

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Infotehnoloogia teaduskond

Informaatikainstituut

*Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut*

# **Helisagedussignaalide kolmeribaline filter**

Bakalaurusetöö

Üliõpilane:	Lauri Ebber
Üliõpilaskood:	025551
Juhendaja:	Dots. Mihhail Pikkov
Kaasjuhendaja:	Dots. Martin Jaanus

Tallinn  
2014

## **Autorideklaratsioon**

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

10.06.2014

-----  
*(kuupäev)*

-----  
*(allkiri)*

## **A n n o t a t s i o o n**

Lauri Ebberi bakalaureuse lõputöös “Helisagedussignaali kolmeribaline filter“ on disainitud kolmeribaline filter, mis eraldab sagedusdiapasoonis 0-20000 Hz signaalidest kolm eraldi sagedusriba: madalsagedusriba 0-400 Hz, kesksagedusriba 400-4000 Hz ja kõrgsagedusriba üle 4000 Hz. Ülesande lahendamiseks on valitud liittagasiside topoloogiaga skeem, mis töötab teise järgu Butterworthi filtrina. On arvatud skeemi elementide väärtused ja viidud läbi filtri töö simulatsioon. Eksperimentaalses osas on koostatud kõigi kolme filtri makettskeemid ja mõõdetud nende amplituudi- ja faasi-sageduse karakteristikad. On koostatud üldskeem, kus on koos kõik kolm arvatud filtrit ja väljatöötatud selle trükiplaat.

Töö on 44 lehel, joonised 20.

## **S u m m a r y**

In Lauri Ebber buchelor thesis “Three-frequency band filter for sound frequency signals“ the frequency filter, separating 0-20000Hz signals into three bands 0-400 Hz, 400-4000 Hz and 4000-20000 Hz, has been designed. The scheme with miltiple loop feedback, that operates as a second order Butterworth filter, was selected. The parameters of scheme were calculated, transfer function was found and simulations of filters work were carried out. All three filters were also made and actual amplitude- and phase- frequency chracteristics were mesured. Using CadSoft Eagle 5.11 printed circuit boad diagram was designed in which all three filters were combined in one common schematic.

# Sisukord

Autorideklaratsioon.....	2
Annotatsioon.....	3
Summary.....	4
Jooniste nimekiri.....	6
Sissejuhatus .....	7
Töö ülesanne ja tööle esitatavad nõuded .....	8
1. Sagedusfiltrite teoreetilised alused .....	9
1.1 Sagedusfiltrite iseloomustamine .....	9
1.2 Passiivsed ja aktiivsed sagedusfiltrid .....	10
1.3 Butterworthi, Chebõshevi ja Besseli filtrid .....	12
2. Filtrite väljatöötamise ja arvutamise põhimõtted.....	14
2.1 Erinevate filtrivariantide realisatsioon ja skeemilahenduse valik .....	14
2.2 Skeemi parameetrite sobitamine ja elementide väärtuste arvutamine .....	14
2.3 Filtrite simulatsioon .....	15
3. Eksperimentaalne osa .....	16
3.1 Reaalse skeemi koostamine.....	16
3.2 Filtri karakteristikute mõõtmine.....	17
4. Valitud topoloogiaga filtrite arvutamise tulemused .....	18
4.1 Madapääsfiltri arvutus .....	18
4.2 Kõrgpääsfiltri arvutus.....	26
4.3 Ribapääsfiltri arvutus .....	33
5. Trükiplaadi väljatöötamine .....	39
6. Majanduslik osa .....	42
Kokkuvõte.....	43
Kirjandus.....	43
Lisa 1, Operatsioonivõimendi LM 324N põhilised parameetrid.....	44

## Jooniste nimekiri

Joonis 1.1. RC-madalpääsfiltri skeem ja tööpõhimõte.

Joonis 1.2. RC-kõrgpääsfiltri skeem ja tööpõhimõte.

Joonis 3.1. Sagedusfiltri amplituudi- ja faasikarakteristikate mõõtmiste skeem.

Joonis 4.1. Teist järku liit tagasisidega madalpääsfiltri skeem.

Joonis 4.2. Madalpääsfiltri simulatsiooni amplituudi-sageduse karakteristik

Joonis 4.3. Madalpääsfiltri simulatsiooni faasi-sageduse karakteristik

Joonis 4.4. Madalpääsfiltri mõõdetud amplituudi-sageduse karakteristik

Joonis 4.5. Madalpääsfiltri mõõdetud faasi-sageduse karakteristik

Joonis 4.6. Teist järku liitvastusidega kõrgpääsfiltri skeem.

Joonis 4.7. Kõrgpääsfiltri simulatsiooni amplituudi-sageduse karakteristik

Joonis 4.8. Kõrgpääsfiltri simulatsiooni faasi-sageduse karakteristik

Joonis 4.9. Kõrgpääsfiltri mõõdetud amplituudi-sageduse karakteristik

Joonis 4.10. Kõrgpääsfiltri mõõdetud faasi-sageduse karakteristik

Joonis 4.11. Kahe astmega ribafiltri skeem

Joonis 4.12. Kaheastmelise ribafiltri simulatsiooni amplituudi-sageduse karakteristik.

Joonis 4.13. Kaheastmelise ribafiltri simulatsiooni faasi-sageduse karakteristik.

Joonis 4.14. Kaheastmelise ribafiltri mõõdetud amplituudi-sagedus karakteristik.

Joonis 4.15. Kaheastmelise ribafiltri mõõdetud faasi-sageduse karakteristik.

Joonis 5.1. Kolmeribalise helisagedusfiltri skeem

Joonis 5.2. Väljatöötatud kolmeribalise helisagedusfiltri trükiplaat

## S i s s e j u h a t u s

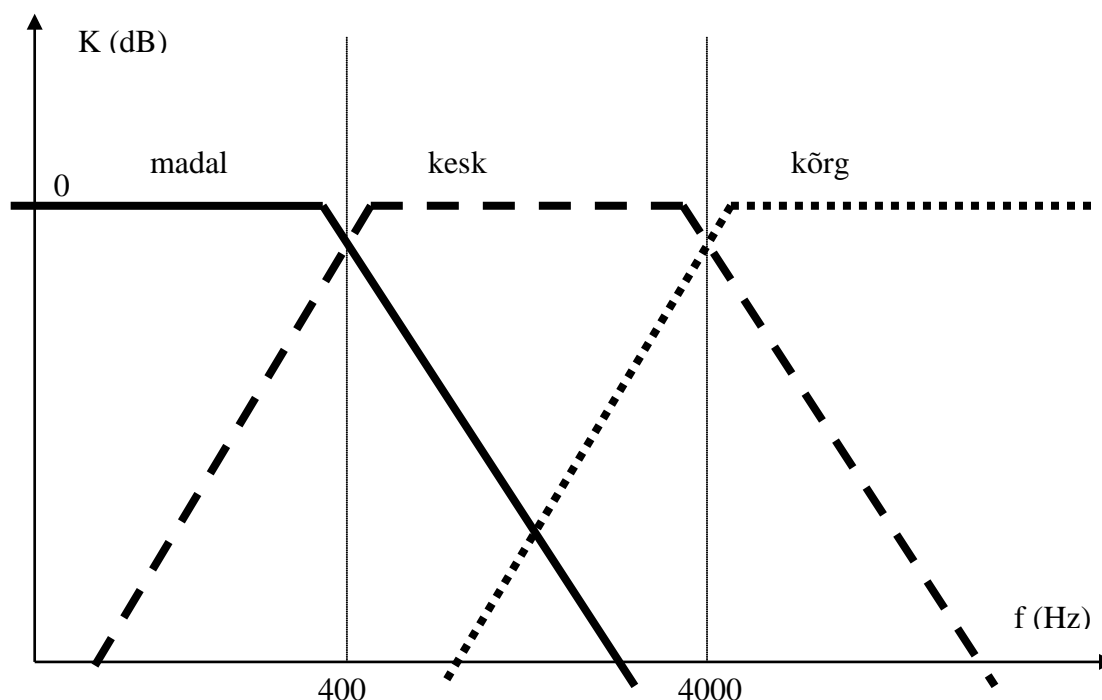
Helisagedustel on väga spetsiifiline roll inimese elus, sest evolutsiooni käigus on helilainete tajumiseks välja arenenud spetsiaalne organ – kõrv, mis võimaldab detekteerida väliskeskkonnas (näit. õhus) mehhaanilisi (akustilisi) võnkeid. Inimene kuuleb helivõnkumisi sagedusvahemikus umbes 16-20000 hertsi ning kui mikrofoni abil õhu rõhu muutumine transformeerida proportsionaalseks elektisignaali muutumiseks saamegi elektrilise helisagedussignaali. Helisagedusega signaalide salvestamiseks, edastamiseks, töötlemiseks ning reprodutseerimiseks läbi valjuhääldite kasutatakse elektroonilisi süsteeme, mis tihti sisaldavad sagedusfiltreid. Näiteks bassikõlarisse, kõrgsageduskõlarisse või värvimuusika ühte värvikanalisse suunatav signal modustab ühe sagedusriba tervest helisagedussignaali diapasonist ning seda eraldatakse vastava filtri abil. Sagedusfiltreid kasutatakse ka ekvilaiserites, erinevates võimendites või siis kõrgsagedusmüra (“sahina”) eemaldamiseks madalsagedusega signaalidest.

Käesolevas töös oli formuleeritud ülesanne konstrueerida selline sagedusfilter, mis võimaldab jagada helisagedusega signaalid kolmeks segedusdiapasooniks. Etteantud omadustega helisageduse filtrite disain ja nende arvutus ongi teema, mida käsitletakse käesolevas bakalaureuse diplomitöös.

## Töö ülesanne ja tööle esitatavad nõuded

Käesolevas bakalaureuse töös oli formuleeritud ülesanne väljatöötada ning arvutada kolm aktiivfiltrit, mis katavad helisageduste diapasooni (0 Hz – 20 kHz)

1. Madalpääsfilter lõikesagedusega 400 Hz (sumbumustasemel -3dB), mille kalle on vähemalt -40 dB/dec.
2. Keskmiste helisagedustele ribapääsfilter kalletega +40dB/dec ja -40dB/dec , lõikesagedustega (tasemel -3dB) 400Hz ja 4kHz.
3. Kõrgpääsfilter lõikesagedusega 4000 Hz (sumbumustasemel -3dB) ning kaldega +40db/dec.



Joonis 1. Projekteeritava kolmeribalise filtri amplituudi-sageduse tunnusjoon

Filtrite lõplik variant peab koosnema nominaalväärtustega elementidest , peab olema reaalselt koostatud ja katsetatud amplituudi- ja faasi-sageduse karakteristikute mõõtmisega. Signaali sisendpinge efektiivne väärtus 1V. Peab olema koostatud üldine skeem, mis sisaldab kõiki kolme arvutatud filtrit ning peab olema disainitud trükiplaat.

Kolmeribalise filtri väljatöötamisel peeti eesmärgiks konstrueerida universaalne kolmeribaline filter korraliku amplituudi – sageduse karakteristikuga , mida saab kasutada helivõimendusseadmetes kui ka näiteks värvimuusikas.



# 1. Sagedusfiltrite teoreetilised alused

## 1.1. Sagedusfiltrite iseloomustamine

Filter on lülitus teatava tunnusega signaalide eraldamiseks mitmesuguste signaalide segust. Tunnuseks mille järgi signaale eristatakse, on enamasti sagedus. Sagedusfiltri ülesanne on seega teatud sagedusega signaale läbi lasta ja muude sagedustega signaalide edasipääsu tõkestada [1,2].

Filtrit iseloomustab kompleksne sageduskarakteristik:

$$H(j\omega) = |H(j\omega)| \cdot e^{j\varphi(\omega)}$$

$|H(j\omega)|$  amplituudi-sageduse karakteristikut väljendav moodul

$\varphi(\omega)$  faasi-sageduse karakteristik

$$j = \sqrt{-1}$$

$\omega$  [rad/s] =  $2\pi f$ , kus  $f$  on sagedus hertsides.

Kompleksset sageduskarakteristikut (e. ülekande funktsiooni) võib üldjuhul avaldada polünoomide suhtena:

$$H(j\omega) = \frac{U_v(j\omega)}{U_s(j\omega)} = \frac{a_m(j\omega)^m + a_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + a_1(j\omega) + a_0}{b_n(j\omega)^n + b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + b_1(j\omega) + b_0} \quad (1.1)$$

$a, b$  – konstantsed kordajad

$m, n = 1, 2, 3, \dots$

$m \leq n$ , matemaatiliselt võib olla  $m > n$ , kuid sellise ülekandefunktsiooniga filter ei ole füüsiliselt realiseeritav.

Nimetajas oleva polünoomi astendaja  $n$  määrab filtri järgu.

Tähtsamad parameetrid, millega filtreid iseloomustatakse on pääsuala, tõkkeala, siirdeala, lõikesagedus, pääsuala piirsagedus, tõkkeala piirsagedus, sumbumus, tunnusjoone kalle. Ülekandefunktsiooni nullid on sellised  $\omega$  väärtused mille puhul on lugejas olev polünoom võrdne nulliga. Ülekandefunktsiooni poolused on sellised  $\omega$  väärtused, mille puhul on nimetajas olev polünoom võrdne nulliga.

Kui teatava sagedusega signaal läbib filtri, siis võivad muutuda signaali amplituud ja faas. Amplituudi ja faasi muutust iseloomustavad amplituudi-sageduse karakteristik (tunnusjoon) ja faasi-sageduse karakteristik. Need kaks karakteristikut koos moodustavad Bode diagrammi.

