VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Gediminas Gražulevičius

KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ TYRIMAS IR TAIKYMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T

Vilnius 2004

Disertacija rengta 2000-2004 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Julius SKUDUTIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

© G. Gražulevičius, 2004

TURINYS

ĮVADAS 5
1. KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ KOKYBĖS VERTINIMO METODŲ ANALITINĖ APŽVALGA 10
1.1 Kompiuterių garso sistemų sandara ir tipai 10
1.2 Dinaminiai kompiuterių garso sistemų parametrai 13
1.2.1 ASK dinaminiai parametrai 14
1.2.2 SAK dinaminiai parametrai 18
1.3 Kompiuterių garso sistemų tyrimo metodai ir jų analizė 20
1.3.1 Vizualios kontrolės metodai 20
1.3.2 Signalo ir triukšmo santykio matavimo metodas 22
1.3.3 Priartinimo prie idealios sinusinės kreivės metodas 23
1.3.4 Histograminis (statistinis) metodas 24
1.3.5 Surištųjų histogramų metodas 25
1.3.6 Greitosios Furjė transformacijos (spektrinis) metodas 26
1.3.7 Efektyviųjų skilčių metodas 28
1.3.8 SAK dinaminių parametrų matavimo metodas 29
1.4 Programinė įranga kompiuterių garso sistemų kokybei tirti 29
1.5 Kompiuterių garso sistemų taikymas 32
1.6 Išvados 33
2. KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ KOKYBĖS TYRIMO METODAS 35
2.1 Programų paketo MATLAB taikymo galimybių tyrimas 35
2.2 Kompiuterių garso sistemų kokybės tyrimo metodo parinkimas ir pagrindimas 39
2.2.1 Bandymų skaičiaus parinkimas 44
2.2.2 Įrašymo lygio parinkimas 47
2.2.3 Triukšmų įtakos tyrimas 50
2.2.4 SAK įtakos efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimui tyrimas 51
2.2.5 Efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybių nuo dažnio matavimas 52
2.3 Kompiuterių garso sistemų atkūrimo kanalų tyrimas 55
2.4 Išvados 59

3. KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ KOKYBĖS VERTINIMO KRITERIJŲ PATIKIMUMO IR TIKSLUMO ANALIZĖ 60
3.1 Kvantavimo paklaidos skirstinys, taikant sinuso formos testinį signalą 60
3.2 Efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodas 63
3.3 Analoginių signalų formavimas ASK tyrimui 65
3.3.1 Eksponentinio signalo formavimas 66
3.3.2 Dvipolio aperiodinio signalo formavimas 67
3.3.3 Silpstančiųjų periodinių virpesių formavimas 69
3.3.4 Parazitinių parametrų įtakos įvertinimas 70
3.3.5 Suformuotų signalų taikymas 74
3.4 Išvados 77
4. KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ TAIKYMAS 78
4.1 Oscilografas 78
4.2 Spektrografas 79
4.3 Dažniamatis 80
4.4 Akustinis tachometras 81
4.5 Akustrinis tachometras-savirašis 82
4.6 Akustinio triukšmo savirašis 82
4.7 Įrenginių atpažinimas pagal garsą 84
4.8 Išvados 86
5. DARBO REZULTATAI 87
LITERATŪRA 89
1 PRIEDAS 98
2 PRIEDAS 109

ĮVADAS

Temos aktualumas

Kompiuterinės technologijos dėl savo spartaus vystymosi vis plačiau taikomos įvairiose žmogaus veiklos srityse. Viena iš tokių sričių yra *Multimedia* – aparatinių ir programinių priemonių visuma, skirta garso ir vaizdo informacijai apdoroti. Ypač išsiplėtė garso apdorojimo programinių priemonių taikymas. Mokymo, matavimų, monitoringo ir balsu valdomos sistemos, balso atpažinimas, tekstų skaitymas, rašymas diktuojant, akustinių signalų registravimas ir analizė medicinoje, kriminalistikoje, technikoje, tai toli gražu nepilnas sąrašas kompiuterių garso sistemų panaudojimo sričių [1-30]. Nemažai garso signalų apdorojimo programinių priemonių yra ir MS *Windows* operacinėje sistemoje.

Viena iš tokių yra MS *Narrator* [31]. Tai teksto skaitymo programa, skirta akliesiems arba silpnaregiams žmonėms. *Narrator* programa, taikydama kompiuterio garso sistemą, skaito aktyvaus operacinės sistemos lango turinį, meniu arba renkamą tekstą. Ji pritaikyta darbui su *Notepad*, *WordPad*, *Internet Explorer*, *Windows desktop* ir kai kuriomis *Windows* įdiegimo procedūros dalimis.

Kita programa, jau nuo seno esanti MS *Windows* operacinėje sistemoje, yra *Sound Recorder* [31]. Ši programa leidžia įrašyti, atkurti, maišyti, redaguoti garso signalus iš įvairių šaltinių (pvz.: mikrofono, kompaktinių diskų įrenginio ir kt.).

Populiari programa *Windows Media Player* [31] leidžia atkurti .wav, .wma, .mp3, .cda, .asf, .avi, .mpeg, .mpg ir kt. formatų garso ir vaizdo failus.

Šiuolaikinės kompiuterinės informacinės technologijos kelia žymiai griežtesnius reikalavimus kompiuterinei garso sistemai, ypač kai ji taikoma matavimo tikslams, kaip patogus matavimo signalų įvesties ir išvesties prievadas garso dažnių ruože. Todėl šiandien yra aktualu žinoti kompiuterio garso sistemos kokybę.

Dabar kompiuterinių garso sistemų pasirinkimas gana didelis. Tačiau garso sistemas gaminančios firmos pateikia labai nedaug informacijos apie jų kokybę. Esminės įtakos kompiuterinių garso sistemų kokybei turi analoginiai-skaitmeniniai ir skaitmeniniai-analoginiai keitikliai (ASK ir SAK). ASK efektyviųjų skilčių skaičius, tai vienas iš svarbiausių parametrų, leidžiantis objektyviai vertinti kompiuterio garso sistemos įėjimo kanalo dinamines savybes. Palyginti sudėtingas efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo algoritmas ir didelė skaičiavimų apimtis, taikant šiuolaikinius kompiuterius ir jų programinę įrangą, jau tapo neaktualūs. Tačiau pati skaičiavimo metodika, kurioje idealaus ASK kvantavimo paklaidos skirstinys, esant sinuso

formos testiniam signalui priimamas kaip vienodos tikimybės [32-63], kelia tam tikrų abejonių. Be to, reikalavimas, kad testinis signalas išnaudotų visus ASK kodus nelengvai pasiekiamas ir tai atsiliepia skaičiavimų tikslumui.

ASK tyrimui reikalingi analoginiai signalai. Lyginant šių signalų formą ASK įėjime ir išėjime galima įvertinti keitiklių statines ir dinamines charakteristikas. Suprantama, kad tokiam vertinimui signalo forma ASK įėjime turi būti tiksliai žinoma. Šiuo metu ASK testavimui dažniausiai taikomas sinuso formos signalas. Toks signalas yra geras tuo, kad tiesinė įėjimo grandinė nepakeičia jo formos. Keičiasi tik jo amplitudė ir pradinė fazė. Sinusinių virpesių generatorių pasirinkimas yra gana didelis, tačiau jų generuojamame virpesyje visuomet yra aukštesniųjų harmonikų. Ypač sunku gauti gero spektrinio grynumo sinusinį virpesį garso dažnių ruože, kur generatoriai dažniausiai yra *RC* tipo. Kita analoginio signalo forma, kuri yra patogi ASK tyrimams, tai tiesiškai didėjanti arba mažėjanti įtampa. Turint tokį testinį signalą patogu tirti ASK keitimo charakteristikos integralinį ir diferencialinį netiesiškumą, tačiau formuoti tokį signalą sudėtinga. Be to keitiklio įėjimo grandinė keičia jo formą. Testiniais signalais gali tarnauti ir pereinamieji procesai tiesinėse elektros grandinėse, tačiau šie klausimai literatūroje nenagrinėti.

Šiuolaikinės kompiuterinės garso sistemos paprastai sudarytos iš dviejų pagrindinių dalių: garso kodavimo ir dekodavimo įtaiso (KDĮ) ir skaitmeninio valdiklio. Šie įtaisai tarpusavyje sujungti specialia ryšio grandimi (angl. AC-*link*). KDĮ yra naujos architektūros kompiuterinės garso sistemos pagrindinė dalis. Pagrindinė KDĮ funkcija – garso įrašymas ir atkūrimas per specialiai tam skirtus prievadus gali būti pritaikyta ir matavimo tikslams garso dažnių ruože. Yra sukurta nemažai virtualių prietaisų: osciloskopų, generatorių, multimetrų ir kitų, panaudojančių šią galimybę. Osciloskopas ir funkcinis generatorius yra ir programų pakete MATLAB. Tokių virtualių prietaisų programuotojai nemažai dėmesio skiria jų apipavidalinimui, mėgdžiodami realių prietaisų valdymo rankenėles, mygtukus ir panašius dalykus, tuo tarpu tokios svarbios funkcijos, kaip matavimo rezultatų kopijavimas ir dokumentacija juose dažniausiai nenumatytos.

Darbo tikslas

Sukurti paprastą, nereikalaujantį specialios aparatūros kompiuterių garso sistemų ASK kokybės įvertinimo metodą ir programinę įrangą jam realizuoti. Patikslinti šiuo metu taikomą ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus matavimo metodiką. Taikant pasiūlytą metodą, ištirti naujų testinių analoginių signalų formavimo ir taikymo kompiuterių garso sistemų ASK tyrimui galimybes. Parodyti kompiuterių garso sistemų taikymo galimybes.

Darbo uždaviniai

1. Išanalizuoti kompiuterių garso sistemų kokybės vertinimo metodus ir tam skirtą programinę įrangą.
2. Ištirti klasikinį kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodą ir jį patikslinti.
3. Sukurti programinę įrangą, skirtą kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybių nuo dažnio ir amplitudės, skaičiavimui.
4. Ištirti kompiuterių garso sistemų atkūrimo kanalų charakteristikas.
5. Ištirti naujų testinių analoginių signalų formavimo ir taikymo kompiuterių garso sistemų ASK tyrimui galimybes.
6. Sukurti kompiuterių garso sistemų taikymo pavyzdžių.

Darbo metodiniai principai

Disertaciniame darbe taikomi analitiniai, skaitiniai ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Sudarytas skaitinis idealaus analoginio-skaitmeninio keitiklio modelis, patikslintas kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodas bei skaičiavimo algoritmai. Taikant šį modelį bei pasiūlytą metodą ir algoritmą, programų paketu MATLAB sukurta programinė įranga kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybių nuo dažnio ir amplitudės skaičiavimui. Gauti rezultatai analizuojami ir lyginami su rezultatais, gautais taikant klasikinę skaičiavimo metodiką, ir eksperimentinio tyrimo rezultatais.

Mokslinis naujumas ir rezultatų panaudojimas

Įrodyta, kad klasikinis ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodas reikalauja patikslinimo. Pasiūlytas naujas, nereikalaujantis specialios aparatūros kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodas. Pasiūlytos ir eksperimentiškai patikrintos eksponentinio, dvipolio aperiodinio signalo bei silpstančiųjų periodinių virpesių formavimo ir taikymo kompiuterių garso sistemų ASK tyrimams galimybės.

Parodytos kompiuterių garso sistemų taikymo matavimams galimybės. Autoriaus sukurti virtualūs prietaisai: oscilografas, spektrografas, dažniamatis, akustinis tachometras ir akustinis tachometras-savirašis dalyvavo parodoje INFOBALT ′2002 ir sulaukė lankytojų susidomėjimo.

