



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Justinas Barakauskas

**GALIOS STIPRINTUVO EFEKTYVUMO DIDINIMAS
PANAUDOJANT MODULIUOTOS ĮTAMPOS MAITINIMO
ŠALTINĮ**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. Vytautas Markevičius

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTRONIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

**GALIOS STIPRINTUVO EFEKTYVUMO DIDINIMAS
PANAUDOJANT MODULIUOTOS ĮTAMPOS MAITINIMO
ŠALTINĮ**

Baigiamasis magistro projektas
Elektronikos inžinerija (kodas 621H61002)

Vadovas

(parašas) Prof. Dr. Vytautas Markevičius
(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. Dr. Darius Gailius
(data)

Projektą atliko

(parašas) Justinas Barakauskas
(data)

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Justinas Barakauskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektronikos inžinerija

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Galios stiprintuvo efektyvumo didinimas panaudojant moduliutos įtampos maitinimo šaltinį“

AKADEMINIO SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. gegužės 27 d.

Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Justino Barakausko** baigiamasis projektas tema „Galios stiprintuvo efektyvumo didinimas panaudojant moduliutos įtampos maitinimo šaltinį“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Barakauskas J. Galios stiprintuvo efektyvumo didinimas panaudojant moduliuojamos įtampos maitinimo šaltinį. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Vytautas Markevičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektronikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. – 49 p.

SANTRAUKA

Vieni iš pagrindinių šiandieninės elektronikos inžinerijos siekių yra mažinti energijos sąnaudas, mažinti gabaritus ir gerinti atliekamų funkcijų kokybę. Šios tendencijos neaplenkia ir galios stiprintuvų profesionalioms akustinėms sistemoms, tačiau dauguma rinkoje siūlomų produktų naudoja inžinerinius sprendimus, kurie koncentruoti arba į ekonominius parametrus (energijos sąnaudas, svorį, gabaritus, kainą) arba į atliekamų funkcijų kokybę, kadangi šios sprendimų kryptys sunkiai suderinamos tarpusavyje.

Magistro baigiamasis darbas pristato projektuotus inžinerinius sprendimus, tokius kaip specializuotas galios koeficiento korektorius, dvigubas maitinimo šaltinis ar moduliuojamos maitinimo įtampos technologija, kurie leidžia pasiekti aukštą naudingumo koeficientą, gerus fizinius parametrus, santykinai tolygų tinklo apkrovimą ir didelę galią, išlaikant aukštus stiprinamo signalo kokybės parametrus.

Darbe aprašyti tiek tyrimai, atlikti siekiant nustatyti duomenis, kurie buvo panaudoti galios stiprintuvo projektavimo metu, tiek ir atliktų projektavimo sprendimų pagrindimas.

Barakauskas J. Power amplifier efficiency increase using modulated voltage power supply: Final project of Master of electronics engineering / supervisor prof. dr. Vytautas Markevičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electricity and Electronics Engineering, department of Electronics Engineering.

Kaunas, 2015. – 49 p.

SUMMARY

One of the main goals of today's electronic engineering is to reduce energy consumption, reduce the physical size of devices and improve the quality of the functions performed. These trends are also present in the production of power amplifiers for professional acoustic systems, but in mass-production of these devices the main focus is placed either on economic parameters, such as energy consumption, weight, dimensions, price, or on the quality of a certain function, because the satisfaction of both parameters is both: too expensive and too complicated. This work introduces a set of improvements such as power factor correction, double power supply technology of modulated voltage power supply, that may help to combine both parameters (economic efficiency and quality) in real production.

This Master's thesis is emphasizing the improvement of design and technology of power amplifiers, since the suggested ways of development allows to achieve high efficiency, good physical parameters, relatively smooth mains current draw and high power, at the same time maintaining high signal quality parameters.

The Master's thesis includes both: the results of numerous researches, which have been performed in order to identify the data, that was used during the design of innovative power amplifiers and the reasoning of chosen design decisions.

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

AĮGS	Aukštos įtampos galios stiprintuvas
AK	Amplitudės koeficientas
BMB	Budintis maitinimo blokas
DK	Demferavimo koeficientas
GK	Galios koeficientas
GKK	Galios koeficiento korektorius
ĮB	Įėjimų blokas
IPM	Impulso pločio moduliacija
MMG	Maksimali momentinė galia
MMĮ	Moduliuojama maitinimo įtampa
MŠ	Maitinimo šaltinis
MTF	Maitinimo tinklo filtras
NK	Naudingumo koeficientas
PMB	Pagrindinis maitinimo blokas
VB	Valdymo blokas
VG	Vidutinė galia
ŽĮGS	Žemos įtampos galios stiprintuvas

TURINYS

IVADAS	9
1. GALIOS STIPRINTUVŲ ANALIZĖ	10
1.1 Galios stiprintuvo raida	10
1.2 Galios stiprintuvų klasių tyrimas	10
1.2.1 AB klasė	11
1.2.2 G (H) klasė	12
1.2.3 D klasė	13
1.2.4 MMĮ paremtos technologijos	14
1.3 Galios stiprintuvų naudingumo koeficiento tyrimas	15
Pirmojo skyriaus apibendrinimas	18
2. REALIŲ MUZIKINIŲ SIGNALŲ ANALIZĖ	19
2.1 Amplitudės ir galios koeficientų analizė pilno garsinio spektro signaluose	19
2.2 Amplitudės ir galios koeficientų analizė filtruoto garsinio spektro signaluose	22
2.3 Energijos akumuliacijos maitinimo šaltinio apkrovos stabilizavimui tyrimas	23
Antrojo skyriaus apibendrinimas	26
3. EFEKTYVUMO DIDINIMAS PANAUDOJANT MODULIUOTOS ĮTAMPOS MAITINIMO ŠALTINĮ	27
3.1 Galios stiprintuvo su MMĮ techniniai reikalavimai	27
3.2 Galios stiprintuvo sandara	27
3.3 Maitinimo tinklo filtro bloko projektavimas ir tyrimai	28
3.4 Galios koeficiento korektorius	31
3.4.1 GKK paskirtis ir tyrimai	31
3.4.2 GKK sandara	33
3.4.3 GKK valdymas	34
3.5 Budintis maitinimo blokas	36
3.6 Pagrindinis maitinimo blokas	37
3.6.1 Pagrindinio maitinimo bloko funkcija	37
3.7 Aukštos įtampos galios stiprintuvas	37
3.7.1 Aukštos įtampos galios stiprintuvo valdymo modulis	38
3.7.2 Aukštos įtampos galios stiprintuvo galios modulio projektavimas ir tyrimas	39
3.8 Žemos įtampos galios stiprintuvas	41
3.8.1 ŽĮGS sandara	41

3.8.2 Nuolatinės dedamosios apsauga.....	42
3.9 Įėjimų blokas.....	43
3.10 Valdymo blokas	44
Trečiojo skyriaus apibendrinimas.....	45
4. IŠVADOS	46
5. LITERATŪROS SĄRAŠAS	48
6. PRIEDAI	50
6.1 Garso įrašų analizės duomenys	50
6.2 Apkrovos modelis	51

IVADAS

Darbo aktualumas

Vieni iš pagrindinių šiandieninės elektronikos inžinerijos siekių yra mažinti energijos sąnaudas, mažinti gabaritus ir gerinti atliekamų funkcijų kokybę. Šios tendencijos neaplenkia ir profesionalių akustinių sistemų įrangos, taip pat ir galios stiprintuvų. Dėl dažniausiai ribotų energijos išteklių, ribojamų išlaidų transportavimui ir žmogiškiesiems ištekliams, bei siekiant aukštų akustinių sistemų kokybės rodiklių, naudingumo koeficientas (NK), įrangos svoris ir kokybės parametrai yra ypatingai aktualūs.

Dauguma rinkoje siūlomų produktų naudoja inžinerinius sprendimus, kurie koncentruoti tik į kai kuriuos iš minėtų siekių. Pavyzdžiui, impulso pločio moduliacijos principu veikiančiuose galios stiprintuvuose pasiekiamas didelis NK, tačiau prastesni sustiprinto signalo kokybiniai rodikliai – intermoduliaciniai ir netiesiniai iškreipimai, vėlinimas, elektromagnetiniai trikdžiai. Stiprintuvuose, kurių stiprinimo laipsnių aktyvieji elementai dirba tiesiniu režimu, galimi geresni signalo kokybiniai parametrai, tačiau dėl mažo NK. susiduriama su išskiriamos šiluminės energijos perdavimo aplinkai problemomis, dideliais įrenginio gabaritais ir svoriu.

- **Darbo tikslas** - suprojektuoti stiprintuvą, panaudojant mažai išplėtotą technologiją – NK didinimą panaudojant galinio stiprinimo laipsnio, kurio aktyvieji elementai dirba tiesiniame režime maitinimo įtampos moduliaciją, pagal stiprinamą signalą

Uždaviniai:

- Išanalizuoti skirtingų klasių galios stiprintuvų klasių NK charakteristikas, privalumus, trūkumus.
- Nustatyti realių muzikinių signalų parametrus – vidutinę amplitudę, AK, GK, trukmę tarp amplitudės pliūpsnių, charakteristikas ribojant spektrą ir kitas.
- Atlikti kitus tyrimus reikalingus GS projektavimui.

1. GALIOS STIPRINTUVŲ ANALIZĖ

1.1 Galios stiprintuvo raida

Galios stiprintuvo istorijos pradžia – 1906 m. kai fizikas Lee De Forest'as padarė pirmąjį triodą [24]. To meto lempinių stiprintuvų santykis galia/svoris sunkiai perkopdavo 1W/1kg. Pagrindinės problemos su kuriomis buvo susiduriama lempinių GS progrose – reikalingos aukštos įtampos, didelis lempų vidaus impedansas, mažas NK, svoris ir gabaritai. Be to nebuvo galios poreikio – dėl naudojamų medžiagų (klijai, silpni alniko magnetai) ir konstrukcijos, garsiakalbiai buvo labai mažos galios.

Padarius pirmuosius GS puslaidininkinių elementų pagrindų galia ir kiti parametrai ženkliai pakilo. Iki apytiksliai 1990 metų GS pasiekta 500W/kanalui galia. Tolesnę pažangą stabdė puslaidininkinių maksimali išsklaidoma galia ir įtampa – nebuvo tranzistorių komplementarinės poros, kuri esant maksimaliai leistinai emiteris-kolektorius įtampai, lygiagretinant racionalų kiekį elementų ir apkraunant standartinėmis apkrovomis (2Ω - 8Ω), gebėtų perduoti aušinimo elementams reikiamą kiekį šiluminės energijos. Tranzistorių emiteris-kolektorius įtampa bei srovė taip pat buvo maža. Dėl prastų puslaidininkinių elementų ir mažo NK sukiamų problemų didinti GS galią tapo ekonomiškai nebenaudinga.

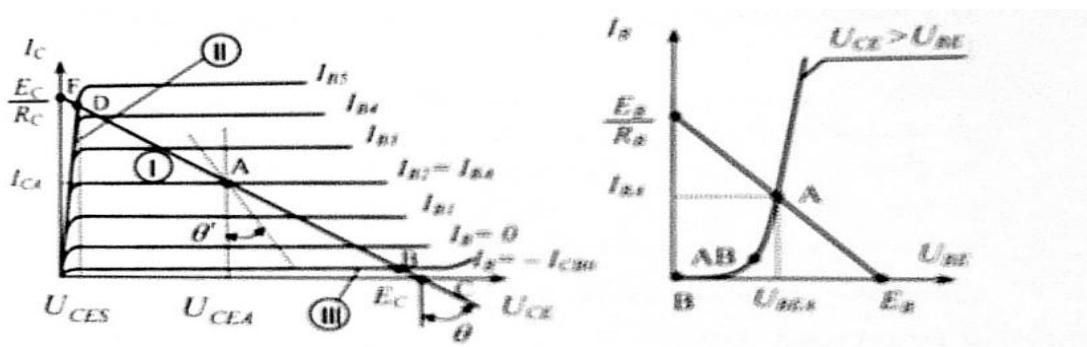
Didelės galios stiprintuvų su transformatoriais dirbančiais maitinimo tinklo dažniu svoris ir gabaritai taip pat tapo neracionalus – maitinimo blokas nebetilpo į 19“ pločio standarto korpuso, kuriuose montuojami profesionalūs GS, 4 sekcijas (176mm). Svoris siekė 40kg. Šie fiziniai parametrai lėmė labai didelius transportavimo ir žmoniškųjų išteklių kaštus.

Būtent šių problemų sprendimo paieškos yra šiuolaikinių GS technologijų sukūrimo pagrindas. Sukurtos ar dėl komponentų pažangos pradėtos plėtoti technologijos, leidusios padidinti GS maitinimo įtampas ir tuo pačiu galią. Du pagrindiniai pradėti naudoti metodai – maitinimo įtampų komutavimas ir signalo stiprinimas panaudojant IPM. Šiandien rinkoje esančio didžiausios galios skirta profesionaliam naudojimui GS vieno kanalo galia 10kW (esant $2,6\Omega$ apkrovai). Bendra įrenginio naudinga galia 40kW [25].

1.2 Galios stiprintuvų klasių tyrimas

Poskyryje aptariamos GS klasės, kurios naudojamos šiuolaikiniuose profesionaliuose įrenginiuose. A klasės stiprintuvai dėl mažo NK, o B dėl netiesinių iškraipymų, kuriuos sukuria tranzistorių charakteristikos netiesiškumas, profesionaliuose GS nenaudojamos.

1.2.1 AB klasė



1.1 pav. A, AB ir B klasių darbo taško iliustracija: B klasės darbo taškas apkrovos charakteristikos apačioje, A klasės tiesės viduryje, o AB – tiesės pradžioje.

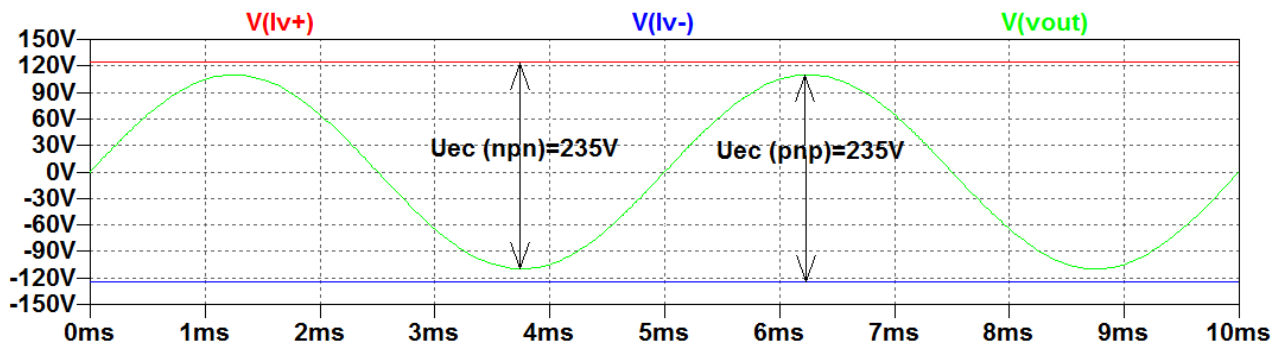
AB klasė – yra tarpinė tarp A ir B klasių. Tranzistorių darbo taškas A apkrovos charakteristikos tiesėje parenkamas taip, kad ir nepadavus signalo teka nedidelė (ramybės) srovė (1.1 pav.)

Pilno periodo stiprinimui naudojama dvitaktė schema. Dėl simetrinės dviejų pečių konstrukcijos kompensuojamos lyginės harmonikos ir galimas visiškas subalansavimas panaikinant nuolatinę įtampą galinės pakopos išėjime.

Sustiprinto signalo kokybinių parametrų atžvilgiu AB klasės stiprintuvai turi daug privalumų:

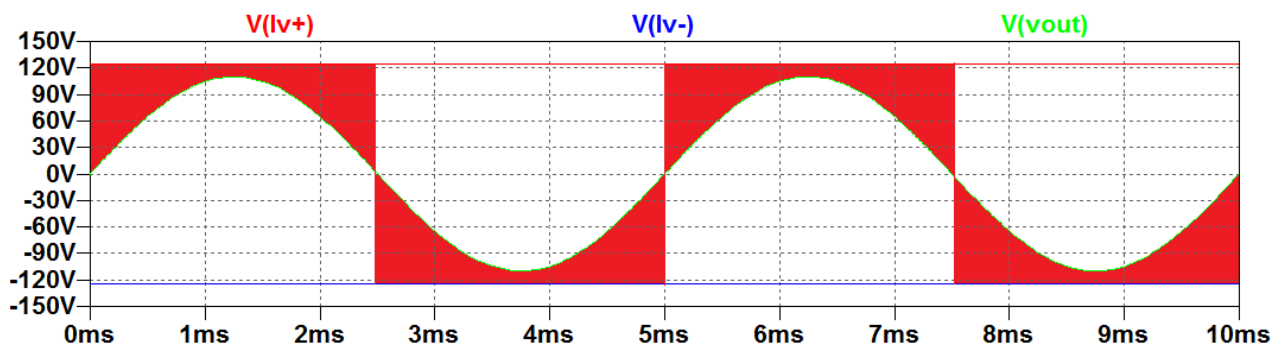
- Dažninės charakteristikos tiesiškumas – gerai suprojektuotų AB klasės stiprintuvų dažninės charakteristikos netiesiškumas mažesnis už $\pm 0,1\text{dB}$ visame akustiniame diapazone (20Hz-20kHz).
- Mažas netiesinių iškraipymų ir triukšmų lygis (*angl.* total harmonic distortion + noise) – gamintojai profesionaliems AB klasės stiprintuvams daugeliu atveju garantuoja mažesnius nei 0,01%-0,1% netiesinius iškraipymus.
- Maži intermoduliaciniai iškraipymai – daugeliu atveju užtikrinama mažiau 0,01%-0,07% (pagal SMPTE standartą [26])
- Galimas žemas išėjimo impedansas – priklausomai nuo projektavimo galimas itin žemas išėjimo impedansas.

Kaip minėta anksčiau ši klasė turi du trūkumus, kurie apriboja maksimalią AB klasės galią. Pirmas - maksimali leistina galinio stiprinimo laipsnio (srovės stiprintuvo) maitinimo įtampa, kurią riboja šio laipsnio tranzistorių parametrai. Gaminamų silicio tranzistorių, kurie savo savybėmis tinka dirbti tiesiniame režime ir turi komplementarinę porą, maksimalus leistinas potencialų, tarp emiterio-kolektoriaus (ar santakos-ištakos) siekia 250V. Kadangi galinio laipsnio tranzistorių emiterio potencialo lygis kinta proporcingai išėjimo signalo įtampai ir gali pasiekti priešingo poliarumo maitinimo įtampą (1.2 pav), todėl maksimali GS maitinimo įtampa gali siekti iki $\pm 125\text{V}$. Perskaičiavus į galią, tai būtų 1.95kW (esant 4Ω apkrovai).



1.2 pav. AB klasės GS potencialų skirtumo tarp signalo ir maitinimo įtampų iliustracija. $V(lv+)$ – teigiamo poliarumo maitinimo įtampa, $V(lv-)$ – neigiamo poliarumo maitinimo įtampa, $V(vout)$ – išėjimo signalo įtampa.

Antras trūkumas – mažas NK. Teoriškai B klasės stiprintuvo NK gali siekti 78,6%, tačiau tik stiprinant harmoninį signalą ir jo amplitudei siekiant maksimalią galimą. Visais kitais atvejais NK mažėja. AB klasės stiprintuvų galiniame laipsnyje tekančios ramybės srovės NK dar sumažina. Taigi dėl kylančių šiluminės energijos perdavimo iš puslaidininkių kristalo į aplinką problemų ir išsiskiriančios šiluminės energijos kiekio, galios didinimas tampa neracionalus (1.3 pav).



1.3 pav. AB klasės GS nenaudingos energijos vartojimo iliustracija. $V(lv+)$ – teigiamo poliarumo maitinimo įtampa, $V(lv-)$ – neigiamo poliarumo maitinimo įtampa, $V(vout)$ – išėjimo signalo įtampa, raudonas plotas – įtampos dalis, sukelianti šiluminės energijos išskyrimą.

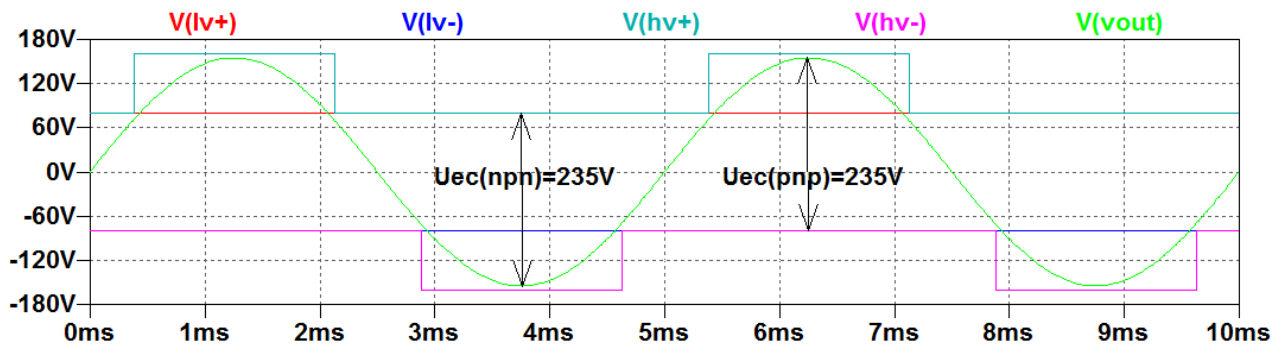
1.2.2 G (H) klasė

G klasės stiprintuvo skirtumas lyginant su AB – galinio laipsnio maitinimo įtampa priklausomai nuo stiprinamo signalo momentinės įtampos kinta pakopiškai. Tai leidžia padidinti NK ir maksimalią galinio laipsnio maitinimo įtampą. Šios klasės stiprintuvų stiprinamo signalo kokybiniai parametrai išlieka labai panašūs į AB klasės.

