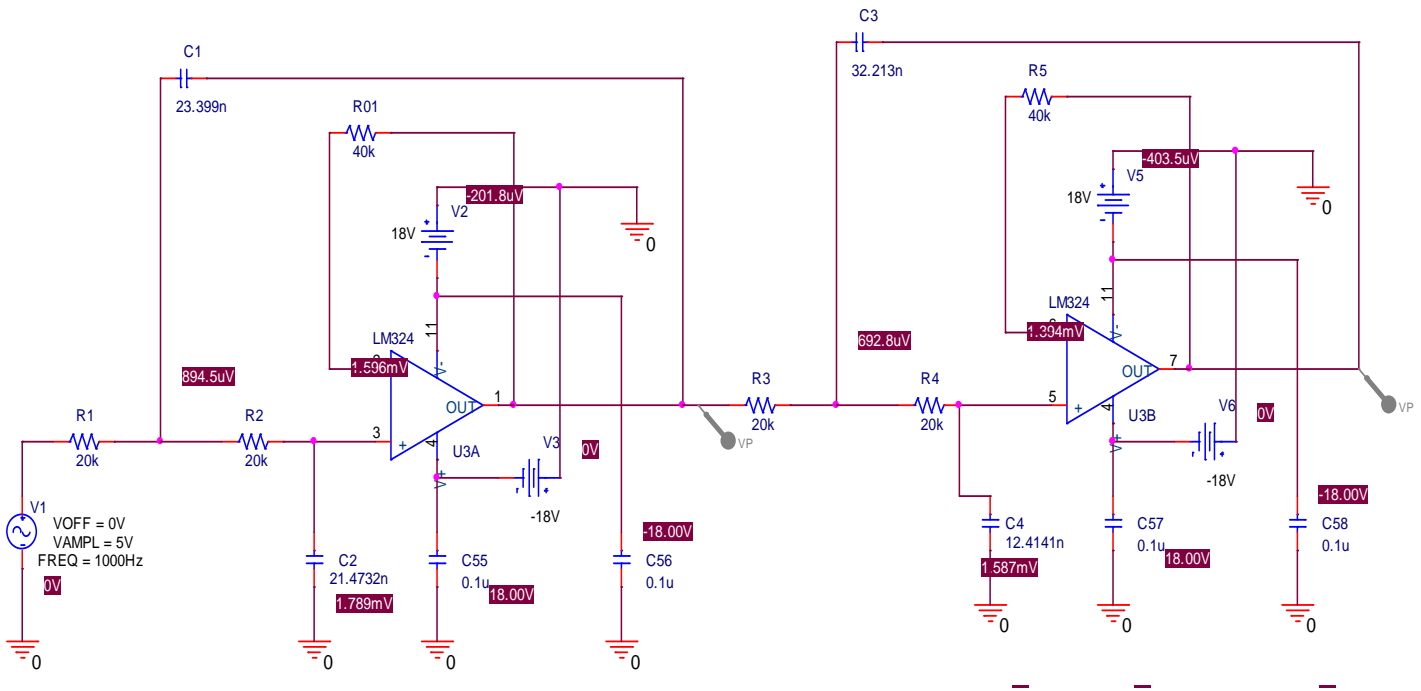
Aukštų dažnių aktyvieji filtrai sudaromi iš žemų dažnių filtrų sukeitus rezistorius ir kondensatorius vietomis. Jų amplitudės dažninė charakteristika yra veidrodinis žemųjų dažnių filtro charakteristikos atspindys, ribinis dažnis lieka tas pats. Tačiau pereinamoji charakteristika yra visai kitokio pavidalo.

4. PRAKTINĖ (TIRIAMOJI) DALIS

4.1 Beselio filtro tyrimas

Tyrimui pasirinktas ketvirtos eilės, žemų dažnių aktyvinis Beselio filtras, su dažnio pralaidumo juosta iki 1500 Hz.

Programiniu modeliavimo paketu OrCAD 16.0 sumodeliuojama schema:



4.1 pav. Sumodeliuota schema

Apskaičiuojami schemos elementų parametrai:

Parenkamas maksimalus pralaidumo dažnis $f_k = 1$ kHz ir remiantis 3.4 formule apskaičiuojamas ω_k :

$$\omega_k = 2 \pi f_k = 6283,185307 .$$

Parenkamos varžos: $R_1=20$ k Ω , $R_2=20$ k Ω , bei $R_{01}=R_1+R_2=40$ k Ω .

Pagal Beselio filtro koeficientus iš 3.1 lentelės ir remiantis 3.5 formule apskaičiuojami kondensatorių talpumai:

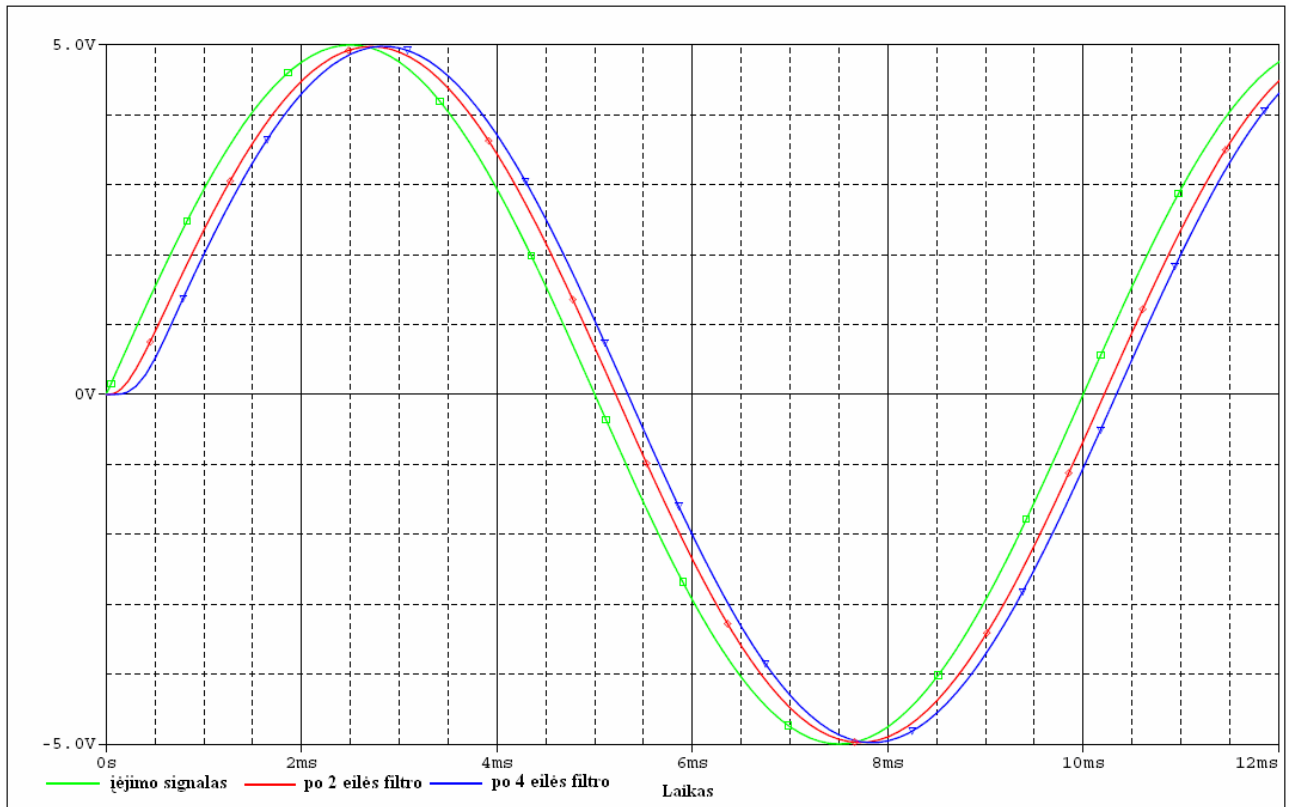
$$(R=R_1=R_2)$$

$$C1 = \frac{0,7351}{\omega_k \cdot R} = 5,84973 \text{ nF} , \quad C2 = \frac{0,6746}{\omega_k \cdot R} = 5,36829 \text{ nF} ,$$

$$C3 = \frac{1,012}{\omega_k \cdot R} = 8,05324 \text{ nF} , \quad C4 = \frac{0,39}{\omega_k \cdot R} = 3,10352 \text{ nF} .$$

Atlikus simuliaciją gaunamos charakteristikos:

4.2 paveiksle gaunama diagrama nustačius sinusinio įtampos generatoriaus dažnio reikšmę 100 Hz.

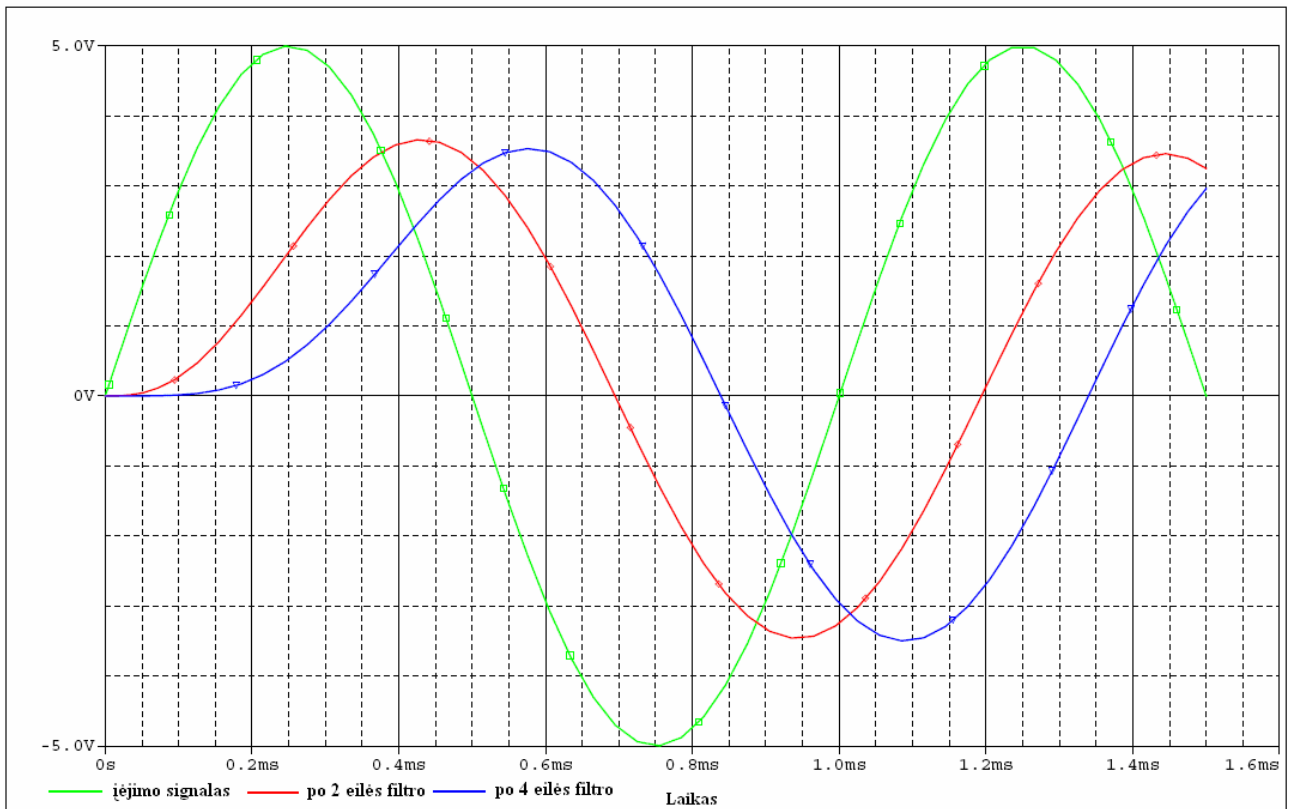


4.2 pav. 100 Hz signalo slopinimas (neslopinamas)