Darbo aprobacija ir publikacijos

Pagrindiniai disertacinio darbo rezultatai pristatyti 11-oje technikos mokslų konferencijų:

- Respublikinėje antrojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Elektronika ir elektrotechnika“. Vilnius, 1999 m.;
- Tarptautinėje konferencijoje „ELEKTRONIKA ′99“. Vilnius, 1999 m.;
- Respublikinėje konferencijoje „ELEKTRONIKA ′2000“. Vilnius, 2000 m.;
- Respublikinėje ketvirtojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Elektronika ir elektrotechnika“. Vilnius, 2001 m.;
- Mokslinėje – praktinėje konferencijoje „Garso korta 2001“. Kauno technologijos universitetas. Kaunas, 2001 m.;
- Du pranešimai respublikinėje konferencijoje „ELEKTRONIKA ′2001“. Vilnius, 2001 m.;
- Respublikinėje konferencijoje „ELEKTRONIKA ′2002“. Vilnius, 2002 m.;
- Respublikinėje konferencijoje „ELEKTRONIKA ′2003“. Vilnius, 2003 m.;
- Tarptautinėje mokslinėje – techninėje konferencijoje “Проблемы электроники“. Kijevas, 2003 m.;
- Respublikinėje konferencijoje „ELEKTRONIKA ′2004“. Vilnius, 2004 m.

Disertacijos tema paskelbta 10 mokslo darbų [111-120], iš kurių 3 straipsniai – konferencijų pranešimų medžiagose [111-113], 5 straipsniai – Lietuvoje pripažintuose technikos mokslo žurnaluose [114-118] ir 2 straipsniai – recenzuojamuose užsienio technikos žurnaluose [119, 120].

Gynimui pateikiama

1. Paprastas, nereikalaujantis specialios aparatūros, kompiuterių garso sistemų ASK kokybės įvertinimo metodas ir programinė įranga jam realizuoti.
2. Kompiuterių garso sistemų eksperimentinio tyrimo rezultatai.
3. Naujų testinių signalų taikymo galimybės kompiuterių garso sistemų ASK tyrimui.
4. Kompiuterių garso sistemų taikymo pavyzdžiai.

Disertacijos struktūra ir turinys

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, darbo rezultatų apibendrinimas, literatūros ir autoriaus mokslinių darbų sąrašas, priedai.

Įvade analizuojamas pasirinktos temos aktualumas, pateikiami pagrindiniai disertacinio darbo tikslai ir uždaviniai, pateikiama disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje apžvelgiama kompiuterių garso sistemų sandara ir tipai, pagrindinių jų dalių ASK ir SAK dinaminiai parametrai ir jų vertinimo metodai, programinė įranga taikoma kompiuterių garso sistemų kokybei tirti. Aprašytas kompiuterių garso sistemų taikymas įvairiose žmogaus veiklos srityse. Čia taip pat suformuluojami disertacinio darbo tikslas ir uždaviniai.

Antrajame skyriuje aprašomos programų paketo MATLAB taikymo galimybės kompiuterių garso sistemų kokybei tirti. Pateikiamas sukurtas kompiuterių garso sistemų kokybės tyrimo metodas programų paketo MATLAB terpėje ir jį taikant atlikti kompiuterių garso sistemų kokybės tyrimai.

Trečiajame skyriuje pateikiama kompiuterių garso sistemų kokybės vertinimo kriterijų patikimumo ir tikslumo analizė, patikslintas ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodas, analoginių signalų formavimas ir taikymas ASK tyrimui.

Ketvirtajame skyriuje pateikiami sukurti programų paketo MATLAB terpėje kompiuterių garso sistemų taikymo pavyzdžiai.

Disertacinio darbo rezultatai pateikti darbo rezultatų apibendrinime.

Disertacijoje yra teksto redaktoriumi *Microsoft Word 2003* sumaketuoti ir atspausdinti 122 puslapiai teksto, 6 lentelės, 46 paveikslai, 120 bibliografijos šaltinių, 2 priedai.

1. KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ KOKYBĖS VERTINIMO METODŲ ANALITINĖ APŽVALGA

Kompiuterių garso sistemos vystėsi ir tobulėjo kartu su asmeniniais kompiuteriais (AK). Pirmieji AK turėjo tik primityvius mažos galios garsiakalbius (angl. PC *Speaker*) įspėjamiesiems bei diagnostiniams garso signalams atkurti, kurie išliko ir dabartiniuose AK. Vėliau garso atkūrimui pradėti naudoti elementarūs rezistoriniai skaitmeniniai-analoginiai keitikliai (SAK) „Covox“, jungiami prie AK lygiagrečiojo prievado (angl. *Line PrinTer* – LPT). Šios priemonės buvo skirtos tik garsui atkurti, taikant centrinį procesorių, todėl jų negalima vadinti garso sistemomis.

Kompiuterių garso sistemų istorija prasidėjo 1988 m., kai firma *Creative Labs* pateikė rinkai pirmąją pasaulyje AK garso plokštę „Game Blaster“. Tai buvo 12 balsų stereofoninis sintezatorius (po 6 balsus kiekvienam stereokanalui), skirtas muzikiniams garsams sintezuoti [64-72].

Šiuolaikinės kompiuterinės informacinės technologijos: IP telefonija, balso paštas, vaizdo konferencijos, kalbos ir muzikos sintezavimas, kalbos signalų atpažinimas, garso įrašų restauravimas, žaidimai ir kt., kelia žymiai griežtesnius reikalavimus kompiuterio garso sistemai. Be to kompiuterio garso sistema pradedama taikyti matavimo tikslams [1, 12-14], kaip patogus matavimo signalų įvesties ir išvesties prievadas garso dažnių ruože, todėl svarbu nustatyti jos kokybę.

Šiandien kompiuterių garso sistemų pasirinkimas gana didelis. Jų kainos labai įvairios: nuo keliasdešimties litų iki tūkstančio ir daugiau. Garso sistemas gaminančios firmos pateikia labai nedaug informacijos apie jų kokybę. Trūksta informacijos apie garso sistemų dažnines amplitudės charakteristikas, netiesinius iškraipymus, triukšmų lygį, analoginių-skaitmeninių ir skaitmeninių-analoginių keitiklių charakteristikas ir kt.

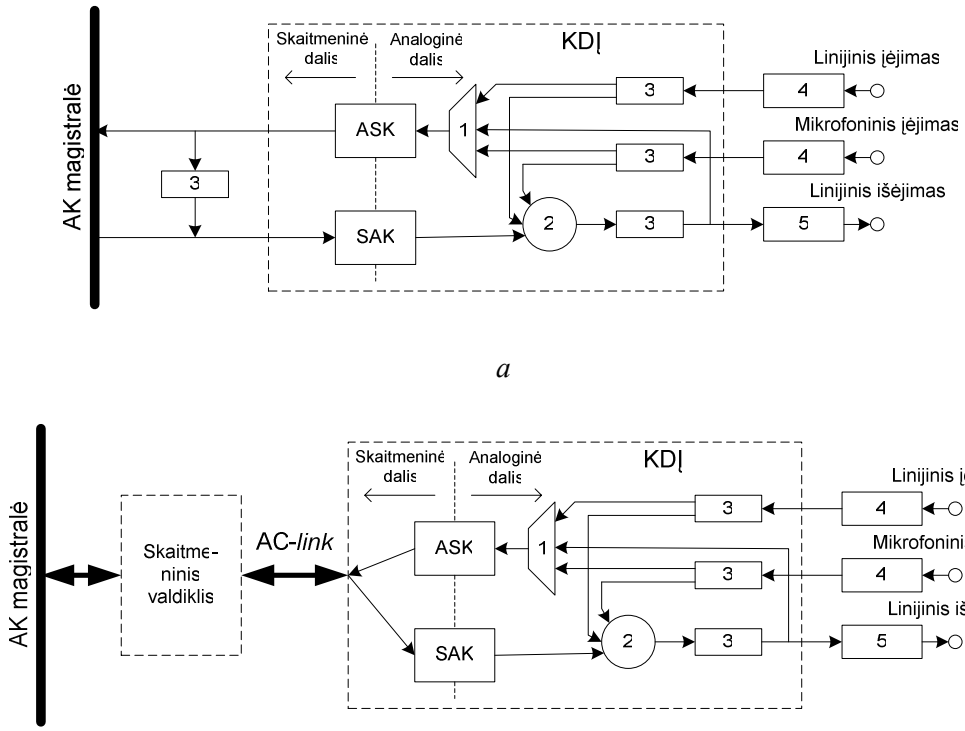
Skyriaus medžiaga paskelbta [116] darbe.

1.1 Kompiuterių garso sistemų sandara ir tipai

Kompiuterio garso sistema (KGS) gali būti realizuojama kaip atskira garso plokštė (angl. *Audio Card*), įstatoma į kompiuterio vidinę ISA (šiuo metu šios magistralės atsisakyta) ar PCI

magistralę, arba sisteminėje plokštėje šioms funkcijoms skiriama speciali integrinė schema. KGS gali būti dviejų tipų – su lygiagrečiuoju arba nuosekliuoju interfeisu (1.1 pav.) [47, 64].

Nagrinėsime tik garso sistemas su nuosekliuoju interfeisu, nes šiuo metu garso sistemos su lygiagrečiuoju interfeisu jau nebegaminamos.

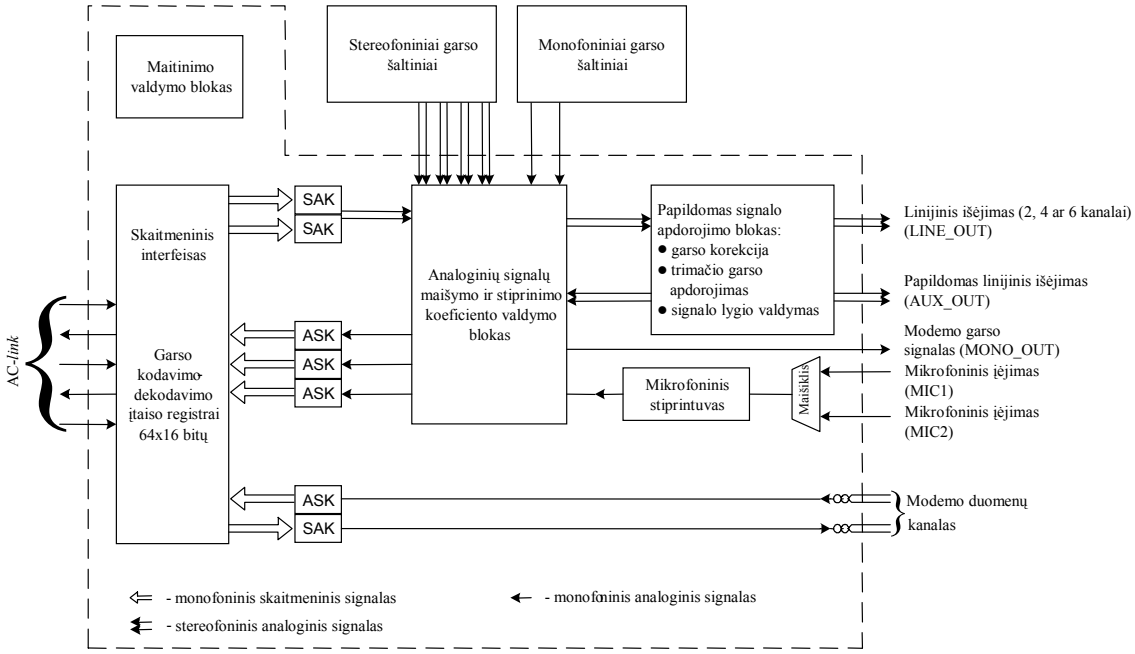


1.1 pav. *Kompiuterių garso sistemos su lygiagrečiuoju (a) ir su nuosekliuoju (b) interfeisais: 1 – multiplekseris; 2 – maišiklis; 3 – garsumo reguliatorius; 4 – įėjimo grandinė; 5 – išėjimo grandinė*

Paprastai garso sistema su nuosekliuoju interfeisu sudaryta iš dviejų pagrindinių dalių – garso kodavimo ir dekodavimo įtaiso (KDĮ, angl. *Codec*) ir skaitmeninio valdiklio (angl. *Digital Controller* – DC). Ryšį tarp šių įtaisų užtikrina speciali ryšio grandis (angl. AC-*link*) (1.1 pav., b). Apibendrinta KDĮ funkcinė schema pateikta 1.2 paveiksle.