Pääsuala piirsagedusel ( $f_p$ ) on lubatav maksimaalne sisendsignaali sumbuvus ( $a_p$ )  $1/\sqrt{2} = 0,7071$  (-3.01 dB). Sellele sumbuvassele vastav piirsagedus on lõikesagedus  $f_1$ . Sageduse järgi käsitletakse käesolevas töös madalpääsfiltreid (mp-filtrid), mille pääsuala on nullist kuni  $f_p$  Hz, kõrgpääsfiltreid (kp-filtrid), mille pääsuala on vahemikus  $f_p$  kuni lõpmatuseni (kuni skeem töötab) ja ribapääsfiltreid, mis töötavad mp- kp- filtrite pääsualade vahel ( $f_{-1}$  kuni  $f_{+1}$ ) ning need filtrid jagavad helisageduse diapasooni kolmeks ribaks. Kuna ideaalne filter nn. „kivimüür“ ei ole realiseeritav, siis jääb pääsu ja tõkkeala vahele siirdeala, kus väljundsignaal järsult langeb teatava kaldenurgaga, mille väärtus on üks olulisemaid filtri iseloomustamise parameetritest.

## 1.2 Passiivsed ja aktiivsed sagedusfiltrid

Elementaarne passiivfilter on pingejagaja, milles vähemalt üheks takistiks on reaktiivtakistusega kondensaator või pool ning mille impedants sõltub signaali sagedusest. Joonistel 1.1 ja 1.2 on esitatud esimest järku passiivsete madal- ja kõrgpääs- RC filtrite skeem ja tööpõhimõte. Kondensaatori takistus (kompleksarvuna) on  $Z_c = -j/\omega C$  ja sõltub sagedusest. Väljundsignaali pinge  $U_v$  moodustab osa sisendsignaali pingest  $U_s$  ja *madalpääsfiltri* ülekande funktsioon on järgmine:

$$\frac{U_v}{U_s} = \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \quad (1.2)$$

$U_v/U_s$  sagedusest sõltuvuse graafik ongi filtri amplituudi-sageduse karakteristik. Kui  $f=0$ Hz, on ülekande funktsioon 1 ja sageduse kasvades väljundsignaali amplituud sumbub. Sagedus mille korral  $R=X_c$  on lõikesagedus ( $f_1 = 1/2\pi RC$ ) ning sellel sagedusel on signaali sumbumine 0.707. Veel kõrgematel sagedustel amplituudi-sageduse tunnusjoon langeb kaldenurgaga 20 dB dekaadi kohta (6 dB/oktaav).

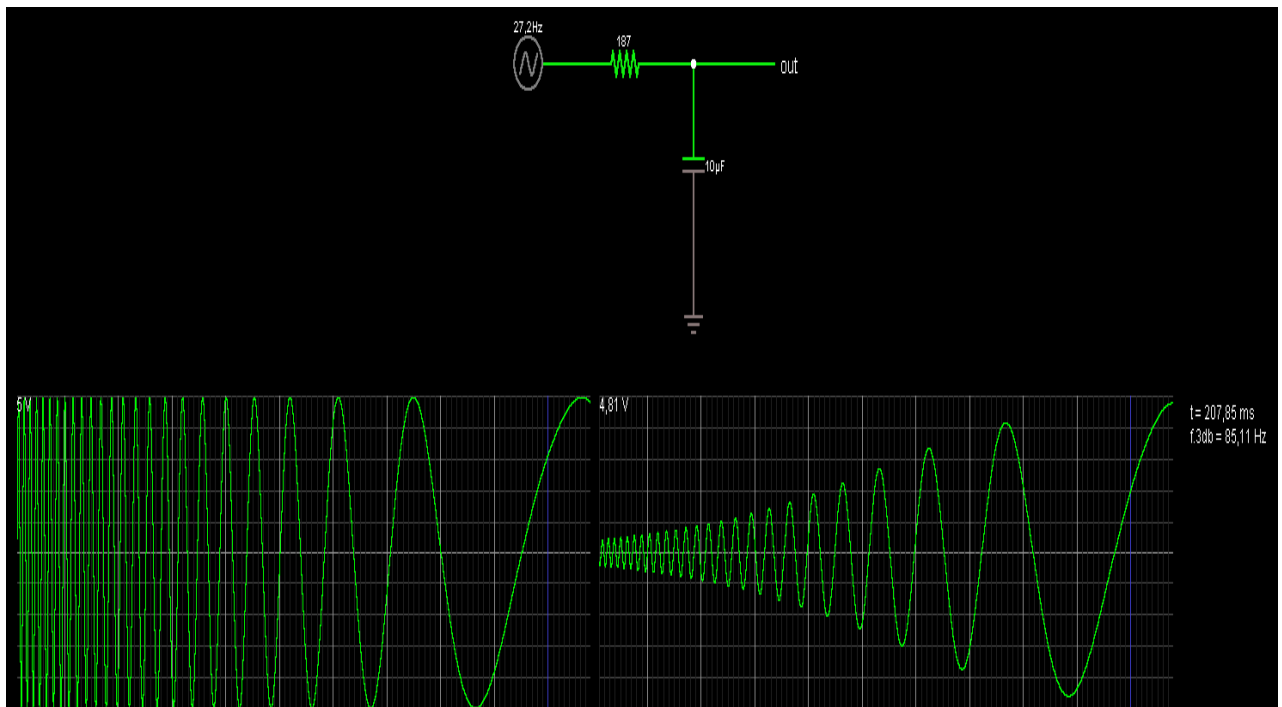
Sisensignaali sageduse muutudes nihkub väljundsignaali faas (sisendi suhtes) ning seda iseloomustab filtri faasi-sageduse karakteristik  $\varphi = F(\log(f))$ . Faasi nihe sagedusel  $f$  on

$$\varphi = -\arctan(2\pi fRC) \quad (1.3)$$

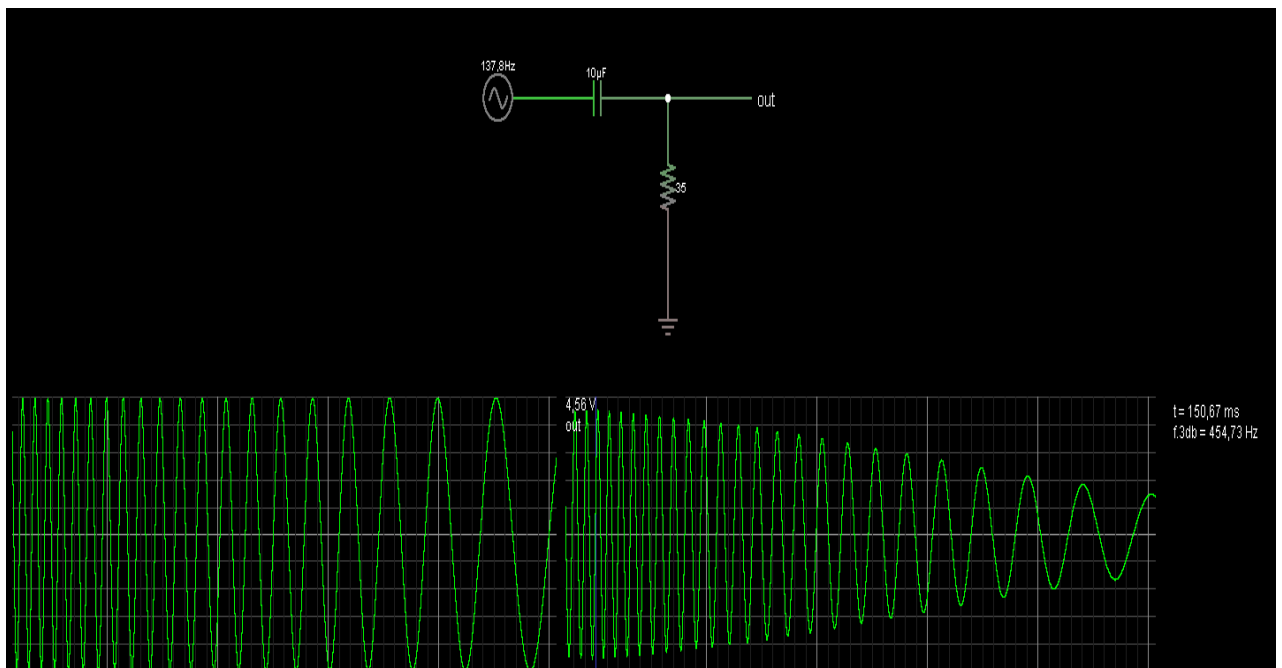
ja lõikesagedusel nihkub faas  $-45^\circ$  võrra. Sagedustel  $0.1f_1$  ja  $10f_1$  erinevad faasinihked umbes  $6^\circ$  asumptootilistest väärtustest.

Heal filtril on lineaarne faasi-sageduse karakteristik, erineva sagedusega signaalid peaks läbima filtri sama aja jooksul. Kuid tavaliselt nii ei ole, sest reaktiivsete elementide füüsilise olemuse tõttu ei ole võimalik luua filtreid, millel on samaaegselt hea amplituudi-sageduse karakteristik ja hea faasi-sageduse karakteristik.

Kui panna järjestikku kokku kaks ülalkirjeldatud esimest järku filtrit – saame teist järku passiivse RC filtri. Selle kaldenurk on 2 korda järsem (-40 dB/Decade), sest iga järk suurendab kaldenurka 20 dB/Decade võrra. Amplituudi-sageduse tunnusjoone “murdenurk“ lõikesagedusel muutub teravamaks mida kõrgem on filtri järk, kuid toimub oluline signaali nõrgenemine (iga järk nõrgendab  $1/\sqrt{2}$  korda). Ka tekivad filtrite ühendamisel kaskaadiks takistuste kooskõlastamise probleemid: iga järgmine



**Joonis 1.1. RC-madalpääsfiltri skeem ja tööpõhimõte.**



**Joonis 1.2. RC-kõrgpääsfiltri skeem ja tööpõhimõte.**

filter on koormuseks eelmisele filtrile ja mõjutab selle tööd. Antud puuduse ületamiseks võib kasutada puhvreid või operatsioonvõimendeid. Parimate omadustega passiivfiltrite ehitamiseks on vaja kasutada induktiivsusi, kuid poolid on ebapraktilised (suured, kallid, omavad takistust, keerdudevahelist mahtuvust, tundlikud magnetväljade suhtes) ning neid üritatakse vältida, kasutades nende asemel güraatoreid või negatiivse impedantsi konverteereid, mis koosnevad ainult RC elementidest. Kuid valdavalt kasutatakse aktiivseid RC filtreid operatsioonvõimendiga, mis kompenseerivad signaali sumbumist pääsupiirkonnas. Kasutatakse nii invertteeriva kui ka mitte-invertteeriva signaali sisendiga skeeme ning mitmeid tagasiside variante [3].

### 1.3 Butterworthi, Chebõshevi ja Besseli filtrid

On olemas mitmesuguseid polünoome, mis võimaldavad saada niisuguse kompleksse sageduskarakteristiku, mis nõutava täpsusega aproksimeerib vajalikku amplituudisageduse või faasi-sageduse karakteristikut, s.t on sellele piisavalt lähedane. Selleks kasutatavate polünoomide autorite järgi nimetatakse ka filtritüüpe. Nii tuntakse Butterworth'i, Tšebõšovi, Caueri, Besseli, Gaussi filtreid.

Klassikaliseks filtriks, millega võrreldakse teisi filtreid, loetakse *Butterworthi filtrit*. Butterworthi madalpääsu filtri amplituudisageduse karakteristik avaldub polünoomide suhtena (1.1), milles  $a_0 = 1$  ja  $a_1, a_2, \dots = 0$  [2, lk15]:

$$\frac{U_v}{U_s} = |H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_l}\right)^{2n}}} \quad (1.4)$$

$U_v$  – filtri väljundpinge

$U_s$  – sisendpinge

$f_l$  – lõikesagedus

$n$  – filtri järk

Filtri disainil saab ette anda filtri järku  $n$ , lõikesageduse  $f_l$  (nt  $f=0,74f_l$ ,  $f=f_l$ ,  $f=4f_l$ ) ja sisendpinge  $U_s$ . Vastus on väljundpinge  $U_v$ . Edasi saab sumbumuse valemit kasutades leida sumbumuse  $a_p$ .

Butterworthi filtri tunnusjoon on pääsuosas peaaegu rõhtne ja läheneb ühele on monotoonne (lainjust ei ole). Lõikesagedusel on faasi-sageduse tunnusjooned võrdlemisi lineaarsed (eriti madalate järkude korral). Faasi tunnusjoone ebalineaarsus põhjustab siirdemoonutust. Andes sisendisse pingestangu, tekib ülevõnge, mis on seda suurem, mida suurem on filtri järk. Amplituudisageduse karakteristikuga kalle avaldub:

$$kalle = \frac{20 \log \left( \frac{G_2}{G_1} \right)}{\log \left( \frac{f_2}{f_1} \right)} \text{ [dB/dec] ,} \quad (1.5)$$

kus  $G_1$  ja  $G_2$  – on võimendused (Gain) siirdeala sagedustel  $f_1$  ja  $f_2$  ( $f_2 > f_1$ )

Siirdealas on tunnusjoone kalle on  $6 \cdot n$  dB oktavi kohta e.  $20 \cdot n$  dB dekaadi kohta .

Seega on teist järku Butterworthi filtri amplituudi-sageduse karakteristikuga kalle 40dB/dec. Faasi-sageduse karakteristik ei ole Butterworthi filtril hea, signaali ajaline hiline mine teeb maksimumi lõikesageduse piirkonnas. Lõikesagedusel nihkub  $U_v$  faas -45 kraadi iga filtri järku kohta (I järku filtril on nihe -45 kraadi, II järku filtril -90 kraadi, III järku filtril -135 kraadi jne).

Kui pääsualas on lubatud teatav lainjus, kuid lõikesagedusel nõutakse väga teravat murdenurka siis parimaks valikuks on *Chebõshevi filter*. Chebõshevi filtri ülekande funktsioon sarnaneb Butterworthi funktsioonile (1.4), kuid täiendavalt sisaldab nimetajas Chebõshevi polünoomi ja pääsuala lainetust iseloomustavat koefitsienti. Selle faasi-sageduse karakteristik on halb ning impulssignaali läbimisel ilmneb pulsatsioon.