Žalia kreivė parodo įėjimo signalą, raudona kreivė parodo koks gaunamas signalas perėjus per antros eilės filtrą, mėlyna – koks gaunamas po ketvirtos eilės.

Kaip matome filtras signalą praleidžia, todėl išėjime gauname tokį pat signalą kaip ir įėjime tik truputį užvėlintą (signalai skiriasi tik faze).

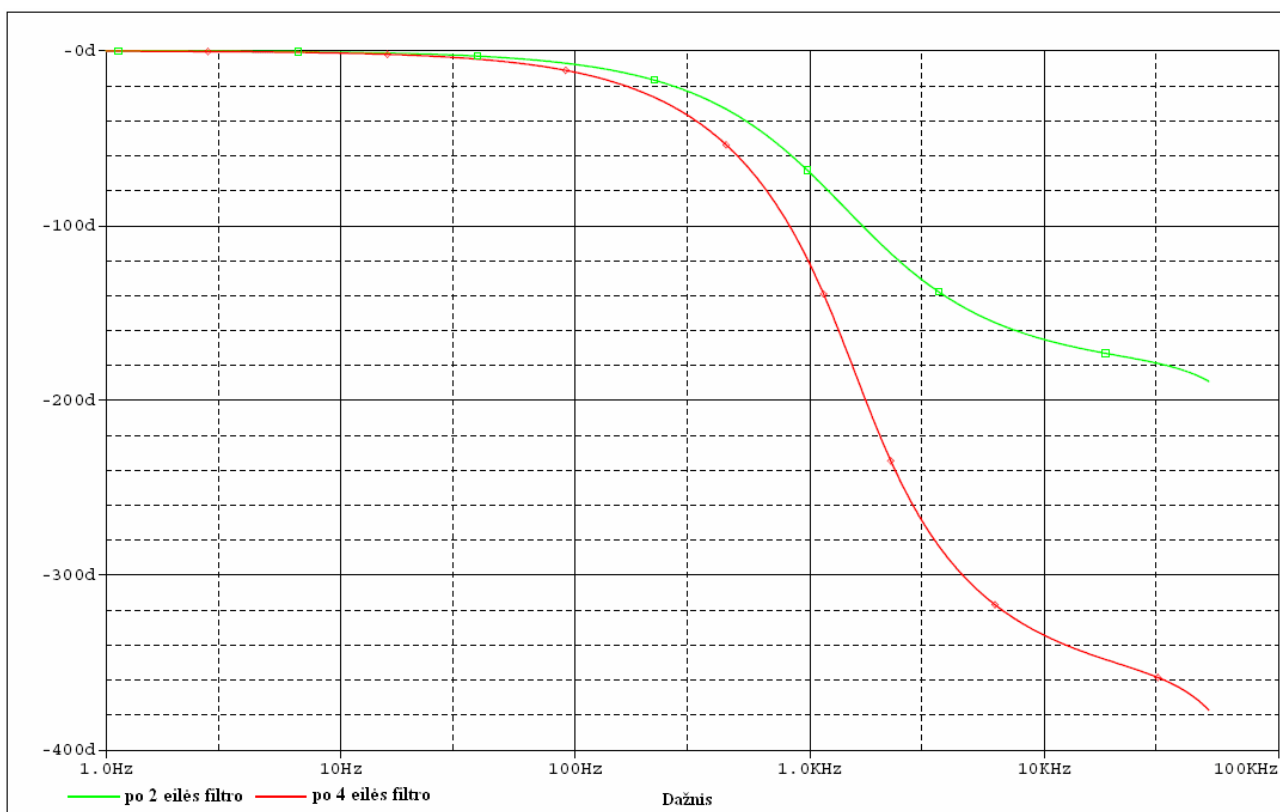
Keičiant sinusinio įtampos generatoriaus dažnio reikšmę atitinkamai į 100 Hz, 1 kHz, 2 kHz gaunamos atitinkamos diagramos, kuriose aiškiai matomas signalo slopinimas (4.3 pav.).



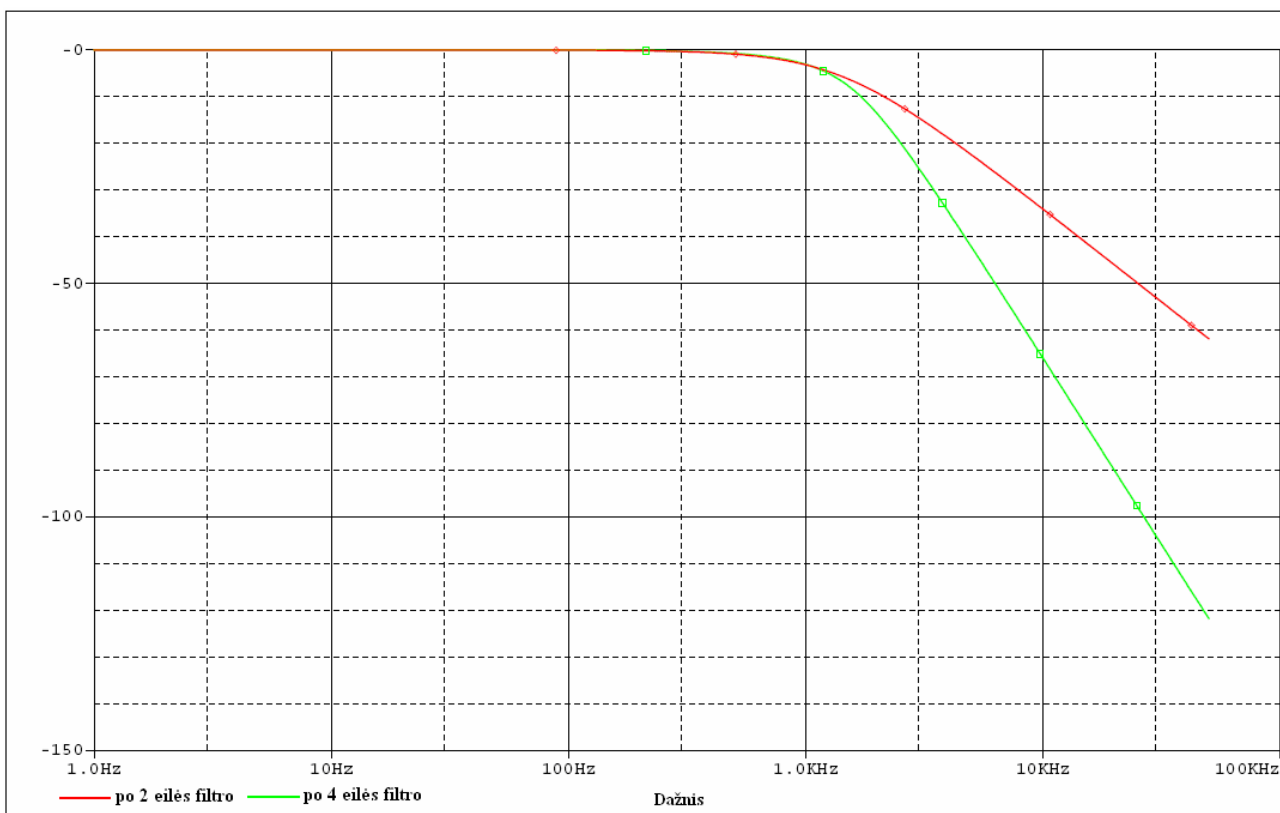
4.3 pav. 1 kHz signalo slopinimas (nuslopinto signalo amplitudė lygi 3,5 V)

Amplitudinės-dažninės bei fazinės charakteristikų tyrimas:

Mūsų atveju prie maksimalaus pralaidumo dažnio $f_k = 1$ kHz, pasirinktų varžų, bei apskaičiuotų talpumų gaunamos tokios fazinės ir amplitudinės-dažninės charakteristikos (4.4 ir 4.5 pav.).



4.4 pav. 1 kHz fazinė charakteristika po 2 ir po 4 eilės filtro



4.5 pav. 1 kHz amplitudinė-dažninė charakteristika po 2 ir po 4 eilės filtro

Iš fazinės charakteristikos (4.4 pav.) matome, kad po 4 eilės filtro fazė pasisuka 360° (raudona kreivė), taip ir turėtų būti, nes schemeje naudojami du invertuojantys operaciniai stiprintuvai, kurių kiekvienas fazę keičia 180° . Stebint amplitudinę-dažninę charakteristiką (4.5 pav.) yra matomas aiškus lūžis ties 1 kHz ir matome, kad po 4 eilės filtro, kreivė po lūžio taško yra statesnė.

Iš to galima daryti išvadą, kad didėjant filtro eilei (jungiant tokius filtrus nuosekliai) didėja filtro kokybė, tačiau proporcingai jai didėja filtro elementų skaičius. Tai vienas iš pagrindinių trūkumų.