KDĮ yra naujos architektūros kompiuterių garso sistemos svarbiausia dalis. Šiuo metu kiekvienas naujos architektūros garso sistemai skirtas KDĮ, nepriklausomai nuo gamintojo, turi atitikti *Intel* korporacijos parengtos specifikacijos AC'97 (angl. *Audio Codec* '97 *Component Specification*) reikalavimus [73, 74].

KDĮ atkūrimo kanalas turi du fiksuoto (48 kHz) arba kintamojo diskretizavimo dažnio 18 – 20 skilčių SAK, sudarančius stereofoninį išėjimo kanalą, į kurį iš skaitmeninio valdiklio per ryšio grandį patenka mišrus skaitmeninis signalas iš visų vidinių šaltinių, tarp jų ir iš sintezatoriaus. Išėjimo stereosignalas gali būti maišomas su kitų šaltinių analoginiais stereo- arba monosignalais, paskui atliekama tembro korekcija arba papildomas apdorojimas erdvinio (3D) garso algoritmais. Toliau signalas perduodamas į linijinio išėjimo ir ausinių jungtis. Modemo garso kanalu perduodamas monosignalas [73-77].



1.2 pav. *Apibendrinta garso kodavimo ir dekodavimo įtaiso funkcinė schema*

Stereo įėjimo (įrašymo) kanalas turi du fiksuoto (48 kHz) arba kintamojo diskretizavimo dažnio 18 – 20 skilčių analoginius-skaitmeninius keitiklius (ASK). Įėjimo kanalu galima įrašyti atskirus stereo- arba monosignalus, arba mišrų signalą iš įvairių garso šaltinių. Signalams iš mikrofonų naudojamas atskiras ASK, taip pat yra numatyta galimybė programinėmis priemonėmis įjungti 20 dB stiprinimą. Tai leidžia realizuoti kai kuriuos kalbos signalų apdorojimo algoritmus.

Skaitmeninis valdiklis (1.1 pav., b) skirtas kompiuterio PCI magistralei ir gali būti realizuotas kaip atskiras savarankiškas įtaisas arba kaip sudėtinė PCI akseleratoriaus dalis, realizuojanti garsines, grafines, telekomunikacines ir kt. funkcijas.

Skaitmeninis valdiklis gali keisti diskretizavimo dažnį, atlikti dažninę (FM) ir (arba) banginę (WT) garso sintezę ir kt.

Interfeisas AC-*link* – tai nuoseklioji dvikryptė penkių laidininkų ryšio grandis su laikiniu sutankinimu, skirta garso ir valdymo signalams perduoti. Taikant laikinį sutankinimą, duomenų siuntos arba paketai perduodami fiksuotais laiko intervalais – kadrais (angl. *Frame*). Toks perdavimo būdas vienu skaitmeniniu ryšio kanalu leidžia perduoti keletą duomenų srautų. Naujausia specifikacijos AC '97 versija [74] prie vieno skaitmeninio valdiklio per ryšio grandį AC-*link* vienu metu leidžia prijungti iki 4 KDĮ.

1.2 Dinaminiai kompiuterių garso sistemų parametrai

KDĮ, būdamas svarbiausia kompiuterio garso sistemos dalimi, lemia ir jos kokybę. Todėl nagrinėsime KDĮ pagrindinių dalių – ASK ir SAK kokybinius parametrus.

Dažniausiai naudojami ASK [32-35, 53, 59-62, 78]:

1) lygiagretieji;

2) nuoseklaus priartėjimo;

3) „skaičiuojantys“.

Dažniausiai taikomi tokių tipų „skaičiuojantys“ ASK:

a) nuoseklaus skaičiavimo arba vienkartinio integravimo (angl. *Single-Slope*);

b) dvigubo integravimo (angl. *Dual-Slope*);

c) sekimo.

Dažniausiai naudojami SAK [35, 49-62, 58, 60, 79]:

1) palyginantys arba daugiaskilčiai (angl. *Multibit*);

2) *Sigma-Delta*;

3) su impulso pločio moduliacija (angl. *Pulse Width Modulation*, PWM).

Šiuo metu statiniai ASK parametrai, jų kontrolės metodologija ir matavimo priemonės, yra plačiai žinomos ir naudojamos, todėl jų nenagrinėsime. Dinaminių ASK parametrų kontrolė yra žymiai sudėtingesnė. Tai paaiškinama tuo, kad statinių parametrų (dažniausiai tai statinės paklaidos) matavimas remiasi gerai išvystytu šiuolaikinės metrologijos matematiniu aparatu ir naudoja jos metodus ir priemones. Dinaminiai parametrai yra specifiniai analoginio-skaitmeninio keitimo procese. Jie susiję su matuojamų laike nepertraukiamų signalų diskretizavimu.

1.2.1 ASK dinaminiai parametrai

ASK yra charakterizuojami keliais dinaminiais parametrais. Pagrindiniams dinaminiams ASK parametrams galima priskirti: keitimo trukmę ir dažnį, apertūrinę trukmę, apertūrinę neapibrėžtį, keitimo charakteristikos monotoniškumą, esant maksimaliam leistinam įėjimo signalo kitimui, signalo ir triukšmo santykį, efektyviųjų skilčių skaičių. Pagrindiniai dinaminiai parametrai priklauso nuo ASK struktūros, nuo darbo ypatybių [32-63].

Keitimo trukmė t_C – tai laikas nuo analoginio signalo keitimo pradžios momento ASK įėjime iki jo išėjime pasirodančio atitinkamo stabilaus kodo.

ASK su išrinkimo ir saugojimo įrenginiais atveju, pasibaigus pereinamiesiems procesams ASK įėjimo grandinėse, dinaminė paklaida bus sumažinta ir dinaminiai parametrai bus vienareikšmiškai apibrėžti keitimo trukme:

$$t_C = t_S + t_K, \tag{1.1}$$

čia t_S – paleidimo vėlinimas; t_K – kodavimo ciklo trukmė.

Paleidimo vėlinimas t_S – tai minimalus laikas nuo šuoliais kintančio signalo padavimo į analoginį ASK įėjimą momento iki ASK paleidimo signalo, kuriam esant išėjimo kodas nuo nominalaus skiriasi ne daugiau kaip statinės paklaidos vertė, padavimo momento. Paleidimo vėlinimas t_S apibrėžiamas pereinamaisiais procesais, vykstančiais ASK grandinėse.

Kodavimo ciklo trukmė t_K – tai laikas, kurio metu vyksta tiesioginis nusistovėjusio analoginio įėjimo signalo keitimas. Trukmė t_K apibrėžiama signalų vėlinimu ASK komponentėse.

Maksimalus keitimo dažnis – tai analoginio įėjimo signalo diskretizavimo dažnis, kuriam esant pasirinktas ASK parametras neišeina už užduotų ribų. Parinktuoju parametru gali būti keitimo charakteristikos monotoniškumas (funkcionavimo kriterijus) arba netiesiškumas. Maksimalų diskretizavimo dažnį riboja vėlinimas komparatoriuose, šifratoriuje ir išėjimo laipsniuose.

ASK be išrinkimo ir saugojimo įrenginių (kai analoginis įėjimo signalas kinta keitimo metu) dinaminiai parametrai kartu su keitimo trukme, charakterizuojami apertūrine trukme, apertūrine neapibrėžtimi, keitimo charakteristikos monotoniškumu ir signalo ir triukšmo santykiu.

Apertūrinė trukmė – laikas, per kurį išlieka neapibrėžtis tarp atskaitos vertės ir ją atitinkančio laiko momento. Visumoje jis priklauso nuo komparatoriaus fiksatoriaus (specialus

trigeris) paleidimo laiko, kuris nustato minimalią trukmę, per kurią įėjimo signalas turi viršyti tam tikrą slenkstinį lygį. Šis slenkstinis lygis užtikrina fiksatoriaus darbą.

Realūs ASK dar charakterizuojami papildomais signalo vėlinimais, atsirandančiais ASK korpuse ir pačiame kristale (pvz., taktinio signalo formavimo įtaisuose). Taigi atsiranda dar vienas pastovus vėlinimas tarp taktinio signalo ASK įėjime ir momento, kai komparatorius pradeda strobuoti. Todėl apertūrinė trukmė yra suma šių dviejų dedamųjų ir nustatomas visuose keitimo charakteristikos taškuose. Skirtinguose charakteristikos taškuose jis gali įgyti skirtingas vertes. To priežastys yra įvairių ASK mazgų ir komponentų parametrų (parazitinių talpų, laipsnių režimų, rezistorių varžų) išsibarstymas, o taip pat skirtingi įėjimo ir taktinių signalų magistralių ilgiai.

Apertūrinė neapibrėžtis [41] – atsitiktinis apertūrinės trukmės, konkrečiame keitimo charakteristikos taške, pasikeitimas. Apertūrinė neapibrėžtis atsiranda dėl atsitiktinių vėlinimo laiko pokyčių tiek ASK sinchronizacijos grandinėse, tiek komparatoriaus ir fiksatoriaus įėjimo grandinėse. Dėl apertūrinės neapibrėžties, koduojant greitai besikeičiantį signalą, atsiranda įvairios kodų kombinacijos. Šių kodų skirstinys yra artimas normaliajam. Taigi dažniausiai pasirodo kodas, kuris atitinka išrinktą signalo vertę.

Egzistuoja ryšys tarp apertūrinės neapibrėžties, maksimalaus įėjimo signalo dažnio ir atsirandančios leistinosios dinaminės paklaidos.

Keitimo charakteristikos monotoniškumas įvertinamas tokiu įėjimo signalo kitimo greičiu, kuriam esant ASK keitimo charakteristika, esant maksimaliems leistiniems įėjimo signalo pokyčiams, dar išlieka monotoniškai didėjanti arba mažėjanti. Vietoje keitimo charakteristikos monotoniškumo gali būti nagrinėjamas integralinis arba diferencialinis netiesiškumas. Maksimalų signalo kitimo greitį ASK įėjime riboja apertūrinė neapibrėžtis, apertūrinė trukmė ir jo išsibarstymas keitimo charakteristikoje, o taip pat komparatorių pralaidumo juosta. Komparatoriaus dinaminius parametrus galima charakterizuoti pralaidumo juosta arba dažnine amplitudės charakteristika. Didėjant įėjimo signalo dažniui, pradeda mažėti komparatoriaus tiesinės dalies stiprinimo koeficientas, t.y. prie tam tikro dažnio yra stebimas įėjimo signalo amplitudės mažėjimas lyginant su atraminės įtampos verte. Dėl to yra neteisingai įvertinamos įėjimo signalo vertės ir, atstačius per ASK praėjusi signalą, gaunamas žymus amplitudės sumažėjimas.

Labai svarbus parametras, turintis didelės įtakos ASK dinaminiams parametrams, yra ***įėjimo talpa***. Įėjimo talpa – tai ekvivalentinė talpa ASK analoginiame įėjime. Ypatingos įtakos įėjimo talpa turi lygiagretiesiems ASK, kuriuose ji gali siekti dešimtis pF. Tokiuose ASK įėjimo talpa

susideda iš dviejų dedamųjų: komparatorių įėjimo laipsnių talpų ir parazitinių ASK kristalo korpuso išvadų bei metalizacijos (jungiamųjų takelių) talpų. Pirmoji dedamoji yra žymiai didesnė už antrąją, todėl ją galima priimti kaip ASK įėjimo talpą. Jei antroji ASK įėjimo talpos dedamoji, veikiant įėjimo signalui, nekinta, tai pirmoji dedamoji yra įėjimo signalo įtampos funkcija. Tai paaiškinama tuo, kad komparatorių įėjimo talpą lemia tranzistorių p-n sandūros parazitinė talpa. Taigi bendruoju atveju lygiagrečiųjų ASK įėjimo talpa yra dinaminė talpa.