G klasės stiprintuvo stiprinamo signalo lygiui pasiekus tam tikrą ribą, įjungiamas aukštesnės pakopos maitinimas. H klasės stiprintuvų veikimas analogiškas, tik aukštesnės pakopos maitinimas įjungiamas ne šuoliu, o palaipsniui. Komutuoiant maitinimo įtampas išsprendžiamos abi AB klasės GS galios didinimo problemos:

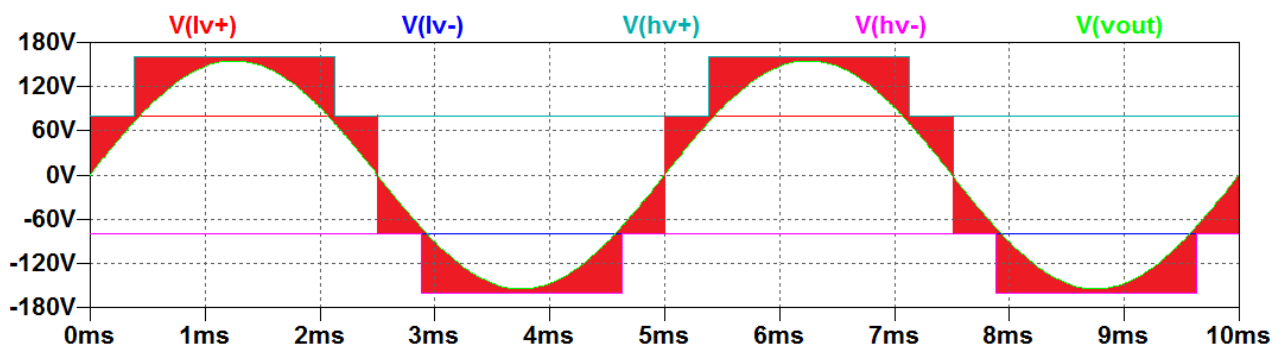
- Maksimalios tranzistorių emiteris-kolektorius įtampos problema – kai G klasės GS signalo įtampa svyruoja vieno maitinimo petyje, tuo metu kito peties maitinimo įtampa yra žemesnėje

įtampos pakopoje, todėl potencialų skirtumas tarp signalo ir maitinimo įtampos visada išlieka mažesnis nei dviguba maksimalios galimos amplitudės įtampa (1.4 pav). Dėl šios priežasties naudojant tranzistorius, kurių maksimali leistina emiteris-kolektorius įtampa yra 250V, maitinimo įtampą būtų galima padidinti iki $\pm 187,5V$ (atvejis, kai aukštos pakopos įtampa dvigubai didesnė už žemos). Tai galią leistų padidinti iki 4,4kW (esant 4Ω apkrovai).



1.4 pav. H klasės GS potencialų skirtumo tarp signalo iš maitinimo įtampų iliustracija. $V(lv+)$ – teigiamo poliarumo žemos pakopos maitinimo įtampa, $V(lv-)$ – neigiamo poliarumo žemos pakopos maitinimo įtampa, $V(hv+)$ – teigiamo aukštos pakopos poliarumo maitinimo įtampa, $V(hv-)$ – neigiamo poliarumo aukštos maitinimo įtampa, $V(vout)$ – išėjimo signalo įtampa.

- Efektyvumas – panaudojant kelių pakopų maitinimo komutaciją, sumažinamas įtampos kritimas galinės pakopos tranzistoriuose, todėl ženkliai padidinamas NK. Sumažėjęs šiluminės energijos išskyrimas (1.5 pav) sumažina aušinimo elementus, reikalingą maitinimo šaltinio galią.



1.5 pav. G klasės GS nenaudingo energijos vartojimo iliustracija. $V(lv+)$ – teigiamo poliarumo žemos pakopos maitinimo įtampa, $V(lv-)$ – neigiamo poliarumo žemos pakopos maitinimo įtampa, $V(hv+)$ – teigiamo aukštos pakopos poliarumo maitinimo įtampa, $V(hv-)$ – neigiamo poliarumo aukštos maitinimo įtampa, $V(vout)$ – išėjimo signalo įtampa., raudonas plotas – įtampos dalis, sukelianti šiluminės energijos išskyrimą.

1.2.3 D klasė

D klasės GS veikimas paremtas impulso pločio moduliacija (IPM). Šios klasės išėjimo pakopos tranzistoriai dirba rakto režimu ir gali būti tik soties arba atkirtos būsenose (nevertinant perėjimo tarp būsenų). Į išėjimą dideliu dažniu, priklausomai nuo įėjimo signalo, tiesiogiai

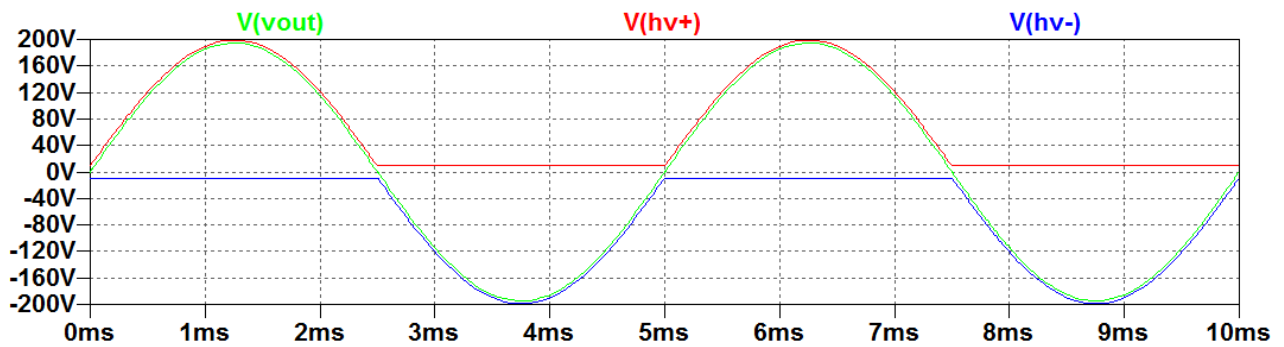
komutuojama vieną iš maitinimo įtampų. Taip suformuotas signalas filtruojamas išėjimo filtru ir atstatoma įėjimo signalo forma.

Šios klasės privalumas – NK, siekiantis daugiau nei 90%. Kai kuriose sistemose galimas mažesnis elementų skaičius nei kitų klasių GS, tačiau tai vieninteliai D klasės privalumai. Dauguma kokybinių stiprinamo signalo parametrų priklauso nuo IPM dažnio, o šiandien technologiškai pasiekiamas dažnis per žemas, todėl D klasės GS turi daug neišspręstų trūkumų:

- Dažninės charakteristikos netiesiškumas - naudojant šiuolaikiškus lauko tranzistorius silicio pagrindu, didelės galios stiprintuvuose, retai viršijamas 1MHz dažnis. Siekiant nufiltruoti sukuriama aukšto dažnio harmonikas ir naudojant 2 eilės filtrą, slopinimas dengia akustinį diapazoną ir iškraipoma dažninė charakteristika. Be to GS filtro apkrova gali kisti nuo 2Ω iki 8Ω , todėl filtro derinimo dažnis nėra pastovus. Aukštesnės eilės filtras sudarytų didesnę GS vidaus varžą, todėl statesnio slopinimo yra vengiama. Rinkoje esančių produktų charakteristikos nurodomas iki $+0/-1\text{dB}$ netiesiškumas, bet esant 8Ω apkrovai. Didinant apkrovą dėl filtro slopinimo dažnio kitimo netiesiškumas dar padidės.
- Fazinės charakteristikos netiesiškumas – dėl išėjimo filtro, stipriai iškraipoma GS fazinė charakteristika, kurios netiesiškumas žalingas naudojant stiprintuvą bendroje sistemoje su kitais GS ir jų stiprinamiems signalams sąveikaujant tarpusavyje.
- Topologiniai trūkumai. Galimos dvi D klasės stiprintuvo topologijos – pusės tilto ir pilno tilto. Naudojant pusės tilto topologiją, dėl netiesinės apkrovos (garsiakalbis ir akustinis ekranas sudaro rezonansinę sistemą) nepasiekiamas aukštas DF, būtinas grįžtamas ryšys, tačiau galimas dviejų tokios topologijos GS jungimas tilto režimu. Naudojant pilno tilto topologiją, pasiekiami mažesni iškraipymai, tačiau dėl dviejų filtrų didėja vidaus varža ir tokios topologijos GS nebegali jungti tilto režimu.
- Aukštas intermoduliacinių iškraipymų lygis - galinio laipsnio tranzistorius įvedus į soties režimą, tekanti srovė moduluojama maitinimo įtampos fluktuacijų, kurių sąveika su stiprinamu signalu sukuria intermoduliacinius iškraipymus. Dėl šios priežasties D klasės GS gali būti maitinamas tik stabilizuoto maitinimo šaltinio, tačiau fluktuacijų visiškas panaikinimas neįmanomas. Gamintojai vidutiniškai užtikrina mažesnius nei 0,5% intermoduliacinius iškraipymus.

1.2.4 MMĮ paremtos technologijos

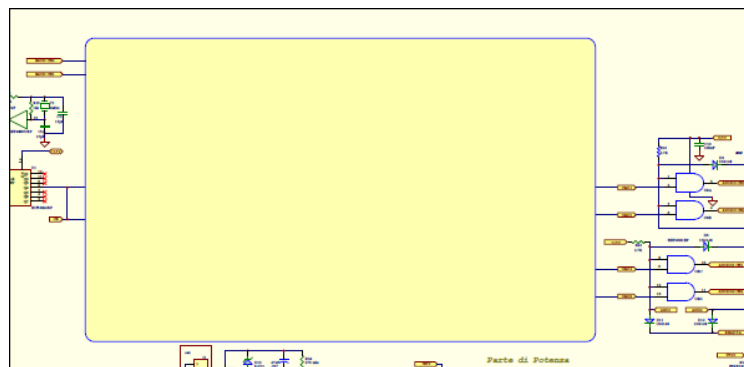
Kai kurių komercinių GS veikimo principas pagrįstas panašią technologija į 3 skyriuje aprašyto projekto. Tai maitinimo įtampos moduliacija pagal stiprinamą signalą palaikant nustatytą viršįtampį virš išėjimo signalo įtampos (1.6 pav).



1.6 pav. GS naudojančių MMI technologijas maitinimo įtampų priklausomybės nuo signalo iliustracija. $V(hv+)$ – teigiamo poliarumo maitinimo įtampa, $V(hv-)$ – neigiamo poliarumo maitinimo įtampa, $V(vout)$ – išėjimo signalo įtampa.

Įtampa iš maitinimo šaltinio moduluojama IPM, kurios skverbti valdoma garsinio signalo, nufiltruojamos moduliacijos sukurtos harmonikos, gautos moduluotos įtamos maitina AB klasės stiprintuvą. Pritaikant tokio tipo technologiją, NK šiek tiek mažesnis nei D klasės stiprintuvo, tačiau signalo kokybiniai parametrai ekvivalentūs AB klasės GS.

Pagal atliktą apžvalgą nustatyta, kad rinkoje yra bent du komerciniai gamintojai, kurių GS veikimo principas pagrįstas panašia technologija į 3 skyriuje aprašyto projekto: Yamaha Corporation (Pro Audio)- EEEngine technologija [28] ir Martin Audio - Tracking D technologija [29]. Deja abu gamintojai slepia technologinius sprendimus – kai kurie naudojami komponentai pagaminti be skiriamųjų ženklų arba nušlifuoti paviršiais, serviso žinynuose pateikiama cenzūruota medžiaga (1.7 pav.). Informacijos trūkumas lėmė tai, jog šių gamintojų produktai smulkiau analizuoti nebuvo.



1.7 pav. Martin Audio serviso aprašymo cenzūros pavyzdys

1.3 Galios stiprintuvų naudingumo koeficiento tyrimas

Siekiant nustatyti ar projektuojamos MMI technologijos panaudojimas leistų pasiekti pranašumą prieš kitų klasių GS, buvo atlikti tyrimai, kuriais nustatyta NK priklausomybė nuo atiduodamos į apkrovą galios ir kokiam galios diapazonui tikslinga optimizuoti NK. Plačiau apie vidutinę galią atiduodama į apkrovą stiprinant realius muzikinius signalus 2 skyriuje.

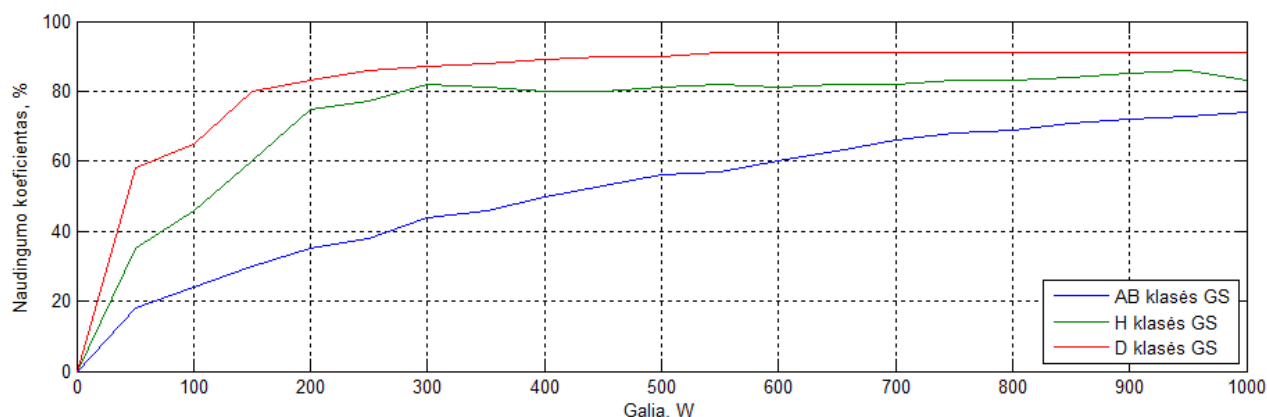
Tirti 3, skirtingų klasių galios stiprintuvai, juos apkraunant 8Ω aktyviniu rezistoriumi. NK matavimai atlikti didinant galią 50W žingsniu iki 1000W, stiprintas 100Hz harmoninis signalas. AB klasės stiprintuvo NK prie 1000W gautas ekstrapoliuojant. Netiesinių iškraipymų ir triukšmų dalis, intermoduliaciniai iškraipymai ir dažninė charakteristika matuoti pagal SMPTE RP 120:2005 standartą, prie 100W galios. Maksimali galia matuota pasiekiant 1% netiesinių iškraipymų. Matavimo rezultatai pateikti 1.1 lentelėje.

Gamintojas	Modelis	Klasė	Išmatuota galia, W (8Ω)	ADCh netiesiškumas, dB	Netiesinių iškraipymų ir triukšmų dalis, %	Intermoduliacinių iškraipymų dalis, %
Crown	MacroTech 3600VZ	AB	970	+0,2/-0,1	0,04	0,05
Crest	CA18	H	1050	+0/-0,3	0,03	0,01
Powersoft	K6 (ribojant galią)	D	1000	+0,4/-0,7	0,5	0,4

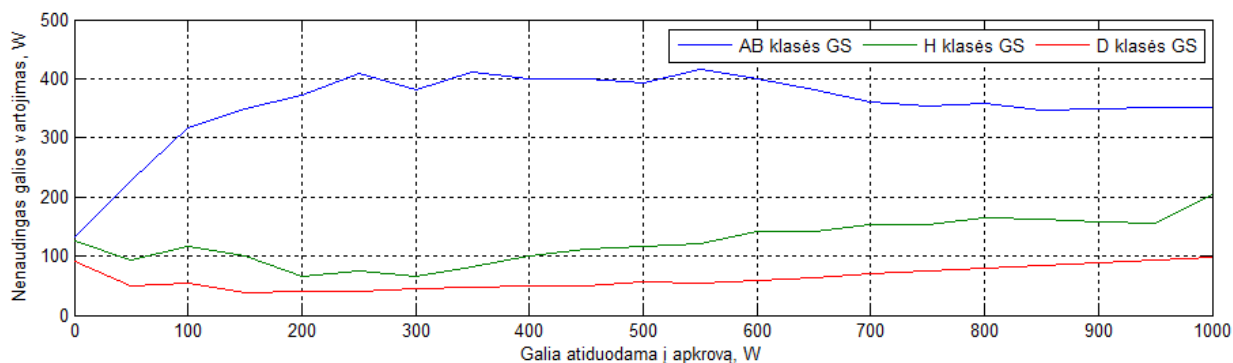
1.1 lentelė. Tirtų GS matavimų rezultatai.

Pagal gautus matavimo rezultatus galima daryti išvadą, kad naudotų H ir AB klasės stiprintuvų sustiprinto signalo kokybiniai parametrai daug geresni nei D klasės. Tirtu D klasės stiprintuvo netiesinių iškraipymų ir triukšmų dalis daugiau nei 10 kartų didesnė nei AB ar H klasės. Intermoduliaciniai iškraipymai taip pat ženkliai didesni. Tai patvirtintų GS klasių apžvalgoje surinktą medžiagą. Pastebėtina, kad tirtu D klasės stiprintuvo apkrovą padidinus iki 2Ω , prie 20kHz dažnio išmatuotas -4,4dB kritimas, o versijos, turinčios skaitmeninį signalo apdorojimo procesorių, dažninės charakteristikos netiesiškumas mažesnis nei $\pm 0,1\text{dB}$, tačiau daug prastesnė fazinė charakteristika.

Atlikus NK priklausomybės nuo galios atiduodamos į apkrovą matavimus, nustatyta, kad H ir D klasių GS NK didėja apytiksliai iki 30% maksimalios galios, vėliau išlaiko pastovų, o AB klasės beveik tolygiai didėja iki maksimalios galios. NK matavimo rezultatai pateikti 1.8 ir 1.9 paveiksluose.



1.8 pav. Skirtingų klasių NK priklausomybė nuo galios atiduodamos į apkrovą



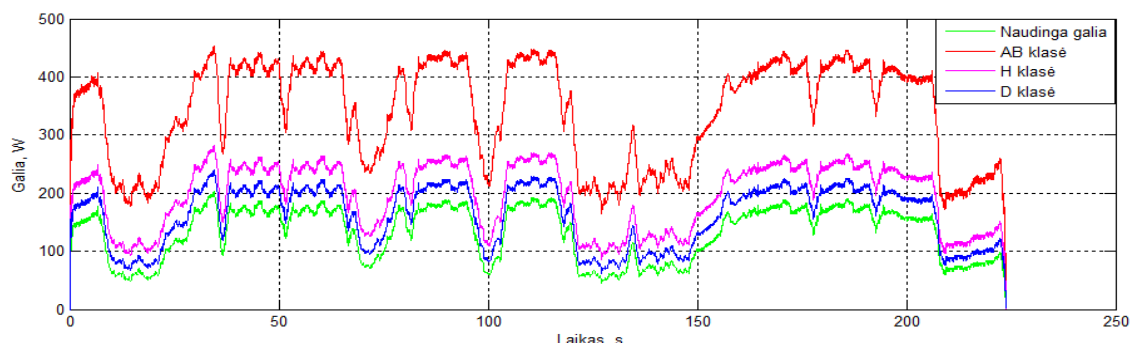
1.9 pav. Skirtingų klasių nenaudingai vartojamos galios priklausomybė nuo galios atiduodamos į apkrovą

Nustačius NK priklausomybę nuo atiduodamos į apkrovą galios, buvo atliktas GS modeliavimas stiprinant du signalus skirtingais galios koeficientais (GK) – 7,6 (35 signalas, 1 priedas) ir 103,9 (30 signalas, 1 priedas).

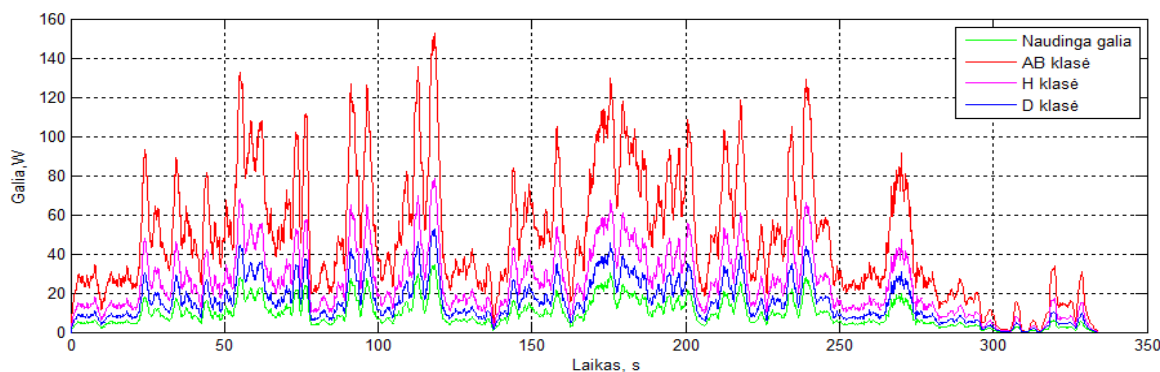
$$GK = AK^2 = \left(\frac{U_{max}}{U_{rms}} \right)^2 \quad (1.1)$$

čia: U_{max} – maksimali momentinė signalo įtampa, U_{rms} – vidutinė kvadratinė signalo įtampa

Signalai normuoti 1000W galiai, naudinga galia perskaičiuota į suvartojamą, pagal tirtų GS NK priklausomybės nuo galios tyrimo rezultatus. Tarpiniai rezultatai gauti naudojant tiesinę interpoliaciją, atvaizdavimui grafiškai naudotas 88200 atskaitų (2 sekundžių, 44,1kHz diskretizavimo dažniui) slenkančio vidurkio filtras. Rezultatai pateikti 1.10 ir 1.11 pav.:



1.10 pav. Skirtingų klasių GS galios vartojamo pavyzdys stiprinant signalą, kurio GK-7.6, vertinant NK priklausomybę nuo galios (atvaizdavimas apdorotas 2 s. slenkančio vid. filtru).