Atliekamas modeliavimas (tyrimas) keičiant maksimalų pralaidumo dažnį f_k atitinkamai nuo 250 Hz iki 1,5 kHz, apskaičiuojamas ω_k , varžas paliekant tas pačias $R_1=20\text{ k}\Omega$, $R_2=20\text{ k}\Omega$ bei $R_{01}=R_1+R_2=40\text{ k}\Omega$, apskaičiuojami kondensatorių talpumai:

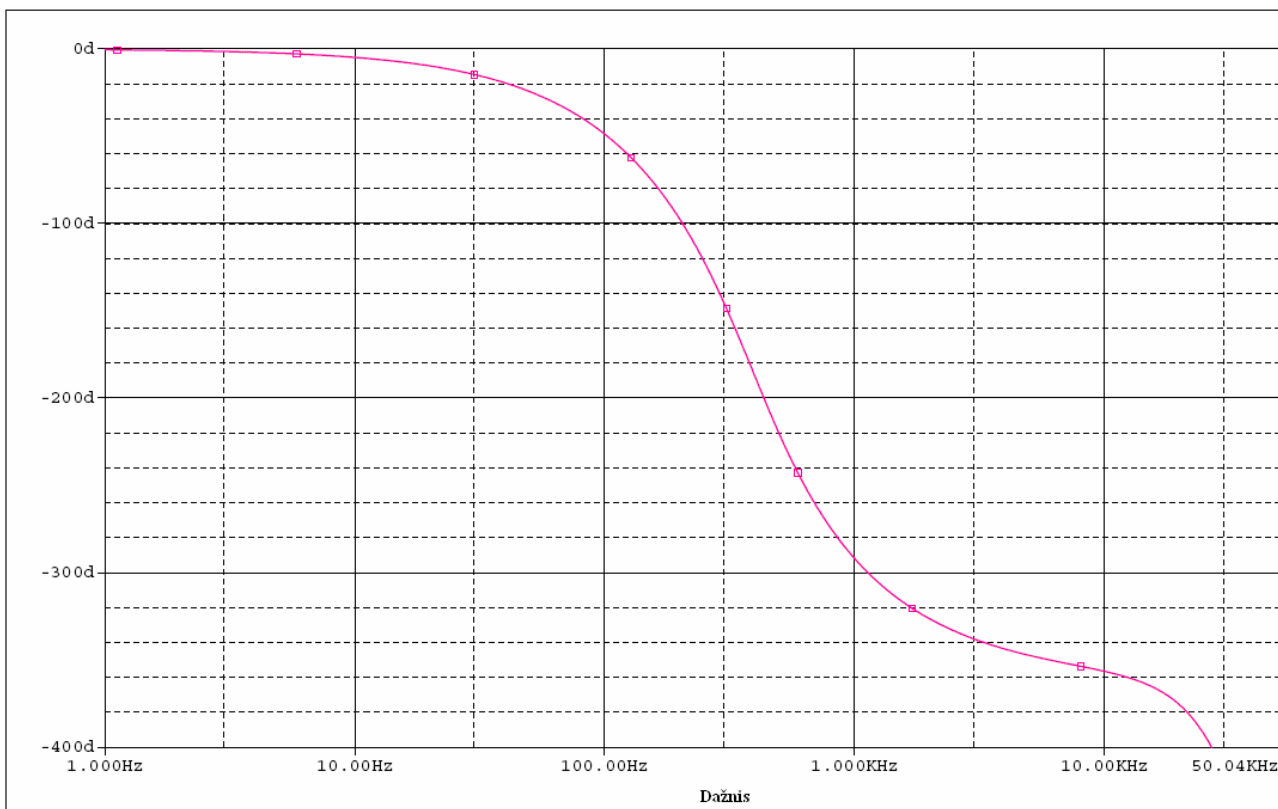
1) Kai maksimalus pralaidumo dažnis $f_k = 250\text{ Hz}$,

Gauname tokias reikšmes: $\omega_k = 2\pi f_k = 1570,796$,

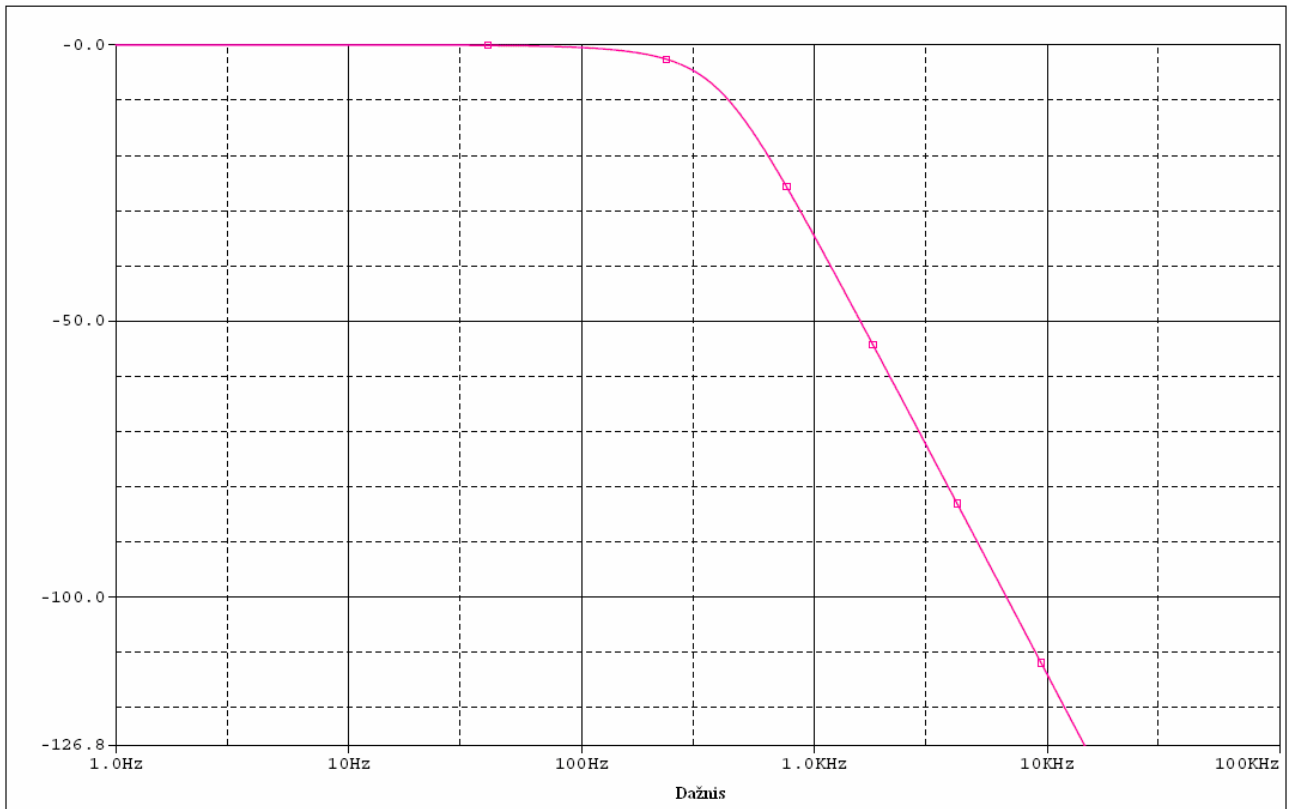
$$C1 = \frac{0,7351}{\omega_k \cdot R} = 23,399\text{ nF}, \quad C2 = 21,4732\text{ nF},$$

$$C3 = 32,213\text{ nF}, \quad C4 = 12,4141\text{ nF}.$$

Gaunamos atitinkamos dažninės charakteristikos (4.6 ir 4.7 pav.).



4.6 pav. 250 Hz fazinė charakteristika



4.7 pav. 250 Hz amplitudinė-dažninė charakteristika

Matome (4.6 pav.), kad fazė pradeda sukintis žymiai anksčiau ir pasisuka 180° nebe prie 1 kHz, o prie nustatyto – 250 Hz. Stebint amplitudinę-dažninę charakteristiką (4.7 pav.) yra matomas aiškus lūžis ties 250 kHz.

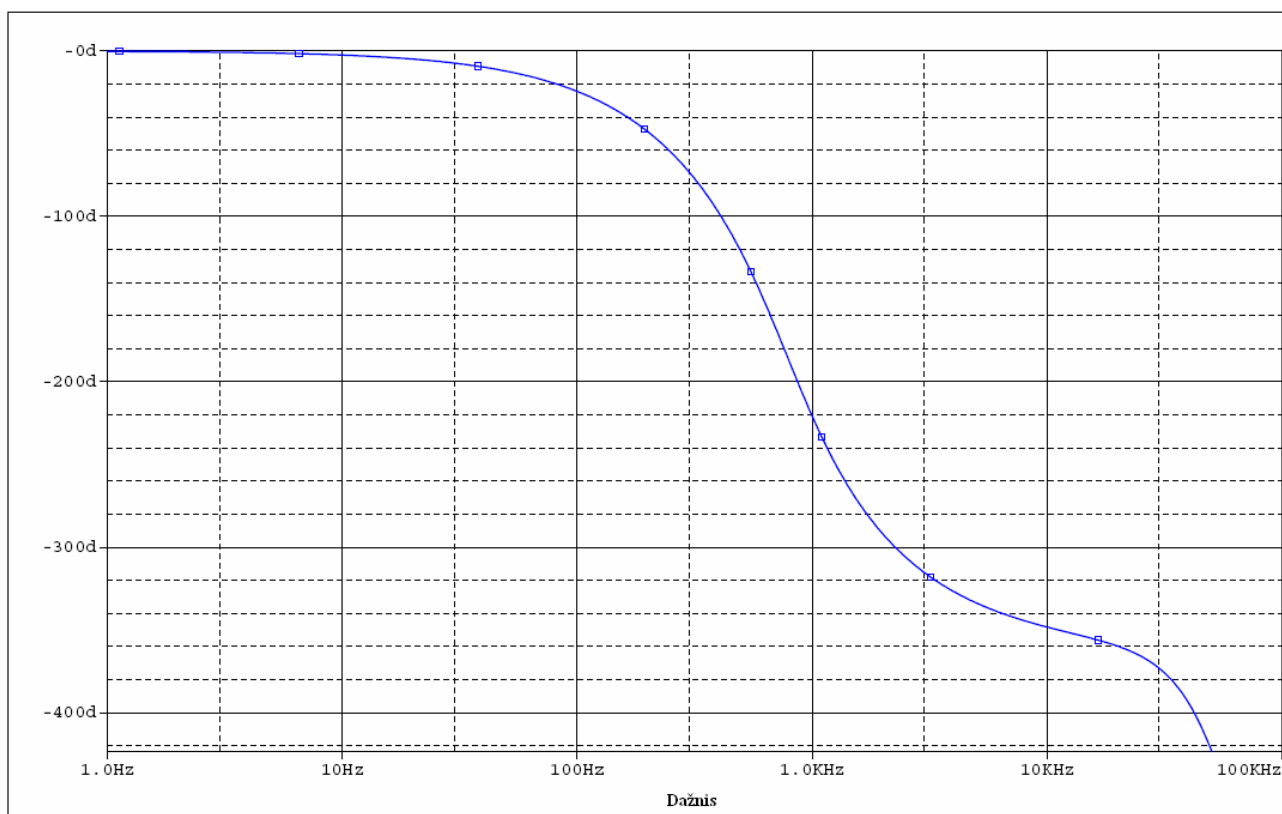
2) Kai maksimalus pralaidumo dažnis $f_k = 500$ Hz,