Įėjimo talpa įtakoja ASK pralaidumo juostą, apertūrinės trukmės išsibarstymą keitimo charakteristikoje, o tai blogina ASK kokybę.

Žinant ASK įėjimo talpą, galima nustatyti kiekvieno komparatoriaus įėjimo talpą atskirai. Tačiau reikia neužmiršti, kad komparatoriaus įėjimo talpos priklausomybė nuo įtampos jo įėjime, iššaukia papildomas paklaidas.

Signalo ir triukšmo santykis yra ASK dinaminis parametras, leidžiantis įvertinti keitiklio kokybę. Idealaus ASK signalo ir triukšmo santykis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$D_{dB} = 10\log\frac{P_V}{P_T}, \tag{1.2}$$

čia P_V – virpesio vidutinė galia per periodą; P_T – triukšmo vidutinė galia.

Triukšmo vidutinė galia sutampa su kvantavimo triukšmo dispersija ir išreiškiama formule:

$$P_T = \frac{q^2}{12}, \tag{1.3}$$

čia q – ASK žemiausiosios skilties vertė.

Vidutinė virpesio galia per periodą išreiškiama formule:

$$P_V = \frac{1}{2}\left(\frac{2^N \cdot q}{2}\right)^2, \tag{1.4}$$

čia N – ASK skilčių skaičius.

ASK signalo ir triukšmo santykis gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$D_{dB} = 6{,}02N + 1{,}76. \tag{1.5}$$

Kaip matyti iš (1.5) formulės, ASK signalo ir triukšmo santykis priklauso nuo jo skilčių skaičiaus. Padidinus ASK skilčių skaičių vienetu, signalo ir triukšmo santykis išauga apytiksliai 6 dB. Pavyzdžiui, dešimties skilčių ASK signalo ir triukšmo santykis yra apytiksliai lygus 60 dB.

Realaus ASK signalo ir triukšmo santykis randamas taip:

$$D_R = 10\lg\frac{P_V}{P_T + P_{PT}}, \tag{1.6}$$

čia P_{PT} – papildomo triukšmo vidutinė galia. Šio triukšmo priežastis realios keitimo charakteristikos nukrypimai nuo idealios. Paprastai papildomas triukšmas lyginamas su kvantavimo triukšmu, t.y. $L = \frac{P_{PT}}{P_T}$,

tai įvertinus gauname:

$$D_R = D_{dB} - 10\lg(1 + L). \tag{1.7}$$

Taigi didėjant papildomo triukšmo lygiui, mažėja keitiklio signalo ir triukšmo santykis arba dinaminis diapazonas.

Efektyviųjų skilčių skaičius – tai vienas iš pagrindinių ASK kokybės rodiklių. Jis įvertina ASK tikslumą, apdorojant analoginius signalus.

Efektyviųjų skilčių skaičius apskaičiuojamos pagal formulę:

$$N_{ef} = N - \log_2\left(\frac{E_{RT}}{E_T}\right), \tag{1.8}$$

čia N – nominalus ASK skilčių skaičius; E_{RT} – realaus ASK kvantavimo triukšmas; E_T – idealaus ASK kvantavimo triukšmas.

Taigi efektyviųjų skilčių skaičius parodo skilčių skaičių idealaus ASK, kurio signalo ir triukšmo santykis lygus realaus ASK signalo ir triukšmo santykiui.

Pasinaudodami (1.8) išraiška, nustatysime ryšį tarp efektyviųjų skilčių skaičiaus N_{ef} ir signalo ir triukšmo santykio D_R. Idealaus ASK signalo ir triukšmo santykis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$D_{dB} = 6{,}02N_{ef} + 1{,}76. \quad (1.9)$$

Iš čia:

$$N_{ef} = \frac{D_R - 1{,}76}{6{,}02}. \quad (1.10)$$

Iš šios išraiškos matyti, kad ASK efektyviųjų skilčių skaičius tiesiškai priklauso nuo signalo ir triukšmo santykio.

Atsižvelgiant į ASK taikymo sritį, pateiksime ASK parametrus, kuriuos reiktų įvertinti [61] (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. *Svarbiausi ASK parametrai, įvairiose jų taikymo srityse*

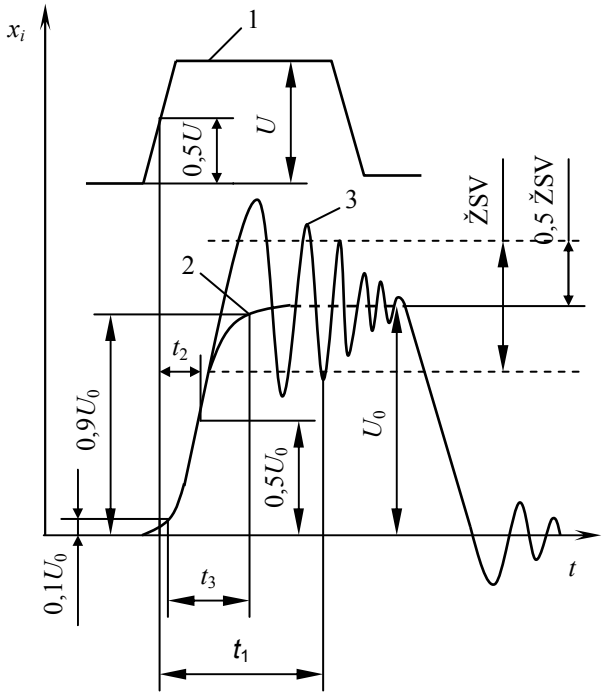
Taikymo sritis	Svarbūs ASK parametrai
Garso aparatūra	Signalo ir triukšmo santykis. Netiesiniai iškraipymai ir triukšmas.
Automatizuotas valdymas	Keitimo charakteristikos monotoniškumas.
Skaitmeninis oscilografas, signalų formos registratorius	Signalo ir triukšmo santykis. Efektyviųjų skilčių skaičius. Praleidžiamų dažnių juosta.
Geofizika	Netiesiniai iškraipymai ir triukšmas. Signalo ir triukšmo santykis.
Vaizdų apdorojimas	Diferencialinis netiesiškumas. Integralinis netiesiškumas. Signalo ir triukšmo santykis. Efektyviųjų skilčių skaičius.
Radarai ir sonarai	Signalo ir triukšmo santykis. Intermoduliaciniai iškraipymai. Efektyviųjų skilčių skaičius.
Spektrinė analizė	Signalo ir triukšmo santykis. Efektyviųjų skilčių skaičius.
Paskirstyto spektro komunikacijos	Signalo ir triukšmo santykis. Intermoduliaciniai iškraipymai. Efektyviųjų skilčių skaičius. Triukšmų lygis.
Telekomunikacijos	Signalo ir triukšmo santykis. Triukšmų lygis. Intermoduliaciniai iškraipymai.
Vaizdo aparatūra	Diferencialinis netiesiškumas. Signalo ir triukšmo santykis.
Plačiajuosčiai skaitmeniniai imtuvai	Intermoduliaciniai iškraipymai. Signalo ir triukšmo santykis.

1.2.2 SAK dinaminiai parametrai

Elektroninėje aparatūroje, asmeniniuose kompiuteriuose, duomenų surinkimo ir apdorojimo sistemose, SAK dirba nuolat kintančių kodų (jo įėjime) režimu. Akivaizdu, kad informacija iš SAK išėjimo turi būti nuskaitoma tik pasibaigus pereinamiesiems procesams jame. Tik tokiu

atveju galima pasiekti tikslumą, kuriam yra pritaikytas SAK. Sistemos greitaveika priklauso nuo SAK pereinamųjų procesų trukmės, t.y. nuo SAK greitaveikos. Todėl SAK dinaminiai parametrai daugeliu atveju lemia informacijos apdorojimo spartą [35, 49-62, 79].

Išėjimo signalo nusistovėjimo trukmė – tai laikas nuo kodo pasikeitimo pradžios SAK įėjime iki momento, kai analoginio išėjimo signalo vertė pradeda skirtis nuo nusistovėjusios užduotos vertės (1.3 pav.). Priklausomai nuo SAK tipo, tai gali būti išėjimo srovės ir išėjimo įtampos nusistovėjimo trukmės t_{si} ir t_{su}. Daugeliu atveju nusistovėjimo trukmė skaičiuojama nuo minimalios įėjimo kodo vertės iki maksimalios arba atvirkščiai, kai išėjimo signalo analoginė vertė nuo nusistovėjusios vertės skiriasi ne daugiau kaip 0,5 žemiausiosios skilties vertės (ŽSV) į vieną ar kitą pusę. Laikas atskaitomas nuo momento, kai įėjimo įtampos lygis pasiekia 0,5 amplitudės. 1.3 pav. – tai laiko intervalas t_1.



1.3 pav. *SAK išėjimo signalas: 1 – testinis impulsas; 2 – nominalaus išėjimo impulso forma; 3 – realaus išėjimo impulso forma*

Plitimo trukmė – tai laikas nuo momento, kai įėjimo įtampos lygis pasiekia pusę maksimalios vertės, iki momento, kai analoginio išėjimo signalo vertė pasiekia pusę nusistovėjusios vertės (laikas t_2 1.3 pav.). Kartu su šiuo parametru gali būti naudojamas vėlinimo laikas – nuo kodo keitimo momento iki momento, kai analoginio išėjimo signalo vertė pasiekia 0,1 nusistovėjusios vertės.

Kilimo trukmė – tai laikas, per kurį analoginio išėjimo signalo vertė kinta nuo 0,1 iki 0,9 nusistovėjusios vertės (laikas t_3 1.3 pav.).

Kilimo greitis – tai analoginio išėjimo signalo vertės ir laiko t_3 santykis.

Persijungimo trukmė – tai laikas nuo kodo keitimo momento pradžios iki momento, kai analoginio išėjimo signalo vertė pasiekia 0,9 nusistovėjusios vertės.

Dinaminiams SAK parametrams taip pat galima priskirti ir impulsinius trukdžius, atsirandančius SAK išėjime, kai įėjimo kodo vertės kinta nenutrūkstamai. Tai analoginio išėjimo signalo impulsiniai iškraipymai, įėjimo kodo vertės kitimo momentais. Šie iškraipymai dažniausiai apibrėžiami amplitude ir trukme. Jų priežastis yra laiko nesutapimai atskirų skilčių persijungimo momentais, t.y. tam tikru laiko momentu yra išjungiamas arba įjungiamas, neatitinkantis įėjimo kodo, skilčių skaičius. Pats nepalankiausias atvejis yra tada, kai kintant įėjimo kodui yra įjungiamas maksimalus skilčių skaičius, pavyzdžiui, kai kodas kinta nuo 0,1...1 iki 10...0. Šiuo atveju išmetimas gali siekti pusę maksimalios analoginio išėjimo signalo vertės ir jo dydis gali būti bet kokio ženklo.

1.3 Kompiuterių garso sistemų tyrimo metodai ir jų analizė

Kaip buvo minėta, bendra ASK dinaminių charakteristikų matavimo metodologija yra paremta kvantavimo charakteristikos gavimu, keičiant įėjimo signalus. Tolesnis šios charakteristikos apdorojimas vartotojui leidžia gauti norimą informaciją apie ASK dinaminius parametrus. Taigi norimiems dinaminiams parametrams gauti, taikoma bendra matavimo metodologija, tinkanti ir statinių parametrų nustatymui. Tai vienas iš privalumų. Šiame skyriuje išnagrinėsime pagrindinius lygiagrečiųjų ASK dinaminių parametrų matavimo metodus [32-35, 39-47, 59-63, 80]. Šie metodai tinka ir kitų tipų ASK dinamikos vertinimui.