1.11 pav. Skirtingų klasių GS galios vartojamo pavyzdys stiprinant signalą, kurio GK-103,9, vertinant NK priklausomybę nuo galios (atvaizdavimas apdorotas 2 s. slenkančio vid. filtru).

Stiprintuvų stiprinančių signalą, kurio vidutinė amplitudė artimesnė maksimaliai (žema GK reikšmė), suvartojama galia išlieka gana proporcinga į apkrovą atiduodamai galiai, tačiau stiprinant signalą, kurio GK reikšmė aukšta, pastebimas akivaizdus stiprintuvų, kurių aukštas NK pasiekiamas prie mažos galios pranašumas.

Įvertinus tirtų stiprintuvų modelių suvartotą energiją ir atiduotą į apkrovą, suskaičiuotas realus NK stiprinant minėtus signalus (1.2 lentelė).

Signalų GK	AB klasės NK	H klasės NK	D klasės NK
7.6 (35 signalas)	38%	67%	82%
103.9 (30 signalas)	19%	38%	61%

1.2 lentelė. NK stiprinant skirtingo GK, skirtingų klasių GS analizės rezultatai.

Pirmojo skyriaus apibendrinimas

- Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą ir komercinių GS tyrimus patvirtinta teorija apie skirtingų klasių GS stiprinamo signalo kokybinius parametrus – tirtų AB ir H klasės stiprintuvų signalo kokybiniai parametrai ženkliai geresni nei D klasės.
- GS techninėse specifikacijose NK nurodymas neturi realios inžinerinės reikšmės – NK turi stiprų ryšį su galios atiduodamos į apkrovą dalimi, nuo maksimalios GS galios.
- Projektuojant GS, NK turėtų būti optimizuojamas vidutinei galiai, kuria dirbs stiprintuvas, nes tokiu atveju bendras energijos suvartojimas bus mažiausias. Srityje arti maksimalios galios NK stiprintuvas dirba santykinai trumpą laiką, tačiau taip pat reikalingas aukštas NK siekiant tolygesnio MŠ apkrovimo.

2. REALIŲ MUZIKINIŲ SIGNALŲ ANALIZĖ

Siekiant išsiaiškinti reikalingus parametrus GS projektavimui, buvo atliktas realių muzikinių signalų tyrimas. Tyrimo metu analizuota 50 muzikinių įrašų, surinkus kuo įvairesnių bei skirtingų suspaudimo laipsnių. Įrašai suskirstyti į 5 grupes pagal žanrą: roką, greito ritmo pop, lėto ritmo pop, šiuolaikišką šokių muziką ir senus ar instrumentinius įrašus.

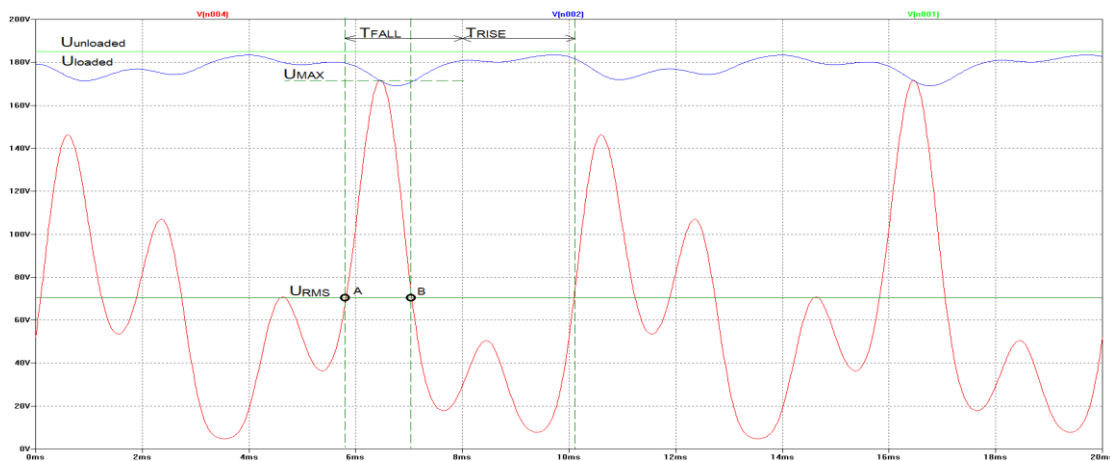
Įrašų analizei naudotas Matlab programinis paketas. Visi įrašai konvertuoti į .wav (angl. Waveform Audio File Format). Įrašų amplitudės normuotos. Kai kurie rezultatai vertinami atvejui, kai maksimali normuota amplitudė lygi 185V (3 skyriuje pateikiamo GS projekto maksimali galima įtampos amplitudė). Kūrinių sąrašas pateikiamas 6.1 priede.

2.1 Amplitudės ir galios koeficientų analizė pilno garsinio spektro signaluose

Amplitudės koeficientas (AK) ir jam proporcingas galios koeficientas (GK) yra vienas svarbiausių parametrų GS optimizavime. Amplitudės koeficientas išreiškiamas kaip:

$$AK = \frac{U_{MAX}}{U_{RMS}} \quad (2.1)$$

Čia: U_{max} – maksimali amplitudė signalė, U_{rms} – signalo įtampos vidutinė kvadratinė reikšmė. GS ribiniu stiprinimo atveju U_{max} sutampa su galinio stiprinimo laipsnio maitinimo įtampa, U_{rms} priklauso tik nuo signalo.



2.1 pav. GS stiprinamo signalo ir maitinimo įtampos charakteringų parametrų iliustracija.

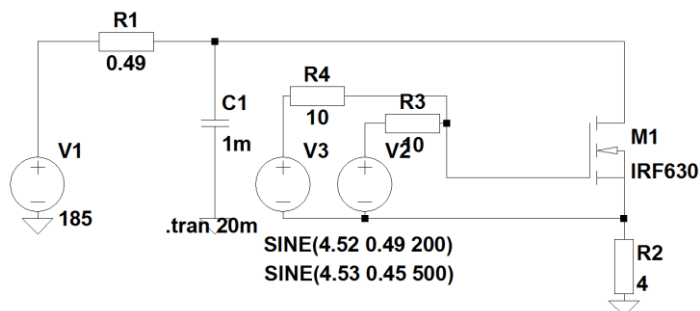
2.1 pav pavaizduoti pagrindiniai charakteringi garsinio signalo parametrai ir jų ryšys su GS. Grafike pavaizduotos dvi GS maitinimo įtampos: $U_{unloaded}$ – įtampos vertė, kuria maitinamas GS nesant apkrovos ir U_{loaded} – įtampos vertė, kuria maitinamas GS jį apkraunant. Įtampos kritimas mažinamas mažinant maitinimo šaltinio (MŠ) vidaus impedansą. Dėl didelės vidaus varžos atsirandančio įtampos kritimo sukuriama netiesiniai iškraipymai (tiesiniuose stiprintuvuose, kai GS stiprinamo signalo įtampa pasiekia maitinimo įtampą).

Kadangi GS apkrovos varža yra žinoma, todėl $U_{\max}$ ir U_{rms} gali būti perskaičiuota į galią išskiriamą GS apkrovoje. Gaunamos reikšmės atitinkamai $P_{\max}$ ir P_{rms} . Kaip ir pateiktame supaprastintame modelyje (2.2 pav.) GS maitinamas iš MŠ (modelyje V1 su vidaus varža R1) ir didelės talpos kondensatorių baterijos (modelyje C1).

Optimaliu atveju MŠ turi užtikrinti pastovų energijos tiekimą, lygų energijai atiduodamai į apkrovą, todėl galima teigti, kad $P_{\text{mait.}}$ turi būti lygi P_{rms} . ($P_{\text{mait.}}$ – nominali MŠ galia). Energijos poreikio pulsacijas iš dalies stabilizuoja kondensatorių baterija (modelyje C1). Energijos kiekis perduodamas į apkrovą vieno impulso metu gali būti apskaičiuotas kaip:

$$E_{\text{cap}} = \frac{1}{R} \int_A^B |U_{\text{out}}(t)|^2 dt; \quad (2.2)$$

Čia R-GS apkrovos impedansas, U_{out} – GS išėjimo įtampa, A- impulso pradžios laiko momentas, B- impulso pabaigos laiko momentas. Laiko periodas tarp A ir B laiko momentų - T_{fall} . Po T_{fall} , seka laiko periodas, kai $U_{\text{out}} < U_{\text{rms}}$ (toliau – T_{rise}). Esminis šių periodų skirtumas GS veikimo eigoje - T_{rise} periodu energija GS kaupiama, T_{fall} - sukaupta energija atiduodama į apkrovą.



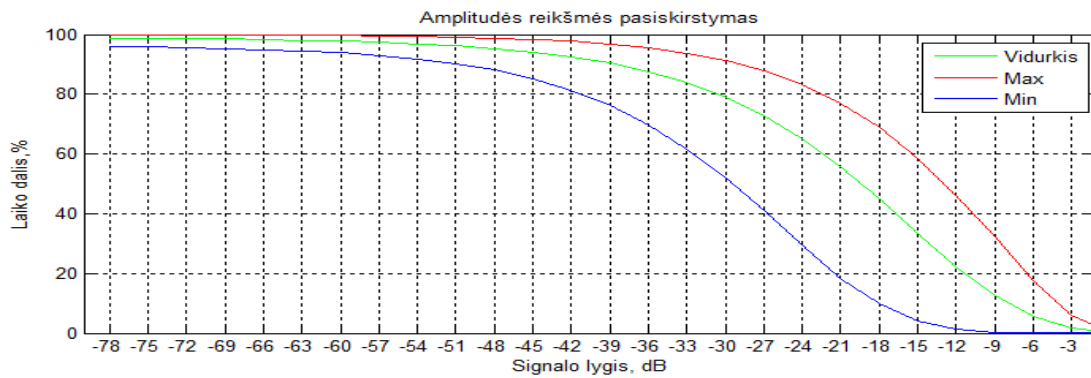
2.2 pav. Supaprastintas GS maitinimo šaltinio ir apkrovos modelis

Atliekant signalų analizę nustatyta garso įrašų amplitudės vidutinė kvadratinė reikšmė, AK, GK ir kokią laiko dalį yra viršijama tam tikra amplitudė. Pagal gautus rezultatus galima teigti, kad priklausomai nuo kūrinio, šie parametrai labai stipriai varijuoja (2.1 lentelė).

Parametras	Vidurkis	Min	Max
Amplitudės koef.	5,35	2,75	12,74
Amplitudės koef. dB	14,56	8,8	22,11
Galios koef.	35,2	7,59	162,38
Laiko dalis, kai amplitudė didesnė už vidutinę, %	26,89	18,26	31,17
Vidutinė galia, kai nominali stiprintuvo galia 4278W	474	53	1128

2.1 lentelė. Signalų analizės rezultatų santrauka

Matematiškai nustatyti signalų AK. Mažiausi AK - šiuolaikiškos šokių muzikos įrašų grupėje (vidutiniškai 3,32), didžiausi - senų ir instrumentinės muzikos įrašų grupėje (vidutiniškai 9,17). Galima pastebėti aiškią tendenciją, jog naujų įrašų suspaudimo laipsnis (atvirkščias dydis AK) vis didėja.

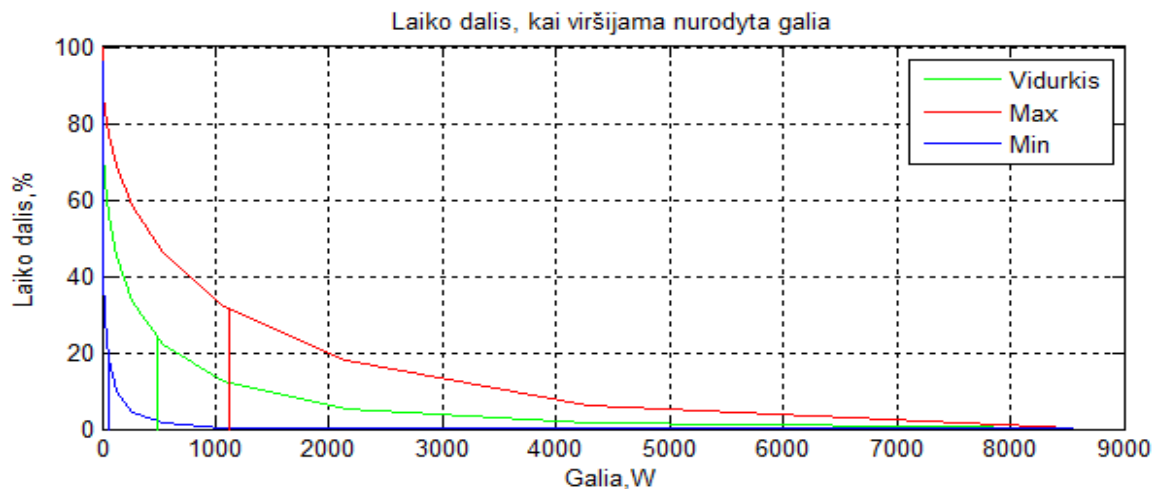


2.3 pav. Laiko dalies, kurią viršijamas nurodytas signalo lygis pasiskirstymas

AK perskaičiuojamas į GK. Rezultatai iliustruoja labai didelį skirtumą tarp MMG ir VG. Mažiausias užregistruotas skirtumas – 7,59 karto arba VG yra 13,2% MMG. Didžiausias užregistruotas skirtumas – 162,38 karto arba VG yra 0,62% MMG. Kaip minėta anksčiau idealiu atveju GS MŠ galia turi būti ne mažesnė nei VG atiduodama į apkrovą. Kadangi tyrimai atliekami, konkretaus įrenginio projektavimui, reikalinga MMG P_{max} yra žinoma ir apskaičiuojama kaip:

$$P_{max} = \frac{U_{unloaded}^2}{R} = \frac{185^2}{4} = 8556.25W \quad (2.3)$$

Pagal lyginamąjį MMG rezultatą ir mažiausią užregistruotą GK galima teigti, kad GS, kurio MMG lygi 8556.25W pakaktų MŠ, kurio galia 1128W (NK nevertinamas).



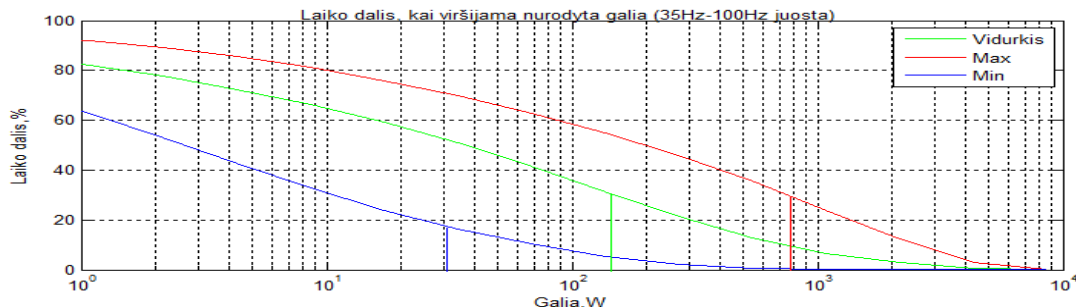
2.4 pav. Laiko dalies, kurią viršijama nurodyta galia pasiskirstymas

2.4 paveiksle iliustruojami skaičiavimai laiko, kurį stiprinant analizuotus signalus, viršijama nurodyta galia. Statmenimis pažymėtos vidutinės galios reikšmės. Vidutiniškai tik 26,89% signalo trukmės, galia viršija VG. Projektuojant GS turėtų būti atsižvelgta į blogiausią registruotą atvejį (mažiausias GK). Optimizuojant NK atsižvelgiama į rezultatų vidurkius.

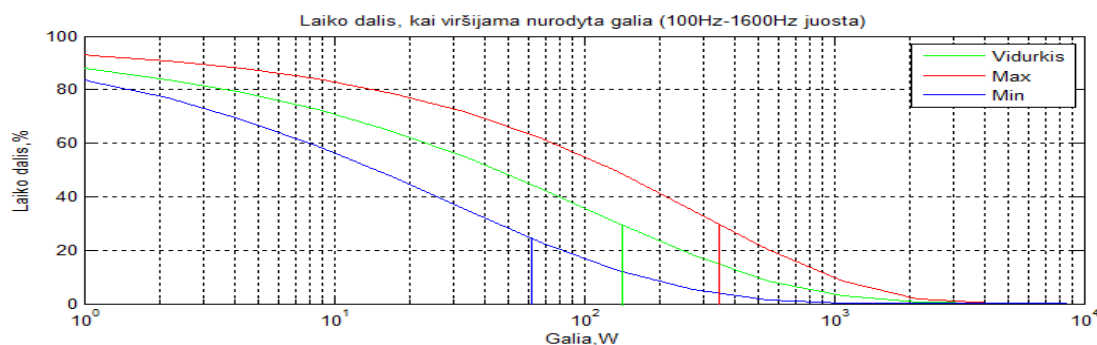
2.2 Amplitudės ir galios koeficientų analizė filtruoto garsinio spektro signaluose

Didesnės nei keleto kilovatų galios profesionaliose akustinėse sistemose retai naudojamas pasyvaus sustiprinto signalo po GS filtravimo. Dėl skaitmeninio signalo apdorojimo pažangos, leidžiančios derinti akustines sistemas įvedant signalo vėlinimą priklausomai nuo dažnio (fazinė korekcija) ir energetiškai bei ekonomiškai neefektyvių pasyvių filtrų esant didelėms galioms, šiuolaikiškose akustinėse sistemose visas garsinis diapazonas padalijamas į atskirus diapazonus prieš GS. Dažnių juostos šiek tiek varijuoja pagal konkrečios sistemos parametrus. 3 skyriuje pateikto GS projekto techninėse sąlygose pateiktos galios (bendra nominali galia ne mažesnė 8kW) stiprintuvai praktiškai naudojami tik žemų (35Hz-100Hz) arba vidutinių (100Hz-1600Hz) dažnių juostų stiprinimui, todėl visų signalų AK ir GK tyrimai atlikti pakartotinai apribojus signalų spektrą minėtų dažnių juostoms. Panaudotas praktikoje naudojamas -24dB/okt Butterworth filtras.

Iš signalų analizės nustatyta, kad vidutinė AK reikšmė išfiltravus 35Hz-100Hz juostą padidėjo nuo 5,35 iki 6,69, o vidutinė GK reikšmė padidėjo nuo 35,2 iki 52,09. Išanalizavus vidutinių dažnių juostą (100Hz-1600Hz) nustatyta vidutinė AK reikšmė lygi 7,49, o GK 58,8. Analogiškuose kaip 2.4 pav. grafikuose 2.5 pav. ir 2.6 pav. pavaizduoti rezultatai, kai iš viso diapazono išskirtos juostos žemų ir vidutinių dažnių juostos.



2.5 pav. Laiko dalies, kurią viršijama nurodyta galia pasiskirstymas (dažnių juosta ribota 35Hz-100Hz ruože)



2.6 pav. Laiko dalies, kurią viršijama nurodyta galia pasiskirstymas (dažnių juosta ribota 100Hz-1600Hz ruože)

Parametras	Pilnas spektras	35Hz-100Hz juosta	100Hz-1,6kHz juosta
AK min (vid)	2,75 (5,35)	3,31 (6,69)	4,97 (7,49)
GK min (vid)	7,59 (35,2)	11 (52,1)	24,7 (58,8)
P _{RMS} max (vid), W	1128 (474)	781 (164)	346 (146)

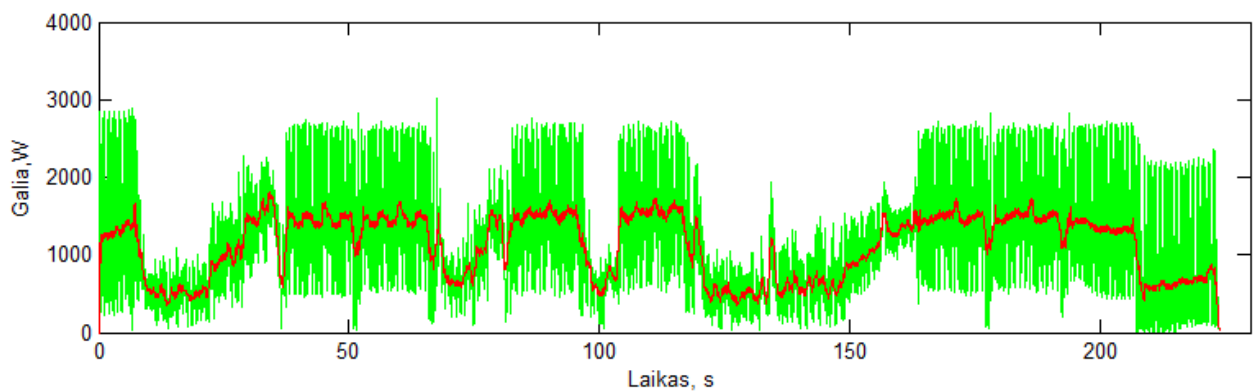
2.2 lentelė. Riboto spektro signalų analizės rezultatų santrauka

Pagal gautus rezultatus, galima daryti išvadą, kad sunkiausiomis sąlygomis GS dirba stiprindamas pilno garsinio spektro signalus, todėl tolimesniuose projektavimo etapuose atsižvelgiama tik į pilno spektro signalus.