Gauname tokias reikšmes: $\omega_k = 2 \pi f_k = 3141,593$,

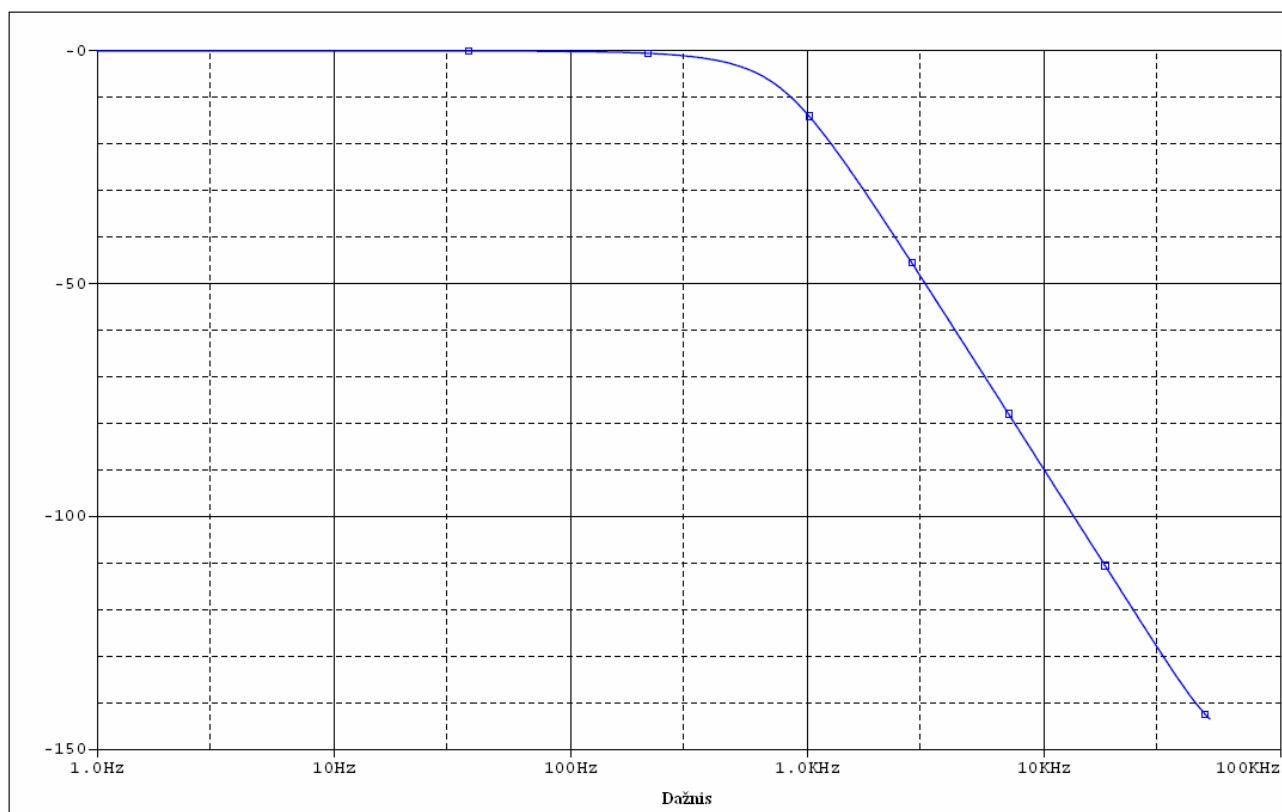
$$C1 = 11,6995 \text{ nF} , \quad C2 = 10,7366 \text{ nF} ,$$

$$C3 = 16,1065 \text{ nF} , \quad C4 = 6,20704 \text{ nF} .$$

Gaunamos atitinkamos dažninės charakteristikos (4.8 ir 4.9 pav.).



4.8 pav. 500 Hz fazinė charakteristika



4.9 pav. 500 Hz amplitudinė-dažninė charakteristika

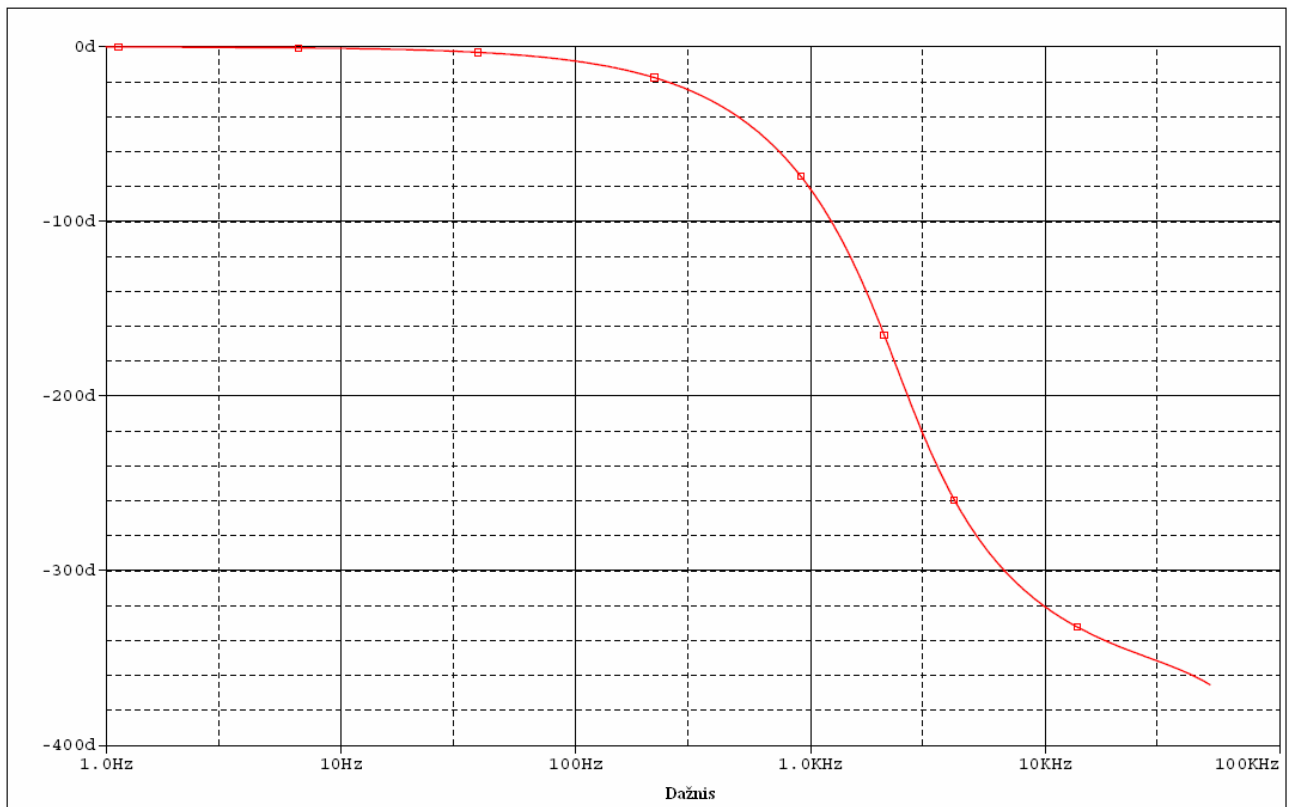
3) Kai maksimalus pralaidumo dažnis $f_k = 1,5 \text{ kHz}$,

Gauname tokias reikšmes: $\omega_k = 2 \pi f_k = 9424,778$,

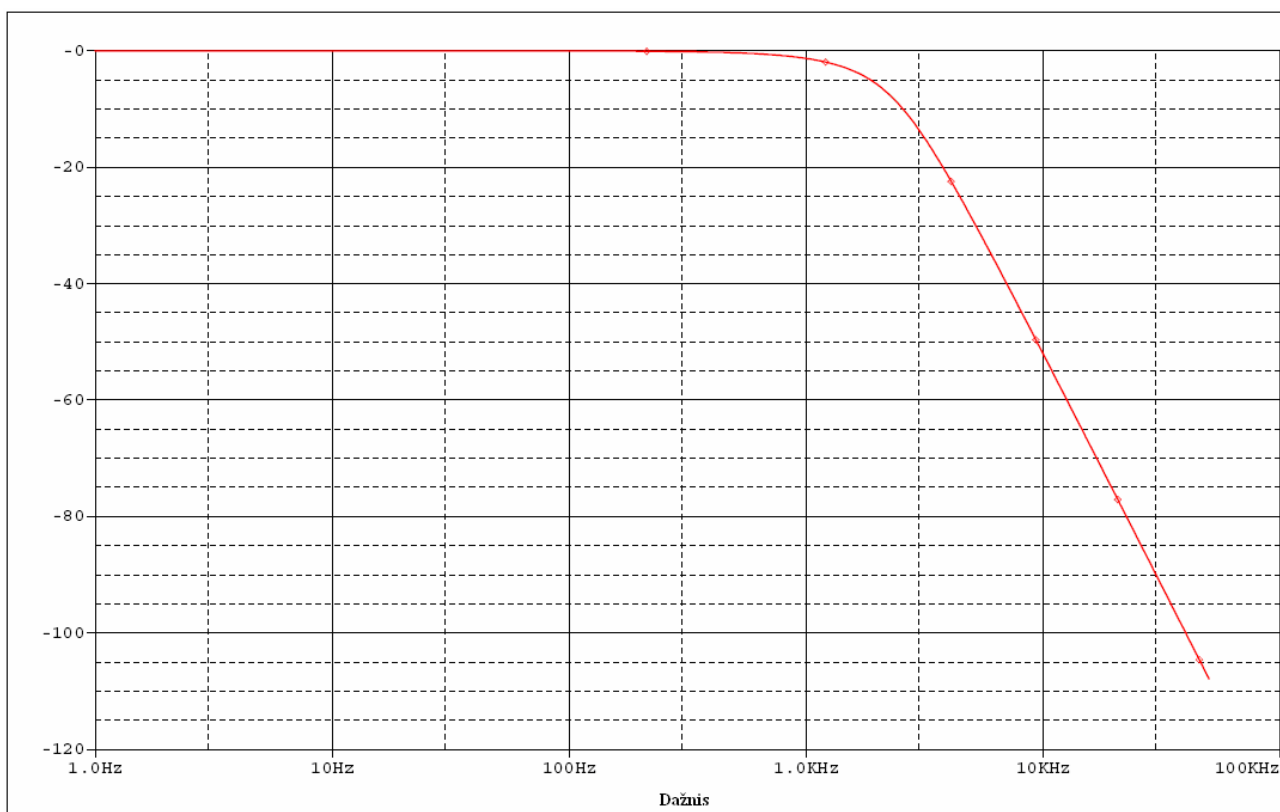
$C1 = 3,89983 \text{ nF}$, $C2 = 3,57886 \text{ nF}$,

$C3 = 5,36883 \text{ nF}$, $C4 = 2,06901 \text{ nF}$.