1.3.1 Vizualios kontrolės metodai

Tai patys pirmieji ir labiausiai paplitę ASK dinaminių parametrų įvertinimo metodai. Jie remiasi praėjusio per ASK signalo atstatymu etaloniniu SAK ir to atstatyto signalo stebėjimu oscilografo ekrane.

Šis metodas iš atstatyto signalo leidžia įvertinti grubias anomalines paklaidas, o taip pat netiesiškumo paklaidas, naudojamo oscilografo jautrumo ribose. Daug vaizdesnis diferencialinio ir integralinio netiesiškumo įvertinimas gaunamas, taikant įėjimo signalo ir atstatyto po keitimo

signalo skirtumą. Šis skirtumas gali būti gaunamas tiek taikant operacinį stiprintuvą, tiek oscilografą su diferencialiniu įėjimu.

Naudojant pjūklo formos kontrolinį įėjimo signalą yra paprasčiau išskirti diferencialinį ir integralinį netiesiškumą. Tačiau didėjant tiriamojo ASK diskretizavimo dažniui ir platėjant jo praleidžiamųjų dažnių ruožui sunku suformuoti stabilią greitai besikeičiančią tiesinę įtampą. Dalinai šį uždavinį galima išspręsti panaudojus kombinuotą signalą, susidedantį iš žemo dažnio sinusinio signalo ir nedidelės amplitudės pjūklo formos signalo su kintamu kilimo greičiu, sumos. Greitai besikeičiančio pjūklo formos kontrolinio signalo su geromis metrologinėmis charakteristikomis formavimo sunkumai sąlygojo platų sinusinių kontrolinių signalų panaudojimą ASK dinamikai tirti. Todėl yra gaminami serijiniai didelio spektrinio grynumo sinusinių signalų generatoriai ir sintezatoriai. Jų taikymas leidžia, duotame įėjimo signalo dažnių ruože, įvertinti ASK darbingumą, jo keitimo charakteristikos monotoniškumą ir netgi diferencialinį netiesiškumą, jei tai gali atvaizduoti oscilografas [32-34].

Principinis atstatyto (etaloniniu SAK) signalo tiesioginio vizualaus stebėjimo metodo trūkumas yra reikalavimas, kad į vieną tiriamojo sinusinio signalo periodą patektų pakankamas vizualiam stebėjimui diskretizavimo periodų arba signalo imčių skaičius. Šis trūkumas labai riboja įėjimo signalo dažnį, esant duotam diskretizavimo dažniui. Taip pat šis metodas reikalauja brangios matavimo įrangos ir etaloninio SAK.

Tam, kad išplėsti įėjimo signalų dažnių diapazoną ir galima būtų pilniau vizualiai tirti išėjimo signalą, panaudojamas stroboskopinis ASK paleidimo režimas, t.y. kai įėjimo signalo dažnis f_{IN} nežymiai skiriasi nuo diskretizavimo dažnio f_d. Tokiame režime ASK išėjimo signalas išlieka sinusinis, bet turi plakimosi dažnį: $f_p = f_{IN} - f_d$. [32-34].

Šiuo atveju signalo šaltinis yra sinusinių signalų sintezatorius arba generatorius. Tiriamojo ASK išėjimo kodas keičiamas etaloniniu SAK ir išvedamas į oscilografo ekraną arba per buferinį atminties įrenginį į registracijos įrenginį, pavyzdžiui į dviejų koordinačių braižiklį. Principinis šio metodo ir tiesioginio vizualaus stebėjimo metodo skirtumas yra tas, kad atstatytas signalas yra žemo dažnio, taigi keliami žymiai mažesni reikalavimai etaloninio SAK greitaveikai.

Tam, kad išėjimo signalas savyje turėtų visos ASK keitimo skalės informaciją, reikia užtikrinti, kad įėjimo signalas padengtų visą šią skalę, be to reikia išlaikyti nustatytą įėjimo signalo ir diskretizavimo dažnių santykį. Pavyzdžiui, jei pareikalausime, kad ASK išėjime būtu tikrinamos visos kodų kombinacijos, tai maksimalus plakimosi dažnis turi būti parenkamas iš santykio:

$$f_p = f_{IN} / 2\pi \cdot 2^m, \quad (1.11)$$

čia m – tiriamojo ASK skilčių skaičius.

Šis metodas, kaip ir tiesioginio vizualaus stebėjimo metodas leidžia įvertinti tuos pačius ASK dinaminius parametrus, tačiau kur kas platesniame įėjimo signalo dažnių ruože.

Metodas turi ir trūkumų. Vienas iš jų – sąlyginai nedidelis ASK dinaminių parametrų verčių nustatymo tikslumas. Be to, norint gauti reikiamą plakimosi režimą, reikia keisti diskretizavimo dažnį atsižvelgiant į įėjimo signalo dažnį. Tai sąlygoja nevienodus matavimo rezultatus, kadangi tiriamasis ASK dirba skirtingais diskretizavimo dažniais. Metodo realizacijai reikia gana sudėtingos aparatinės įrangos.

Kitas plakimosi metodo variantas yra vadinamas gaubiančiosios analizės metodu. Šiuo atveju, įėjimo signalo dažnis parenkamas artimu pusei diskretizavimo dažnio. Taigi diskretizavimo momentai sutampa su skirtingais įėjimo signalo pusbangiais ir taip gaunamas plakimasis. ASK išėjimo signalo gaubiančioji savyje turi du priešingų fazių signalus. Gaubiančiosios analizė gali būti vykdoma tiek abiem dedamosioms, tiek atskirai kiekvienai [32-34].

1.3.2 Signalo ir triukšmo santykio matavimo metodas

Prieš tai paminėti metodai yra skirti vizualiai ASK dinaminių parametrų kontrolei, t.y. grubiems diferencialiniams ir integraliniams netiesiniams iškraipymams, kodų praleidimams ir anomaliniams išmetimams fiksuoti. Paklaidos, netgi žemiausiosios skilties lygmenyje, esant aštuonioms ir daugiau skilčių, iš esmės nėra įvertinamos. Todėl firma TRW pasiūlė ASK dinaminių parametrų kontrolės metodą, pagrįstą signalo ir triukšmo santykio matavimu.

Kontroliniu signalu čia yra taikomas sinuso formos signalas, kurio dviguba amplitudė dengia visą ASK keitimo skalę. Matavimas vykdomas dviem etapais, naudojant du dažnius. Pirmajame etape matuojama atstatyto (etaloniniu SAK ir žemo dažnio filtru) signalo pilna galia arba jo vidutinė kvadratinė vertė. Antrajame etape pagrindinė harmonika yra slopinama aukštos kokybės režekciniu filtru ir matuojama ASK kvantavimo triukšmo pilna galia arba vidutinė kvadratinė vertė esant duotam įėjimo signalo dažniui. Matavimams taikomas galios matuoklis arba atitinkamo tikslumo voltmetras. Toliau skaičiuojamas dviejų pirmajame ir antrajame etapuose gautų parametrų verčių santykis decibelais, t.y. ASK dinaminis diapazonas.

Palyginus gautą rezultatą su idealaus ASK dinaminiu diapazonu, galima spręsti apie realaus ASK darbo kokybę. Atliekant kelis tokius pat matavimus su skirtingais įėjimo signalo dažniais, galima įvertinti dinaminio diapazono kitimą ir tiriamojo ASK efektyviųjų skilčių skaičių dažnių diapazone.

Šio metodo trūkumas – vaizdumo stoka ir gana sudėtinga metodo aparatinė realizacija. Be to nėra prisirišimo prie konkrečios kvantavimo charakteristikos. Todėl šis metodas dažniausiai taikomas kartu su kitais ASK dinaminių parametrų matavimo metodais.

1.3.3 Priartinimo prie idealios sinusinės kreivės metodas

Tolimesnis ASK dinaminių parametrų vertinimo metodų vystymasis ir matavimo tikslumo didinimas, lėmė pradinių rezultatų apdorojimo algoritmų sudėtingumą. Dėl to iškilo kompiuterių panaudojimo būtinybė. Kompiuterių taikymas leido automatizuoti matavimo procesą ir rezultatų analizę [32-34, 111-120]. Tapo įmanomas grafinis rezultatų pateikimas ir jų dokumentacija.

Vienas iš tokių metodų yra metodas, pagrįstas sinusinio signalo $U=A\cos(\omega t+\varphi)$ su pilnai žinomais parametrais keitimo tiriamuoju ASK rezultatų ir to paties sinusinio signalo analitinio analoginio-skaitmeninio keitimo skaičiavimo rezultatų palyginimu. Pastaroji procedūra imituoja idealaus to paties skiltiškumo (kaip ir tiriamasis ASK) ASK darbą.

Šio metodo esmė – realaus ASK išrinktų signalo verčių ir skaičiavimais gautų signalo verčių skirtumų kvadratų sumos skaičiavimas. Šis skirtumas skaičiuojamas pagal formulę [32-34, 113]:

$$E=\sum_{k=1}^{N}\left[U\left(t_k\right)-A\cos\left(\omega t_k+\varphi\right)-C\right]^2, \tag{1.12}$$

čia $U(t_k)$ – tiriamojo ASK išėjimo kodo vertės, laiko momentais t_k (k=1, 2,..., N); A, ω, φ ir C – idealaus sinusinio signalo amplitudė, dažnis, fazė ir nuolatinė dedamoji atitinkamai.

Matavimo procese, keičiant parametrus A, ω, φ ir C, pakeistas signalas priartinamas prie realaus išmatuoto. Taigi pritaikius minimizacijos algoritmą, gauta minimali vidutinė kvadratinė vertė E ir yra realaus ASK kokybinis rodiklis. Vidutinę kvadratinę vertę E galima taikyti tiek ASK dinaminio diapazono, tiek ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimui. Kartojant minimizacijos procedūrą skirtingiems įėjimo signalo dažniams, galima gauti dinaminio diapazono arba efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybę nuo įėjimo signalo dažnio, o pagal šias priklausomybes ir dažninę amplitudės charakteristiką. Gauti parametrai yra būtini bendrai

ASK darbo kokybei įvertinti, tačiau dažnai išsamiai ASK dinamikos analizei to nepakanka. Tam, kad šis matavimo metodas duotų tikslius (tikrus) rezultatus, būtina tenkinti tokias sąlygas [32-35, 39-47, 59-63, 80]:

- turi būti pakankamas išėjimo duomenų kiekis;
- neturi būti įėjimo signalo ir diskretizavimo dažnių kartotinumo;
- pakankamo spektrinio grynumo sinusinis įėjimo signalas turi dengti visą ASK keitimo skalę.

1.3.4 Histograminis (statistinis) metodas

Šis metodas yra labiau šiuolaikiškas nei prieš tai aptarti ir pagrįstas tiriamojo ASK kodų kombinacijų histogramų sudarymu, naudojant kontrolinius signalus. Paprastai tam taikomas sinusinis signalas [32-34].

Kontrolinis sinusinis signalas į tiriamąjį ASK perduodamas iš kompiuteriu valdomo generatoriaus arba sintezatoriaus. Šio signalo dviguba amplitudė parenkama taip, kad perdengtų visą tiriamojo ASK keitimo skalę. ASK paleidžiamas kompiuteriu valdomu impulsų generatoriumi. Tiriamojo ASK išėjimo kodai kaupiami atminties įrenginyje ir paskui patenka į kompiuterį apdorojimui. Matavimo metu kompiuteris gali keisti įėjimo signalo ir diskretizavimo dažnį, o taip pat ir į ASK paduodamą atraminę įtampą. Šiuo atveju keičiant atraminę įtampą taip pat keičiama ir įėjimo signalo dviguba amplitudė, kad visuose matavimo režimuose būtų išlaikytas visiškas keitimo skalės perdengimas. Apdorojimo rezultatai atvaizduojami kompiuterio ekrane. Informacijos perdavimas tarp atskirų mazgų ir kompiuterio atliekamas per standartinį IEEE 488 interfeisą.