2.3 Energijos akumuliacijos maitinimo šaltinio apkrovos stabilizavimui tyrimas

Standartinių parametrų MŠ išėjimo filtrų, kurie skirti maitinimo šaltinio pulsacijoms po lyginimo slopinti, nepakanka žemo dažnio fluktuacijoms, kurias sukelia dėl GS stiprinamo signalo formos nuolatos kintanti apkrova, slopinti [14,23,2,5]. Siekiant kuo didesnio DK (GS apkrovos ir GS vidaus impedanso santykio), reikalingas žemas MŠ vidaus impedansas nepriklausomai nuo dažnio.

Daugumoje GS fluktuacijų slopinimui naudojamos didelės talpos kondensatorių baterijos po MŠ. Energijos kiekis kaupiamas, baterijoje turėtų užtikrinti kuo tolygesnį MŠ apkrovimą. Idealus rezultatas – nufiltruoti žemesnes nei 1,5Hz (pulsų dažnis 90 pulsų per minutę (angl. BPM - beats per minute) kūrinys) fluktuacijas. Tokio ir didesnio tempo kūriniai pasižymi dideliu ritmiškumu ir stipriomis amplitudės pulsacijomis proporcingos kūrinio tempui. Šios pulsacijos sukelia problemas, kai pirminis elektros energijos šaltinis yra elektromagnetinis generatorius, sukamas vidaus degimo variklio, o jo apkrova GS yra artima nominaliai generatoriaus galiai. Standartinių generatorių besisukančių elementų sukaupta kinetinė energija per maža, o vidaus degimo variklio galios valdymo reakcija į apkrovą per lėta, kad generatorius gebėtų stabilizuoti kintamos srovės dažnį ir įtampą, kintančią pagal GS energijos poreikį. Pagal 2.7 paveiksle pateiktą muzikinio signalo pavyzdį, apdirbto 100ms ir 1s slenkančio vidurkio filtrais (amplitudė normalizuota 185V, perskaičiuota į galią esant 4Ω apkrovai, maksimali momentinė galia – 8.6kW), matyti, kad muzikinio signalo lygis labai nepastovus.

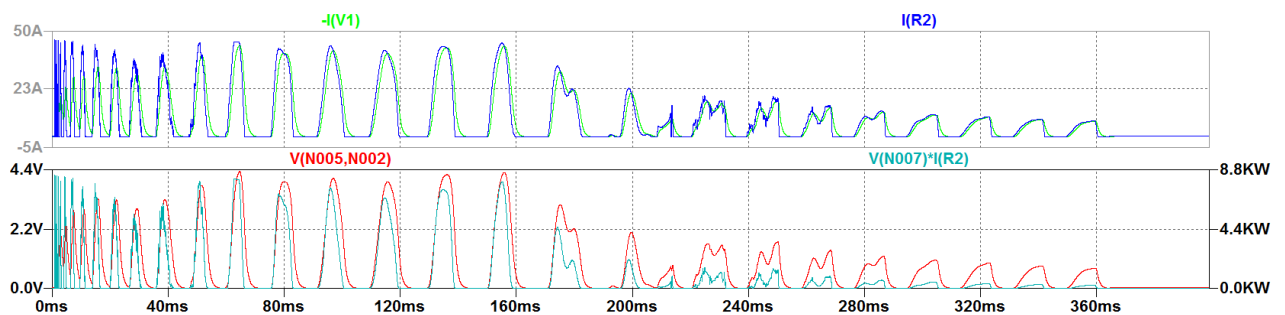


2.7 pav. Muzikinio signalo amplitudės perskaičiuotos į galią po GS pavyzdys

Atlikus skaičiavimus ir signalų analizę ištirta, kad realių garsinių signalų vieno pusperiodžio impulsai, kurių amplitudė siekia 185V, į 4Ω apkrovą atiduoda iki 35J energijos. Kadangi MŠ vidaus impedansas nėra lygus 0, apkrova sukelia MŠ išėjimo įtampos kritimą. Kai GS išėjimo signalo įtampa pasiekia MŠ maitinimo įtampą, sukeliami netiesiniai iškraipymai, kurie yra viena pagrindinių elektroakustinių prietaisų gedimo priežasčių, todėl siekiant didesnio NK ir įrenginio galios, kritimas turi būti kuo mažesnis.

Kaip pavyzdį galima pateikti 8,8mF talpos kondensatorių bateriją, užkrautą iki 185V. Jei leistiną kritimą priimtume 5V, tai energijos rezervas baterijoje - 8J. Bendrai įrenginyje reikalinga keturis kartus didesnė talpa – teigiamo ir neigiamo poliarumo įtampoms bei dviem kanalams (viso reikėtų 35.2mF). Tokia baterija užima apie 196cm² naudingo ploto standartiname korpuse (bendras plotas 1640cm²).

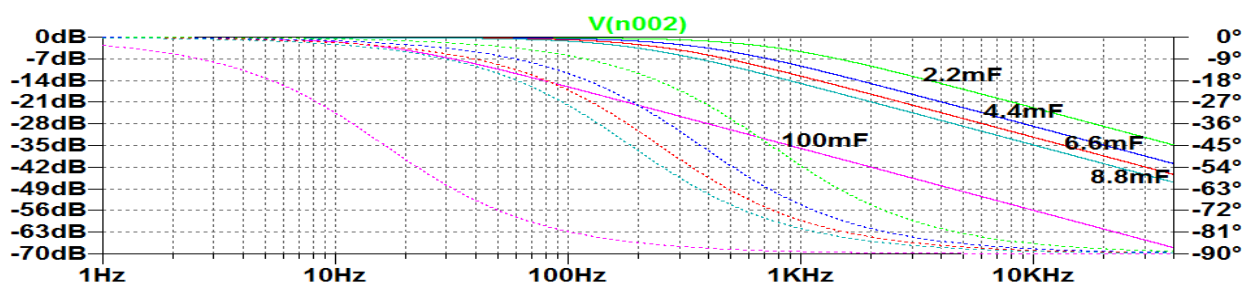
Panaudojant minėtos talpos kondensatorių modelyje (2.2 pav. R1=0.1Ω C1=8,8mF), stiprinant 35 signalo ketvirčio muzikinio takto iškarpą, gautas įtampos $U_{unloaded}$ kritimo priklausomybės nuo galios perduodamos į apkrovą ir srovės iš šaltinio bei į apkrovą grafikas.



2.8 pav. RC filtro pulsacijų slopinimo iliustracija (žydra - galia į apkrovą, raudona – įtampos kritimas, mėlyna- srovė į apkrovą, žalia – srovė prieš filtrą.

Grafike matomas tik nedidelis žemo dažnio pulsacijų slopinimas, įrenginyje prarandama daug naudingo montažo ploto, o didelė kondensatorių baterija stipriai padidintų gaminio kainą, todėl galima teigti, kad šis metodas žemo dažnio fluktuacijų slopinimui nenaudingas tiek dėl fizinių, tiek

dėl ekonominių priežasčių. RC filtro slopinimo charakteristikos pateiktos 2.9 pav. (2.2 pav modelis, $R1=0.1\Omega$)



2.9 pav. RC filtro pulsacijų slopinimo charakteristikos panaudojant skirtingo talpumo kondensatorius

Modeliavimo rezultatai iliustruoja nežymų filtravimo dažnio pokytį keičiant filtro kondensatorių baterijos talpą. Šie tyrimai atlikti panaudojant modelį su gana dideliu fiksuotu MŠ vidaus impedansu.

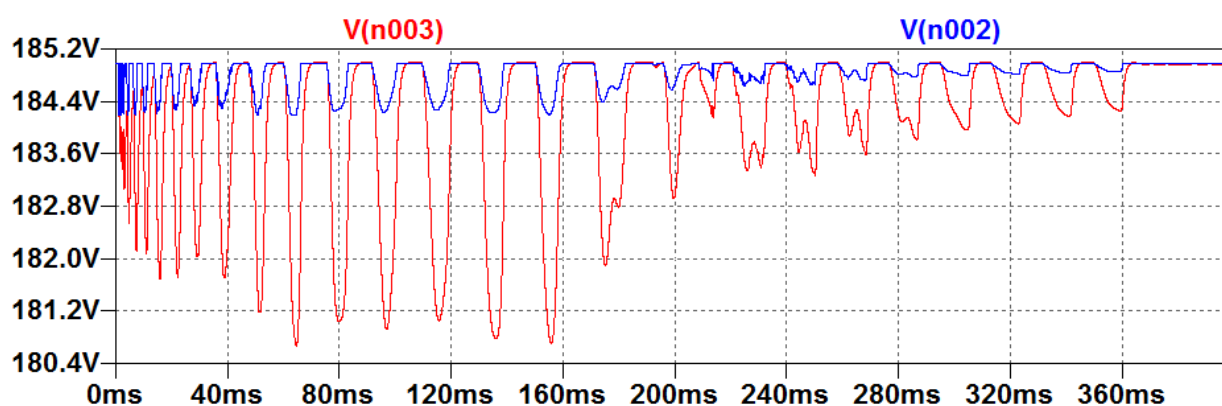
Kaip alternatyva didelės talpos baterijai po MŠ sistemoje gali būti naudojamas aukšto dažnio įtampos keitiklis, kurio išėjimo įtampa labai dideliu greičiu stabilizuojama pagal GS maitinimo įtampą - sukuriamas grįžtamas ryšys įtampos po filtro atžvilgiu.

Tokio metodo privalumai:

- Ženkliai sumažintų MŠ vidaus impedansą ir įtampos svyravimus
- Reikalingas mažesnės talpos kondensatorius po maitinimo šaltinio
- Efektyviau stabilizuojama maitinimo tinklo apkrova leidžiant didesnius įtampos svyravimus energijos rezerve prieš maitinimo šaltinį (kai naudojamas GKK)

Trūkumai:

- Didesnės pulsacijos perduodamos į kitas apvijas, esančias ant tos pačios šerdies.
- Didesni transformatoriaus akustiniai triukšmai.



2.10 pav. Pasyvaus RC filtro ir aktyvaus pulsacijų slopinimo palyginimo iliustracija raudona – įtampos kritimas su RC filtru, mėlyna- įtampos kritimas panaudojant aktyvų filtravimą

2.10 pav pateikiamas modelio (2.2 pav. modelio pagrindu) palyginimas MŠ be grįžtamo ryšio ($R_1=0,1\Omega$, $C_1=8,8\text{mF}$ $R_2=4$) - V(n003) ir su grįžtamu ryšiu ($R_1=0,1\Omega$, $C_1=0,2\text{mF}$ $R_2=4$) - V(n002). Šio modelio atveju įvedus grįžtamą ryšį ir C_1 talpą sumažinus 44 kartus, MŠ ekvivalentinis vidaus impedansas tapo lygus $19\text{m}\Omega$ (pulsacijos sumažėjo apie 5,3 karto).

Antrojo skyriaus apibendrinimas

- Atlikus įvairių muzikinių signalų analizę nustatyta, kad signalų vidutinė amplitudė ir maksimali skiriasi nuo 2,75 iki 12,74 karto (vidutiniškai – 5,35). Šis skirtumas leidžia optimizuoti GS, atsižvelgiant į tai, kad vidutinė stiprintuvo galia yra daug mažesnė nei nominali ir sumažinti maitinimo šaltinio vidutinę galią bei aušinimo elementus, taip sumažinant įrenginio kainą, svorį ir gabaritus.
- Vertinant blogiausią užfiksuotą atvejį (didžiausios vidutinės amplitudės signalas) nustatyta, kad projektuojamam GS (3 skyrius), nevertinant NK, reikalingas ne mažesnės nei 2,4kW vidutinės galios GS.
- Įvertinus MŠ standartinio žemo dažnio filtro po lygintuvo ir aktyvaus slopinimo panaudojant grįžtamo ryšio topologiją, nustatyta, kad žemesnio nei apytiksliai 100Hz pulsacijų slopinimas panaudojant kondensatorių bateriją po MŠ – neracionalus.
- To paties signalo ribotos dažnių juostos vidutinė energija visada mažesnė už pilno akustinio spektro signalo.

3. EFEKTYVUMO DIDINIMAS PANAUDOJANT MODULIUOTOS ĮTAMPOS MAITINIMO ŠALTINĮ

3.1 Galios stiprintuvo su MMĮ techniniai reikalavimai

Pagal atliktus realių muzikinių signalų tyrimus, atsižvelgiant į rinkos poreikį ir kitą analitinėje dalyje pateiktą medžiagą, vykdoma pagrindinė darbo užduotis – suprojektuoti ir optimizuoti galios stiprintuvą panaudojant MMĮ technologiją.

MMĮ technologijos stiprintuvas išsiskiria iš kitų tuo, kad sudarytas iš dviejų modulių - AB klasės stiprintuvo (žemos įtampos galios stiprintuvas – ŽİGS), kuris maitinamas įtampa, kurią moduliuoja aukštos įtampos galios stiprintuvas (AİGS). ŽİGS maitinimo įtampa lygi ŽİGS išėjimo įtampai su palaikomu ne mažesniu 6 voltų viršįtampiu.

Projektavimui iškeltos šios techninės sąlygos:

- Stiprintuvas dviejų kanalų.
- Stiprintuvo vieno kanalo išėjimo galia ne mažesnė 4000W esant 4Ω apkrovai
- Maksimali efektinė srovė iš maitinimo tinklo – 32A
- Nominali maitinimo tinklo įtampa – 230V±10%
- Maitinimo tinkle iškraipymai turi atitikti IEC 61000-3 standartą.
- Panaudojant MMĮ technologiją, pasiekti didesnę nei H klasės NK
- DK ne mažiau 400
- Dažnių juosta - 5Hz-30kHz (-3dB)
- Netiesiniai iškraipymai <0,03% (1kHz)
- Tilto režimas
- 19`` standarto korpusas

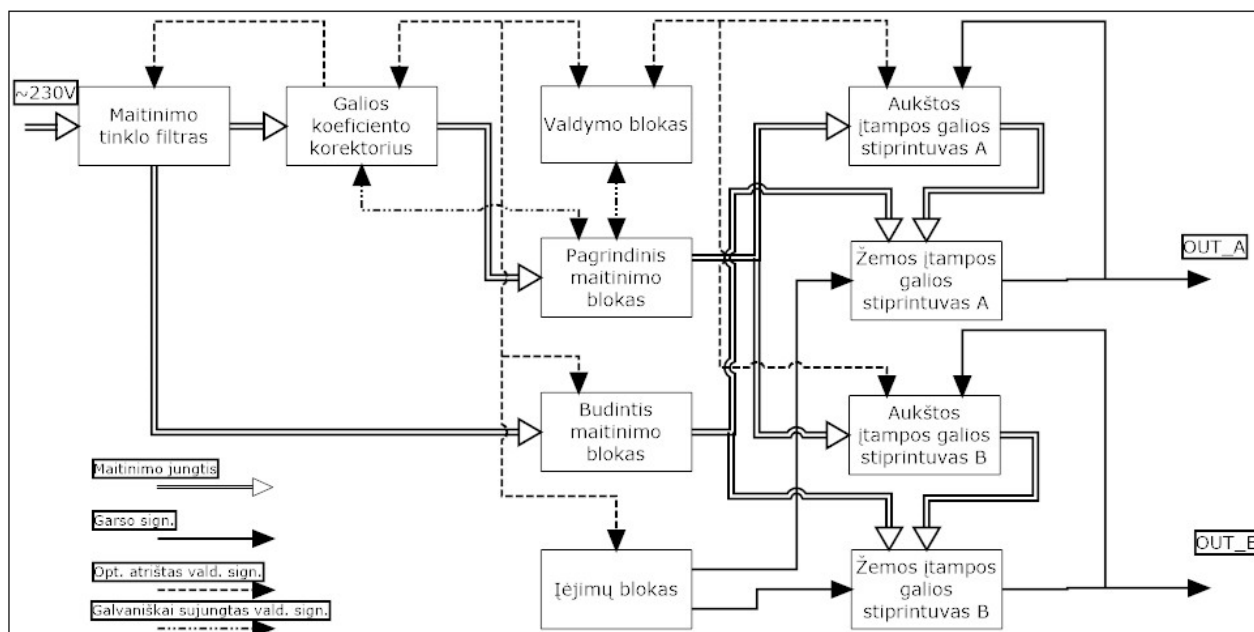
3.2 Galios stiprintuvo sandara

Į bendrą korpusą montuojami du identiški galios stiprintuvai. Šis kiekis pasirinktas kaip optimalus, vertinant bendrų komponentų kainą ir galią, kurią racionalu diegti į vieną korpusą.

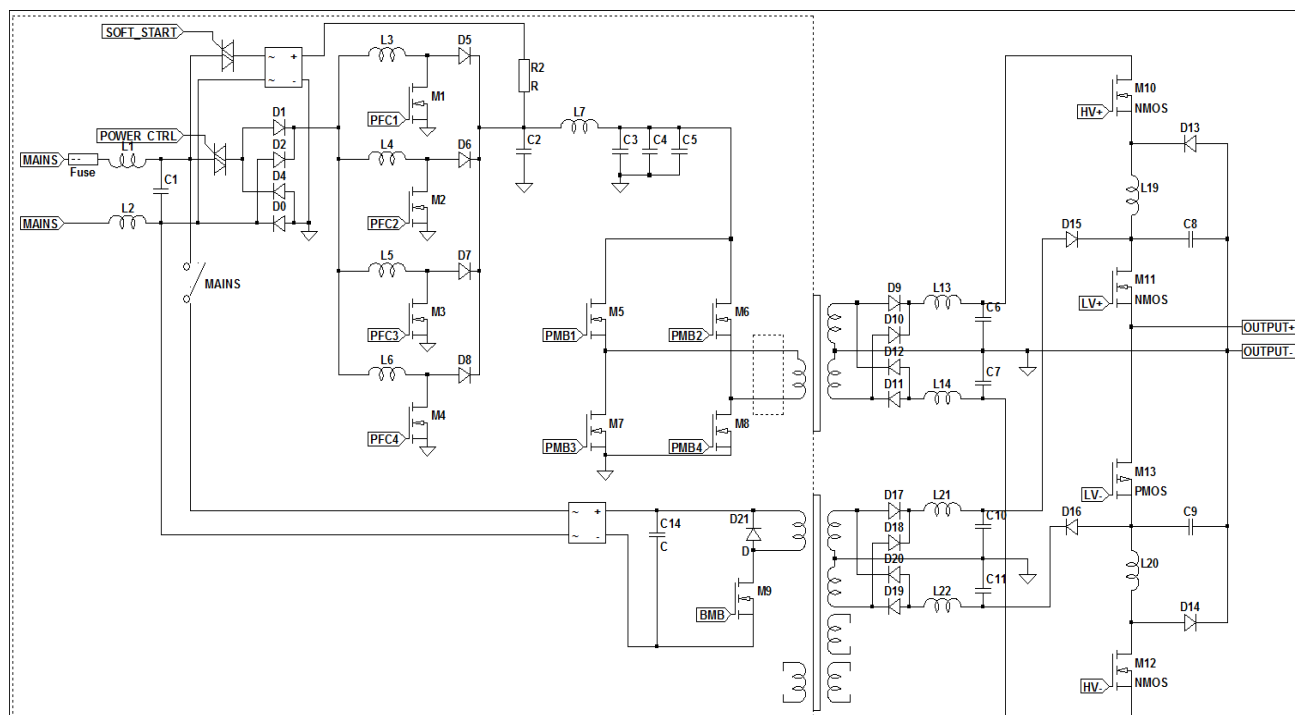
Abu galios stiprintuvai maitinami bendro maitinimo šaltinio, turi bendrą valdymo bloką, bendrą įėjimų bloką, tačiau dėl skirtingų maitinimo potencialų ir saugumo, dauguma valdymo signalų atskiriami optiškai.

MTF, GKK ir dalis PMB bei BMB yra neizoliuoti nuo maitinimo tinklo. Maitinimo įtampos galios stiprintuvams nuo tinklo izoliuojamos transformatoriumi su elektriškai nesurištomis pirmine ir antrinėmis apvijomis. Ryšiai, kurie nėra skirti galios perdavimui taip pat izoliuojami nuo tinklo

optiškai . Blokinė stiprintuvo schema pateikta 3.1 pav., 3.2 pav. pateikta supaprastinta projektuojamo GS schema. Pilna struktūrinė schema pateikta 6.3 priede.



3.1 pav. Projektuojamo GS blokinė schema.



3.2 pav. Projektuojamo GS supaprastinta struktūrinė schema.