Gaunamos atitinkamos dažninės charakteristikos (4.10 ir 4.11 pav.).

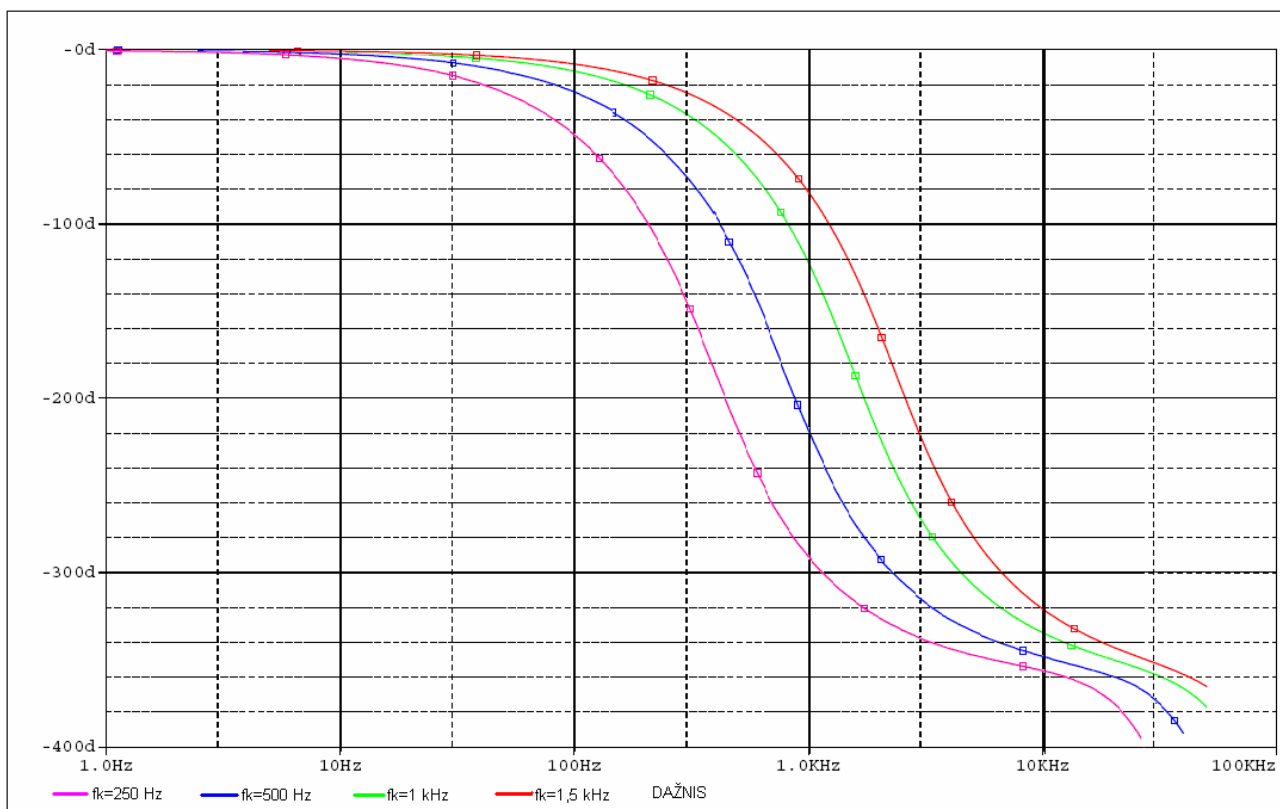


4.10 pav. 1,5 kHz fazinė charakteristika

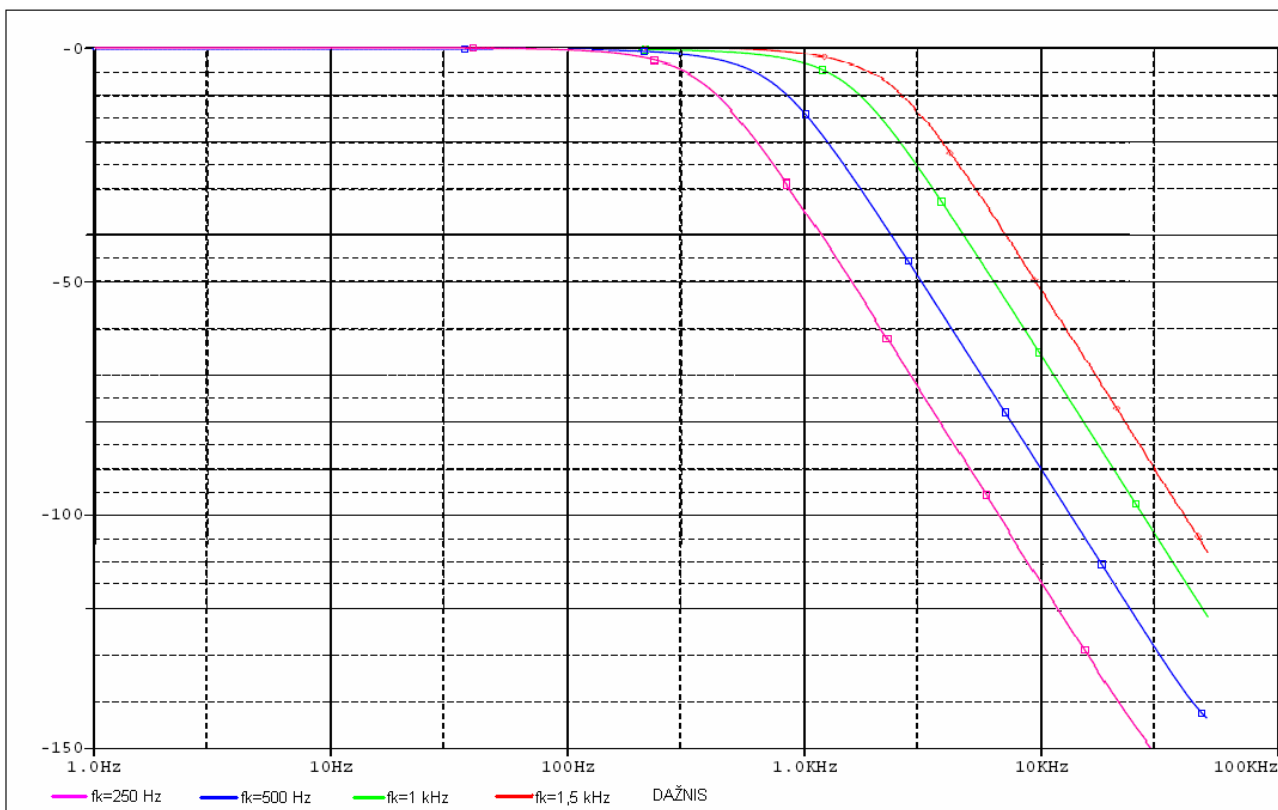


4.11 pav. 1,5 kHz amplitudinė-dažninė charakteristika

Charakteristikų palyginimui atvaizduojame jas vienoje diagramoje:



4.12 pav. Fazinių charakteristikų šeima



4.13 pav. Amplitudinių-dažnių charakteristikų šeima

Iš charakteristikų šeimų (4.12 ir 4.13 pav.), aiškiai matosi, kaip keičiantis maksimaliam pralaidumo dažniui f_k , keičiasi filtro pralaidumo juosta.

4.2 Batervorto filtro tyrimas

Analogiškai pasirinktas ketvirtos eilės, žemų dažnių aktyvinis Batervorto filtras, su dažnio pralaidumo juosta iki 1500 Hz.

Apskaičiuojami schemos elementų parametrai:

Filtrų charakteristikų palyginimui parenkamas maksimalus pralaidumo dažnis $f_k = 1$ kHz ir remiantis 3.4 formule apskaičiuojamas ω_k :

$$\omega_k = 2 \pi f_k = 6283,185307.$$

Parenkamos varžos: $R_1 = 20$ k Ω , $R_2 = 20$ k Ω bei $R_{01} = R_1 + R_2 = 40$ k Ω .