Histograma, kurią reikia gauti, yra ne kas kita kaip kiekvieno *i*-ojo tiriamojo ASK kodo pasirodymo tikimybės tankis, intervale nuo $+M_{\max}/2$ iki $-M_{\max}/2$, kur $M_{\max}=2^m-2$. Idealaus sinusinio signalo $U=A\sin\omega t$ atveju šis tikimybės tankis aprašomas tokia išraiška [32-34]:

$$P(U)=\frac{1}{\pi}\sqrt{A^2-U^2}\ . \tag{1.13}$$

Histogramų tikslumas ir tikrumas priklauso nuo ASK paleidimo schemos ir vienam kvantavimo žingsniui tenkančių signalo imčių skaičiaus. Galimi du ASK paleidimo variantai: atsitiktinis ir reguliarus. Pirmuoju atveju ASK paleidžiamas pseudoatsitiktinių skaičių

generatoriumi, užtikrinančiu vienodos tikimybės paleidimo momentus atžvilgiu signalo periodo. Generatorius gali būti realizuotas tiek programiškai, tiek aparatiniu būdu. Antruoju atveju paleidimui naudojamas impulsų generatorius, kuris dirba dažniu, užtikrinančiu pakankamą imčių skaičių, tenkantį kiekvienam *i*-ajam keitimo intervalui. Imčių skaičius, tenkantis kiekvienam keitimo intervalui, priklauso nuo užsiduoto ASK dinaminių parametrų įvertinimo tikslumo.

Iš gautos histogramos galima surasti ASK diferencialinį netiesiškumą, kuris kiekvienam *i*-ajam keitimo intervalui lygus [32-34]:

$$\delta_{D.N}(i) = \frac{realaus\ ASK\ i-ojo\ kodo\ pasikartojimų\ sk.}{idealaus\ ASK\ i-ojo\ kodo\ pasikartojimų\ sk.} - 1. \qquad (1.14)$$

Norint gauti pakankamą atskaitų skaičių, gali būti panaudojamas stroboskopinis režimas. Tam įėjimo signalo ir diskretizavimo dažniams turi būti išpildytos sąlygos, aptartos plakimosi metode. Principiniai skirtumai tarp histograminio ir plakimosi metodų yra akivaizdūs: skaičiavimams ir reikšmių gavimui naudojamas kompiuteris ir specialūs ASK pradinių kodų masyvų apdorojimo algoritmai, be to čia nėra etaloninio SAK ir oscilografo. Šio metodo atveju gali būti naudojami ir kitokios formos kontroliniai signalai, kurie yra determinuotos laiko funkcijos. Taip pat gali būti panaudoti ir atsitiktinio charakterio signalai su kontroliuojamais parametrais [32-34].

1.3.5 Surištųjų histogramų metodas

Vienas sunkiausiai kontroliuojamų ASK dinaminių parametrų yra apertūrinė neapibrėžtis. Tai paaiškinama tuo, kad jos dydis yra labai mažas nuo 20 iki 30 ns. Todėl jos įvertinimui reikalingi tikslūs matavimai. Dalinai šį uždavinį galima išspręsti pasinaudojus surištų histogramų metodu. Jį ir išnagrinėsime detaliau [32-34].

Surišus įėjimo sinusinį signalą su diskretizavimo dažniu taip, kad ASK atskaitų atskaitymo momentai sutaptų su sinusinio signalo perėjimu per nulį ir stebėti ASK išėjimo kodus, tai ASK kvantavimo charakteristikos dalims, kuriose signalas yra surištas su paleidimo impulsais, galima sudaryti histogramas. Idealaus ASK ir matavimo priemonių atveju, histograma atvaizduotų vieną kodo reikšmę visame stebėjimo laiko intervale. Realiai histograma atvaizduoja kodų reikšmių pasirodymo tikimybių tankį. Norint gauti tikslius matavimus, stebėjimo laikas turi būti pakankamai ilgas ir turėti $(20\text{-}100)\cdot 10^3$ atskaitų. Bendras apertūrinės neapibrėžties, kurią įvertina

surištų histogramų metodas, atsiradimas yra sąlygotas jos vidutinės kvadratinės vertės didėjimu, didėjant įėjimo signalo dažniui ir amplitudei. Abu šie faktoriai yra surišti su įėjimo signalo kitimo greičio didėjimu.

Šiek tiek modifikuotas apertūrinės neapibrėžties įvertinimo metodas yra toks: pradžioje yra įžeminamas ASK įėjimas ir nustatoma histograma, kuri atspindi ASK savųjų triukšmų lygį, atsirandantį dėl vidinių ASK įžeminimų netobulumo ir trukdžių. Paskui paduodamas nustatyto dažnio sinusinis signalas ir surištų histogramų metodu nustatoma nauja tiriamojo ASK išėjimo triukšmo vertė, kuri šiuo atveju bus apibrėžiama savaisiais triukšmais ir apertūrine neapibrėžtimi. Matuojant vidutinę kvadratinę triukšmo vertę abiem atvejais, galima įvertinti ASK apertūrinę neapibrėžtį ir efektyviųjų skilčių skaičiaus sumažėjimą dėl pastarosios [32-35].

1.3.6 Greitosios Furjė transformacijos (spektrinis) metodas

Tai dar vienas efektyvus ASK dinaminių parametrų įvertinimo metodas, panaudojantis kompiuterį. Šiuo atveju išėjimo duomenų masyvas gaunamas į tiriamojo ASK įėjimą padavus tokį kontrolinį signalą [32-34]:

$$X_k = \sum_{m=0}^{M-1} x(m) e^{-j\frac{2\pi mk}{M}};\ (m = 0,1,...,M-1), \tag{1.15}$$

čia M – įėjimo imties dydis.

Susidomėjimas šiuo metodu visų pirma kilo dėl to, kad greitoji Furjė transformacija (GFT) yra vienas iš efektyviausių skaitmeninio signalų apdorojimo algoritmų [32-35, 39-47, 59-63, 80].

Taikant šį metodą į tiriamojo ASK įėjimą perduodamas sinusinis signalas, turintis kuo mažiau aukštesniųjų harmonikų, lemiančių matavimo rezultatų tikslumą. Šio signalo dviguba amplitudė turi dengti visą ASK keitimo skalę. Norint gauti tikslius ASK išėjimo signalo spektro įverčius, turi būti atkreiptas ypatingas dėmesys įėjimo signalo ir diskretizavimo dažnių santykio parinkimui. Dėl spektrų persidengimo, atsirandančio diskretizuojant baigtinio ilgio signalus, ASK išėjimo signalo spektre atsiranda jo harmonikos ir kombinacinės dedamosios. Atsižvelgiant į tai ir turi būti parenkamas minėtų dažnių santykis. Pavyzdžiui, tiriant aštuonių skilčių ASK, dirbantį 20 MHz dažniu, naudojamas f_{IN} = 0,95, 4,95 ir 9,85 MHz dažnių įėjimo signalas. Bendru atveju santykis tarp įėjimo signalo dažnio f_{IN} ir diskretizavimo dažnio f_d turi būti randamas iš sąlygos [32-34]:

$$M\frac{1}{f_d} = N\frac{1}{f_{IN}}, \tag{1.16}$$

čia M – skaičius, kuris aštuonių skilčių ASK paprastai yra lygus 1024; N – sveikasis skaičius.

Perėjimas prie dažnių srities reikalauja šiek tiek kitokios matavimo rezultatų interpretacijos. Signalo ir triukšmo santykis, charakterizuojantis ASK dinaminį diapazoną, apskaičiuojamas taip [32-34]:

$$d_{ASK} = 20\lg\frac{Pirmosios\ harmonikos\ maksimali\ vertė}{Harmonikų\ vidutinė\ kvadratinė\ vertė}. \tag{1.17}$$

Firma *Analog Devices Inc*. šių paminėtų iškraipymų įvertinimui įvedė du papildomus ASK darbą charakterizuojančius parametrus. Pirmasis iš jų yra netiesinių iškraipymų koeficientas, randamas pagal formulę [32-34, 52]:

$$K_h = 20\lg\frac{\left(x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + x_5^2 + x_6^2\right)^{1/2}}{x_1}, \tag{1.18}$$

čia x_1 – pirmosios signalo harmonikos amplitudė; x_2,...,x_6 – harmonikų su dažniais $2f_c$,...,$6f_c$ amplitudės.

Antrasis – intermoduliacinių iškraipymų koeficientas, randamas pagal formulę [32-34, 52]:

$$K_p = 20\lg\left(\frac{x_{21}^2 + x_{22}^2}{x_{11}^2 + x_{12}^2}\right)^{1/2}, \tag{1.19}$$

čia x_{21} ir x_{12} – kombinacinių dažnių f_{21} ir f_{12} dedamosios; x_{11} ir x_{22} – 1-osios ir 2-osios harmonikų amplitudės.

Taigi reziumuojant galima teigti, kad naudojant GFT metodą keliems įėjimo signalo dažniams, galima įvertinti tiriamojo ASK dinaminio diapazono priklausomybę nuo įėjimo signalo dažnio. Paskui šiuos duomenis galima panaudoti ASK efektyviųjų skilčių skaičiui nustatyti.

1.3.7 Efektyviųjų skilčių metodas

Kaip matyti iš anksčiau aptartų ASK dinaminių parametrų įvertinimo metodų, visi jie pagrįsti kvantavimo triukšmo vidutinės kvadratinės vertės skaičiavimu ir jos palyginimu su idealaus tokio pat skiltiškumo ASK kvantavimo triukšmu. Pagal šį rodiklį galima įvertinti realaus ASK dinaminį diapazoną konkrečioms darbo sąlygoms ir atitinkantį jam dvejetainių skilčių skaičių. Šis skaičius vadinamas tiriamojo ASK efektyviųjų skilčių skaičiumi, galinčiu būti skaitine charakteristika, įvertinančia ASK darbo kokybę duotame dinaminiame režime. Taigi tiriamojo ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus nustatymas yra atskiras, savarankiškas metodas, kuris remiasi beveik visais anksčiau aptartais dinaminių parametrų nustatymo metodais.

Bendruoju atveju efektyviųjų skilčių skaičius randamas pagal formulę [32-63]:

$$N_{ef} = N - \log_2 \frac{Realaus\ ASK\ kvantavimo\ \ triukšmas}{Idealaus\ ASK\ kvantavimo\ \ triukšmas}, \tag{1.23}$$

čia trupmenos vardiklis paprastai lygus $\frac{q}{\sqrt{12}}$; q – ASK žemiausiosios skilties vertė; N – idealaus ASK (fizinis) skilčių skaičius.

Efektyviųjų skilčių skaičius gali būti skaičiuojamas arba pagal (1.23) formulę, arba skaičiuojant realaus ASK dinaminį diapazoną D_{dB} ir perskaičiuojant pagal formulę [32-63]:

$$N_{ef} = \frac{D_{dB} - 1{,}76}{6{,}02}. \tag{1.24}$$

Taigi visi anksčiau aptarti metodai pagrįsti kvantavimo triukšmo arba dinaminio diapazono nustatymu, gali būti panaudoti tiriamojo ASK efektyviųjų skilčių skaičiui nustatyti. Taikant kelių dažnių įėjimo signalus, galima nustatyti efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybę nuo dažnio [112-120].

1.3.8 SAK dinaminių parametrų matavimo metodas

Beveik visų tipų SAK (viena iš pagrindinių kompiuterių garso sistemų KDĮ dalis) dinaminių parametrų įvertinimo metodai yra labai panašūs tiek savo principais, tiek juos realizuojančių matavimo įrenginių struktūrinėmis schemomis. Tačiau yra ir ypatumų įvertinant kai kurių tipų SAK darbo kokybę.