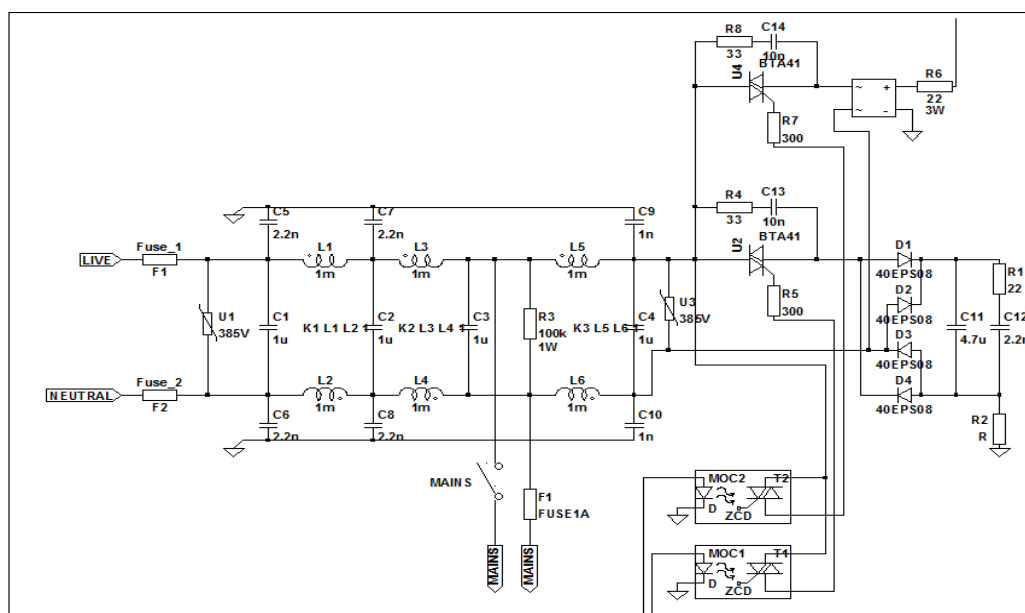
3.3 Maitinimo tinklo filtro bloko projektavimas ir tyrimai

Maitinimo tinklo blokui priskiriama sistemos dalis, kurios įėjimas yra maitinimo tinklas ($230V \pm 10\%$), o išėjimas išlyginta tinklo įtampa. Pagrindinės bloko funkcijos yra užtikrinti apsaugą nuo nenumatytai didelės srovės iš tinklo, šalinti trikdžius patenkančius tiek iš tinklo, tiek į tinklą iš

įrenginio, užtikrinti apsauga nuo tinklo virpėjimų, viršįtampių, užtikrinti reikalingą įrenginio paleidimo charakteristiką.

Pagal projektą galios stiprintuvo efektinė srovė iš tinklo gali siekti 32A. Srovės ribojimą turi užtikrinti galios koeficiento korektorius (GKK), tačiau dėl saugumo ir patikimumo (pavyzdžiui GKK gedimo atveju), maksimali tinklo srovė ribojama 32A nominalios srovės lydžiais saugikliai F1 ir F2. Tinklo viršįtampių slopinimui, bei pereinamųjų procesų filtru įrenginio įjungimo-išjungimo momentu slopinimui panaudoti varistoriai U1 ir U2.

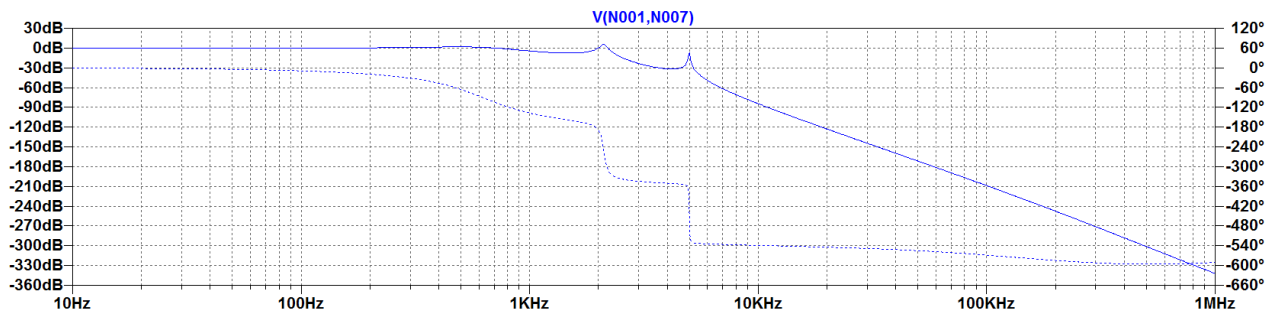
Pagal savo charakteristikas įrenginys turėtų būti priskiriamas profesionalaus vartojimo prietaisams, todėl elektromagnetinio suderinamumo standartai IEC 61000-3, reglamentuojantys visų elektros prietaisų kuriamus elektromagnetinius trikdžius, negalioja šiam prietaisui, tačiau dėl elektromagnetinio suderinamumo projektuojant siekiama tenkinti šių standartų reikalavimus.



3.3 pav. Projektuojamo GS tinklo filtro struktūrinė schema

Bendros žemės (*angl.* common mode) trikdžių slopinimui suprojektuotas filtras sudarytas iš ričių (*angl.* common mode choke) L3-L4, L5-L6 ir L7-L8, bei Y tipo kondensatoriai C5-C6, C7-C8 ir C9-C10. Bendra šių kondensatorių talpa 10,8nF. Pagal saugumo reikalavimus (IEC 61000-3 standartų grupė) talpa negali būti didinama dėl leistinos maksimalios srovės (1mA) į korpusą, jei prietaisas nebūtų įžemintas. Ritės vnyiojamos ant aukštos magnetinės skvarbos šerdžių, jungiamos atsižvelgiant į poliariškumą taip, kad tekančios skirtingų kryptų srovės kompensuotų viena kitą. Atsižvelgiant jog srovė tekanti ritėmis gali siekti 45A, vertinant įtampas kritimą, laido storis ne mažesnis nei 2,2mm.

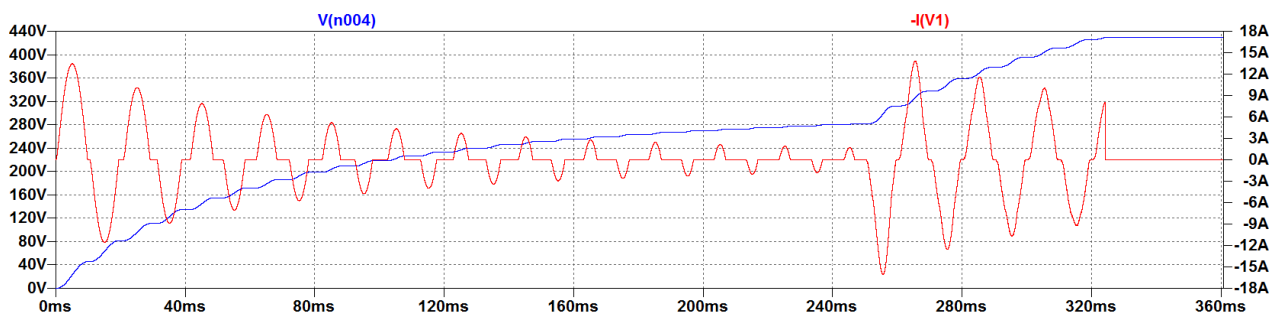
Diferencialinių (*angl.* differential mode) trikdžių slopinimui naudojamas filtras, sudarytas iš tų pačių ričių ir X tipo kondensatorių C1, C2, C3 ir C4. Filtras nuolatos apkraunamas 100kΩ (1W) rezistoriumi, mažinančio susidarančių kontūrų kokybę ir išsklaidančio energiją pereinamųjų procesų metu.



3.4 pav. Tinklo filtro slopinimo charakteristika esant vidutinei GS apkrovai.

Atsižvelgiant į tai, jog galios koeficiento korektoriaus (GKK) kuriamos pagrindinės harmonikos priklausomai nuo režimo gali būti 100kHz, 200kHz, o pagrindiniu režimu 400kHz, todėl pagal filtro modeliavimo gautus rezultatus, galima teigti, jog filtras užtikrina aukštą trikdžių slopinimą.

Dar viena filtro bloko funkcija – prietaiso įjungimas-išjungimas. Kadangi komutuoti 32A nominalią srovę sudėtinga, todėl įjungimui pasirinkta puslaidininkinė, o ne mechaninė komutacija. Tam naudojamas simistorius U3 (BTA41), valdomas per optroną MOC3063MT su paleidimo, esant nuliniam potencialui tinkle funkcija (angl. zero cross detection). Be to prieš įjungiant GKK į tinklą, akumuliacinė talpa 250ms kraunama per 22Ω rezistorių. Per tą laiką pasiekia maždaug 280V įtampą. Po 250ms į tinklą įjungiamas GKK. Tai reikalinga minkštam paleidimui, kadangi GKK, kuris darbiname režime geba valdyti srovę iš tinklo, įjungimo metu susidarius sąlygai, jog energijos akumuliacinė talpa po korektoriaus visiškai tuščia, o tinklo įtampos augimo greitis didesnis nei 75V/ms, srovė korektoriuje tampa nevaldoma ir viršija leistiną ribą (45A). Įjungimo metu efektinė srovė neviršija 10A. Komutavimo simistoriai šuntuoti RC grandimis, kurių $T=330\text{ns}$.



3.5 pav. GS srovės iš tinklo ir įtampos GKK akumuliacinėje talpoje kitimas įjungimo metu.

Raudona – srovė iš tinklo, mėlyna – talpos įtampa.

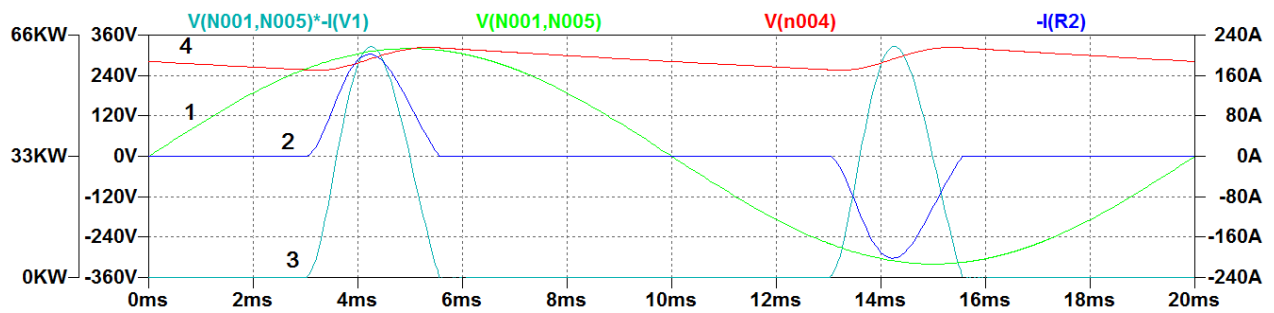
Viena sudėtingiausių dalių dėl terminių procesų – lygintuvas. Lygintuvą sudaro tiltelis iš 4 diskretinių diodų 40EPS08. Maksimali leistina srovė 40A ($T_c=105^\circ\text{C}$), o tiesioginė krentanti įtampa apie 1,1V (32A). Taigi įrenginiui veikiant maksimaliu galingumu diodų tiltelyje išsiskirianti šiluminė energija sieks 70,4W, todėl turi būti užtikrinamas aušinimas. Visų filtre naudojamų elementų nominali įtampa ne mažesnė nei 630V.

3.4 Galios koeficiento korektorius

3.4.1 GKK paskirtis ir tyrimai

Pagrindinė galios koeficiento korektoriaus (GKK) paskirtis elektros prietaisuose – mažinti netiesinių iškreipymų kiekį, kuriuos sukuria įrenginys apkraudamas tinklą ne tiesine apkrova. Netiesiniai iškreipymai tinkle sukelia papildomų srovių tekėjimą, kurios didina energijos perdavimo nuostolius, generuoja elektromagnetinius trikdžius, sukelia netinkama funkcionavimą įrenginių, kurių procesai sinchronizuoti su tinklu (pavyzdžiui nulinio kirtimo detektavimo grandinės), sukelia akustinius triukšmus elektromagnetiniuose prietaisuose. Kaip minėta anksčiau netiesinių iškreipymų kiekį Europos Sąjungoje reglamentuoja standartai analogiški IEC 61000-3 grupei.

Kita GKK funkcija šiame įrenginyje – energijos akumuliacija. Įrenginio techniniai reikalavimai apibrėžia, kad iš tinklo būtų vartojama ne didesnė nei 32A (45A momentinė) srovė. Momentinė suminė abiejų kanalų galia gali siekti 17,2kW esant 4Ω/kanalui apkrovai. Atlikus tyrimus (2 skyrius) nustatyta, kad daugumoje atvejų impulsų, kurie siekia maksimalią galią, pasikartojimo dažnis krenta nuo 450 Hz iki 40Hz. Impulsų sekos trukmė apie 200ms, ciklo periodas apie 400ms. Šie parametrai stipriai varijuoja nuo muzikinio signalo tempo ir ritmo, tačiau jie visiškai nekoreliuoja su maitinimo tinklo dažniu. Minėto modelio atveju vienam ciklui atkurti reikia 461J (apkrova 4Ω) energijos. Šio ciklo pirmoms 20ms (tinklo periodas) reikia 96,8J (193,6J jei stiprina abu kanalai). Teoriškai nominalią tinklo srovę ribojant iki 32A, per vieną periodą galima iš tinklo paimti 147J energijos. Nepaisant to, susidarius atvejui, kad muzikinio signalo ciklo pradžia sutaps su tinklo faze artėjančia į 0° ar 180° energijos iš tinklo trūkumas bus dar didesnis, todėl reikalingas didelis energijos kiekis sukauptas įrenginyje. Siekiant palaikyti stabilų įtampą AIGS maitinimui, suprojektuotas aktyvus galios koeficiento korektorius, nes be jo neįmanoma tenkinti energijos iš tinklo poreikio. Energijai akumuliuoti naudojama kondensatorių baterija išlygintai tinklo įtampai, kurios krovimą vykdo GKK. Leistinas sukauptos energijos kiekio svyravimas 68J. Didesnis svyravimas daro įtaką stiprintuvo galiai. Iš viso įrenginyje kaupiama virš 320J energijos (166J akumuliacinė talpa po GKK ir 155J po PMB). Tai gi GKK atlieka ir energijos akumuliaciją iš tinklo, integruojant srovės vartojimą ir mažinant atiduodamos į apkrovą galios įtaką tinklui funkciją.



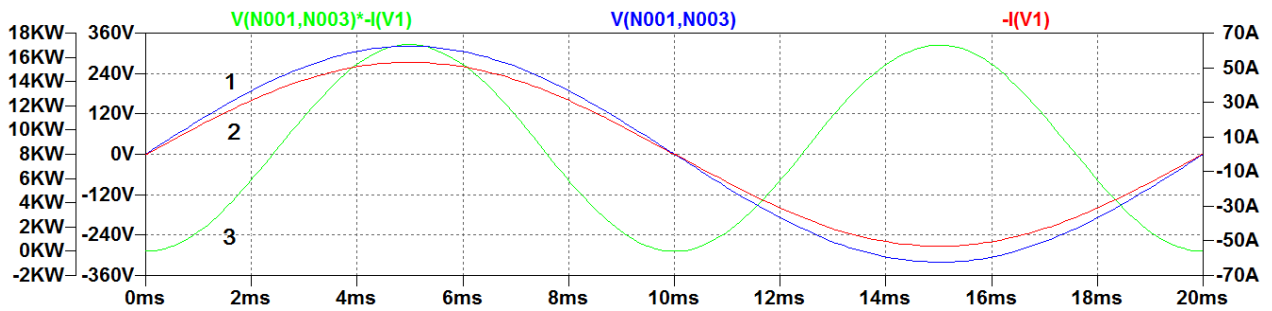
3.6 pav. Srovės kitimo nuo įtampos tinkle iliustracija, tinklą apkraunant lygintuvu ir talpumu po jo.

Priežastį, kodėl projektuojamame įrenginyje būtinas GKK iliustruoja 3.6 pav. Modeliuota primityvi grandinė, kurią sudaro idealus kintamos įtampos šaltinis (imituojantis maitinimo tinklą) ir lygintuvas apkrautas 10Ω rezistoriumi. Vidutinė galia išsiskirianti apkrovoje apytiksliai 8kW. Kaip matome srovė iš tinklo (2 funkcija) teka tik laiko momentu, kai įtampa tinkle (1 funkcija) yra didesnė nei įtampa po lygintuvo (lygintuvo talpiniuose elementuose). Tai gi energija iš tinklo (3 funkcija) paimama tik maža tinklo įtampos periodo dalį. Per laiko momentą, kai energija iš tinklo nėra vartojama, įtampa lygintuvo talpiniuose elementuose (4 funkcija) ženkliai krenta. Šie įtampos svyravimai mažintų PMB naudingumo koeficientą – stabilizuoti įtampai būtų reikalinga labai plati impulso pločio moduliacijos skverbties amplitudė. Be to mažėjant skverbčiai, sudėtingėja filtravimas.

Šiame modeliavime lygintuve panaudotas 3300 μ F kondensatorius. Racionalių galimybių panaudoti tokį talpumą realioje sistemoje nėra, dėl tūrio, kurį tokios talpos kondensatorių baterija užimtų ir dėl kainos. Realus variantas – 2 kartus mažesnė talpa. Suprantama, kad aptartos įtampos svyravimas dar padidės (to paties modelio atveju įtampos kritimas siektų 240V), todėl toks tinklo lyginimas projektuojamo įrenginio atveju visiškai neracionalus.

Be aptarto įtampos svyravimo, kitas klasikinio lyginimo trūkumas – per minėtą trumpą periodo dalį vis vien iš tinklo turi būti paimtas reikalingas energijos kiekis, todėl momentinė srovė tampa daug kartų didesnė už efektinę. Modelio atveju momentinė srovė siekia 200A, o efektinė nesiekia 30A. Tai sukuria netiesinius iškreipymus tinkle, didina nuostolius ir mažina sistemos elementų patikimumą. Tai dar kartą įrodo GKK būtinumą.

Panaudojant aktyvios galios koeficiento korekcijos technologiją tikslas yra suimituoti tiesinę apkrovą tinklui. Jei sudarytume idealų modelį, gautume tokį grafiką:

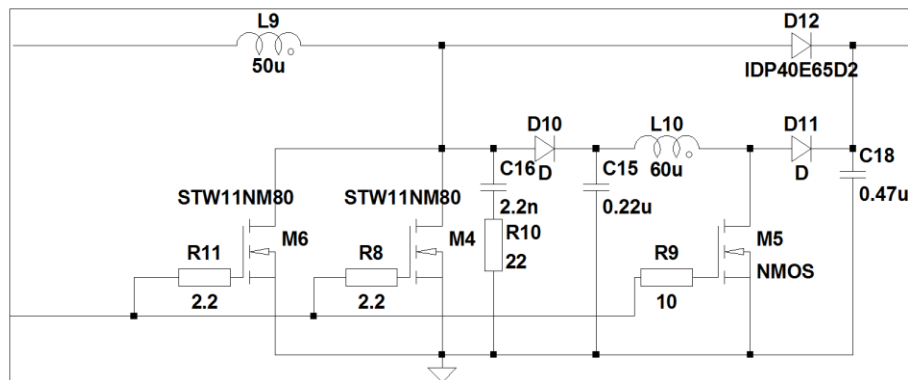


3.7 pav. Srovės priklausomybės nuo įtampos iliustracija kai GK=1

Kaip matome iš grafiko (3.7 pav.) srovė iš tinklo (2 funkcija) yra tiesiškai proporcinga įtampai tinkle (1 funkcija). Tokiu atveju galima maksimali galia iš tinklo (3 funkcija), nesukuriant netiesinių iškraipymų. Tuo tarpu maksimali momentinė srovė yra tik $\sqrt{2}$ karto didesnė už efektinę. Šiuo atveju akivaizdžiai sumažinama naudojamų elementų apkrova ir dėl mažesnės tekančios srovės padidinamas NK.

3.4.2 GKK sandara

Aktyvaus GKK modulis suprojektuotas klasikinio įtampą aukštinančio keitiklio (angl. boost converter) pagrindu, papildytu trikdžių slopinimo grandinėmis – RC filtrais ir aktyviu šuntavimu.