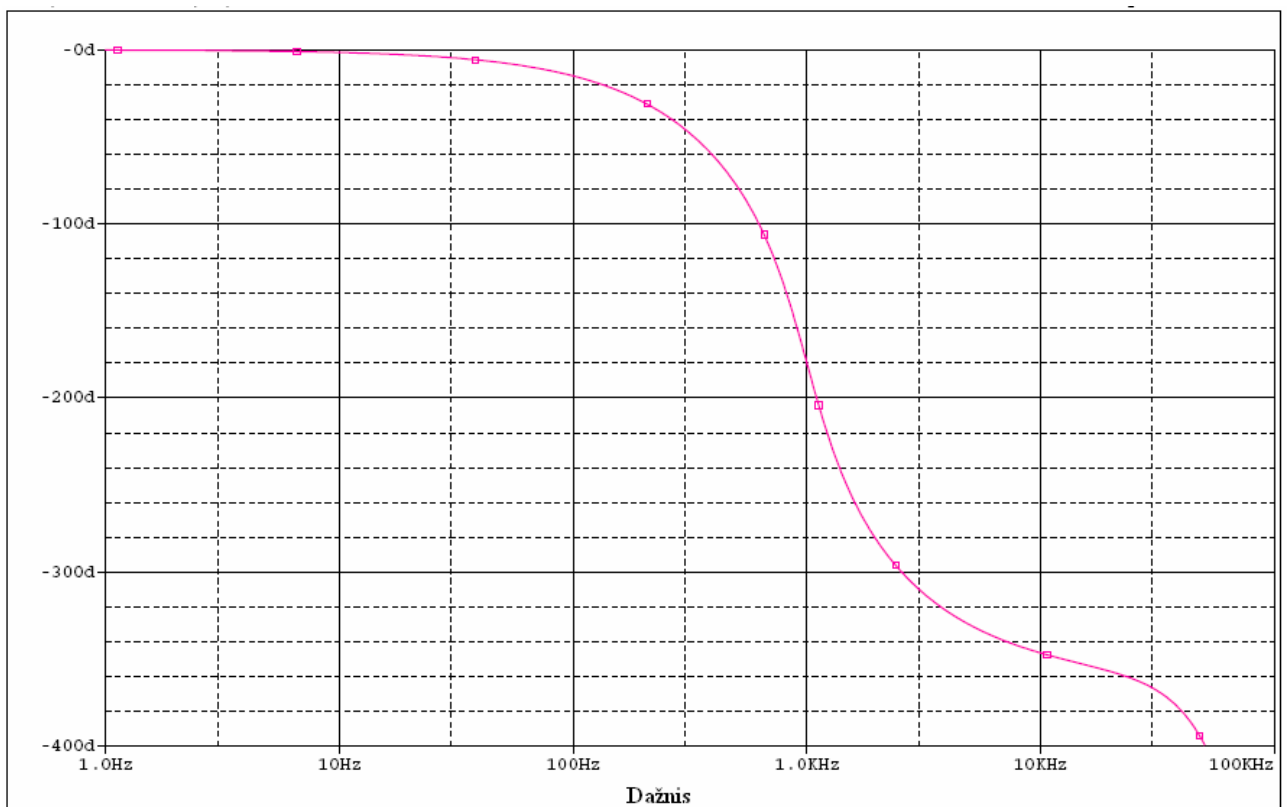
Pagal Batervorto filtro koeficientus iš 3.1 lentelės ir remiantis 3.5 formule apskaičiuojami kondensatorių talpumai:

$$(R = R_1 = R_2)$$

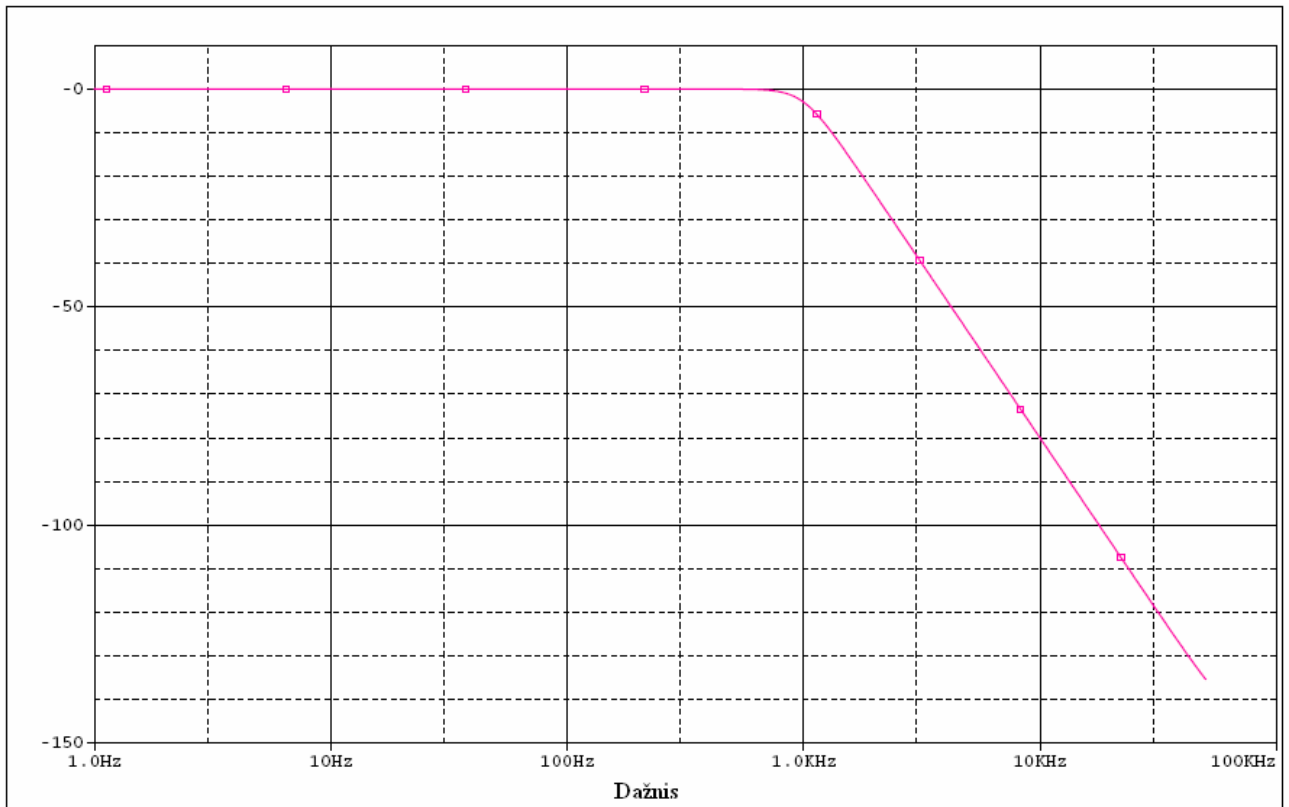
$$C1 = \frac{1,082}{\omega_k \cdot R} = 8,61028 \text{ nF} , \quad C2 = \frac{0,9241}{\omega_k \cdot R} = 7,35375 \text{ nF} ,$$

$$C3 = \frac{2,613}{\omega_k \cdot R} = 20,7936 \text{ nF} , \quad C4 = \frac{0,3825}{\omega_k \cdot R} = 3,04384 \text{ nF} .$$

Atlikus simuliaciją gaunamos charakteristikos:



4.14 pav. Batervorto filtro 1 kHz fazinė charakteristika



4.15 pav. Batervorto filtro 1 kHz amplitudinė-dažninė charakteristika

4.3 Čebyševio filtro tyrimas

Taip pat pasirinktas ketvirtos eilės, žemų dažnių aktyvinis Čebyševio filtras, su dažnio pralaidumo juosta iki 1500 Hz.

Apskaičiuojami schemos elementų parametrai:

Filtrų charakteristikų palyginimui parenkamas maksimalus pralaidumo dažnis $f_k = 1$ kHz ir remiantis 3.4 formule apskaičiuojamas ω_k :

$$\omega_k = 2 \pi f_k = 6283,185307.$$

Parenkamos varžos: $R_1 = 20$ k Ω , $R_2 = 20$ k Ω bei $R_{01} = R_1 + R_2 = 40$ k Ω .

Pagal Čebyševio filtro koeficientus (pasirinktas dažninės charakteristikos nelygumas – 1 dB) iš 3.1 lentelės ir remiantis 3.5 formule apskaičiuojami kondensatorių talpumai:

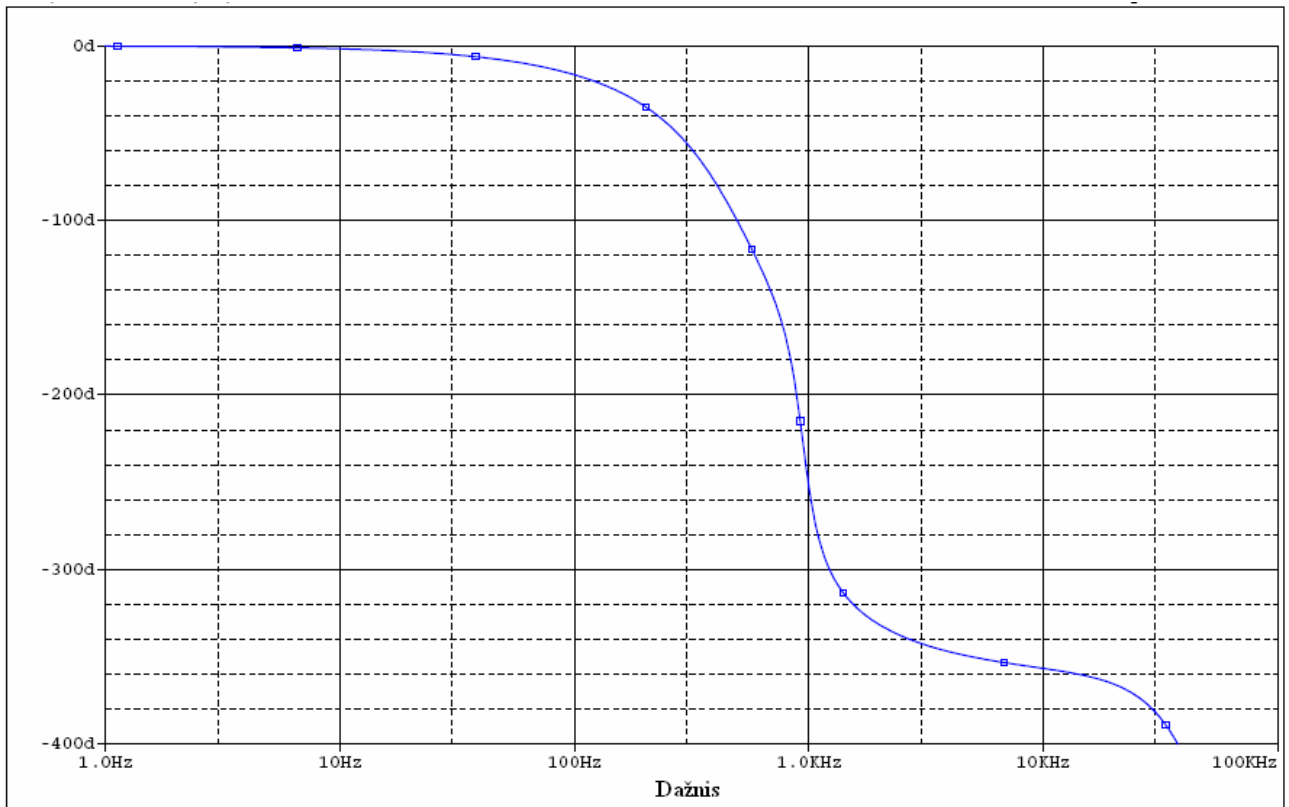
$$(R = R_1 = R_2)$$

$$C_1 = \frac{3,125}{\omega_k \cdot R} = 24,868 \text{ nF} ,$$

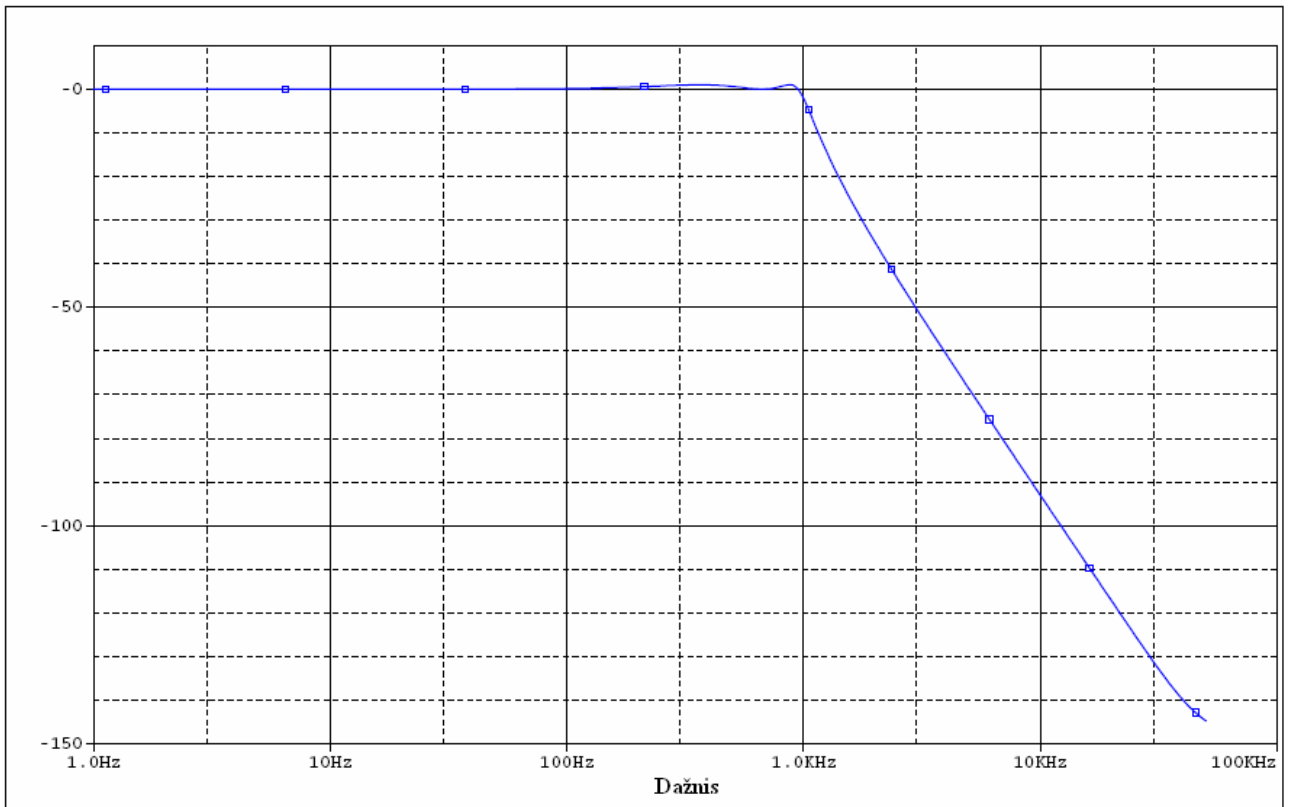
$$C_2 = \frac{1,269}{\omega_k \cdot R} = 10,0984 \text{ nF} ,$$

$$C3 = \frac{7,546}{\omega_k \cdot R} = 60,0492 \text{ nF} , \quad C4 = \frac{0,1489}{\omega_k \cdot R} = 1,18491 \text{ nF} .$$

Atlikus simuliaciją gaunamos charakteristikos:



4.16 pav. Čebyševio filtro 1 kHz fazinė charakteristika



4.17 pav. Čebyševio filtro 1 kHz amplitudinė-dažninė charakteristika

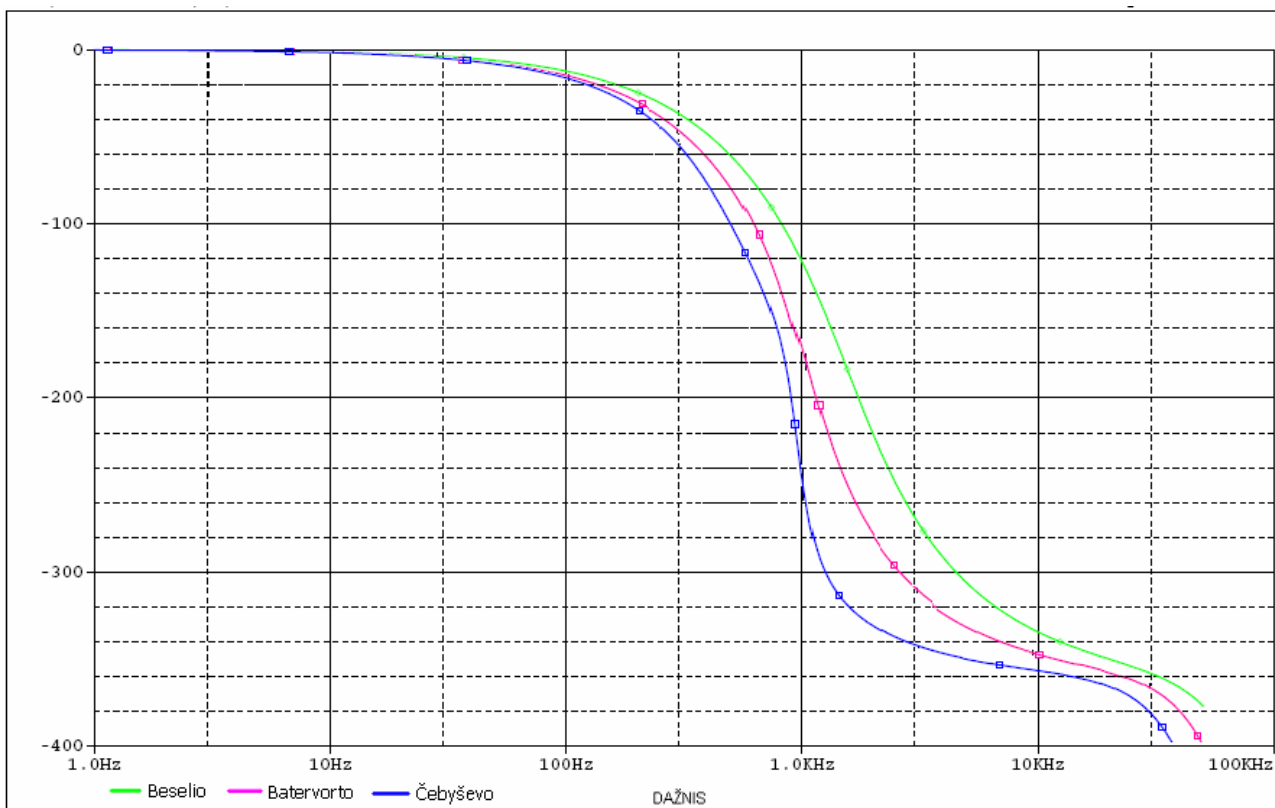
4.4 Aktyviųjų (ištirtų) filtrų apžvalga

Atvaizduojame vienoje diagramoje visų trijų tirtų filtrų tipų fazines ir amplitudines-dažnines charakteristikas (4.18 ir 4.19 pav.), ir galime pamatyti, kokie yra charakteristikų skirtumai, mustačius vienodą pralaidumo dažnį $f_k = 1$ kHz.

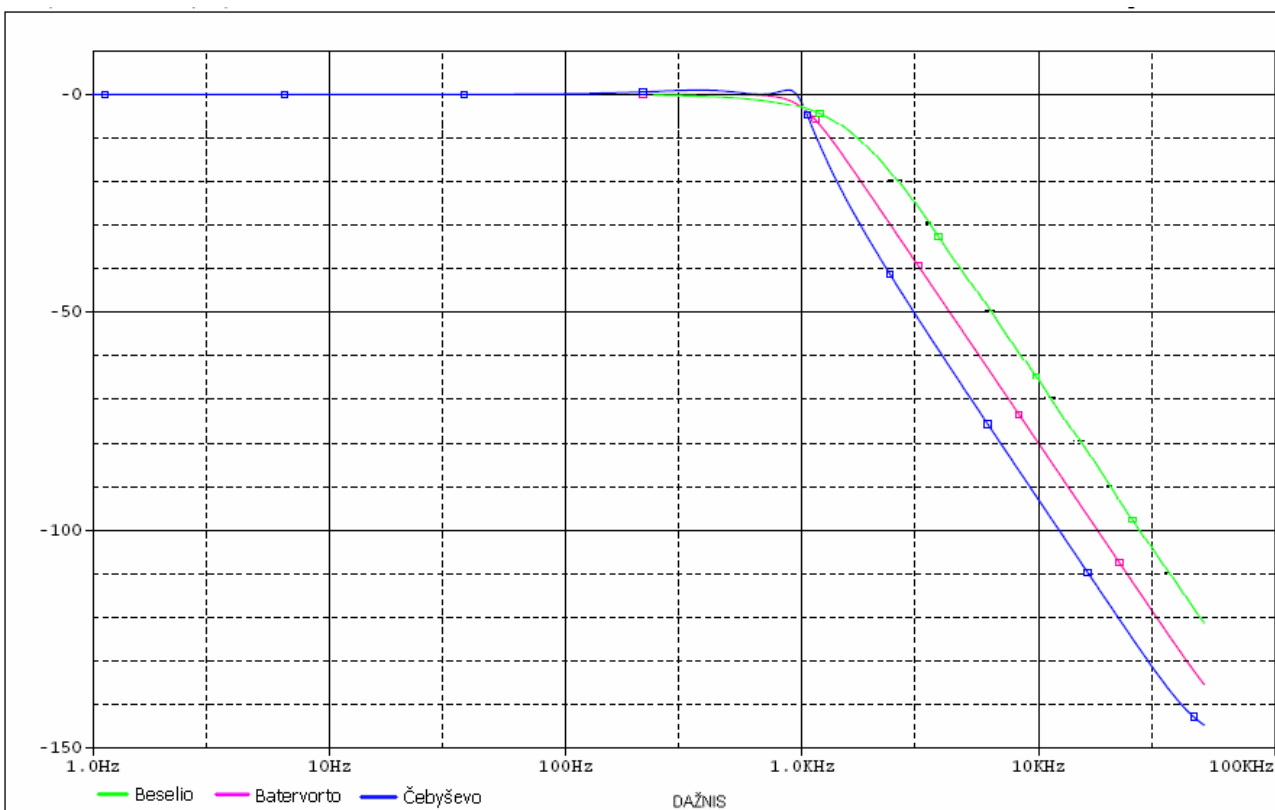
Aprašant filtrus pageidautina, kad jo perdavimo funkcija atitiktų tam tikras matematinės funkcijas (Beselio [Bessel], Batervorto [Butterworth], Čebyševio [Chebyshev]).