Kui on vaja sagedusfiltrit lineaarse faasi-sageduse karakteristikuga (konstantse hiline misajaga) siis sobib selleks *Besseli* (e. Thomsoni) filter. Nagu ka Gaussi filter töötab Besseli filter korralikult impulssignaalidega. Kuid Besseli filtril ei ole amplituudi-sageduse karakteristikuga siirdealas sellist suure kaldenurgaga langust nagu Chebõshevi või Butterworthi filtritel. On olemas filtreid, mis lasevad läbi kõiki sagedusi, kuid muutub erinevate sageduste faas.

## 2. Sagedusfiltri tüübi väljatöötamise ja arvutamise põhimõtted

### 2.1 Erinevate filtrivariantide realisatsioon ja skeemilahenduse valik

Lähtuvalt tööülesandest ei ole meie projekteeritavale filtrile kriitiline faasi-sageduse lineaarsus, vaid pigem vajame igale filtrile siledat pääsuriba ja suhteliselt head kaldenurka. Seega võime välistada Besseli filtri. Kuna filtrite nõutav kalle on 40 dB/dec (12 dB/oktaav), siis peame kasutama vähemalt teist järku filtrit. Chebõshevi filtri amplituudi-sageduse karakteristikuga kalle on hea ja isegi ületab meie minimaalseid vajadusi, kuid selle lainjus pääsualas võib moonutada helisignaali edastamist. Lähtudes sellest oleks mõistlikum valida ühtlase pääsualaga teist järku Butterworthi tüüpi filter, mille puuduseks on ülekantava signaali teatud nõrgenemine lõikesageduse piirkonnas.

Butterworthi ja Tchebõshevi *teise järgu* madlpääs-filtrite tüüpiline ülekande funktsioon polünoomi kujul on järgmine:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{KC\omega_c^2}{s^2 + B\omega_c s + C\omega_c^2}, \quad (2.1)$$

kus  $\omega_c$  on lõikesagedus,

B ja C - normeeritud koefitsiendid, eraldi Butterworthi ja Tchebõshevi filtrite jaoks on kirjanduses tabelites.

Eelmises peatükis klassifitseeriti sagedusfiltrite tüübid põhiliselt ülekandne funktsiooni järgi. Kuid skeemitehnika seisukohalt võib sama ülekande funktsiooni realiseerida erinevaid skeemitopoloogiaid kasutades ning valides skeemi elementide vastavaid väärtusi ja parameetreid. Erinevad ülekande polünoomid sisaldavad erinevaid koefitsiente, mis on tabuleeritud. Enim levinud tagasisidega ja operatsioonvõimendiga skeemi lahendused on Sallen-Key topoloogiaga skeem, lihtpääsudega skeemid ja mitmeharulise liitvastuste topoloogiaga skeemid. Sallen-Key filter on üks lihtne variant pingega tüüritavast pingesallikast (näit. kaskaad kahest elementaarsest kõrgepääsu RC filtrist-pingejagajast, nagu joonisel 1.2, milles esimese astme R ei ole maandatud vaid ühendatud operatsioonvõimendi väljundiga. Sallen-Key filter on lihtne (vahe elemente), kuid vajab täpseid elementide väärtusi. Sellepärast paremaks valikuks oleks kasutada mitmeharulise liitvastuste topoloogiaga skeemi, inverteerisendiga operatsioonvõimendisse [2, lk.42]. Selline skeem on ka suhteliselt lihtne, kuid samaaegselt vähe tundlik elementide väärtuste suhtes. See tähendab, et kui töö käigus elementide omadused muutuvad ei mõjuta see filtri omadusi. Võttes kokku filtrite kohta kirjanduse ülevaate võime järeldada, et tööülesandele vastab teist järku Butterworthi filter, mis on realiseeritud liitvastuste skeemina (joonis 4.1).

### 2.2 Skeemi parameetrite sobitamine ja elementide väärtuste arvutamine

Konkreetsel realisatsiooni jaoks peab sobitama filtrite töö teatud parameetreid, et arvutada välja kõik skeemi elemendid. Võtame vastavad väärtused järgmiselt: signaalliallika sisetakistus 1 kOm ja elektromotoorne jõud 1V, koormustakistus 10 kOm.

Signaaliallika takistus peab olema väike, et tema mõju filtri parameetritele oleks minimaalne (vajadusel võib kasutada pingejärgurit signaaliallika ja filtri vahel). Operatsioonvõimendi toide peab peab vastama tehnilistele nõuetele ja võib olla ühepoolne või sümmeetriline kahepoolne.

Edasi kasutatakse valitud skeemi jaoks elementide väärtuste vahelisi matemaatilisi seoseid, mis on filtrite arvutuse käsiraamatus [2], et arvutada välja kõikide skeemi elementide väärtused. Reeglina osa väärtusi peab ette andma, sest arvutatavate suuruste hulk ületab matemaatiliste seoste arvu. Võib mitu korda anda ette erinevaid elementide väärtusi ja uurida kuidas see mõjutab teisi arvutatavaid suurusid. Valemite järgi arvutamiseks võib kasutada erinevaid tarkvara vahendeid, käesolevas töös kasutati programmi Matlab (MathWork Inc.), mis on väga universaalne ja laialt kasutatav signaalide töötlemisel.

### 2.3 Filtrite simulatsioon

Enne skeemide kokkupanemist on mõistlik teoreetiliselt kontrollida kuidas skeem töötab. Selleks peab olema skeemi tööd kirjeldav matemaatiline mudel. Filtri matemaatiliseks mudeliks on ülekande funktsioon, mis sisaldab kõiki skeemi elementide väärtusi.

Paljust olemasolevatest võimalustest kasutati töös Internetist kättesaadavat filtrite simulaatorit [4], milles sisaldab meie töös valitud topoloogiaga skeemi ja vastavat ülekande funktsiooni.

Asendades ülekande funktsioonis parameetrid kas meie täpselt arvutatud või nominaal väärtustega ja vastavad Butterworthi koefitsiendid on võimalik aprioorselt hinnata filtri käitumist erinevatel sagedustel.

Iga väljatöötatud filtriga

- Arvutati projekteeritud skeemidele amplituudi- ja faasi-sageduse karakteristikud ideaalsete skeemielementide korral.
- Arvutati projekteeritud skeemidele amplituudi- ja faasi-sageduse karakteristikud reaalsete (nominaalsete) skeemielementide korral.

Pikem ja põhjalikum arvutuskäik ning arvutuste tulemused on näidatud madalpääsfiltri disaini korral. Kõrgpääs ja ribafiltrite arvutused on sellele analoogsed

### 3. Eksperimentaalne osa

Seeleks, et kontrollida disainitud filtrite arvutuste õigsust, pandi kokku kõikide filtrite maketid ja viidi läbi amplituudi ja faasi mõõtmised erinevatel sisendsignaali sagedustel.

#### 3.1 Reaalse skeemi koostamine

Komponentide valik:

Pingevõimendina kasutati operatsioonvõimendit. Põhjused: stabiilne (ei ole vaja arvestada võimendi koostekomponentide stabiilsust ja koostööd), suur võimendustegur, kompleksne seade (töö eesmärk ei ole disainida võimendit), suur sisendtakistus, väike voolutarve (erinevad realisatsioonid), kõrge pingevõimendustegur (hõlpsasti muudetav), helisageduste jaoks sobiv sagedusvahemik. Kõrgsagedusfiltrite disainil võiks kasutada ka pingejärguriga skeemis kõrgsagedustransistore.

#### Kasutatavad komponendid:

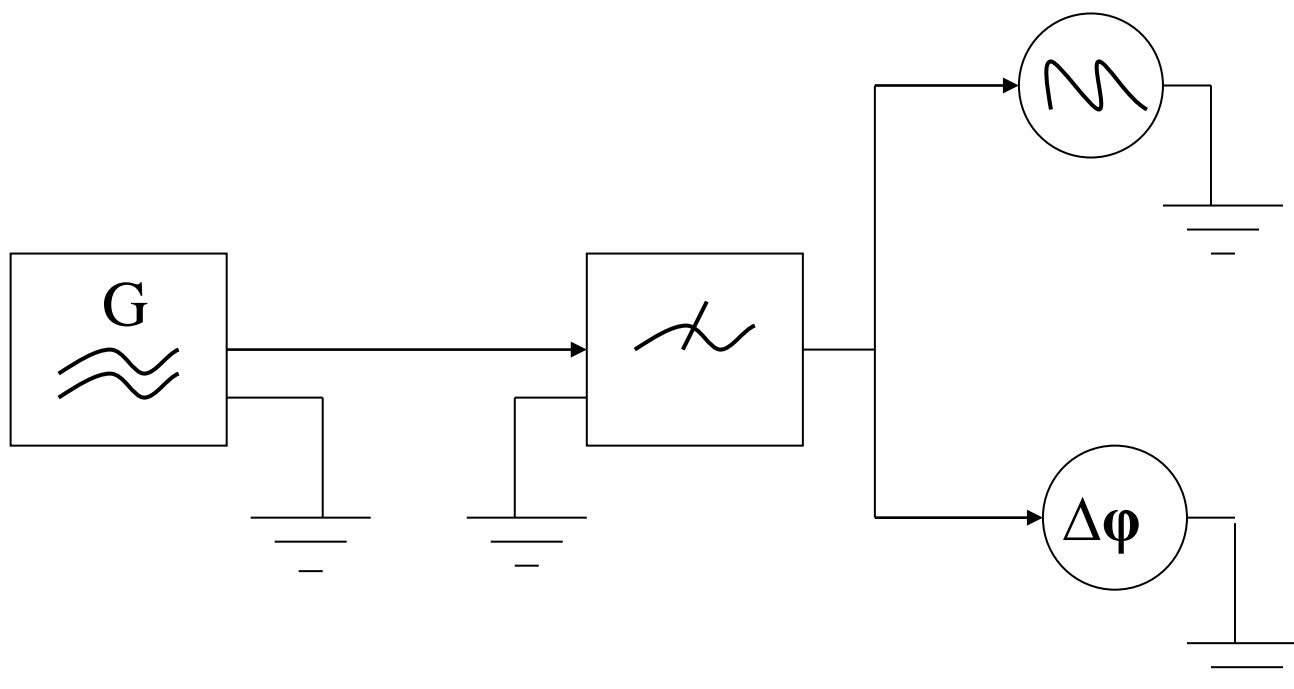
- Takistid. Väärtused vastavad nominaalreale E24 (täpsusklass 5%).
- Kondensaatorid. Väärtused vastavad nominaalreale E24 (täpsusklass 5%).
- Operatsioonvõimendi LM 324N. Enamik universaalseid operatsioonvõimendeid sobib kasutamiseks aktiivsetes helisagedusfiltrites. Parameetreid on kirjeldatud lisas LISA 1 "Operatsioonivõimendi LM 324N põhilised parameetrid".

Lõpliku montaažina on kasutatud makettplaatmontaaži. Mõõtmised on tehtud modelleerimisplaadi peal võimaldades hõlpust komponentide väärtuste täpsustamist töö käigus.



### 3.2 Filtri karakteristikute mõõtmine

Mõõtmiste skeem on esitatud alljärgneval joonisel.



Joonis 3.1 Sagedusfiltri amplituud- ja faasikarakteristikate mõõtmiste skeem

Mõõtmisteks kasutatud seadmed:

G - Signaaligeneraator Г3-123 (madalsagedusgeneraator 0 – 100 kHz)

Ostsillograaf C1-91

Fasomeeter Ф2-16

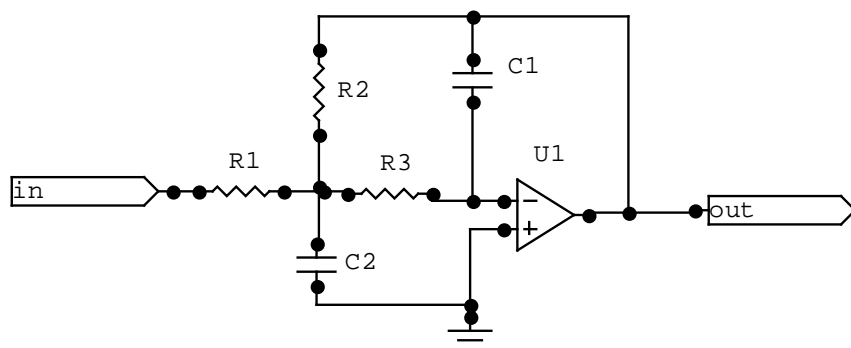
Mõõtmised on sooritatud operatsioonivõimendi toitepingel +5V. Generaatori signaal 1V. Labori temperatuur oli 25 °C.

Filtri tööpiirkonnas genereeriti erineva sagedusega signaalid (10-15 punkti) ja igal sagedusel mõõdeti väljundsignaali amplituud ja faas. Tulemused tabuleeriti ning nende järgi kasutades programmi Matlab (MathWorks Inc.) koostati eksperimentaalsed amplituudi- ja faasi- sageduse tunnusjooned.

## 4. Valitud topoloogiaga filtrite arvutamise tulemused

### 4.1. Madalpääsfiltri arvutus

Kasutame töö teises peatükis valitud liitvastusidega skeemi signaali inverteersisendiga. Filtri läbilaskeriba peab olema nullist kuni 400 Hz.