Viena iš pagrindinių SAK dinaminių charakteristikų yra išėjimo įtampos arba srovės nusistovėjimo trukmė. Kiti SAK dinaminiai parametrai (persijungimo trukmė, kilimo trukmė ir kt.) paprastai įvertinami bandymų metu. SAK išėjimo impulso atskirų parametrų ir pereinamųjų procesų matavimas atliekamas žinomais impulsinės technikos metodais, t.y. naudojant universalų oscilografinį metodą. Kaip taisyklė, SAK persijungimo trukmė ir kilimo trukmė pateikiami jo dokumentacijoje ir nėra matuojami. Todėl atsižvelgiant į tai pagrindinė SAK dinaminė charakteristika yra išėjimo signalo nusistovėjimo trukmė [32-35, 43-47, 81].

Į tiriamojo SAK žemiausiosios skilties įėjimą perduodami stačiakampiai impulsai, generuojami testinių impulsų generatoriumi.

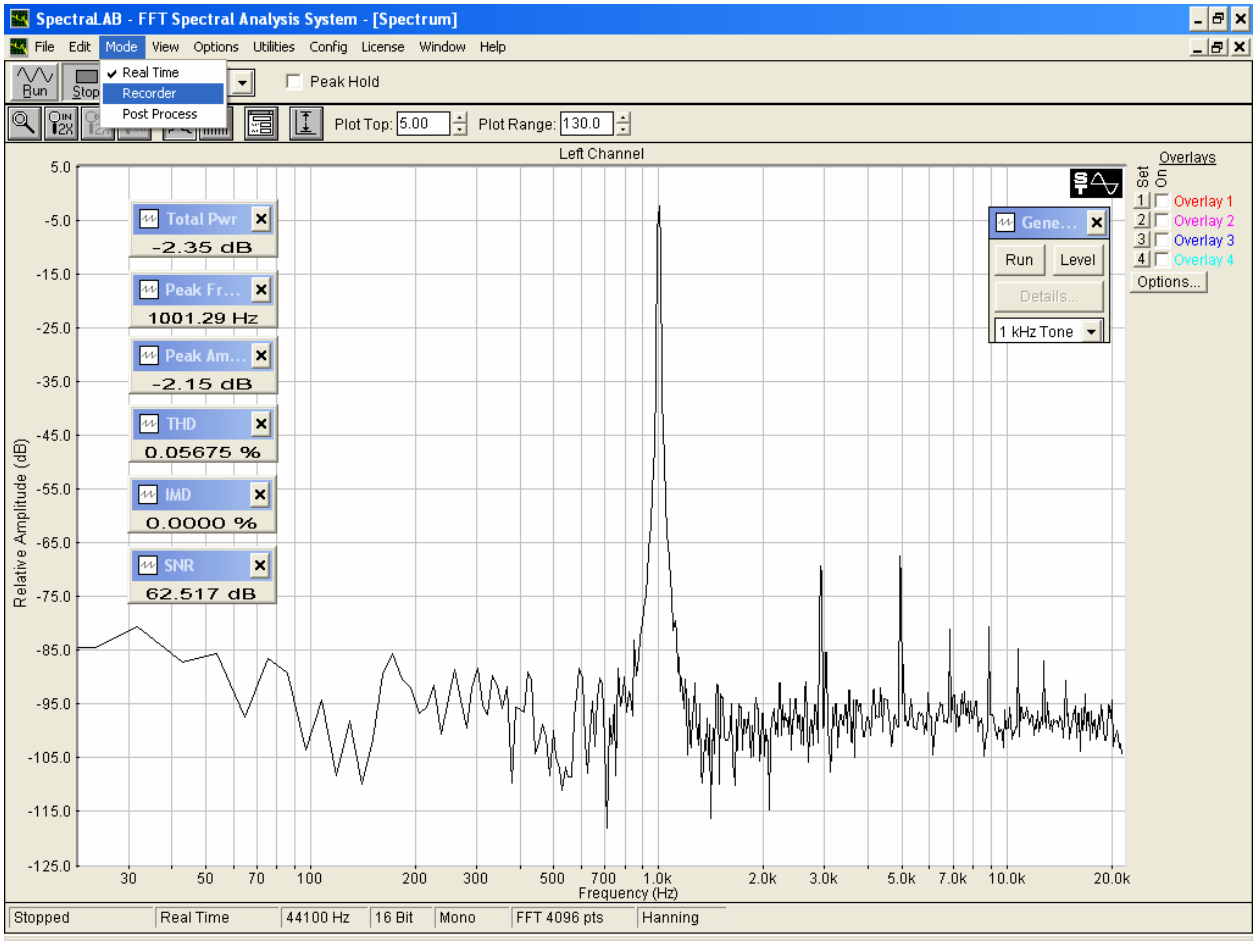
Iš generatoriaus į žemiausiosios skilties įėjimą taip pat perduodami loginis 0 ir loginis 1. Lygio reguliatoriumi nustatomas slenkstinis lygis, prie kurio stabiliai dirba komparatorius. Slenkstinio lygio vertę reiktų pasirinkti iš tokios eilės ±0,5; ±1; ±2 žemiausiosios skilties vertės (ŽSV). Paprastai komparatoriaus veikimo slenkstinis lygis lygus 0,5 ŽSV. Nusistovėjimo trukmė matuojama oscilografo ekrane, t.y. nuo įėjimo kodo keitimosi pradžios momento iki momento, kai komparatoriaus išėjimo signalas nusistovi iki tam tikros vertės. Šio metodo trūkumas – ribotas dažnių diapazonas, didelės matavimo paklaidos, atsirandančios dėl oscilografinio metodo panaudojimo ir komparatorių paklaidų. Taigi turi būti didelio jautrumo oscilografas, ypatingai tai svarbu tiriant 10 ir daugiau skilčių SAK. Jei nepakanka oscilografo jautrumo, SAK išėjime jungiamas stiprintuvas. Tačiau čia gali atsirasti papildomos matavimo paklaidos dėl stiprintuvo netobulumo, o taip pat dėl to, kad yra sunku sukurti plačiajuosčius stiprintuvus, kas vėl gi apsunkina greitų SAK tyrimą.

1.4 Programinė įranga kompiuterių garso sistemų kokybei tirti

Trumpai apžvelgsime dažniausiai taikomas kompiuterių garso sistemų kokybės įvertinimui skirtas programas. Viena iš jų yra firmos *Sound Technology* programa „SpectraLab“ [69-71, 82]. Tai daugiafunkcinė programa, skirta kompiuterio garso sistemos parametrų matavimui bei

signalų formuojamų ne tik bet kurio analoginio įrenginio, prijungto prie KGS linijinio įėjimo, bet ir signalų saugomų **.wav* formato failuose, spektro analizei. Šios programos grafinis vartotojo interfeisas pateiktas 1.4 paveiksle.

Programoje numatyti trys darbo režimai: *Real Time, Recorder* ir *Post Process.* Jie pasirenkami pagrindinėje programos meniu juostoje *Mode* (1.4 pav.). *Real Time* – matavimai atliekami realiame laike, *Recorder* – **.wav* failų įrašymas ir apdorojimas, *Post Process* – tai režimas, kurį pasirinkus galima apdoroti **.wav* failus, jau įrašytus į kietąjį diską ar kitą laikmeną.



1.4 pav. *Programos „SpectraLab“ langas*

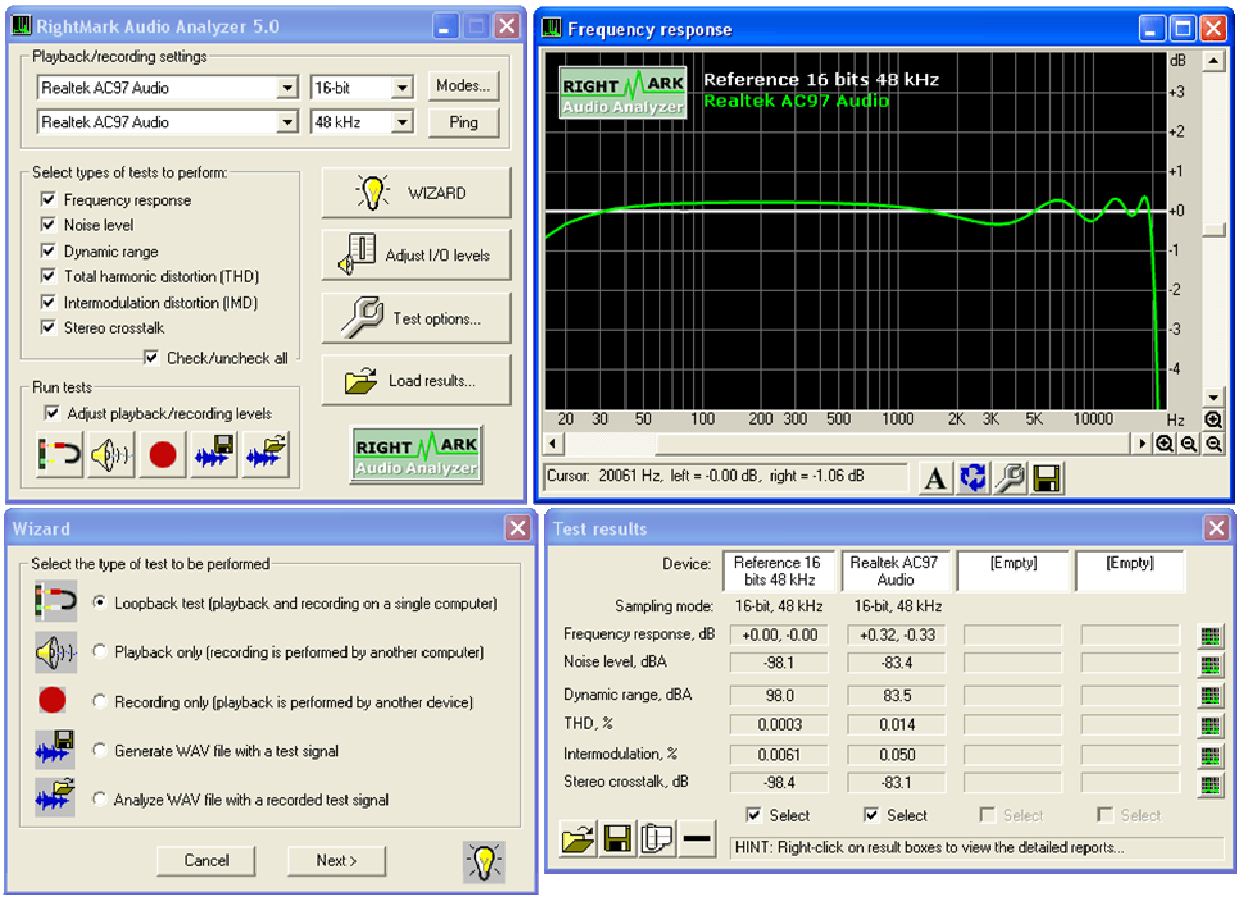
„SpectraLab“ programoje taip pat numatyti penki atkuriamo signalo atvaizdavimo būdai: *Time Series* – atvaizduojamas signalo kitimas laike, *Spectrum* – atvaizduojamas signalo spektras, *Phase* – atvaizduojamas signalo fazės kitimas laike, *Spectrogram* – atvaizduojama signalo spektrograma ir *3D Surface* – atvaizduojamas trimatis signalo spektras.

Su šia programa galima matuoti:

- *Peak Frequency* – piko dažnį;
- *Peak Amplitude* – piko amplitudę;
- *Total Power* – signalo galią;
- *Total Harmonic Distortion* (THD) – KGS netiesinius iškraipymus;
- *Total Harmonic Distortion + Noise* (THD+N) – KGS netiesinius iškraipymus ir triukšmą;
- *Intermodulation Distortion* (IMD) – KGS intermoduliacinius iškraipymus;
- *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) – KGS signalo ir triukšmo santykį.

Taip pat yra numatyta įvairių tipų virpesių generavimo galimybė.