Beselio filtras:

Tai filtras su minimaliu užlaikymu, pakankama fazine ir amplitudine dažninėmis charakteristikomis, kuri aproksimuojama Gauso funkcija. Filtras turi optimalią amplitudinę-dažninę charakteristiką – svyravimų beveik nėra, nes fazės charakteristika pralaidumo juostoje yra tiesinė, t.y. filtras visas harmonikas vėlina tiek pat. Amplitudės charakteristikos nuolydis už ribinio dažnio palapsniui pasidaro tiesinis. Šie filtrai gerai tinka impulsinėms grandinėms ir fazei jautrių signalų apdorojimui.



4.18 pav. Beselio, Batervorto ir Čebyševo filtrų fazinės charakteristikos



4.19 pav. Beselio, Batervorto ir Čebyševo filtrų amplitudinės-dažninės charakteristikos

Batervorto filtras:

Filtro amplitudės charakteristikos iki ribinio dažnio turi palyginti ilgą horizontalios dalies atkarpą ir pastovų nuolydį už ribinio dažnio. Amplitudinei-dažninei charakteristikai būdingi gana greitai nuslopstantys svyravimai. Kuo aukštesnės eilės filtras, tuo didesnė svyravimų amplitudė. Fazinė dažninė charakteristika šiek tiek netiesinė. Sąlyginai nedidelis jautrumas elementų verčių nuokrypiams.

Čebyševio filtras:

Amplitudinė-dažninė charakteristika turi normuojamą nelygiškumą dažnių pralaidumo zonoje ir staigų jo kritimą už pralaidumo dažnio ribos. Amplitudinės-dažninės charakteristikos svyravimų amplitudė didesnė ir užgęsta jie netaip sparčiai kaip Batervorto filtro. Perdavimo charakteristika netiesinė.

Aktyvių RC filtrų pagalba negalima išgauti idealių dažninių charakteristikų kaip parodyta 3.4 pav.

Tokių filtrų projektavimas visada verčia ieškoti kompromiso tarp idealios filtro charakteristikos ir jos realizavimo sudėtingumo. Tai dar vadinama „problemine aproksimacija“. Daugelyje atvejų reikalavimai filtravimo kokybei leidžia išsiversti paprasčiausiais pirmos ar antros eilės filtrais.

Tokiu atveju filtrų projektavimas privedamas prie to, kad pasirenkama schema su labiausiai tinkama konfigūracija ir sekančiu elementų reikšmių paskaičiavimu konkrečioms dažniams. Tačiau būna situacijų, kai reikalavimai signalo filtravimui yra labiau griežtesni ir tai pareikalauja aukštesnės eilės filtrų. Kuo didesnės eilės filtras, tuo tiksliau jis aproksimuoja idealiąją charakteristiką su griežtomis ribomis. Tačiau, didėjant filtro eilei didėja jo elementų skaičius, o t. y. filtras darosi sudėtingesnis, didesnių matmenų ir žinoma brangesnis. Todėl dažnai tenka ieškoti kompromiso tarp norimos ar reikalaujamos charakteristikos ir schemos sudėtingumo.

Filtro stabilumas apibūdinamas: kaip atsiliepia jo charakteristikoms, nedideli schemos elementų parametrų nukrypimai, iššaukti dėl temperatūrinių dreifų, nominalų klaidos ir senėjimas. Kai kuriais atvejais net nedideli elemento reikšmių nuokrypiai nuo nominalios reikšmės gali iššaukti gan žymų filtro charakteristikų pasikeitimą. Pavyzdžiui jautrumas lygus 1 reiškia, kad pasikeitus elemento parametro reikšmei 1 % iššaukia 1 % parametrų pasikeitimui viso filtro.

Šiame darbe atlikdamas skaičiavimus pasirinkdavau varžas $R=R_1=R_2$, o apskaičiuodavau talpumus C . Šis metodas gana paprastas ir nesusiaurina elementų nominalų pasirinkimo. Tačiau, kadangi perdavimo koeficientas yra užduotas (3.1 lentelė) ir iškyla dilemą, ką pasirinkti rezistorius ar kondensatorius, tikslingiau yra pasirinkti kondensatorius, o varžų dydžius apskaičiuoti, nes

nominalių reikšmių rezistorių pasirinkimas žymiai didesnis ir prieinamesnis. Dar kondensatoriai turi didelius temperatūrinius koeficientus, palyginus su rezistoriais, todėl pasirenkant vienodo nominalo kondensatorius, galima juos pasirinkti ir vieno tipo, sumažinant tuo pačiu temperatūrinius svyravimus, kurie atsiliepia į filtro kokybę Q , ir teigiamai atsiliepia iš ekonominės pusės.

Nepriklausomas visų parametru nustatymas, kad ir kaip būtų gaila, neįmanomas. Paprastai filtro kokybė nustatoma R_1 ir R_2 pagalba [3].

IŠVADOS

1. Atlikus tyrimą išsiaiškinta, kaip kinta signalas, atitinkamai keičiant tam tikrus parametrus.
4.2 Pav. atsispindi filtro įtaka signalui laiko atžvilgiu. Filtras signalą praleidžia, todėl išėjime gauname tokį pat signalą kaip ir įėjime tik truputį užvėlintą (signalai skiriasi tik faze).
2. Keičiant sinusinio įtampos generatoriaus dažnio reikšmes atitinkamai į 100 Hz, 1 kHz, 2 kHz gaunamos atitinkamos diagramos, kuriose aiškiai matomas signalo slopinimas (4.3 pav.).
3. Stebint perdavimo charakteristiką (4.5 pav.) yra matomas aiškus lūžis ties 1 kHz. Kaip matome didėjant filtro eilei (jungiant tokius filtras nuosekliai) didėja filtro kokybė, tačiau proporcingai jai didėja filtro elementų skaičius. Tai vienas iš pagrindinių trūkumų.
Iš fazinės charakteristikos (4.4 pav.) matome, kad fazė pasisuka 360° (nes schemeje naudojami du investuojantys operaciniai stiprintuvai, kurių kiekvienas fazę keičia 180°).
4. Iš charakteristikų šeimų (4.12 ir 4.13 pav.), aiškiai matosi, kaip keičiantis maksimaliam pralaidumo dažniui f_k , keičiasi filtro pralaidumo juosta.
5. Aktyvių RC filtrų pagalba negalima išgauti idealių dažninių charakteristikų kaip parodyta 3.4 pav., todėl tai verčia ieškoti kompromiso tarp idealios filtro charakteristikos ir jos realizavimo sudėtingumo.
6. Nedideli schemos elementų parametrų nukrypimai, iššaukti dėl temperatūrinių dreifų, nominalų klaidos ir senėjimas iššaukia gan žymų filtro charakteristikų pasikeitimą (pasikeitus elemento parametro reikšmei 1 % iššaukia 1 % parametrų pasikeitimui viso filtro), todėl nemažas dėmesys turi būti skirtas ir filtro stabilumo užtikrinimui.
7. Dėl ekonominių paskatų ir filtro kokybės užtikrinimo atliekant skaičiavimus naudingiau pasirinkti vienodas kondensatorių nominalias reikšmes, o varžų dydžius apskaičiuoti, nes rezistorių pasirinkimas žymiai didesnis ir prieinamesnis ir išvengiami temperatūriniai svyravimai.
8. Harmonikų mažinimas didina elektros tinklo „pajėgumą“ ir stabilizuoja elektros sistemą, o galios koeficiento pataisos didina energijos vartojimo efektyvumą ir sumažina elektros išlaidas.
9. Tinkamai parinkta schema, elementai ir jų parametrai, filtro eilė įtakoja filtro stabilumą, kokybę ir tuo pačiu efektyvumą (efektyvų filtro darbą).

LITERATŪRA

1. LST EN 50160 Bendrų skirstomųjų elektros tinklų įtampos charakteristikos.
2. Elektros energijos tiekimo ir naudojimo taisyklės (Žin.,2005, Nr. 120-4328).
3. А.Дж.Пейтон, В.Волш Аналоговая электроника на операционных усилителях. Москва, 1994.
4. О.Григорьев и др. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ. «Новости электротехники» № 6/ 2002 – 1 / 2003.
5. В.Петухов, И.Красилов Резонансные явления в электроустановках зданий. «Новости электротехники» №6 / 2003.
6. М.Сапунов Несимметрия трехфазной системы напряжений. «Новости электротехники» №1 / 2001.
7. А.Сердешнов и др. Симметрирующее устройство для трансформаторов. Средство стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ. «Новости электротехники» №1 / 2005.
8. S. Swenson Power measurement uncertainties in a Non-sinusoidal power system. IEEE/KTH Stockholm Power Tech.Conf., June 18-22, 1995, p.p. 617-622.
9. Active filter design techniques, chapter 16, excerpted from Op Amps for Everyone literature number: SLOD006A, Texas Instruments 2008.
10. Active filters, chapter 39, excerpted from M.H.Rashid Power electronics handbook, second edition, London 2007.
11. Harmonic studies of power compensating plant, chapter 7, excerpted from Power electronic control in electrical systems / Newnes power engineering series, Oxford, 2002.
12. Filtrų projektavimo sistema OrCAD. <http://www.orcad.com>.
13. Elektros energijos kokybė. Lietuvos ūkio ministerijos rekomendacija. Vilnius, 1997 lapkričio 10, 8 p.
14. A. Čitavičius, V. Paražinskas. Žemosios įtampos elektros tinklo signalų parametrų matavimas ir įvertinimas. ISSN 1392-1223, Matavimai, 1998. Nr.4(9), 7-14 psl.
15. Interneto prieiga - <http://coe.pitt.edu/courses/Labs/Software/Pspice> , 2008 10 12.
16. Interneto prieiga - <http://ifko.ktu.lt/~vypet/T120B012/filtras1.htm> , 2008 10 20.
17. Interneto prieiga – <http://lt.schneiderelectric.nu/Electrical%20distribution/MV/Trihal%20mass%20mailing/8-T6-Harmonics%20filter> , 2008 11 12.