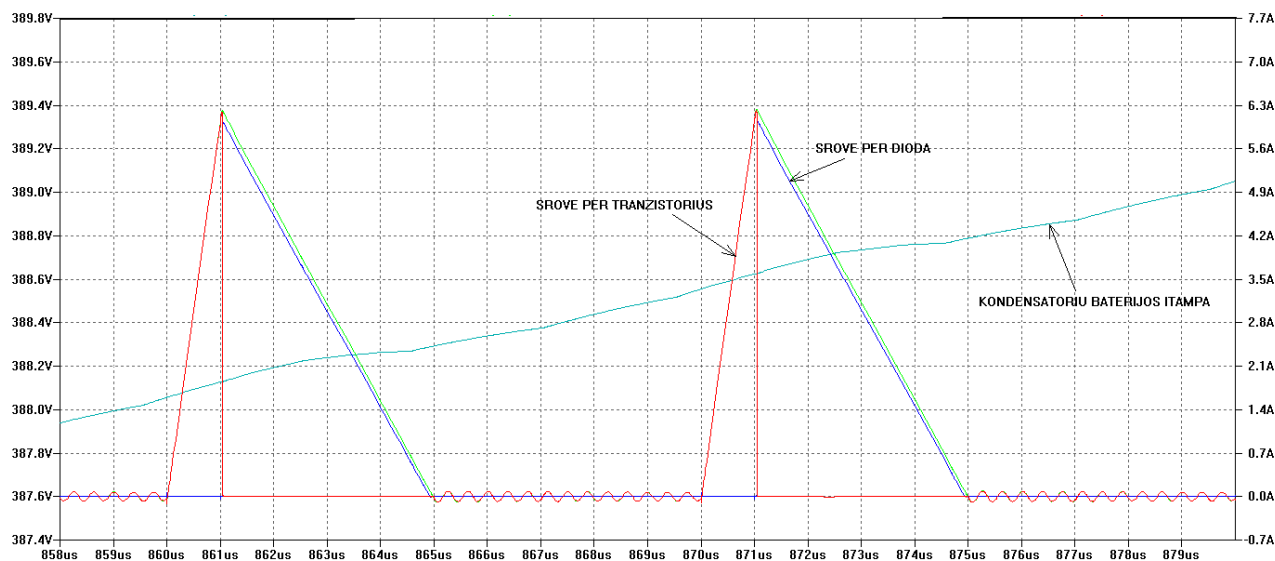


3.8 pav. Dalis suprojektuoto GKK struktūrinės schemos

Projektuojant priimta, kad nominali įtampa po turi būti 400V, su leistinu 6,25% viršįtampiu GKK išėjimo įtampos stabilizavimui. Didelės apkrovos atveju įtampa visada didinama iki 430V, tačiau įtampos kritimas po GKK iki 30V laikomas normaliu, kadangi PMB geba stabilizuoti įtampa išėjimuose, kai įėjimo įtampa svyruoja 370-450V ribose. Bendra GKK kondensatorių baterijos talpa - $1800\mu F$ ($\pm 20\%$). Maksimaliai sukaupiamas energijos kiekis, kuris gali būti atiduodamas iki leistinos įtampos kritimo ribos – 59J, tačiau nuolatinės tokios amplitudės pulsacijos darytų didelį terminį poveikį kondensatoriams.

Keitiklis (3.8 pav.) dirba fiksuoto dažnio pertraukiamo laidumo režimu (angl. frequency clamped critical conduction mode), kadangi dėl labai plačių įėjimo įtampos ir apkrovos svyravimų, neįmanomas srovės iš tinklo valdymas ir mažų netiesinių tinklo iškraipymų užtikrinimas naudojant

nepertraukiamo laidumo (angl. continuous conduction mode) ar pertraukiamo laidumo režimu (angl. critical conduction mode), kur perdavimo funkcija valdoma keitiklio būsenos komutavimo dažniu.



3.9 pav. GKK vieno modulio veikimo laikinė diagrama

Keitiklio darbo būsenos pavaizduotos 3.9 paveiksle. Keitiklio darbo dažnis 100kHz (periodo trukmė 10μs). Periodo pradžioje tranzistoriai (M4 ir M6 3.8 pav) įvedami į soties režimą (3.9 pav. 870μs). Srovė pradeda tekėti iš taško A į žemę ir srovė tolygiai didėja. Šioje būsenoje energija sukaupiama ritėje L9. Valdant laiko, kuriuo tranzistoriai įvesti į sotį, trukmę, valdoma srovė iš tinklo. Atliekant tyrimus įvertinta, kad maksimalios apkrovos metu, periodas soties režime gali siekti 5μs. Tokiu atveju, esant 50μH induktyvumui ir maksimaliai tinklo įtampai maksimali momentinė srovė per ritę siektų 36A. Po minėto laiko periodo tranzistoriai (M4 ir M6), įvedami į atkirtos režimą ir srovė pradeda tekėti iš taško A į tašką C, bei krauti kondensatorių bateriją (3.9 pav. 871μs).

Komutacijos sukeltų trikdžių slopinimui naudojama pasyvi RC grandinė (3.8 pav. R10,C16), kurios $T=48,4\text{ns}$ ir suprojektuota aktyvi šuntavimo grandinė. Deja dėl teorinio ir realaus modelio skirtumų, tiksliai nustatyti aktyvaus šuntavimo naudingumo neįmanoma.

3.4.3 GKK valdymas

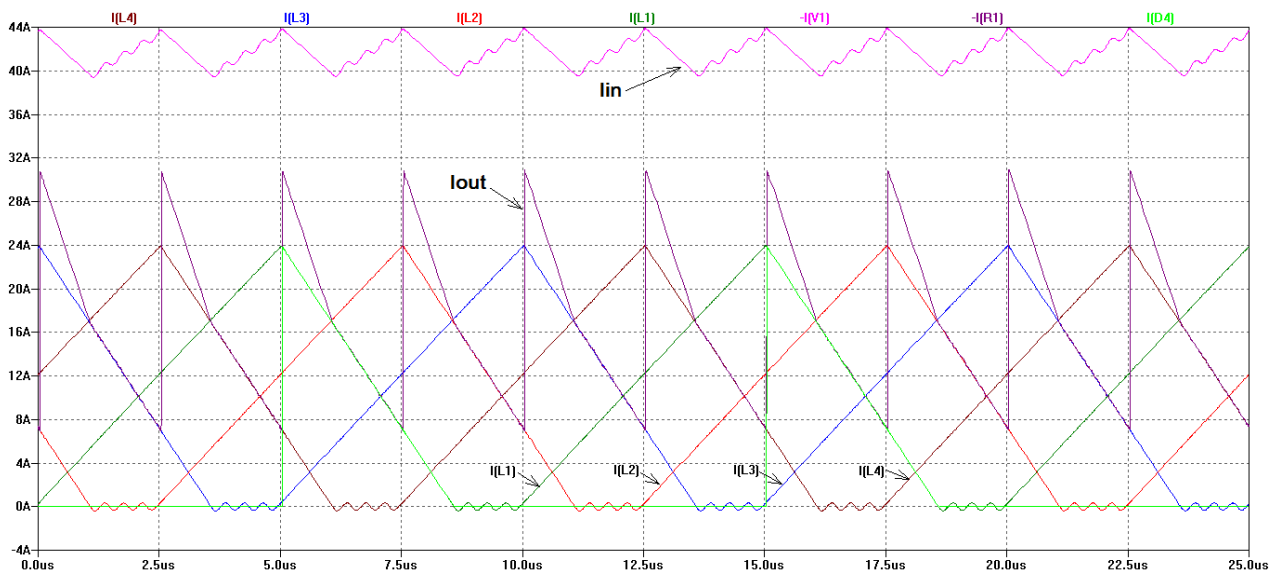
Įrenginyje galios koeficiento korekcijai panaudotas ne vienas anksčiau aprašytas GKK modulis, o keturi. Toks sprendimas priimtas dėl šių priežasčių:

- Mažesnė puslaidininkinių elementų apkrova. Kadangi tą patį energijos kiekį turi perduoti ne vienas, o keturi moduliai, todėl apkrova vienam moduliui 4 kartus mažesnė. Dėl didelės srovės ir aukštos įtamos, bei aukšto komutavimo dažnio rinkoje praktiškai nėra reikiamų puslaidininkinių elementų arba jų kaina yra daug didesnė, nei panaudojant keletą žemesnių

parametrų puslaidininkinių elementų. Be to galimas geresnis šilumos perdavimas aušinimo elementams.

- Paprastėja induktyvinis elementas. Panaudojant fiksuoto dažnio pertraukiamo laidumo režimu dirbantį keitiklį ir siekiant perduoti reikiamą energijos kiekį, reikiami induktyvumo parametrai (soties srovė, varža, gabaritai) tampa neracionaliais.
- Galimybė modulių veikimo fazių perdengimui. Keitiklių fazės perstumiamos laike taip, jog tarpusavyje sumuodamosios srovės, maksimaliai eliminuoja pulsacijas prieš ir po GKK.

Fazių perdengimo galimybė yra pagrindinė priežastis 4 modulių panaudojimui. Kaip minėta anksčiau keitiklio ciklo periodas yra $10\mu s$. Naudojant fazių perdengimą kiekvieno keitiklio ciklo pradžia yra perstumta $2,5\mu s$.

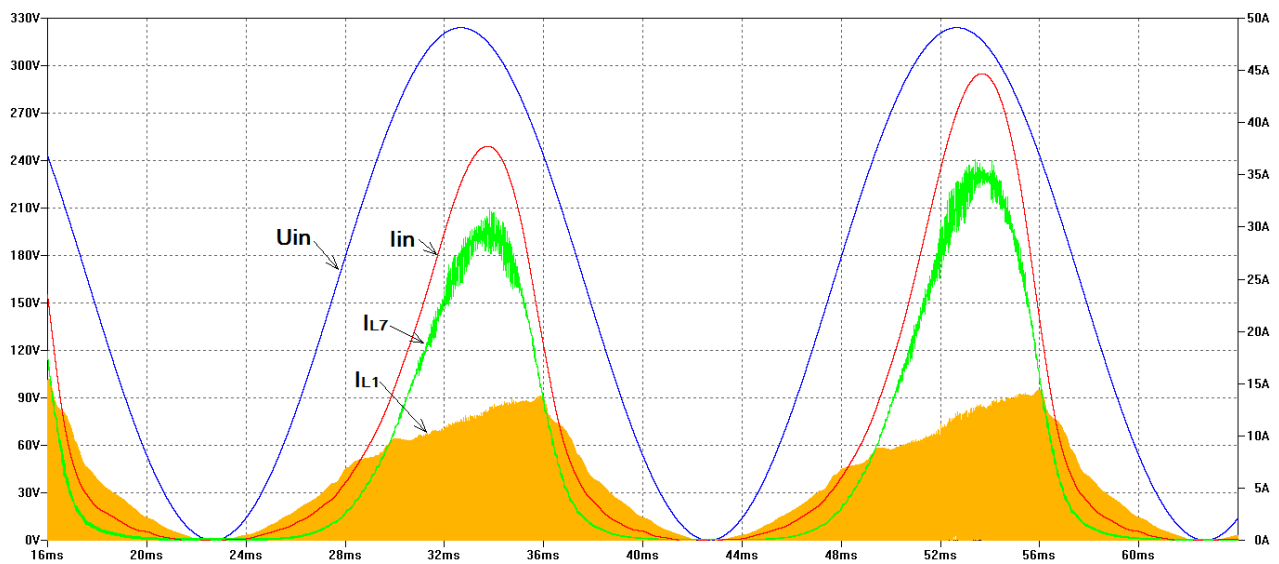


3.9 pav. GKK visų modulių veikimo laikinė diagrama

3.9 pav grafiškai pavaizduotas GKK veikimas. $10\mu s$ pradeda tekėti srovė pirmuoju GKK moduliu. Po $2,5\mu s$ paleidžiamas antrasis ir t.t. Kaip matome iš funkcijos I_{in} , susisumavus visų 4 modulių įtekančioms srovėms, bendros įtekančios srovės pulsacijų amplitudė lieka apie 4A (prie maksimalios GKK apkrovos).

Taip pat šiuo metodu išėjimo srovės pulsacijos esant toms pačioms sąlygoms be filtravimo sumažinamos iki 23,25A nepertrūkstanto pjūklo formos, nors išėjimo srovė šiuo atveju iš vieno modulio yra pjūklo formos, 24A maksimalios srovės su $6,4\mu s$ pertrauktimi.

Atliktas GKK modeliavimas (be matematinės korekcijos) kartu su tinklo filtru, esant maksimaliai apkrovai (3.10 pav.) Grafikas U_{in} vaizduoja tinklo įtampą įrenginio įėjime, o I_{in} srovę vartojamą įrenginio. Lyginant $I_{(in)}$ su $I_{(L1)}$ (srovė į vieną iš GKK modulių), matoma, kad susisumavus visų keturių blokų įėjimo srovėms ir po tinklo filtro, įėjimo srovės trikdžiai nykstamai maži.



3.10 pav. GKK visų modulių veikimo laikinė diagrama

3.10 paveiksle matoma, kad modelyje srovė nėra visiškai tiesiai priklausoma nuo tinklo įtampos, tačiau įrenginyje valdymo algoritmas sudarytas taip, kad srovės proporcingumas įtampai gali būti koreguojamas.

3.5 Budintis maitinimo blokas

Budintis maitinimo blokas, tai maitinimo šaltinis, kuris įjungiamas į tinklą bendru prietaiso įjungimo jungikliu. Iš BMB pradedami maitinti visi mikrokontrolieriai, kurie pradeda GS paleidimą. Nesant tinkamoms sąlygoms, GS nepaleidžiamas, tačiau indikacija displėjuje apie būseną lieka. Veikiant GS, BMB maitina mikrokontrolierius, GKK ir PMB valdymo grandines, AİGS valdymo modulius ir ĮB. Atskiro maitinimo šaltinio konstrukcija pasirinkta įvertinus, kad:

- Visoms aukščiau išvardintoms grandims nereikalinga didelė galia, apkrova santykinai su PMB stabili, o stiprintuvas pilnai funkcionuoja (iki 11,3V ŽİGS maitinamas iš BMB), todėl stiprintuvui esant ramybės būsenoje (bendra galia į apkrovą neviršija 30W) galimas PMB išjungimas. Taip sumažinami elektromagnetiniai trikdžiai, padidinamas NK, sumažinami triukšmai išėjime.
- Naudojant atskirą maitinimo šaltinį galimas daug stabilesnis, pakopinis GS įjungimo procesas. Dėl silpnesnių pereinamųjų procesų padidinamas įrenginio patikimumas, nereikalingas mechaninis išėjimo atjungimas įjungimo metu.
- Suveikus temperatūrinėms apsaugoms ir išjungus GKK, PMB ir AİGS, išlieka maitinimas priverstiniam aušinimui.

Maitinimo blokas turi užtikrinti iki 120W bendrą galia. Pagrindiniai vartotojai ŽİGS (iki 60W), ventiliatoriai (iki 12W) ir tranzistorių valdikliai (iki 40W). Naudojama *flyback* topologija, TOPSwitch integrinio grandyno pagrindu, su optiškai izoliuotu grįžtamu ryšiu.

Ijungus įrenginį į maitinimo tinklą, BMB gamina stabilizuota 5V ir nestabilizuota 18V įtampas. 5V naudojami GKK ir PMB kontrolių maitinimui, kadangi GKK turi atlikti ir minkšto paleidimo funkciją, todėl valdymo maitinimas turi būti užtikrintas anksčiau nei įjungiamas maitinimas iš tinklo. 18V įtampa naudojama GKK ir PMB galios tranzistorių valdikliams (*angl.* driver) maitinti.

3.6 Pagrindinis maitinimo blokas

3.6.1 Pagrindinio maitinimo bloko funkcija

Pagrindinis maitinimo blokas (PMB) atlieka tik vieną funkciją – maitina AİGS. Sprendimas nenaudoti PMB kitų funkcinių blokų maitinimui priimtas dėl šių priežasčių:

- Siekiant išvengti viso GS įtampų fluktuacijų - AİGS yra didžiausią energijos kiekį vartojantis funkcinis blokas ir vienintelis, kurio apkrova priklauso tiesiogiai nuo stiprinamo signalo, todėl vartojamos srovės sukeltos fluktuacijos moduliuoja PMB maitinimo įtampas, kurios sukelia intermoduliacinius iškreipimus.
- Dėl didelės galios sukuriama dideli srovės per transformatorių komutavimo triukšmai
- Galimas įtampos valdymas – jei ribota leistina srovė iš tinklo ar nustatomas galios ribojimas į apkrovą, galimas AİGS maitinimo įtampos sumažinimas, padidinant NK (sumažinant komutavimo nuostolius AİGS) ir sumažinant kuriamus elektromagnetinius trikdžius.
- Galimas pakopinis sistemos įjungimas (3.3 skyrius).
- Būtų galimas įtampos valdymas pagal maksimalų stiprinamo išėjimo signalo lygį, tačiau tam reikalingas didelis PMB įtampos užaugimo greitis ir valdymo algoritmas gebantis prognozuoti maksimalų įtampos poreikį.

3.7 Aukštos įtampos galios stiprintuvas

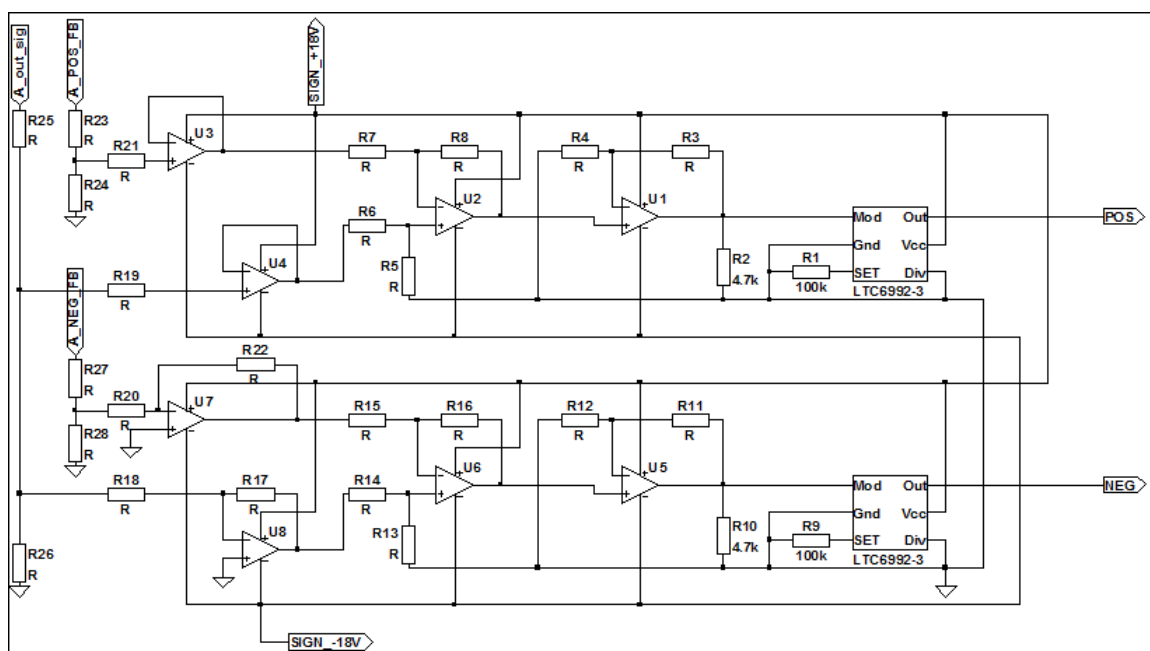
Aukštos įtampos galios stiprintuvo (AİGS) funkcija šiame įrenginyje – moduluoti nuolatinę įtampą iš PMB, pagal valdymo signalą. Stabilizuotos +185V ir -185V įtampas, panaudojant impulso pločio moduliaciją, valdomos nuo +12 iki +185V ir atitinkamai neigiama įtampa nuo -12V iki -185V. Minimalus reikalingas įtampos užaugimo greitis - 23.25V/μs (kai signalo dažnis 20kHz). Esant 4Ω apkrovai, maksimali srovė – 46,25A. Vertinant blogiausią atvejį - virš 68A, kadangi atlikus apžvalgą nustatyta, jog nominalaus 4Ω impedanso garsiakalbių, realus impedansas (priklausomai nuo dažnio) siekia mažiau 2,7Ω.

Suprojektuotas AİGS sudarytas iš dviejų modulių – AİGS valdymo modulio ir galios modulio. AİGS galios modulių žemės potencialas yra lygus lauko tranzistorių, komutuojančių

AİGS maitinimo įtampa ($\pm 185\text{V}$), ištakų potencialams. Neigiamos įtampos petyje AİGS galios modulio žemės potencialas visada sutampa su neigiama maitinimo įtampa (-185V). Teigiamos įtampos petyje AİGS galios modulio žemės potencialas nėra stabilus ir kinta priklausomai nuo AİGS išėjimo įtampos. Dėl šios priežasties AİGS galios modulių maitinimo įtampos izoliuotos magnetiniu lauku, o valdymo signalas optiškai.

3.7.1 Aukštos įtampos galios stiprintuvo valdymo modulis

AİGS valdymo modulis – žemos įtampos galios stiprintuvo (ŽİGS) išėjimo signalo atšakojimas, apdirbimas ir konvertavimas į IPM signalą. Modulis sudarytas iš dviejų analogiškų dalių, tik viena IPM signalą generuoja pagal teigiamą pusperiodį, kita pagal neigiamą.