Joonis 4.1. Teist järku liitvastusidega madalpääsfiltri skeem

Selle skeemi ülekande funktsioon on järgmine [4]:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{-\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}}{s^2 + s \frac{1}{C_1} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + \frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}} \quad (4.1)$$

Valitud skeemi parameetrite vahel kehtivad järgmised seosed [2, lk.41]:

$$\begin{cases} c\omega_p^2 = 1/(R_2 R_3 C_1 C_2) \\ b\omega_p = (1/C_2)(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3) \\ K = R_2 / R_1 \end{cases}$$

$\omega_p = 2\pi f_p$  - pääsuuala piirsagedus, kuna meil on sumbuvus piirsagedusel  $1/\sqrt{2}$ , siis  $f_p = f_c$

K – filtrivõimendustegur (1..10)

b, c – konstandid tabelist 1.11 [2, lk.43]

Skeemi üheseks määratlemiseks peavad kõikide elementide ja parameetrite väärtused olema määratud. Tavaline protseduur on selline, et antakse ette K ja C-d ning

arvutatakse välja vajalikud takistite väärtused. Mahtuvuse C2 võib leida ligikaudsest seosest  $C_2=10^{-5}/f_p$  ja seejärel arvutada C1, kasutades seost [2, lk. 43]

$$C_1 \leq b^2 C_2 / [4c(K + 1)].$$

Vajadusel saab skeemis takistite väärtusi muuta seadetakistitega.

### Arvutuskäik:

Kasutades ülaltoodud valemeid leiti C1 ja C2 väärtused:

$C_1=5.50 \cdot 10^{-9}$  F,  $C_2=5.50 \cdot 10^{-8}$  F ja seejärel takistused R1, R2, R3 [2, lk. 43].

$$R_2 = \frac{2(K + 1)}{\left[ bC_2 + \sqrt{b^2 C_2^2 - 4cC_1 C_2 (K + 1)} \right] 2\pi f_p}$$

$$R_1 = R_2 / K$$

$$R_3 = 1 / (4\pi^2 f_p^2 c C_1 C_2 R_2)$$

Valemite järgi vajalike väärtuste arvutamiseks kasutati programmi Matlab (MathWorks Inc.). Tulemused esitatud tabelis 4.1.

Tabel 4.1. Madalpääsfiltri skeemi elemendid

Etteantud suurus		$f_p$ , Hz	konstsnt b	konstsnt c	K
väärtus		400	1.4142	1	1
Arvutatud suurus	C1, F	C2, F	R1, oom	R2, oom	R3, oom
Arvutatud väärtus	$2.50 \cdot 10^{-9}$	$2.50 \cdot 10^{-8}$	$3.70 \cdot 10^4$	$3.70 \cdot 10^4$	$4.13 \cdot 10^4$
Nominaalväärtus	$2.70 \cdot 10^{-9}$	$2.20 \cdot 10^{-8}$	$3.90 \cdot 10^4$	$3.90 \cdot 10^4$	$3.90 \cdot 10^4$

Kasutades elementide nominaalväärtusi ja Internetist leitud filtrite kalkulaatorit (Okawa Electronic Design) [4] leiti skeemi ülekande funktsioon normaliseeritud kujul:

Transfer Function

$$G(s) = \frac{-6358435.16367}{s^2 + 3496.5034965s + 6358435.16367}$$

ja filtri lõikesagedus 401.3 Hz (hüvetegur  $Q=0.721$ ).

Operatsioonvõimendi sisendtakistus [2, lk.44]:

Peab olema vähemalt 10x suurem kui lülituse ekvivalentne takistus. Sisendtakistus avaldub:

$$R_{eq} = R_3 + R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 60 \text{ k}\Omega. \text{ Seega OV sisendtakistus peab olema}$$

vähemalt  $R_{sis} \geq 0,6 \text{ M}\Omega$

Kui OV sisendastmes on väljatransistorid, on sisendtakistus suurem.

Võimendustegur [2, lk.44]:

Tagasisidestamata OV võimendustegur  $K_f$  sagedusel  $f = f_l$  peab olema vähemalt 50x suurem võimendustegurist  $K$  [1, lk.7].  $K_f \geq 50K$ . Veidi saab löikesagedust suurendada  $K$  vähendamisega. Seega OV võimendustegur peab olema vähemalt  $K_f \geq 50$ .

Lülituskiirus (toimekiirus), näitab kui kiiresti väljundsignaal kasvab [2, lk.44]

$v_u [V / \mu s]$  peab olema vähemalt  $10^{-6} \pi f_l$  korda suurem väljundpinge amplituudist.

$U_v = v_u / (10^{-6} \pi f_l)$  - suurima lubatava väljundpinge amplituudväärtus. Meil  $U_v$  on piiratud toitepingega, st ei tohi sellest suuremaks minna. OV LM 324 lülituskiirus (toitepingel 5V):  $v_u = 1 V / \mu s$ .

### Madalpääsfiltri simuleerimine

Kasutades filtri kalkulaatorit või muid analoogilisi tarkvaravahendeid saab arvutada välja filtri väljundsignaali amplituudi ja väljundsignaali faasi nihet erinevatel sagedustel ning koostada nn Bode diagramm.

Läbiviidud simuleerimise tulemused on esitatud joonistel 4.2 ja 4.3:

1. Madalpääsfiltri simulatsiooni amplituud-sagedus karakteristik
2. Madalpääsfiltri simulatsiooni faasi-sagedus karakteristik

Simulatsioonis kasutati skeemi elementide nominaalväärtusi.

### Mõõtmine

Töös koostati madalpääs-filtri skeem ja viidi läbi amplituudi ja faasi mõõtmised (nagu kirjeldatud peatükis 3) erinevatel sisendsignaali sagedustel diapsoonis 0 (alalispinge) -2500 Hz.

Mõõtetulemused on esitatud järgmise tabelina:

Tabel 4.2. Madalpääsfiltri skeemi mõõtetulemused

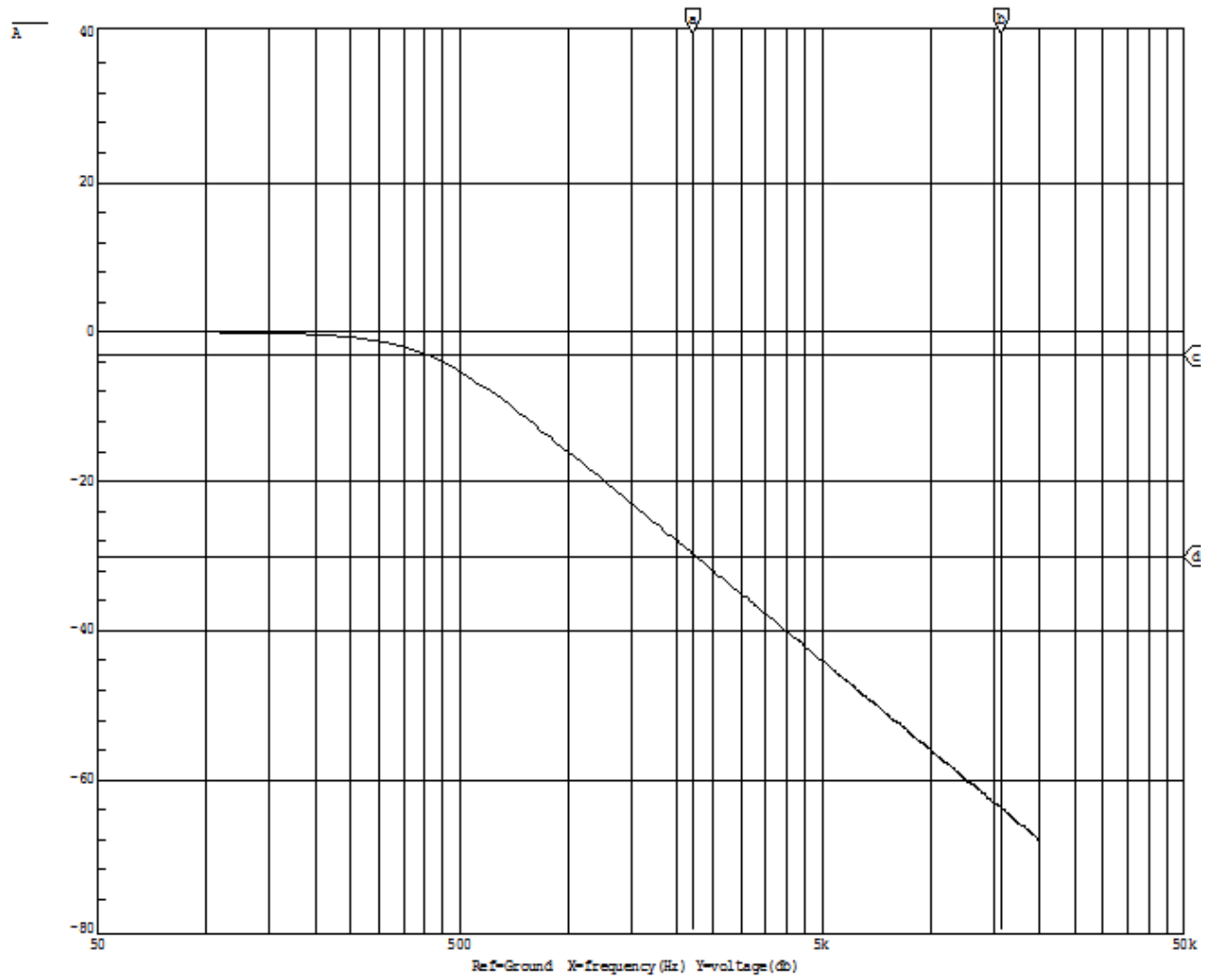
<b>Sagedus [log]</b>	1.70	2.00	2.1	2.30	2.40	2.47	2.54	2.60	2.65	2.70	3.00	3.17	3.30	3.40
<b>Sagedus [Hz]</b>	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	1000	1500	2000	2500
<b>Amplituud [V]*10</b>	9.5	9.5	9.5	10	10	9.5	9.0	8.0	7.0	5.8	1.5	0.64	0.35	0.22
<b>Amplituud [dB]</b>	-0.44	-0.44	-0.4	0	0	-0.4	-0.9	-1.9	-3.1	-4.7	-16	-23	-29	-33
<b>Faas [deg]</b>	170	160	150	140	125	111	99	87	75	66	28	19	17	15

Reaalselt mõõdetud amplituud- ja faasikarakteristikud on toodud joonistel 4.4 ja 4.5.

**Tabel 4.3. Butterworthi polünoomide kordajad**

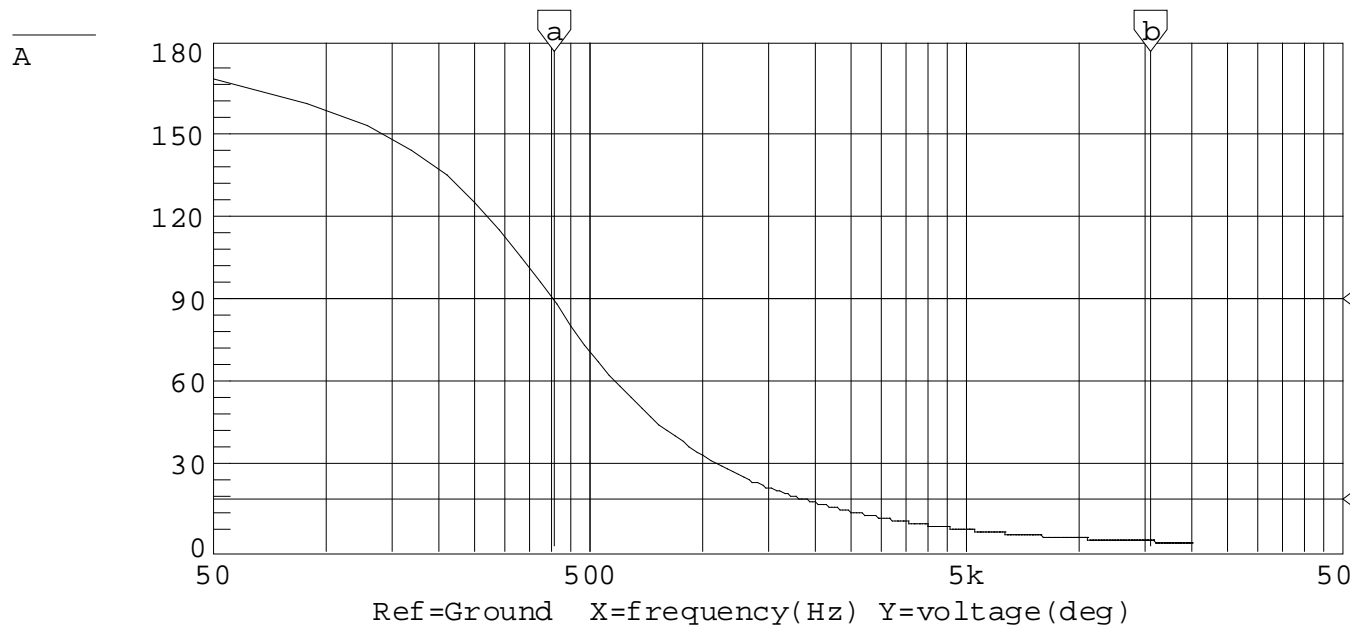
<b>n</b>	<b><math>a_1</math></b>	<b><math>a_2</math></b>	<b><math>a_3</math></b>	<b><math>a_4</math></b>	<b><math>a_5</math></b>	<b><math>a_6</math></b>	<b><math>a_7</math></b>	<b><math>a_8</math></b>
2	1.414214							
3	2.000000	2.000000						
4	2.613126	3.414214	2.613126					
5	3.236068	5.236068	5.236068	3.236068				
6	3.863703	7.464102	9.141620	7.464102	3.863703			
7	4.493959	10.097835	14.591794	14.591794	10.097835	4.493959		
8	5.125831	13.137071	21.846151	25.688356	21.846151	13.137071	5.125831	
9	5.758770	16.581719	31.163437	41.986386	41.986386	31.163437	16.581719	5.758770
10	6.392453	20.431729	42.802061	64.882396	74.233429	64.882396	42.802061	20.431729

Xa: 2.197k Xb: 15.58k a-b:-13.38k  
Yc:-3.111 Yd:-30.00 c-d: 26.89

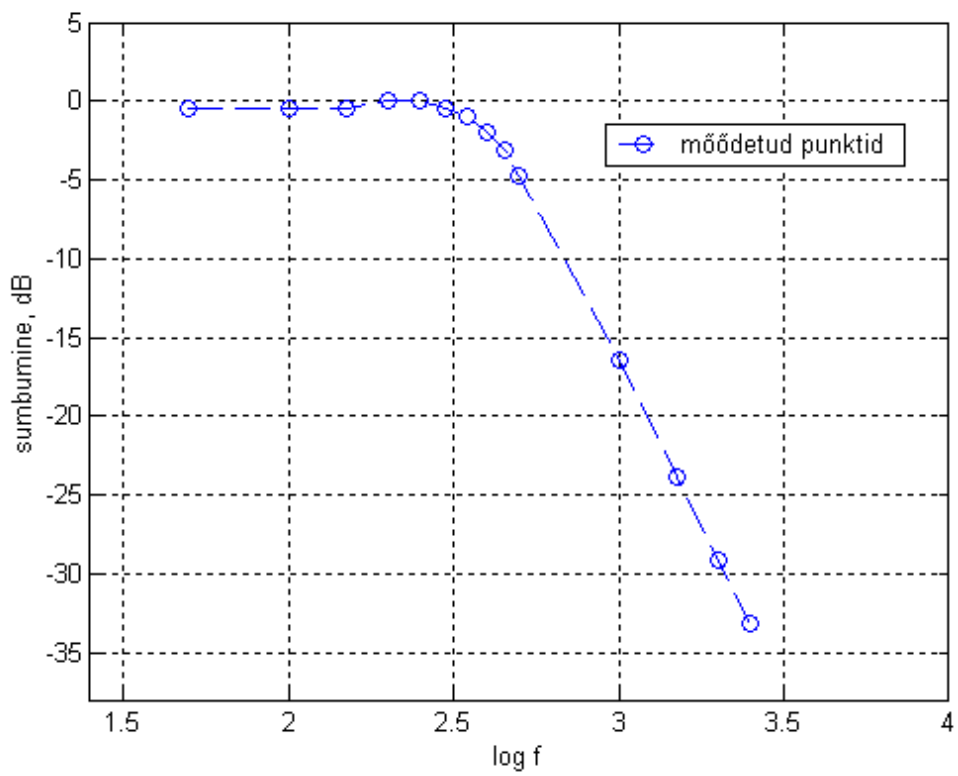


**Joonis 4.2 Madalpääsfiltri simulatsiooni amplituud-sagedus karakteristik**

Xa: 401.9      Xb: 15.42k      a-b:-15.02k  
Yc: 17.00      Yd: 90.00      c-d:-73.00

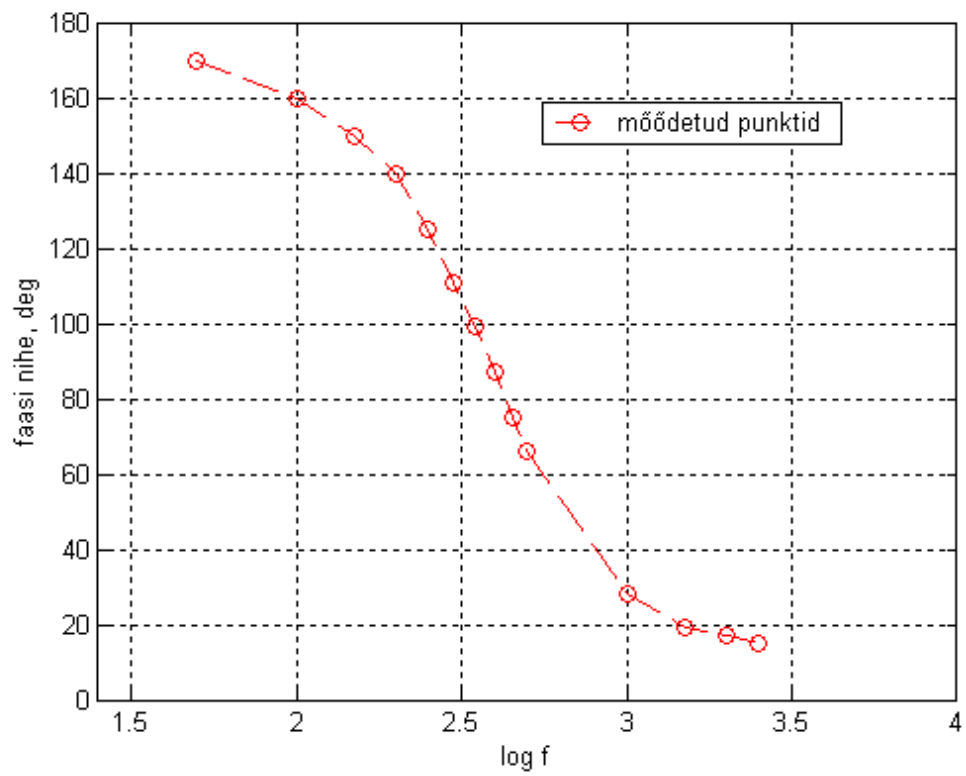


**Joonis 4.3. Madalpääsfiltri simulatsiooni faasi-sageduse karakteristik**



**Joonis 4.4. Madalpääsufiltri mõõdetud amplituudi-sagedus karakteristik**

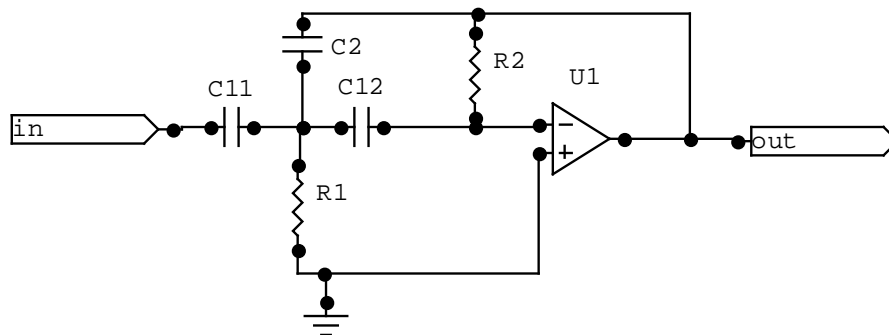




**Joonis 4.5. Madalpääsfiltri mõõdetud faasi-sageduse karakteristik**

## 4.2 Kõrgpääsfiltri arvutus

Kasutatud on liitvastusidega teist järku sagedusfiltri skeemi. Läbilaskeriba 4 kHz kuni 30 kHz ja pääsuala piirsageduseks on lõikesagedus sumbumusega -3dB.



Joonis 4.6. Teist järku liitvastusidega kõrgpääsfiltri skeem

Selle skeemi ülekande funktsioon on jägmine:

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{-s^2 \frac{C_1}{C_3}}{s^2 + s \frac{C_1 + C_2 + C_3}{R_2 C_2 C_3} + \frac{1}{R_1 R_2 C_2 C_3}},$$

ja lõikesagedus

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2 C_2 C_3}}.$$

Skeemi elementide parameetrite vahel kehtivad järgmised seosed [2, lk.48]:

$$\begin{cases} f_p^2 / c = 1 / (R_1 R_2 C_1 C_2) \\ b f_p / c = (2C_1 + C_2) / (R_2 C_1 C_2) \\ K = C_1 / C_2 \end{cases}$$

Ette antakse võimendustegur  $0 < K \leq 10$ , pääsuala piirsagedus  $f_p$  (tavaliselt võrdne lõikesageduse) ja valitakse  $C_1 = C_{11} = C_{12}$ . Harilikult  $C_1 \approx 10^{-5} / f_p$

### Arvutuskäik:

$$C_2 = C_1 / K$$

$$R_1 = b / [2\pi f_p (2C_1 + C_2)]$$

$$R_2 = c(2C_1 + C_2) / (2\pi f_p b C_1 C_2)$$

Valemite järgi vajalike väärtuste arvutamiseks kasutati programmi Matlab (MathWorks Inc.). Tulemused esitatud tabelis 4.4

Tabel 4.4 Kõrgpääsfiltri skeemi elemendid

Etteantud suurus		$f_p$ , Hz	konstant <b>b</b>	konstant <b>c</b>	K
väärtus		4000	1.4142	1	1
Arvutatud suurus	C1, F	C2, F	C3, nF	R2, oom	R1, oom
Arvutatud väärtus	$2.50 \cdot 10^{-9}$	$2.50 \cdot 10^{-9}$	2.50	$3.84 \cdot 10^4$	$8.53 \cdot 10^3$
Nominaalväärtus	$2.20 \cdot 10^{-9}$	$2.20 \cdot 10^{-9}$	2.20	$3.90 \cdot 10^4$	$7.50 \cdot 10^3$

Kasutades elementide nominaalväärtusi ja Internetist leitud filtrite kalkulaatorit (Okawa Electronic Design) [4], leiti skeemi ülekande funktsioon normaliseeritud kujul:

$$G(s) = \frac{-1s^2}{s^2 + 34965.034965s + 706364342.728}$$

### Lõikesagedus 4229 Hz ja hüvetegur $Q=0.760$

#### Kõrgpääsfiltri simuleerimine

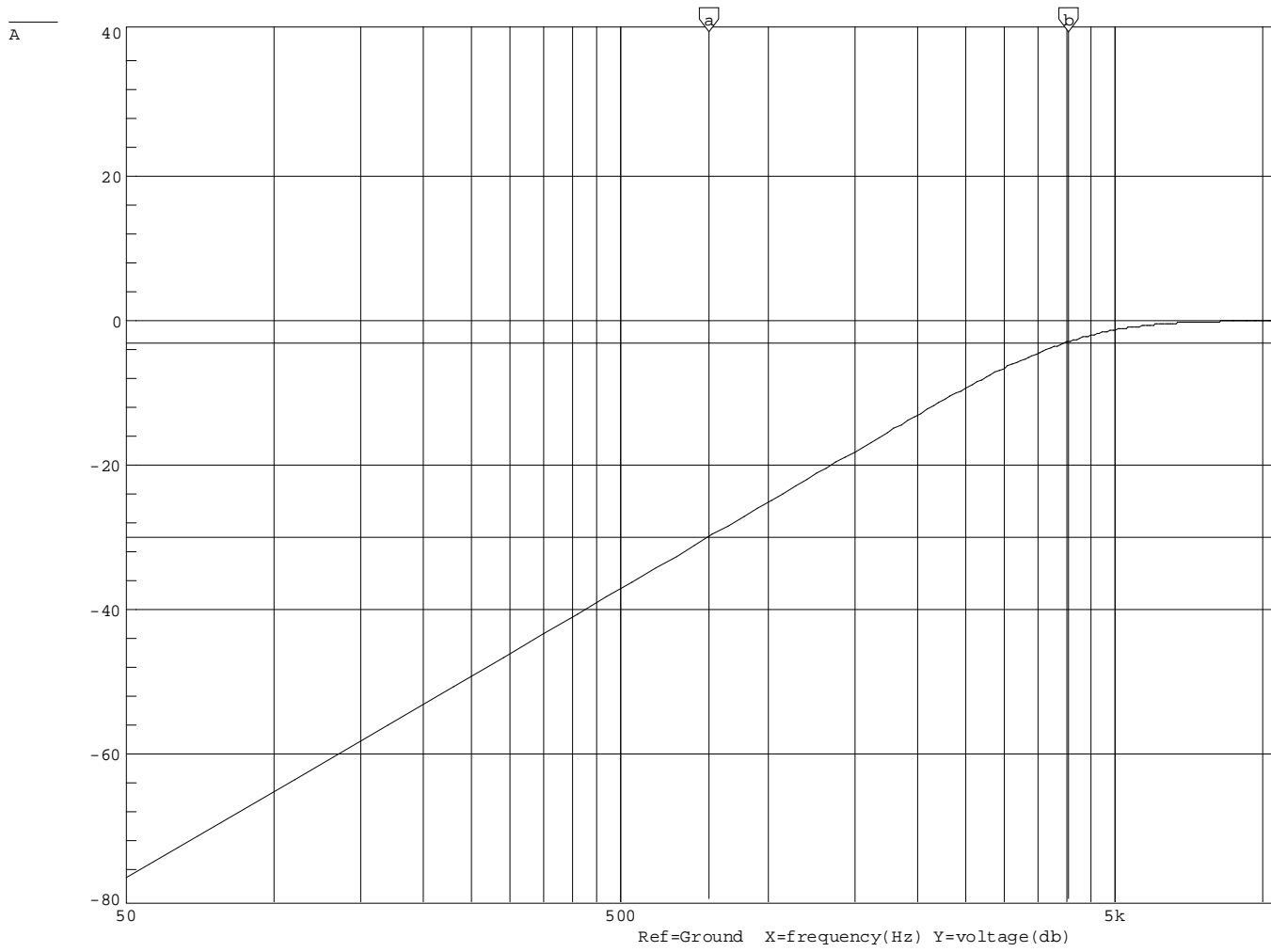
Kasutades sama filtrikalkulaatorit saab arvutada välja filtri väljundsignaali sumbumust ja faasi nihet erinevatel sagedustel ning koostada nn Bode diagramm. Läbiviidud simuleerimise tulemused on esitatud joonistel 4.6 ja 4.7:

1. Kõrgpääsfiltri simulatsiooni amplituud-sagedus karakteristik
2. Kõrgpääsfiltri simulatsiooni faasi-sagedus karakteristik