3.12 pav. AİGS valdymo modulis struktūrinė schema

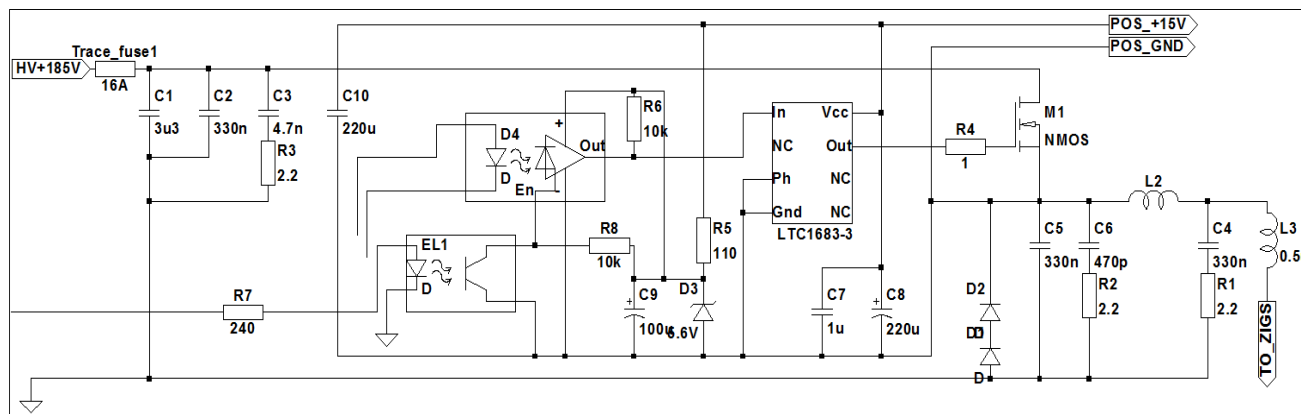
ŽİGS išėjimo signalas dalijamas į AİGS valdymo modulis įėjimą (3.12 pav. A_out_sig) ir amplitudė padalijama 36 kartus. Toliau signalas patenka į kartotuvus, iš kurių vienas invertuojantis. Kadangi generatorius LTC6992-4 valdomas tik teigiama įtampa žemės atžvilgiu, todėl invertavus įėjimo signalą, po keitiklio eliminuojami skirtingi pusperiodžiai. Taip pat apdorojami grįžtamo ryšio signalai. Grįžtamo ryšio signalas dalijamas nuo AİGS išėjimo.

LTC6992-4 valdymo ribos IPM moduliacijai yra nuo 5% iki 100%, todėl nepriklausomai nuo atraminio signalo, ŽİGS maitinimo įtampa nenukris žemiau 9.25V ($185\text{V} \cdot 5\%$). Kadangi ŽİGS minimali maitinimo įtampa užtikrinanti stabilų darbą yra 8.2V , todėl 9.25V pastovios maitinimo įtampos pakaktų, tačiau siekiant stabilizuoti pereinamuosius procesus apkrovus GS reaktyvine apkrova, sumažinti triukšmus ir šiek tiek padidinti NK, ŽİGS maitinimo įtampai nukritus apytiksliai mažiau 11.3V , maitinimas perjungiamas iš BMB.

Dėl interferencijos su kitais funkciniais blokais, pasirinktas 625kHz IPM dažnis. Siekiant užtikrinti tikslų garso signalo atkartinimą reikalingas kuo aukštesnis dažnis, tačiau aukštos įtampos galios stiprintuvo galios modulyje esančių raktų charakteristikos ženkliai blogėja komutavimo dažnį didinant virš 650kHz, todėl dažnis pasirinktas, atsižvelgiant į interferenciją su GKK (100kHz, 200kHz arba 400kHz) ir PMB (150kHz) darbo dažniais, kad jų interferencijos produktai turėtų mažesnę įtaką akustiniam spektrui.

3.7.2 Aukštos įtampos galios stiprintuvo galios modulio projektavimas ir tyrimas

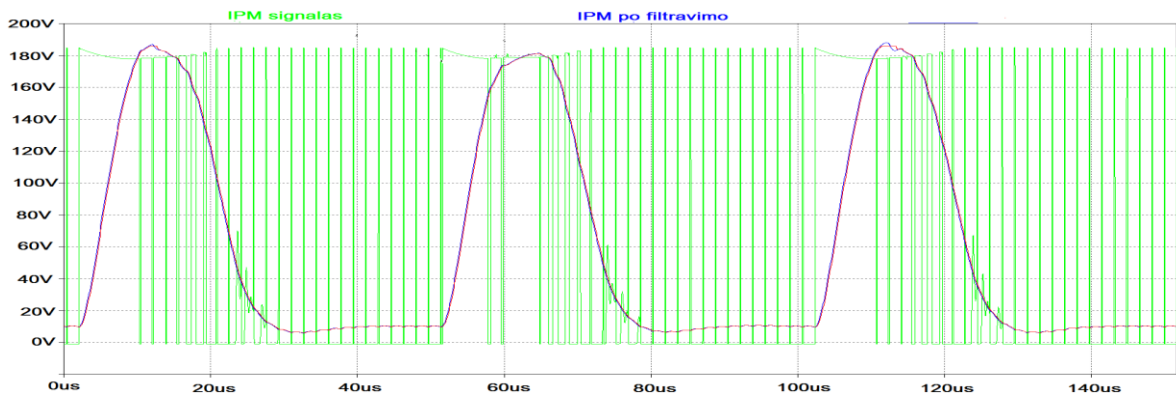
AİGS galios modulio paskirtis – pagal AİGS valdymo modulio sugeneruota IPM signalą, komutuoti pagrindines AİGS maitinimo įtampas ($\pm 185V$) ir žemo dažnio filtro pagalba atkurti AİGS įėjimo signalo formą.



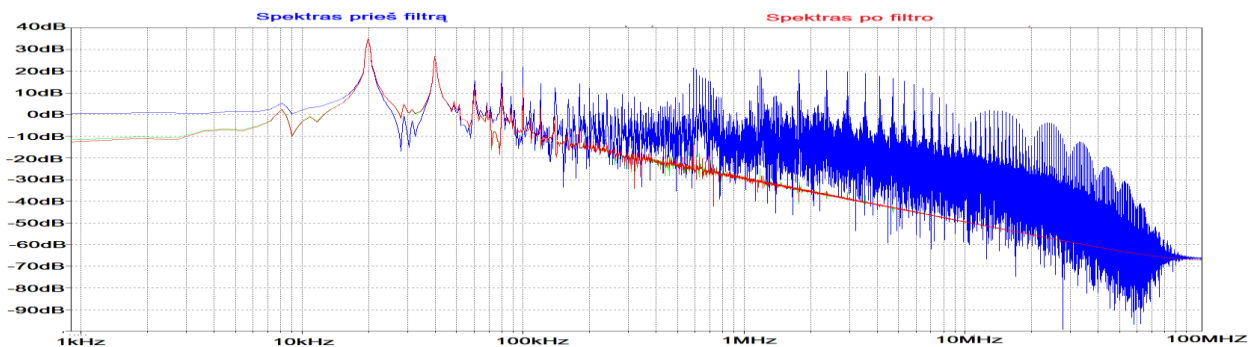
3.13 pav. AİGS galios modulio struktūrinė schema

Komutacijai naudojami IXFN73N30 lauko tranzistoriai (3.13 pav M57), valdomi LTC1683-3 valdikliai. Užtūros srovė ribojama 1Ω rezistoriumi. Šiems tranzistoriams privalo būti užtikrintas ypatingai geras aušinimas, kadangi juose išsiskirianti galia siekia 96W (esant 4Ω apkrovai, stiprinant harmoninį signalą, maksimalia amplitude). Atsižvelgiant į tranzistoriaus charakteristikas, jo sąlyčio su radiatoriumi paviršiaus temperatūra neturėtų viršyti 80°C.

Viena sudėtingiausių dalių projektuojamame įrenginyje – AİGS filtras. Filtras turi slopinti IPM dažnio dedamąją ir harmonikas, užtikrinti kuo mažesnę įtaką garsiniam diapazonui kintant apkrovai (nuo 2,7Ω iki 10Ω) bei kuo silpnesnius pereinamuosius procesus. Filtro projektavimui buvo naudojami matematiniai filtro skaičiavimai, modeliavimas ir nustačius apytiksles reikšmes eksperimentai su realiais elementais, kadangi ekvivalentaus modelio sudarymas sudėtingas. Vienas esminių šio filtro parametrų - filtro kokybė. Siekiant išvengti pereinamųjų procesų sukeltų reiškinių, reikalingas tikslus filtro kokybės derinimas.



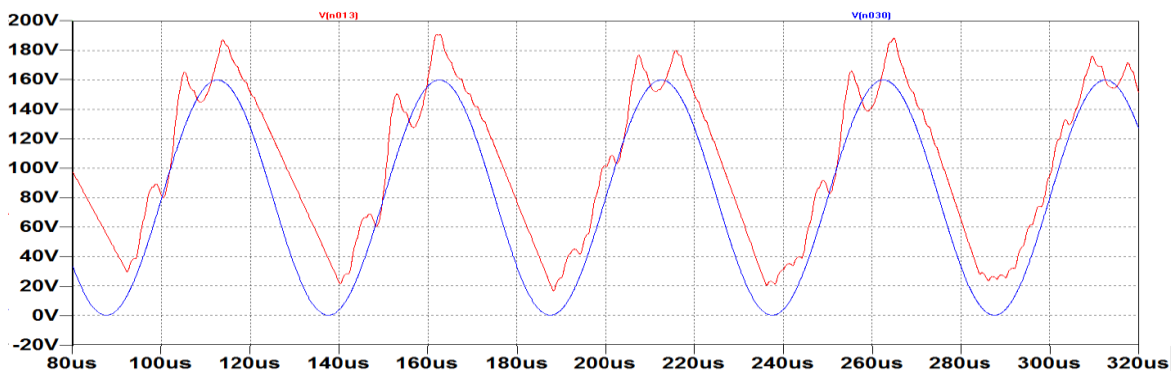
3.14 pav. AIGS signalo forma prieš ir po filtro



3.15 pav. AIGS signalų spektrai prieš ir po filtro stiprinant 20kHz harmoninį signalą

Galima išskirti pagrindines problemas su kuriomis susidurta projektuojant AIGS:

- 1) AIGS išėjimo signalo fazės poslinkis po filtro. AIGS įėjimo signalas paimamas nuo ŽIGS išėjimo, todėl siekiant palaikyti kuo mažesnę viršitampį AIGS išėjime ŽIGS atžvilgiu, reikalingas kuo mažesnis fazės poslinkis. Šiuo metu pasiektas 7 fazės poslinkis stiprinant 20kHz harmoninį signalą.
- 2) AIGS problemos apkrovus realia apkrova. Tyrimams naudotas garsiakalbio dėžė su fazoinvertoriumi modelis (6.2 priedas). Apkrovus stiprintuvą minėta modeliuota apkrova, iškraipomas AIGS išėjimo signalas (4pav). Žemų dažnių garsiakalbiai pasižymi dideliu ritės induktyvumu, todėl aukštų dažnių juostoje ženkliai padidėjęs impedansas išderina AIGS filtrą, kuris derintas 4Ω-8Ω apkrovai.



3.16 pav. AIGS signalo forma po filtro apkrovus induktyvine apkrova, be netiesinio neigiamo grįžtamo ryšio.

AİGS valdomas iš pagrindinio mikrokontrolerio (komutuojamas signalo perdavimas iš AİGS valdymo į galios modulį) ir įjungiamas tik nusistovėjus visiems kitiems GS įjungimo procesams. Taip pat apsaugų suveikimo atveju išjungiamas.

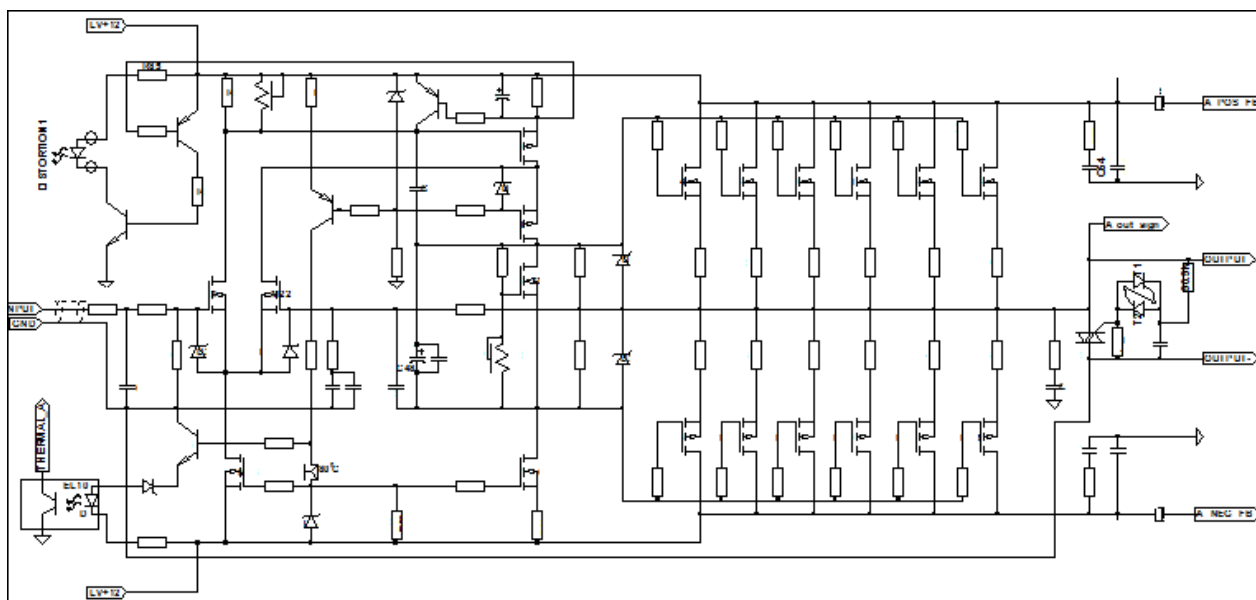
3.8 Žemos įtampos galios stiprintuvas

3.8.1 ŽİGS sandara

Projektuojamoje sistemoje žemos įtampos galios stiprintuvo funkcinis blokas, tai 3 stiprinimo pakopų, žemo dažnio AB klasės stiprintuvas. Stiprintuvą sudaro įėjimo diferencialinis laipsnis, įtampos stiprinimo pakopa ir srovės stiprinimo pakopa. Visose stiprintuvo pakopose panaudoti lauko tranzistoriai.

Tyrimais nustatyta, kad diferencialinio laipsnio aktyvieji elementai (IRFD210), turi būti susieti temperatūriškai, todėl jiems naudojamas bendras nedidelio ploto radiatorius, temperatūrų suvienodinimui. Užtūros apsaugotos 8,2V stabilitronais. Neigiamas grįžtamas sudarytas srovės stiprinimo pakopos išėjimo atžvilgiu. Stiprinimo koeficientas nuolatinei įtampai lygus 1. Ramybės srovė ir nulio balansas išėjime nustatoma rankiniu būdu. Sumontavus įtampos stiprinimo pakopos tranzistorius ant to pačių radiatorių kaip ir srovės stiprinimo pakopos, tyrimais nulio disbalanso nenustatyta (nuolatinės dedamosios įtampa išėjime svyruoja $\pm 3\text{mV}$). Reikalingai galiai užtikrinti kiekviename srovės stiprinimo pakopos petyje lygiagrečiai sujungti 6 didelio galingumo lauko tranzistoriai IRFP240 ir IRFP9240. Dėl geresnio šiluminio laidumo N kanaliniai ir P kanaliniai tranzistoriai montuojami ant atskirų radiatorių jų neizoliuojant. Radiatoriai izoliuojami nuo korpuso.

Dėl patikimumo kiekvienas ŽİGS turi atskirus termojungiklius, kurie komutuoja diferencialinės ir įtampos stiprinimo pakopos srovės generatorius. Jungikliai montuojami į tarpą tarp galinių stiprinimo pakopų N ir P kanalo pečių radiatorių. Radiatorių pasiekus 90°C generatoriai išjungiami ir visi tranzistoriai įvedami į atkirtos būseną, paduodamas signalas į valdymo bloką. Dėl potencialų skirtumo, signalai izoliuoti optiškai. Temperatūrai nukritus ŽİGS automatiškai grįžta į normalų režimą.



3.17 pav. ŽIGS struktūrinė schema

3.8.2 Nuolatinės dedamosios apsauga

GS visos stiprinimo pakopos surištos tarpusavyje neigiamu grįžtamu ryšiu, todėl bet kurios stiprinimo pakopos gedimo atveju išsibalsuoja visos pakopos – stiprintuvas nebepalaiko nulinio potencialo stiprintuvo išėjime, o daugeliu atveju susilygina su viena iš maitinimo įtampų. Per apkrovą tekanti nevaldoma srovė išskiria didelį šiluminės energijos kiekį ir sugadina elektroakustinius elementus. Ypatingai tokiomis gedimų pasekmėmis pasižymi stiprintuvai, kurių galinėje stiprinimo pakopoje naudojami lauko efekto tranzistoriai, dėl savybės gedimo atveju atsirasti laidumui tarp santakos ir ištakos.

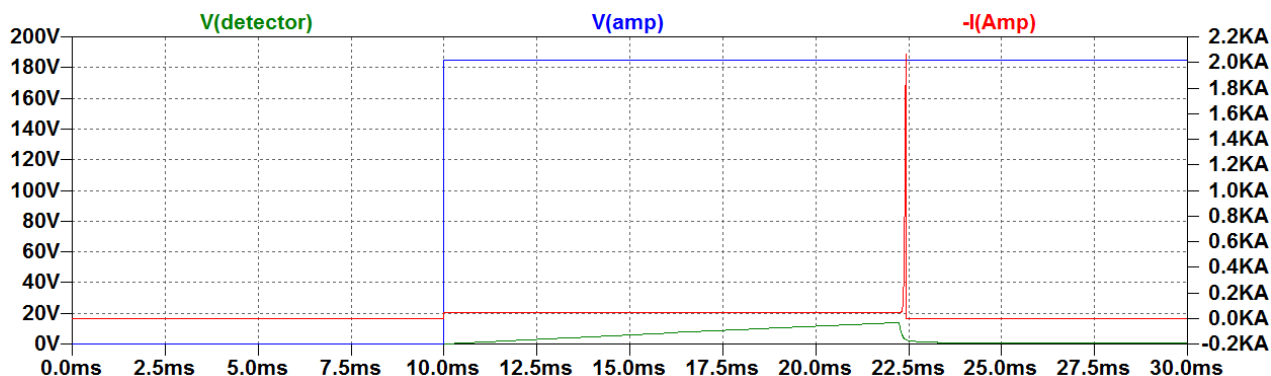
Siekiant sumažinti nuostolius gedimo atveju, naudojamos apsaugos neleidžiančios tekėti nuolatinei srovei į apkrovą. Daugumoje GS detektavus nuolatinę įtampą išėjime, apkrova atjungiama mechaninėmis relėmis. Taip pat relės naudojamos pavélintam apkrovos pajungimui ir atjungimui, siekiant išvengti pereinamųjų procesų įtakos akustinei sistemai GS įjungimo ir išjungimo momentais.

Projektuotame GS mechaninių relių atsisakyta. Toks sprendimas priimtas dėl šių priežasčių:

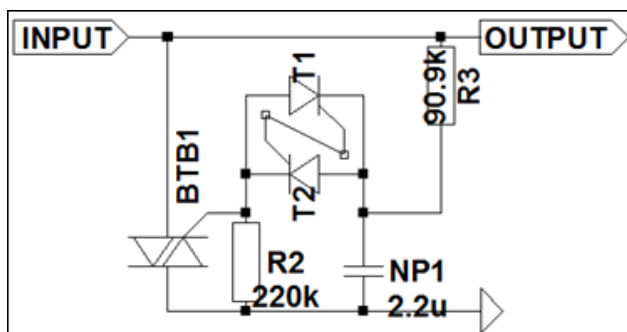
- Projektuotas įrenginys nesukelia akustiškai girdimų pereinamųjų procesų nei įjungimo, nei išjungimo metu.
- Mechaninių relių kontaktų varža mažina GS vidaus varžą ir patikimumą.
- Gedimo atveju relės kontaktais teka stipri nuolatinė srovė ir kontaktų atjungimo metu užsidegus elektros lankui, kontaktai susivirina.

Apsaugai nuo nuolatinės įtamos, suprojektuota simistorinė apsauga. Detektavus nuolatinę įtampą stiprintuvo išėjime, išėjimas užtrumpinamas, apsaugant akustinę sistemą ir sumažinant didesnių nuostolių tikimybę. Užtrumpinus išėjimą, nudega lydieji saugikliai.

Apsaugos grandinės detektoriaus charakteristika parinkta taip, kad detektorius nereaguoja nuo 20Hz harmoninio signalo, esant 185V amplitudei, o atsiradus 185V nuolatinei įtampai reakcijos laikas 22ms (3.19 pav). Grandinės schema pateikta 3.20 pav.