#### Mõõtmine

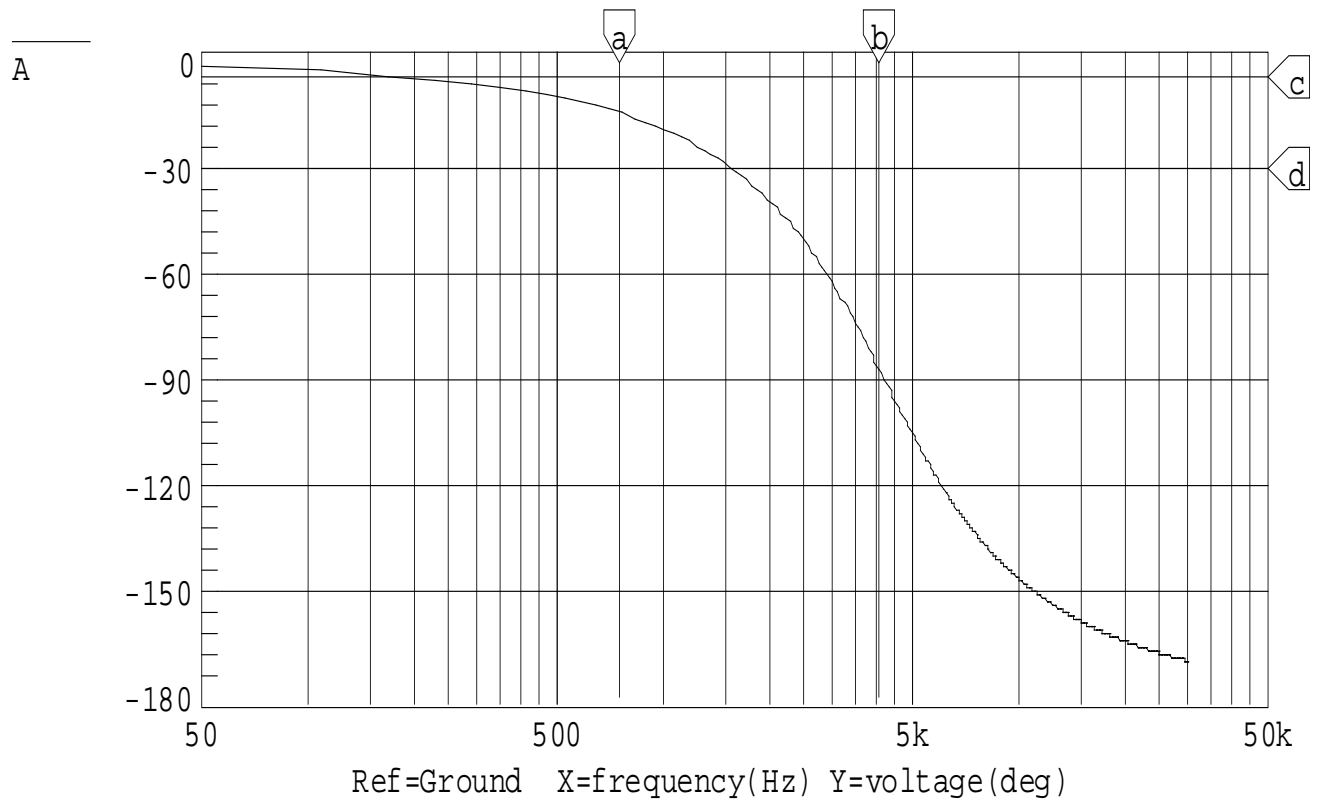
Töös koostati kõrgpääsfiltri skeem ja viidi läbi amplituudi ja faasi mõõtmised erinevatel sisendsignaali generaatori sagedustel diapsoonis 500-25000 Hz. Mõõtetulemused on esitatud järgmises tabelis 4.5:

Xa: 754.3    Xb: 4.025k    a-b: -3.271k  
Yc: -3.111    Yd: -30.00    c-d: 26.89



**Joonis 4.6. Kõrgpääsfiltri simulatsiooni amplituudi-sageduse karakteristik**

Xa: 754.3    Xb: 4.025k    a-b:-3.271k  
Yc:-3.111    Yd:-30.00    c-d: 26.89



**Joonis 4.7. Kõrgpääsfiltri simulatsiooni faasi-sageduse karakteristik**

Tabel 4.5. Kõrgpääsfiltri mõõtmiste tulemused

<b>Sagedus [log]</b>	2.70	3.00	3.17	3.30	3.40	3.47	3.54	3.60	3.65	3.70	4.00	4.17	4.30	4.40
<b>Sagedus [Hz]</b>	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	10000	15000	20000	25000
<b>Amplituud [V]*10</b>	0.12	0.50	1.1	2.0	3.0	4.5	5.6	6.5	8.0	8.5	9.0	8.0	7.0	6.0
<b>Amplituud [dB]</b>	-38	-26	-19	-14	-10	-6.9	-5.0	-3.7	-1.9	-1.4	-0.9	-1.9	-3.1	-4.4
<b>Faas [deg]</b>	-14	-22	-31	-41	-51	-64	-75	-86	-97	-106	-166	-211	-242	-260

Eksperimentaalselt mõõdetud amplituud- ja faasikarakteristikud on esitatud joonistel 4.8 ja 4.9.

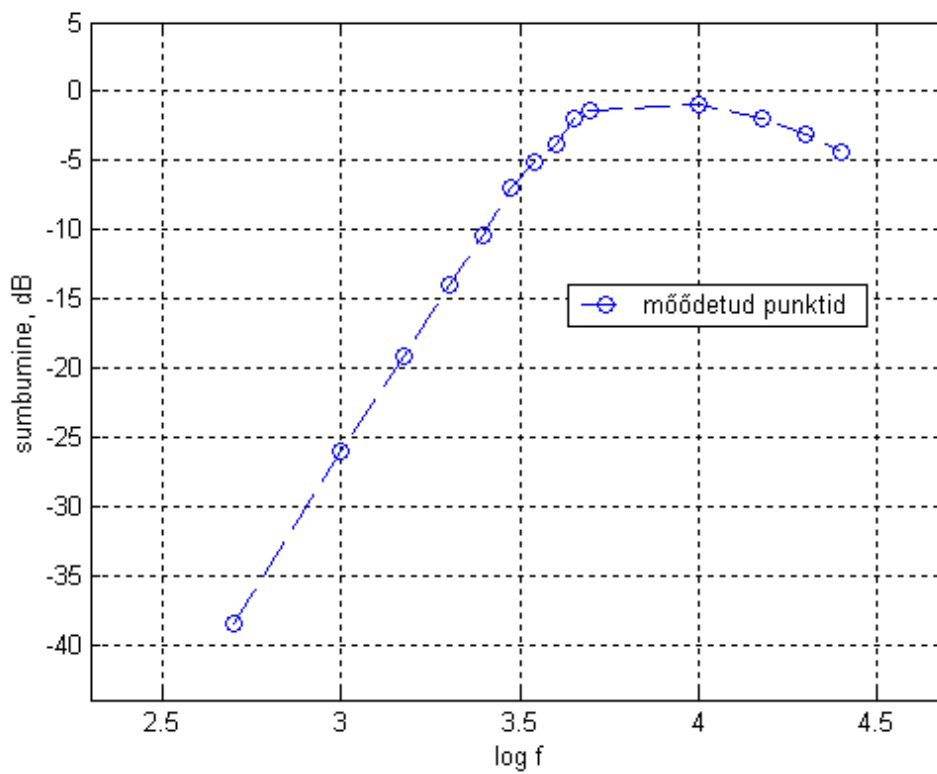
1. Kõrgpääsfiltri mõõdetud amplituud-sagedus karakteristik
2. Kõrgpääsfiltri mõõdetud faasi-sagedus karakteristik

### Operatsioonvõimendi vajalik sisendtakistus

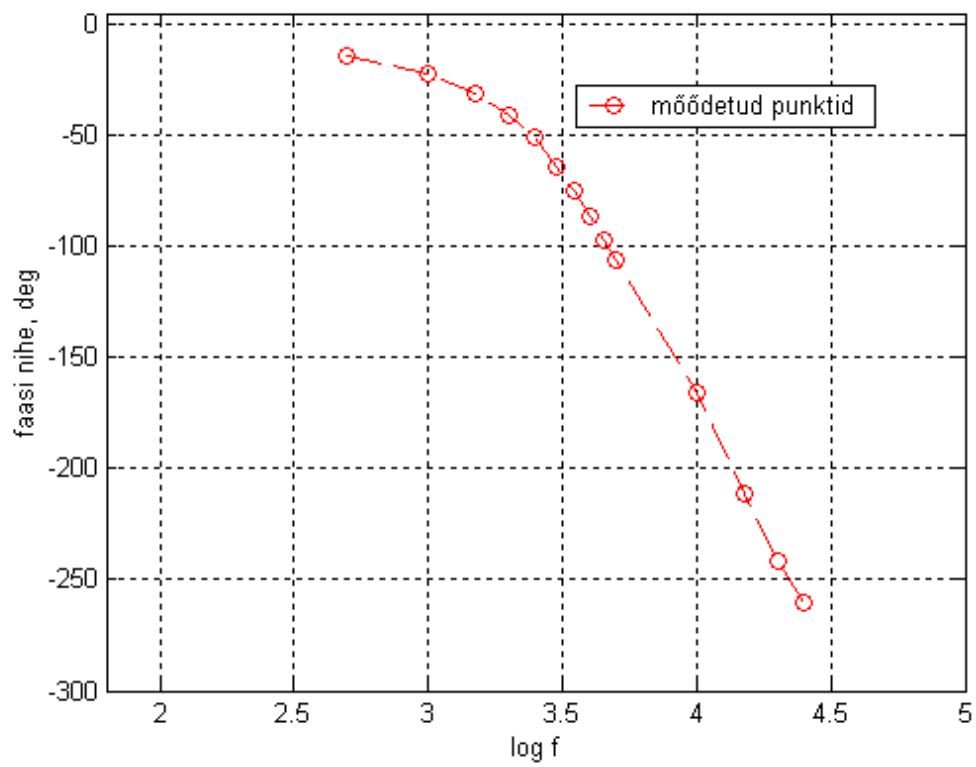
$$R_1 \geq 10R_2 \text{ Meil } R_{sis} \geq 0,38 M\Omega$$

Vastusidestamata OV võimendustegur  $K_f$  peab olema kõrgeimal filtrit läbival siinussagedusel vähemalt 50 korda suurem kui filtri võimendustegur  $K$ .

Kõrgematel sagedustel (OV LM 324 puhul >1 MHz) hakkab amplituud-sagedus karakteristik jälle langema. See on tingitud operatsioonivõimendi enda töösageduse ülemisest piirist.



**Joonis 4.8. Kõrgpääsufiltri mõõdetud amplituudi-sagedus karakteristik**



**Joonis 4.9. Kõrgpääsufiltri mõõdetud faasi-sagedus karakteristik**



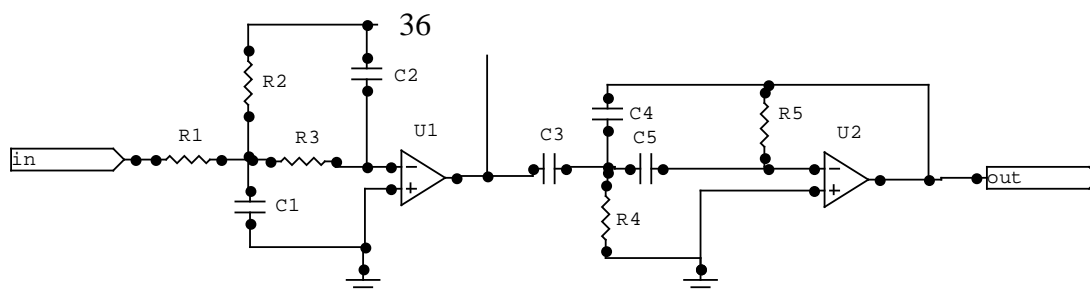
### 4.3. Ribapääsfiltri arvutus

Esialgu katsetati üheastmelist ribapääsfiltrit, kuid selle simulatsiooni näitas, amplituudi-sageduse karakteristik on ebarahuldav ja sellest loobuti ning kasutati kahte teist järku ribafiltrit järjestikku üksteise suhtes nihutatud kesksagedustega.

#### 4.3.1 Kahe astmega ribapääsfiltri arvutus

Disainime teist järku kõrgpääsfiltri ja teist järku madalpääsfiltri ja paneme järjestikku.

Skeemiks on joonistel 4.1 ja 4.6 kujutatud skeemide kombinatsioon (joonis 4.10). Lõikesagedused (tasemel  $-3\text{dB}$ ) on  $400\text{ Hz}$  ja  $4000\text{ Hz}$ .



Joonis 4.10. Kahe astmega ribapääsfiltri skeem

Arvutusprotseduur on sama nagu madalpääs- ja kõrgpääsfiltrite käsitlemisel. Madalpääsfiltri elementide väärtused arvutatud valemite järgi [2, lk.41-44] ja kõrgpääsfiltri elemendid valemite järgi [2, 48-49] ning arvutuste tulemused esitatud tabelites 4.6 ja 4.7.