3.19 pav. Nuolatinės įtamos GS išėjime apsaugos suveikimo laikinė diagrama



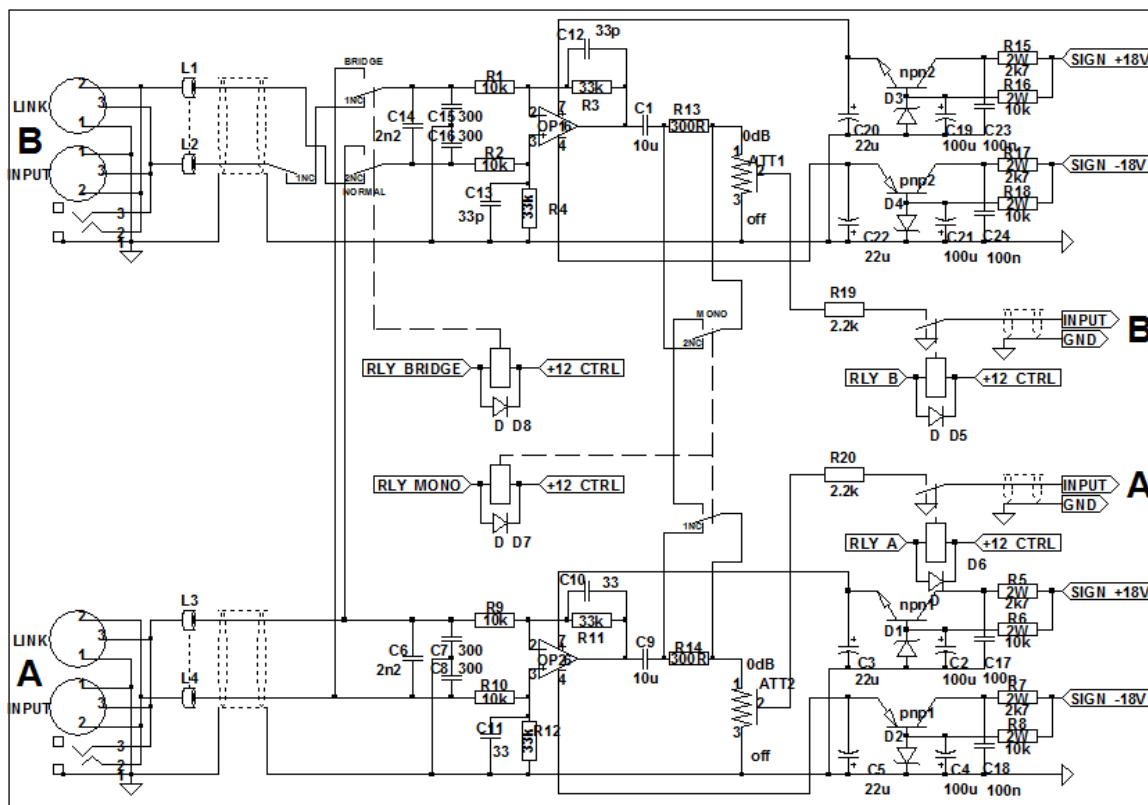
3.20 pav. Nuolatinės įtamos GS išėjime apsaugos struktūrinė schema

3.9 Įėjimų blokas

Projektuojamas komutacijų ir pirminio stiprinimo blokas, kurio paskirtis – įėjimo signalų stiprinimas, dažnių juostos apribojimas, lygio reguliavimas, signalų desimetrizavimas ir komutavimas.

Įėjimo signalas stiprinamas mažatriukšmiu, specializuotu audio tikslams operaciniu stiprintuvu. Įvairių signalų lygių suderinimui su galios stiprintuvu, parinktas stiprinimo koeficientas leidžia suderinti įvairių signalo šaltinių išėjimo įtampas su standartiniu projektuojamo galios stiprintuvo jautrumu +4dBu (0dBu=0,775V; +4dBu =1,23V). Įėjimo signalai paduodami nuo ant prietaiso korpuso sumontuotų jungčių ekranuotu mažos talpos kabeliu į įėjimo fazės apgręžimo reles, per diferencialinių ir bendros žemės trikdžių filtras į operacinių stiprintuvų įėjimus. R153 ir

R154 kompensuoja signalo amplitudės padidėjimą sumuojant abiejų kanalų signalus. Sustiprintas signalas patenka į signalo lygio reguliatorius, užtildymo reles ir į ŽİGS.



3.21 pav. Įėjimų bloko struktūrinė schema

3.10 Valdymo blokas

Valdymo bloko (VB) pagrindinis elementas – mikrokontroleris valdantis visus kitus GS blokus bei sudarantis vartotojo sąsają. Vartotojo sąsaja leidžia stebėti GS parametrus ir kai kuriuos valdyti. Vartotojas GS valdo klaviatūros pagalba, rezultatai gražinami grafiniame ekrane. Nuo kitų blokų valdymo blokas atskirtas galvaniškai, optiškai ar per transformatorių bei mechanines reles.

Pagrindinės VB funkcijos:

- GS į tinklą įjungimo ir išjungimo sekimas
- GKK parametrų valdymas ir būsenos duomenų surinkimas
- PMB parametrų valdymas ir būsenos duomenų surinkimas
- AİGS valdymas
- Audio signalo komutavimas
- Apsaugų valdymas
- Aušinimo valdymas
- Vartotojo sąsajos realizavimas

Trečiojo skyriaus apibendrinimas

- Be GKK (kaip įtampą aukštinančio keitiklio) suprojektuoti techninėse sąlygose nurodytos galios GS jungiamo į vienos fazės maitinimo tinklą (iki 32A) suprojektuoti neįmanoma. Tinklo dažnis per žemas, kad būtų įmanoma sukaupti įrenginyje energijos kiekį, kuris gali būti reikalingas atiduoti į apkrovą laiko momentu, kai įtampa tinkle žemesnė už įtampą talpoje ir energija iš tinklo nėra paimama.
- Nustatyta, kad didžiausios problemos su kuriomis susiduriama projektuojant GS kyla dėl apkrovos nestabilumo ir visiško nenusipėjamumo - reikalinga daug greitesnė reakcija į pokyčius (įtampos stabilizavimas, srovės ribojimas) ir dideli stabilizavimo dinaminiai diapazonai. Be to mažėja NK ir prastėja GK, kai stengiamasi kuo greičiau stabilizuoti visus maitinimo procesus, nes nežinoma trukmė iki kito energijos poreikio šuolio.
- Panaudojant MMĮ technologiją projekte pasiektas reikiamas dažnių juostos plotis, bet didesnis sistemos stabilumas nuo komponentų parametrų nuokrypio ir didesnis NK (dėl galimos mažesnės įtampos virš išėjimo signalo įtampos, kadangi padidinus filtro slopinimo dažnį sumažėtų fazės poslinkis) būtų galimas padidinus IPM moduliuojančios AB klasės galios stiprintuvo maitinimo įtampas dažnį.

4. IŠVADOS

- 1) Ištyrus skirtingų klasių galios stiprintuvų NK nustatyta, kad NK negali būti išreiškiamas konkrečiu koeficientu ir stipriai priklauso nuo maksimalios galios dalies atiduodamos į apkrovą.
- 2) Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą ir komercinių GS tyrimus patvirtinta teorija apie skirtingų klasių GS stiprinamo signalo kokybinius parametrus – tirtų AB ir H klasės stiprintuvų signalo kokybiniai parametrai ženkliai geresni nei D klasės.
- 3) Atlikus įvairių muzikinių signalų analizę nustatyta, kad signalų vidutinė amplitudė ir maksimali (AK) skiriasi nuo 2,75 iki 12,74 karto (vidurkis – 5,35). Atitinkamai GK nuo 7,59 iki 162,4 (vidurkis – 35,2).
- 4) Nustatyta, kad to paties signalo ribotos dažnių juostos vidutinė energija visada mažesnė už pilno akustinio spektro signalo.
- 5) Pasinaudojant muzikinių signalų savybe, jog maksimali momentinė ir vidutinė galia vidutiniškai skiriasi 35,2 karto, optimizuotas projektuojamo galios stiprintuvo maitinimo blokas. Nominali galia sumažinta 4 kartus lyginant su stiprintuvais turinčiais tinklo dažnio transformatorius ir išlaikant tą patį fluktuacijų lygį.
- 6) MMI technologijos pagalba, pagal kompiuterinį modeliavimą AB klasės galios stiprintuvo NK padidintas apie 3 kartus, matuojant esant vidutinei galiai.
- 7) Dėl pastovių AB klasės maitinimo įtampų panaikinimo esant MMI, galiniame laipsnyje naudojant tuos pačius tranzistorius AB klasės stiprintuvo vieno kanalo nominalią galią galima padidinti nuo 1000W iki 4300W (esant 4Ω apkrovai).
- 8) Galios stiprintuvo optimizavimas leido maždaug dvigubai sumažinant įrenginio tūrį, apie 3 kartus sumažinant svorį, pasiekti mažesnę energijos suvartojimą ir tolygiau apkrauti maitinimo tinklą, lyginant su anksčiau suprojektuotu GS, kurio dalis šiame darbe panaudota kaip ŽIGS blokai.
- 9) Stiprinant muzikinius signalus ir siekiant išlaikyti aukštą GK, nenaudingai išnaudojama akumuliacinė talpa kaupianti energiją iš tinklo. Problemas sukelia energijos poreikio

netolygumas ir neprognozuotumas, kadangi akumuliacinė talpą siekiama užpildyti, nepriklausomai nuo energijos poreikio momento, o jei sukaupta energija nesuvartojama, sumažėja GK.

Galimi tolimesni darbai

- Įrenginyje naudojamų komponentų ir topologijos derinimas elektromagnetinio suderinamumo atžvilgiu.
- Įrenginio aušinimo sistemos tyrimas ir projektavimas
- Įrenginio korpuso ir kitų mechaninių komponentų projektavimas
- Valdymo algoritmų optimizavimas
- AIGS pakeitimai, leidžiantys apkrauti GS 2Ω apkrova

5. LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. CORDELL B. Designing Audio Power Amplifiers – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011. – 641 p.
2. BALLOU GLEN M. Handbook of Sound Engineers. Third Edition - USA: Focal Press, 2002. – 1553p.
3. G. RANDY SLONE TAB Electronics Guide To Understanding Electricity and Electronics. Second Edition – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc 2000. – 460p.
4. JOHN LINSLEY HOOD Valve and Transistor Audio Amplifiers – Great Britain. 2006. 250p.
5. G. RANDY SLONE High-Power Audio Amplifier Construction Manual - USA: The McGraw-Hill Companies, Inc 476p.
6. DOUGLAS SELF Audio Power Amplifier Design Handbook – Oxford:Newnes 2002. 427p.
7. AGILENT TECHNOLOGIES DC Power Supply Handbook. Application Note 90B - Agilent Technologies. 126psl
8. ERIC GAALAAS Class D Audio Amplifiers:What, Why, and How - Analog Dialogue 40-06, 2006 7psl
9. BOB METZLER Audio Measurement Handbook – Beaverton: Audio Precision, Inc. 2005 171psl
10. WALT JUNG Practical Circuit for Quiet Audio Transmissions – Norwood: Analog Devices 1997
11. DAVID DAVENPORT Audio Component Grounding and Interconnection - 2010
12. BARTKEVIČIUS V., DOSINAS A. Taikomoji elektronika: vadovėlis. Kaunas 2012, p. 93 – 157.
13. ELLIOT R. Heatsinks. [tinkle].[žiūrėta 2014. 05.15]. Prieiga per internetą: <<http://sound.westhost.com/heatsinks.htm>>
14. DOUGLAS SELF Audio amplifier power supply design - Part 1: Power supply types & transformer considerations [tinkle].[žiūrėta 2014. 11.19]. Prieiga per internetą: <<http://www.eetimes.com/design/audio-design/4204775/Audio-amplifier-power-supply-design---Part-1--Power-supply-types---transformer-considerations/>>
15. JANUŠONIS S. Radijo mėgėjo vadovas - Vilnius: Valstybinė politinės ir mokslinės literatūros leidykla. 1960 606psl.
16. HOROWITZ P., HILL W. The Art of Electronics 2nd edition – Cambridge: Cambridge University Press 1994 1125psl.

17. Calculating spacing between pcb traces for various voltage levels [tinkle]. [žiūrēta 2014. 03.12]. <http://www.smeps.us/pcbtracespacing.html>
18. IPC 2221 Generic Standart on Printed Board Design [tinkle]. [žiūrēta 2014. 05.15]. Prieiga per internetą: <http://classes.soe.ucsc.edu/cmpe174/Fall12/References/AppNotes/IPC-2221.pdf>
19. IPC 9592 Performance Parameters for Power Conversion Devices [tinkle]. [žiūrēta 2014. 05.15]. Prieiga per internetą: http://www.ipc.org/3.0_industry/3.5_councils_associations/3.5.0_ipc/spvc/0607/ipc-9592-final-draft-0407.pdf
20. SCOTLAND D. Power amplifier design criteria – TAG McLaren Audio; 2000 10psl.
21. Texas instuments .AN-1849 An Audio Amplifier Power Supply Design [tinkle]. [žiūrēta 2015.04.15]. <http://www.ti.com/lit/an/snaa057b/snaa057b.pdf>
22. HAVILAND B.D. the transistor in a century of electronics [tinkle]. [žiūrēta 2015. 03.15]. <http://www.nobelprize.org/educational/physics/transistor/history/>
23. PKN Controls. 3-phase series [tinkle]. [žiūrēta 2014. 05.12]. http://www.pknc.com/3phase_eng.html
24. Rane Corporation Rane note-Audio specifications 8psl. [tinkle]. [žiūrēta 2015. 04.11]. http://www.eie.polyu.edu.hk/~enyhchan/audio_spec.pdf
25. JUN YU, MENG TONG TAN, STEPHEN M. COX, WANG LING GOH Time-domain Analysis of Intermodulation Distortion of Closed-loop Class D [tinkle]. [žiūrēta 2015. 05.05]. <http://eprints.nottingham.ac.uk/1887/1/yutancoxgoh.pdf>
26. Yamaha Commercial Audio . Learn More About EEEngine. [tinkle]. [žiūrēta 2013. 03.07]. http://www.yamahaproaudio.com/global/en/training_support/selftraining/technology/eeengine.jsp
27. Martin Audio. MAQ User Manual [tinkle]. [žiūrēta 2013. 03.07]. <https://martin-audio.com/userguides/GUIDES/MANUALS/MAQSerV1.pdf>
28. QSC. GXD Series [tinkle]. [žiūrēta 2013. 03.07]. http://qsc.com/files/6014/1442/8864/QSC_GXD_Spec_Sheet.pdf
29. Crest. CA series [tinkle]. [žiūrēta 2013. 03.07]. <http://www.peaveycommercialaudio.com/media/pdf/caman11-25-97.pdf>
30. Powersoft. K series User Manual. [tinkle]. [žiūrēta 2013. 03.07]. <http://www.powersoft-audio.com/en/docman/56-k-series-user-guide/file>

6. PRIEDAI

6.1 Garso įrašų analizės duomenys

Numeris	Pavadinimas	Skirstymo grupė	Signalio trukmė, s	Signalio dalis, kai amplitudė lygi 0, %	Amplitudės koef.	Amplitudės koef., dB	Galios koef.	Signalio dalis virš vidutinės amplitudės, %	Vidutinė galia, jei maitinimo įtampa 185V	Vidutinės galios santykis su RMS reikšme, jei maitinimo įtampa 185V	Vidutinės galios dalis nuo nominalios stiprintuvo galios	Dinaminis diapazonas
1	Queen -A Kind Of Magic	1	120	1.2	11.08	20.89	122.8	25.34	70	61.8	1.6	90.3
2	Rammstein - Links 2 3 4	1	220	0.0	3.25	10.23	10.5	28.17	811	5.3	19.0	90.1
3	Tina Turner - The Best	1	330	0.1	4.49	13.05	20.2	26.67	424	10.2	9.9	90.2
4	ACDC - Thunderstruck	1	293	0.2	3.99	12.01	15.9	28.01	538	8.0	12.6	90.3
5	B. Adams - Can't Stop This Thing We Started	1	270	0.5	3.34	10.48	11.2	29.75	765	5.6	17.9	90.3
6	Electric light orchestra - Rock 'n' roll is king	1	218	0.0	6.11	15.72	37.3	28.75	229	18.8	5.4	90.3
7	Metallica - Whiskey In The Jar	1	305	0.5	3.14	9.94	9.9	30.78	867	5.0	20.3	90.3
8	The Prodigy - Firestarter	1	280	0.0	3.60	11.13	13.0	25.85	660	6.5	15.4	90.3
9	Whitesnake - Still Of The Night	1	398	0.1	3.82	11.64	14.6	29.29	586	7.3	13.7	90.2
10	Rebelheart & S.Povilaitis - Svieski Man Vel	1	206	1.6	4.68	13.41	21.9	26.32	390	11.0	9.1	90.3
11	Michael Jackson - Billie Jean	2	293	0.4	2.76	8.81	7.6	27.91	1125	3.8	26.3	90.3
12	Hiperbolė - Himnas žemei	2	290	0.1	9.17	19.25	84.1	23.60	102	42.3	2.4	90.3
13	Rondo - Tu Palauk Sustok	2	227	0.9	4.40	12.87	19.4	25.32	442	9.7	10.3	90.3
14	16Hz - Autostrada Vilnius-Kaunas	2	239	1.4	4.48	13.02	20.0	29.19	427	10.1	10.0	90.3
15	F.R. David - Words Don't Come Easy	2	208	0.1	5.78	15.24	33.5	27.12	256	16.8	6.0	90.3
16	Haddaway - What is love	2	270	0.9	5.60	14.97	31.4	27.88	273	15.8	6.4	90.3
17	Kastytis Kerbedis - Del taves galiu	2	216	1.3	3.41	10.64	11.6	27.37	738	5.8	17.2	90.3
18	M.Carey - All i want for christmas is you	2	242	0.2	4.90	13.81	24.0	27.71	356	12.1	8.3	90.3
19	Ricchi e Poveri- Mama Maria	2	177	1.5	5.42	14.68	29.3	29.38	292	14.8	6.8	87.0
20	Rytis Cicinas - Meiles laivas	2	259	1.6	3.74	11.46	14.0	31.05	611	7.0	14.3	90.3
21	Sel - Aš žiūriu į tave pasauli	2	294	0.3	4.21	12.48	17.7	20.87	484	8.9	11.3	90.3
22	S.Twain - Whose Bed Have Your Boots Been Under	2	264	0.0	6.65	16.45	44.2	27.19	194	22.2	4.5	90.3
23	Smokie-Have You Ever Seen The Rain	2	253	0.0	5.18	14.28	26.8	27.19	319	13.5	7.5	90.3
24	Zucchero - Baila Morena	2	249	1.8	3.90	11.81	15.2	28.89	564	7.6	13.2	90.3
25	Celine Dion - My heart will go on	3	281	0.2	5.37	14.61	28.9	23.94	296	14.5	6.9	90.3
26	Katie Melua - Nine million bicycles	3	195	0.2	6.51	16.28	42.4	25.28	202	21.3	4.7	90.3
27	A.Bocceli, S.Brightman - Time To Say Goodbye	3	248	1.2	4.38	12.84	19.2	27.81	445	9.7	10.4	90.3
28	Boyzone - No Matter What	3	274	0.3	4.67	13.39	21.9	26.65	392	11.0	9.2	90.3
29	Eric Clapton - Tears in Heaven	3	273	0.4	5.03	14.03	25.3	26.79	338	12.7	7.9	90.3
30	Extreme - More Than Words	3	334	0.1	10.19	20.17	103.9	24.25	82	52.3	1.9	88.0
31	Madonna - Don't Cry For Me Argentina	3	338	0.9	8.83	18.92	78.0	20.71	110	39.2	2.6	90.3
32	Pupo - Un amore grande	3	219	1.1	4.06	12.17	16.5	28.35	520	8.3	12.1	86.0
33	Rod Stewart - Have I Told You Lately	3	244	0.0	9.70	19.73	94.0	23.95	91	47.3	2.1	88.0
34	Michael Buble - Something Stupid	3	178	0.2	3.49	10.87	12.2	29.04	701	6.1	16.4	90.3

35	The Chainsmokers - Selfie	4	224	0.1	2.75	8.80	7.6	31.17	1128	3.8	26.4	90.3
36	PSY - Gangnam Style	4	219	0.5	2.88	9.18	8.3	29.80	1034	4.2	24.2	90.3
37	Flo Rida - Whistle	4	225	0.3	3.90	11.83	15.2	28.45	562	7.7	13.1	90.3
38	Dj assad - Everybody clap.mp3	4	260	0.2	3.55	11.01	12.6	27.73	678	6.3	15.9	90.3
39	Donny Montell - Artoju Himnas	4	217	0.5	3.20	10.10	10.2	29.60	835	5.2	19.5	90.3
40	Format B - Mondo Time	4	362	0.3	2.84	9.07	8.1	28.30	1060	4.1	24.8	90.3
41	Tom Dazing - Qalibrate (Inxec Remix)	4	410	0.4	3.55	11.01	12.6	23.41	678	6.3	15.8	90.3
42	Usher - Burn	4	258	0.8	4.20	12.46	17.6	23.26	485	8.9	11.3	90.3
43	Timati feat. Kalenna - Welcome to St. Tropez	4	263	0.0	2.95	9.40	8.7	29.82	982	4.4	22.9	90.3
44	Sphongle - Divine moments of truth	4	495	0.0	3.41	10.65	11.6	28.55	737	5.8	17.2	90.3
45	ABBA - Mamma Mia	5	213	0.9	9.72	19.75	94.4	23.65	91	47.5	2.1	89.9
46	Elvis Presley - Blue Suede Shoes	5	133	11.7	5.86	15.35	34.3	28.76	249	17.3	5.8	90.3
47	The Lonious monk - Solo blues piano	5	114	0.7	12.09	21.65	146.3	18.26	58	73.6	1.4	86.0
48	Smooth jazz guitar - Instrumental	5	228	0.6	8.83	18.92	77.9	26.87	110	39.2	2.6	89.6
49	Luis Dimas - Lets twist again	5	135	0.0	5.79	15.25	33.5	28.42	255	16.8	6.0	89.8
50	Vanessa Mae - Autumn LaCaccia	5	198	3.6	12.74	22.11	162.4	22.35	53	81.7	1.2	86.4
	Vidurkis		253	0.80	5.35	14.56	35.20	26.89	474	17.7	11.1	
	Min		114	0.01	2.75	8.80	7.59	18.26	53	3.8	1.2	
	Max		495	11.73	12.74	22.11	162.4	31.17	1128	81.7	26.4	

6.2 Apkrovos modelis

Įrenginio projektavimo metų naudotas realios akustinės sistemos modelis – žemo dažnio garsiakalbis uždaro tipo dėžėje su fazoinventoriumi:

- Garsiakalbis – Beyma 18P1000
- Dėžės tūris - 230l
- Derinimo dažnis – 52Hz
- Naudota arba vienas modelis (8Ω apkrova) arba du sulygiagretinti modeliai (4Ω apkrova)