Tabel 4.6. Madalpääsfiltriosa elementide arvutuse tulemused

Etteantud suurus		$f_p$ , Hz	konstant <b>b</b>	konstant <b>c</b>	<b>K</b>
väärtus		400	1.4142	1	1
Arvutatud suurus	C1, F	C2, F	R1, oom	R2, oom	R3, oom
Arvutatud väärtus	$8.25 \cdot 10^{-10}$	$2.50 \cdot 10^{-9}$	$3.16 \cdot 10^4$	$3.16 \cdot 10^4$	$1.85 \cdot 10^4$
Nominaalväärtus	$8.20 \cdot 10^{-10}$	$3.30 \cdot 10^{-9}$	$3.30 \cdot 10^4$	$3.30 \cdot 10^4$	$2.20 \cdot 10^4$

Tabel 4.7. Kõrgpääsfiltriosa elementide arvutuse tulemused

Etteantud suurus		fp, Hz	konstant <b>b</b>	konstant <b>c</b>	K
väärtus		4000	1.4142	1	1
Arvutatud suurus	C3, F	C4, F	C5, F	R2, oom	R1, oom
Arvutatud väärtus	$2.50 \cdot 10^{-8}$	$2.50 \cdot 10^{-8}$	$2.50 \cdot 10^{-8}$	$3.84 \cdot 10^4$	$8.53 \cdot 10^3$
Nominaalväärtus	$2.20 \cdot 10^{-8}$	$2.20 \cdot 10^{-8}$	$2.20 \cdot 10^{-8}$	$3.90 \cdot 10^4$	$8.20 \cdot 10^3$

Kombineeritud filtri skeemi töö simuleerimine toimus samamoodi nagu osades 4.1 ja 4.2. Ribafiltri simuleerimise tulemused:

1. Kaheastmelise ribafiltri simulatsiooni amplituud-sagedus karakteristik
2. Kaheastmelise ribafiltri simulatsiooni faasi-sagedus karakteristik

on esitatud joonistel 4.11 ja 4.12:

Eksperimentaalne filtri karakteristikute mõõtmine toimus nagu kirjeldatud punktis 3.2 ning mõõtetulemused on esitatud järgmise tabelina:

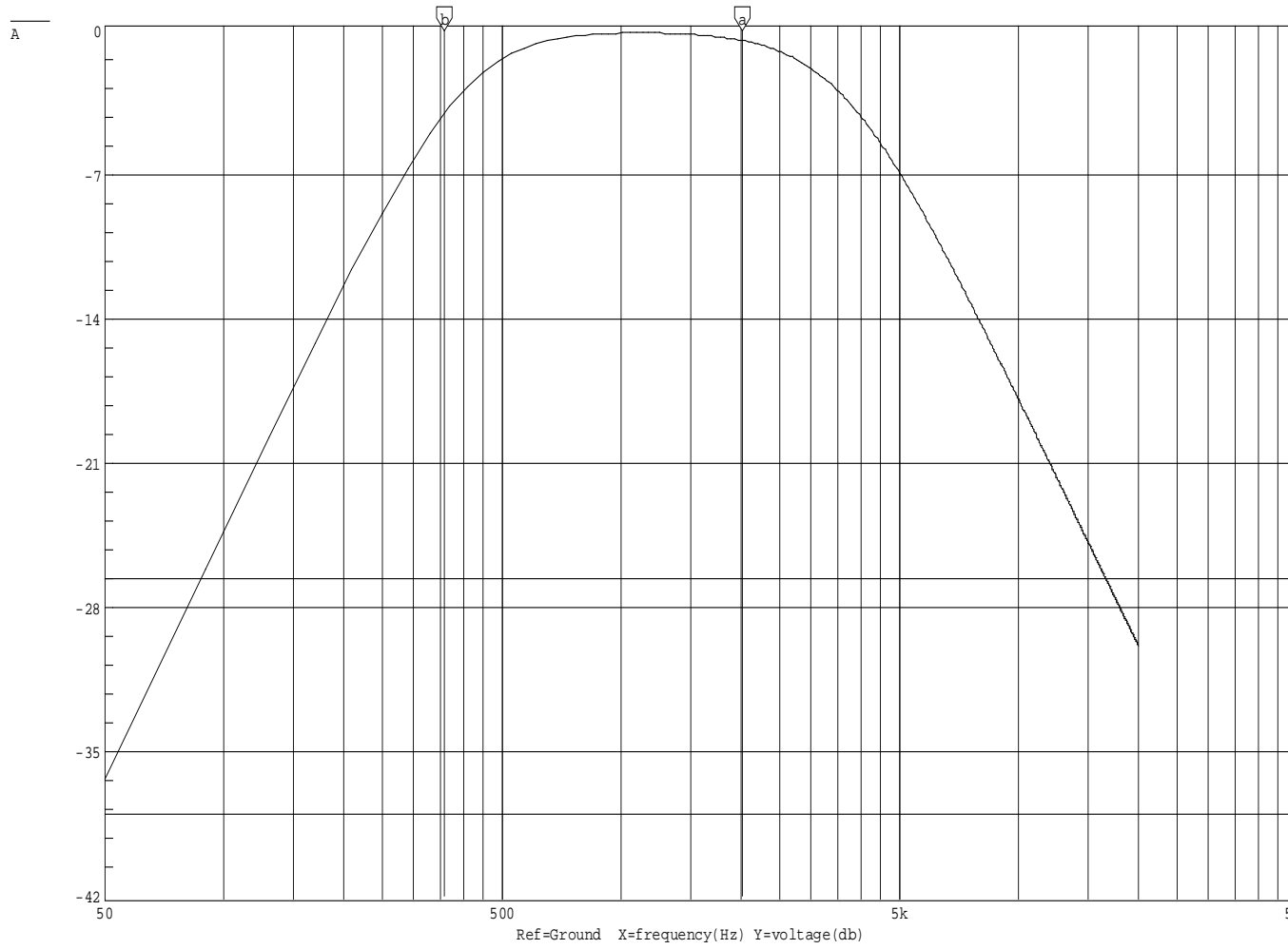
Tabel 4.8. Kaheastmelise ribafiltri mõõtmiste tulemused

<b>Sagedus [log]</b>	1.70	2.00	2.17	2.30	37	2.47	1.70	2.00	2.17	2.30	2.40	2.47	3.30
<b>Sagedus [Hz]</b>	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	1000	1500	2000
<b>Amplituud [dB]</b>	-32	-21	-13	-9.1	-6.0	-3.7	-1.9	-0.9	-	0.82	1.21	1.21	0.82
<b>Faas [deg]</b>	327	244	155	124	112	95	82	71	61	52	6.0	337	319
<b>Sagedus [log]</b>	2.60	2.65	2.70	3.00	3.17	3.30	3.40	4.17					
<b>Sagedus [Hz]</b>	2500	3000	3500	4000	4500	5000	10000	15000					
<b>Amplituud [dB]</b>	0.50	-0.9	-1.9	-3.0	-4.4	-6.0	-22	-40					
<b>Faas [deg]</b>	303	288	276	265	255	247	210	202					

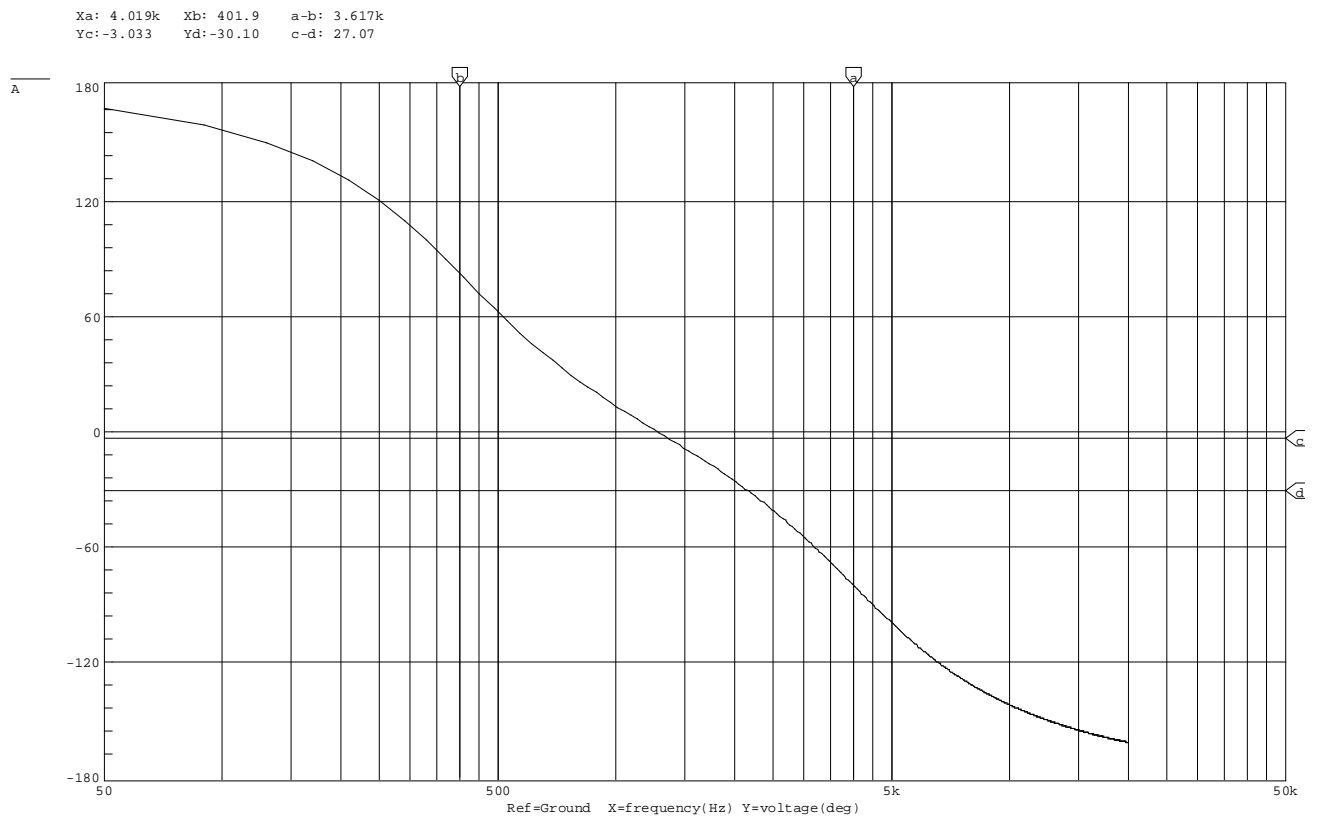
Ribapääsfiltri realselt mõõdetud amplituudi- ja faasi-karakteristikud on toodud joonistel 4.13 ja 4.14. On ilmselt näha, on võrreldes üheastmelise filtriga tulemused oluliselt paranesid: amplituudi-sageduse tunnusjoonal on "plato" ja faasi-sageduse tunnusjoon on suhteliselt lineaarne.

Seega vastab arvutatud kaheastmelise ribapääsfiltri skeem tööülesandes esitatud tingimustele ning võime järeldata et ülesanne on täidetud.

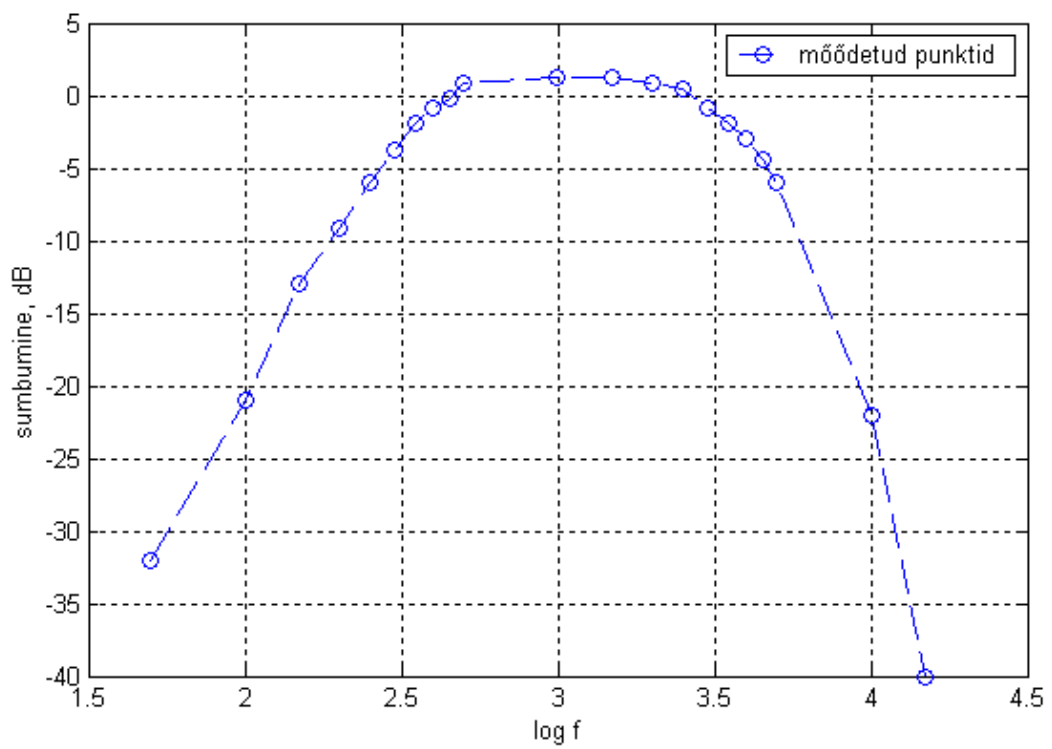
Xa: 2.017k Xb: 357.3 a-b: 1.660k  
Yc: -38.00 Yd: -26.60 c-d: -11.40



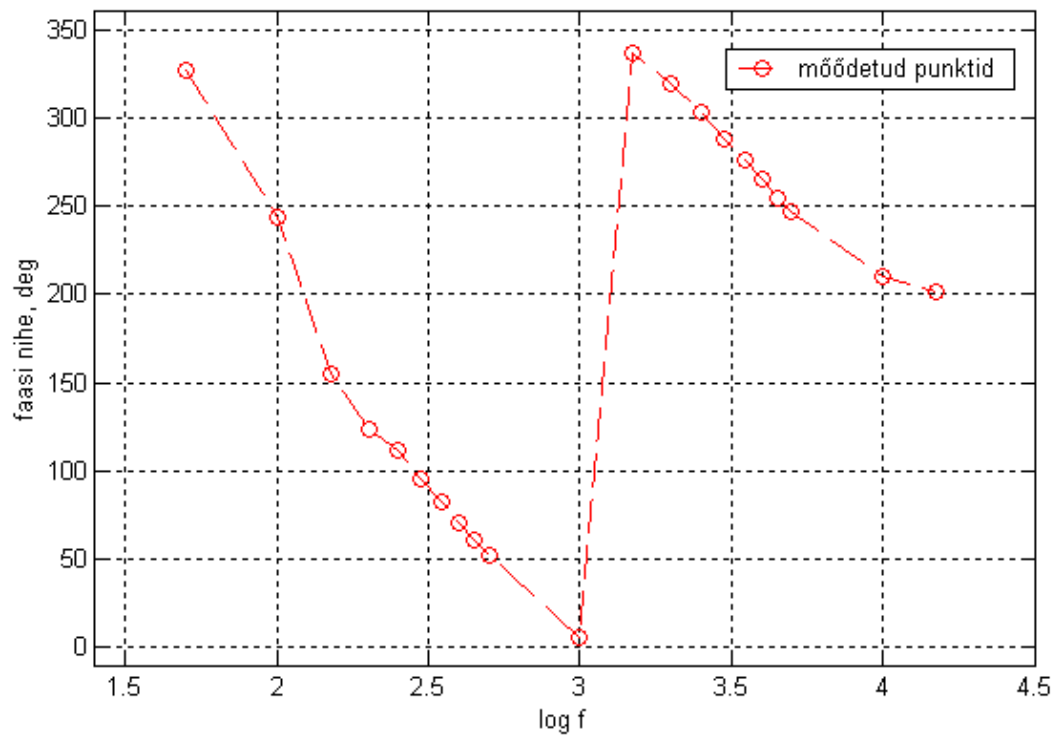
**Joonis 4.11. Kaheastmelise ribafiltri simulatsiooni amplituudisageduse karakteristik**



**Joonis 4.12. Kaheastmelise ribafiltri simulatsiooni faasi-sageduse karakteristik**



**Joonis 4.13. Kaheastmelise ribafiltri mõõdetud amplituudi-sagedus karakteristik**



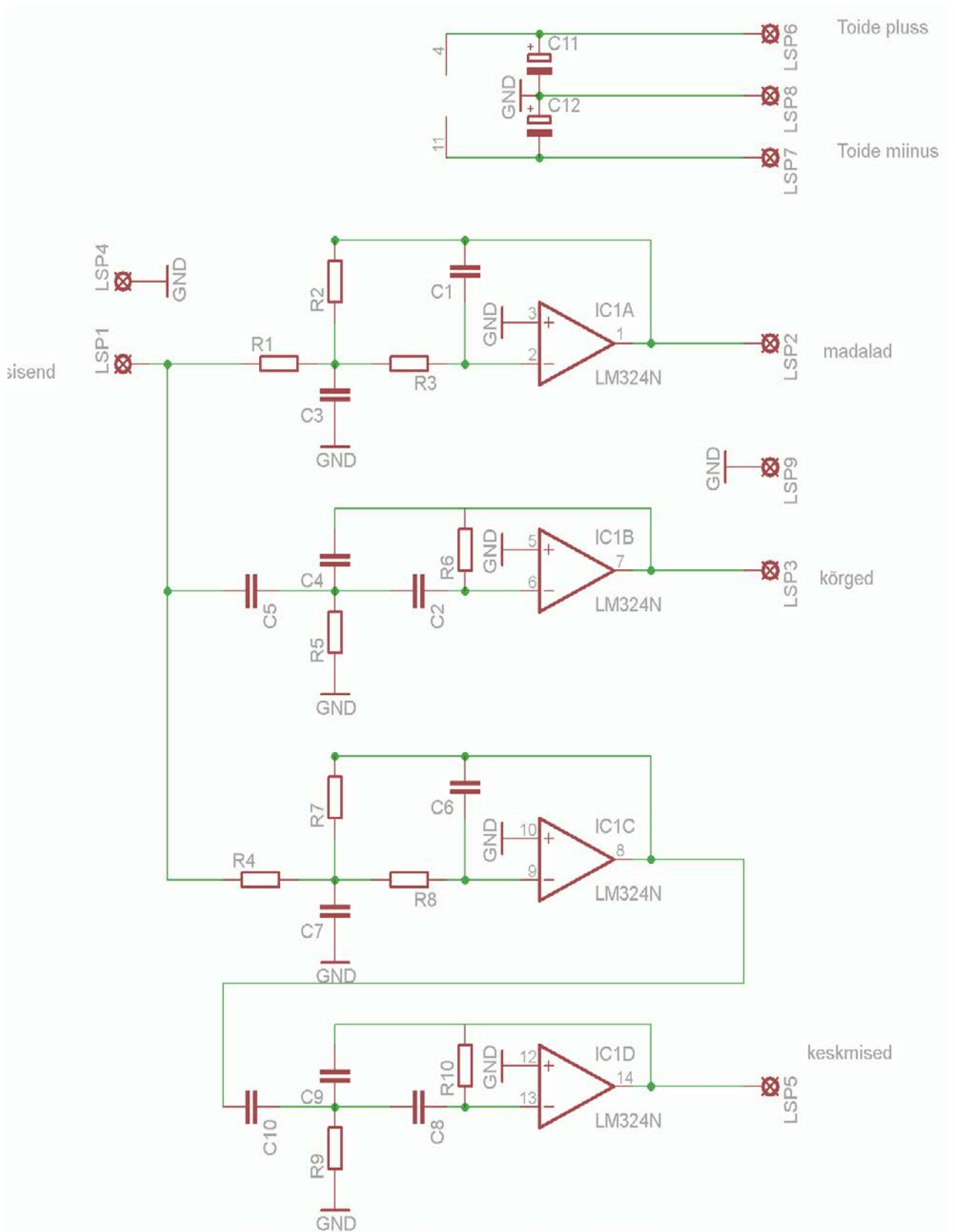
**Joonis 4.14. Kaheastmelise ribafiltri mõõdetud faasi-sageduse karakteristik**

## 5.1 Trükiplaadi väljatöötamine

Esiialgu koostati üldine skeem, kus kõik kolm eraldi väljaarvutatud sagedusfiltrit asuvad ühel plaadil (joonis 5.1). On toodud eraldi välja ka pingeallika sisend operatsioonvõimendite toiteks. Meil on ühepoolne toide +5 V.

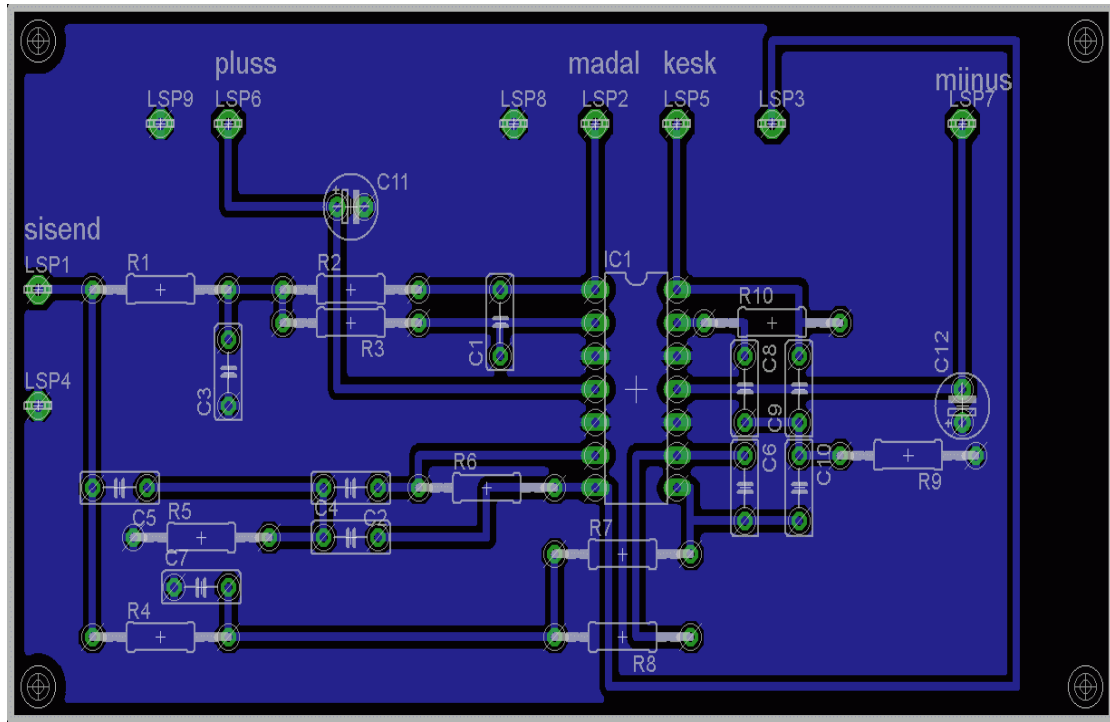
Trükiplaat on ühepoolne, kõik elemendid paiknevad ühel pool plaati, ühendusrajad teisel pool. Kasutatakse tavalisi läbiviikaukudega komponente. Kuna tegemist on väikse hajumisvõimsusega (väiksed voolud, madalad pinged), siis vooluradade laius ja paksus ei ole kriitiline: vooluradade laiuseks on võetud 0.6 mm.

Trükiplaadi projekteerimiseks kasutati Internetist allalaaditud disainimise tarkvara EAGLE 5.11.0. Tulemusena on plaat mõõtudega 50mm x 60 mm, paksusega 2 mm ja valmistatud klaastekstoliidist (epoksiidvaik + klaasriie). Väljatöötatud trükiplaat on esitatud joonisel 5.2.



Joonis 5.1. Kolmeribalise helisagedusfiltri skeem





**Joonis 5.2. Väljatöötatud kolmeribalise helisagedusfiltri trükiplaat**

## 6. Majanduslik osa

Kuna töös disainitud filter ei ole mõeldud seeriatootmiseks, arvutatakse üldülevaate saamiseks ainult trükiplaadil paiknevate komponentide maksumus. Järgnevalt on toodud tabelis 6.1 trükiplaadil paiknevate komponentide hinnad ja maksumus, lähtudes ELFA kataloogiandmetest.

Tähis skeemil	Tüüp	Täiendav info	Kogus tk.	Maksumus, EUR
R1,R2,R3,R6,R10	Takisti	39 k $\Omega$ $\pm$ 5%	5	0.12
R4,R7	Takisti	33 k $\Omega$ $\pm$ 5%	2	0.12
R5	Takisti	7.5 k $\Omega$ $\pm$ 5%	1	0.12
R8	Takisti	22 k $\Omega$ $\pm$ 5%	1	0.12
R9	Takisti	8.2 k $\Omega$ $\pm$ 5%	1	0.12
C3,C8,C9,C10	Kondensaator	22nF	4	0.10
C1	Kondensaator	2.7 nF	1	0.08
C2,C4,C5	Kondensaator	2.2 nF	3	0.11
C6	Kondensaator	3.3 nF	1	0.10
C7	Kondensaator	820 pF	1	0.10
LM324N	OV	Quad	1	1.80
C11,C12	Kondensaator	470 $\mu$ F	2	0.58
Kokku			23	5.98 EUR

Trükiplaadi valmistamine maksab ligikaudu 20 EUR, seega kui arvestada veel mõned kõrvalkulud, saab sellise sagedusfilteri valmistada 30 EUR eest.

## Kokkuvõte

Käesolevas töös disainiti ja arvutati välja kolm sagedusfiltrit, mis võimaldavad separeerida helisagedussignaali piirkonnast madala (0-400 Hz), keskmise (400-4000 Hz) ja kõrgsagedusega (4 – 30 kHz) signaali diapasoone. Kasutati OV-ga aktiivfiltri skeeme, milles on liitvastuside ahel ja mis töötavad teise järgu Butterworthi filtrina. Iga sageduse-riba filtrile on arvutatud skeem, esitatud ülekande funktsioon ning simuleeritud amplituudi-sageduse ja faasi-sageduse karakteristikad. Seejärel on eksperimentaalselt koostatud kõige kolme filtri skeemid ja mõõdetud amplituudi ja faasi tunnusjooned.

Mõõtmise tulemused näitasid, et filtrite läbilaske ja tõkestamise omadused vastavad tööülesandes esitatud tingimustele ning seega on töö teostatud. On koostatud üldine skeem kus kõik filtrid on koos ja väljatöötatud trükiplaat. Selliseid filtreid võib kasutada helireprodutseerimise süsteemides (kõrgsageduse või madalsageduse valjuhääldid, võimendid) või värvimuusika seadmetes.

## Kasutatud kirjandus

1. Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур, СПРАВОЧНИК по активным фильтрам, Энергоатомиздат, Москва, 1983.
2. L. Abo, Raadiolülitused, Valgus, Tallinn, 1990.
3. П. Хоровиц, У. Хилл, Искусство схемотехники т.1, Мир, Москва, 1993.
4. [www.sim.okawa-denshi.jp/en/OPseikiLowkeisan.htm](http://www.sim.okawa-denshi.jp/en/OPseikiLowkeisan.htm) (29.11.2013)

## Operatsioonivõimendi LM 324N põhilised parameetrid

### Features

(For  $V_+ = 5V$  and  $V_- = 0V$ , Typical Unless Otherwise Noted)

- n Guaranteed 2.7V and 5V Performance
- n No Crossover Distortion
- n Space Saving Package SC70-5 2.0x2.1x1.0mm
- n Industrial Temp. Range  $-40^{\circ}C$  to  $+85^{\circ}C$
- n Gain-Bandwidth Product 1MHz
- n Low Supply Current
  - LMV321 130 $\mu$ A
  - LMV358 210 $\mu$ A
  - LMV324 410 $\mu$ A
- n Rail-to-Rail Output Swing @ 10k  $\Omega$  0mV
- $V_- +65mV$
- n VCM  $-0.2V$  to  $V_+ -0.8V$

### Applications

- n Active Filters
- n General Purpose Low Voltage Applications
- n General Purpose Portable Devices