Šiuo metu labai dažnai taikoma programa – „RightMark Audio Analyzer“ [83, 84]. Ši laisvai platinama programa skirta kompiuterių garso sistemų akustinių parametrų įvertinimui arba testavimui. Šios programos grafinis vartotojo interfeisas pateiktas 1.5 paveiksle.



1.5 pav. *Programos „RightMark Audio Analyzer“ langas*

Šioje programoje KGS testavimas vyksta atkuriant testinius signalus ir analizuojant šiuos signalus, praėjusius per jos garso traktą. Toks programos veikimo principas reikalauja, kad tiriamoji garso sistema palaikytų dupleksinį režimą (angl. *Full Duplex*), t.y. galimybė signalą vienu metu atkurti ir įrašyti.

Programoje „RightMark Audio Analyzer“ numatyti tokie testavimo režimai:

- KGS išėjimo kanalo (atkūrimo kokybės) testavimas. Reikalinga išorinė matavimo įranga;
- KGS įėjimo kanalo (įrašymo kokybės) testavimas. Reikalingas testinių signalų generatorius;
- KGS ištisinio (įrašymo ir atkūrimo) kanalo testavimas. Nereikalinga papildoma įranga, tiriamoji KGS turi palaikyti dupleksinį režimą;
- KGS skaitmeninio įėjimo ir išėjimo testavimas;
- išorinės realaus laiko garso aparatūros testavimas;
- kitos garso aparatūros (CD įrenginių SAK, garso magnetofonų ir kt.) testavimas asinchroniniu režimu. Galima analizuoti *.*wav* failus.

Su šia programa galima nustatyti KGS dažninę amplitudės charakteristiką, triukšmų lygį, signalo ir triukšmo santykį, netiesinius iškraipymus ir triukšmą, intermoduliacinius iškraipymus, signalų skvarbą į gretimus kanalus.

1.5 Kompiuterių garso sistemų taikymas

Šiuo metu sparčiai vystantis kompiuterinei technikai kompiuterių garso sistemos be tradicinės taikymo srities, tokios kaip *Multimedia*, vis plačiau taikomos įvairiose kitose žmogaus veiklos srityse. Ypač išsiplėtė kompiuterių garso sistemų taikymas mokymo, matavimo, monitoringo ir balsu valdomose sistemose, balso atpažinime. Tapo įprastu tekstų skaitymas, rašymas diktuojant, akustinių signalų registravimas ir analizė medicinoje, kriminalistikoje, technikoje ir kt. [1-30].

Kompiuterių garso sistemos gali būti taikomos mokymo tikslams. Yra sukurta gana daug tokių sistemų [1, 2, 6-8, 11-13]. Trumpai aptarsime kelias iš jų.

Sukurta kompiuterinė audiovizuali kalbos mokymo sistema, skirta vaikams. Joje taikoma standartinė kompiuterio garso sistema. Kaip teigia autoriai, mokymo procesas vaikams įdomus, kadangi garsai derinami su vaizdais, o tai palengvina ir pagreitina mokymąsi [6].

Kompiuterių garso sistema gali būti taikoma, kaip signalų generatorius, tiriant grandines (pvz.: žemo ar aukšto dažnio filtrus) grandinių teorijos laboratorinių darbų metu. Vienu metu gali būti perduodamas testinis signalas ir tuo pačiu metu įrašoma grandinės reakcija į šį signalą. Tam taikomas programų paketas MATLAB ir „CoolEdit“ [7].

Kompiuterio garso sistema taip pat gali būti taikoma, kaip spektro analizatorius [1, 13], oscilografas [12] ar funkcinis generatorius [11].

Medicinoje kompiuterių garso sistemos dažniausiai panaudojamos kaip garso (širdies, plaučių ir kt. garsų) įrašymo įrenginys. Yra sukurtos širdies garsų kompiuterinės duomenų bazės [26].

Labai plačiai kompiuterių garso sistemos taikomos žmogaus balso atpažinime [18-21].

Akustikoje kompiuterio garso sistema gali būti taikoma kaip triukšmo lygio pastatų patalpose matavimo sistema [9].

Tai toli gražu ne visos kompiuterių garso sistemų taikymo sritys.

1.6 Išvados

1. Kompiuterių garso sistemas gaminančios firmos pateikia labai mažai informacijos apie jų kokybę, todėl, taikant šias sistemas kokybiškam garso ruožo signalų atkūrimui ir įrašymui, svarbu žinoti jų kokybinius parametrus. Vienu iš pagrindinių funkcinių įtaisų, lemiančių kompiuterių garso sistemų kokybę, yra ASK. Vienas iš pagrindinių keitiklio parametrų yra efektyviųjų skilčių skaičius.
2. ASK tyrimo metodų analizė parodė, kad visi jie pagrįsti kvantavimo paklaidos vidutinės kvadratinės vertės skaičiavimu ir jos palyginimu su idealaus tokio pat skiltiškumo ASK kvantavimo paklaidos vidutine kvadratine verte.
3. Žinomi ASK kokybės vertinimo metodai reikalauja daug aparatūros, t.y. generatorių, sintezatorių, oscilografų, etaloninių ASK ir SAK. Ši aparatūra įtakoja matavimų tikslumą bei našumą.
4. Šiuo metu vis plačiau pats kompiuteris taikomas garso kanalo parametrų ir charakteristikų tyrimui. Žinoma programinė įranga turi patogius vartotojo grafinius interfeisus, leidžia nustatyti eilę kompiuterių garso sistemų garso kanalo parametrų ir charakteristikų, tačiau netinka kiekybiniam garso sistemos kokybės įvertinimui.

5. Kadangi, kompiuterių garso sistemos vis plačiau taikomos įvairiose žmogaus veiklos srityse (mokymo, matavimo, monitoringo ir balsu valdomose sistemose, balso atpažinime, tapo įprastu tekstų skaitymas, rašymas diktuojant, garso signalų registravimas ir analizė medicinoje, kriminalistikoje, technikoje ir kt.), šiandieną yra aktualu:

– išanalizuoti kompiuterių garso sistemų kokybės vertinimo metodus ir tam skirtą programinę įrangą;

– ištirti klasikinį kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodą ir jį patikslinti;

– sukurti paprastą, nereikalaujantį specialios aparatūros, kompiuterių garso sistemų ASK kokybės įvertinimo metodą ir programinę įrangą jam realizuoti;

– ištirti ir tarpusavyje palyginti šiuo metu plačiai naudojamų kompiuterių garso sistemų kokybę;

– ištirti naujų testinių analoginių signalų formavimo ir taikymo kompiuterių garso sistemų ASK tyrimui galimybes;

– pateikti praktinio kompiuterių garso sistemų taikymo pavyzdžių.

2. KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ KOKYBĖS TYRIMO METODAS

Taikant kompiuterį, o tiksliau jo garso sistemą matavimo tikslams, kaip patogų tiriamųjų signalų įvesties ir išvesties prievadą garso dažnių ruože, reikia žinoti garso sistemos kokybę.

Vienu iš pagrindinių funkcinių elementų, lemiančių kompiuterių garso sistemų (KGS) kokybę, yra analoginis-skaitmeninis keitiklis (ASK). Žinomi šių keitiklių kokybės vertinimo metodai reikalauja nemažai papildomos aparatūros, t.y. generatorių, sintezatorių, oscilografų, etaloninių skaitmeninių-analoginių keitiklių (SAK), pagaliau jungiamųjų kabelių ir kt. Visa ši pagalbinė aparatūra įtakoja matavimų tikslumą bei našumą. Svarbios, taip pat ir KGS triukšminės savybės, dažninė amplitudės charakteristika, netiesiniai iškraipymai kt. Todėl vartotojui, renkantis naują KGS, aktualu objektyviai ir operatyviai ją patikrinti. Pageidautina, kad tokiam patikrinimui nereikėtų jokios specializuotos aparatūros arba stendų, išskyrus kompiuterį su garso sistema.

Šiame skyriuje tiriama programų paketo MATLAB panaudojimo galimybė KGS kokybės vertinimui.

Skyriaus medžiaga paskelbta [112-116, 119, 120] darbuose.

2.1 Programų paketo MATLAB taikymo galimybių tyrimas

Programų paketas MATLAB (firma *MathWorks, Inc*.) praėjo ilgą vystymosi kelią nuo siaurai specializuoto matricinio programinio modulio, taikyto tik didelėse ESM, iki universalios kompiuterinės matematikos sistemos, orientuotos IBM PC ir *Macintosh* kompiuteriams ir UNIX darbo stotims. Ši inžinerinių ir mokslinių skaičiavimų sistema šiuo metu plačiai taikoma pasaulio universitetuose ir mokslo centruose.

Labiausiai žinomos sistemos MATLAB [85-98] taikymo sritys yra matematika ir skaičiavimai, algoritmų kūrimas, skaičiuojamasis eksperimentas, imitacinis modeliavimas, duomenų analizė, mokslinė ir inžinerinė grafika, taikant grafinę vartotojo sąsają ir kt.

Pradedant penktąja MATLAB versija išplėstos darbo su garso signalais priemonės. Iki tol buvo žinoma vienintelė funkcija SOUND (Y, F_S) ir jos variacijos per garso kolonėles atkurianti signalą iš vektoriaus Y su diskretizavimo dažniu F_S. Toliau, jau šeštoje MATLAB versijoje, pasirodė dar dvi šios funkcijos SOUND modifikacijos – SOUNDSC (Y, F_S, *BITS*) ir SOUNDSC

(*Y, F_S, BITS, SLIM*). Pirmoji iš jų normalizuoja atkuriamą analoginį signalą, nustatydama jo kitimo ribas nuo -1 iki +1. Atkuriamo signalo lygis šiuo atveju nepriklauso nuo vektoriaus *Y*. Antroji – analoginio signalo kitimo ribas nustato pagal parametrą *SLIM*=[SLOW SHIGH], t.y. parametras *SLIM* nustato garso dinaminį diapazoną. Pagal nutylėjimą *SLIM*=[min(*y*) max(*y*)].

Šeštojoje MATLAB versijoje garso atkūrimui gali būti taikoma dar viena panašaus veikimo funkcija WAVPLAY. Galimi tokie šios funkcijos variantai:

WAVPLAY (*Y, F_S*) iš vektoriaus *Y* atkuria garso signalą su diskretizavimo dažniu F_S ir perduoda jį į *Windows Wave* įrenginį. Standartiniai diskretizavimo dažniai yra 8000, 11025, 22050 ir 44100 Hz;

WAVPLAY (*Y*) diskretizavimo dažnį automatiškai nustato lygų 11025 Hz;

WAVPLAY (*Y, F_S, 'async'*) leidžia vykdyti kitas MATLAB funkcijas lygiagrečiai su signalo *Y* atkūrimu;

WAVPLAY (*Y, F_S, 'sync'*) neleidžia vykdyti jokių kitų funkcijų tol, kol nebus baigtas signalo *Y* atkūrimas. Stereo signalo atveju *Y* turi būti $N\times2$ matrica.

Galimi funkcijos WAVPLAY duomenų formatai pateikti 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. *Funkcijos WAVPLAY duomenų formatai*

Formatas	skilčių skaičius / imčiai
'double'	16
'single'	16
'int16'	16
'uint8'	8

Funkcija WAVPLAY gali veikti tik esant 32 bitų *Windows* operacinei sistemai.

Garso įrašymui taikoma funkcija WAVRECORD, kuri per kompiuterio garso įvesties įrenginį įrašo garso signalą į operatyviąją atmintį. Galimi du šios funkcijos formatai: WAVRECORD (*N, F_S, CH*) ir WAVRECORD (*..., DTYPE*).

Pirmasis į operatyviąją atmintį įrašo *N* signalo imčių su diskretizavimo dažniu F_S ir kanalų skaičiumi *CH*. Kanalų skaičius gali būti 1 arba 2 (mono arba stereo). Standartiniai diskretizavimo dažniai yra 8000, 11025, 22050 ir 44100 Hz. Jeigu nenurodyta, imama $F_S = 11025$ Hz ir $CH = 1$.

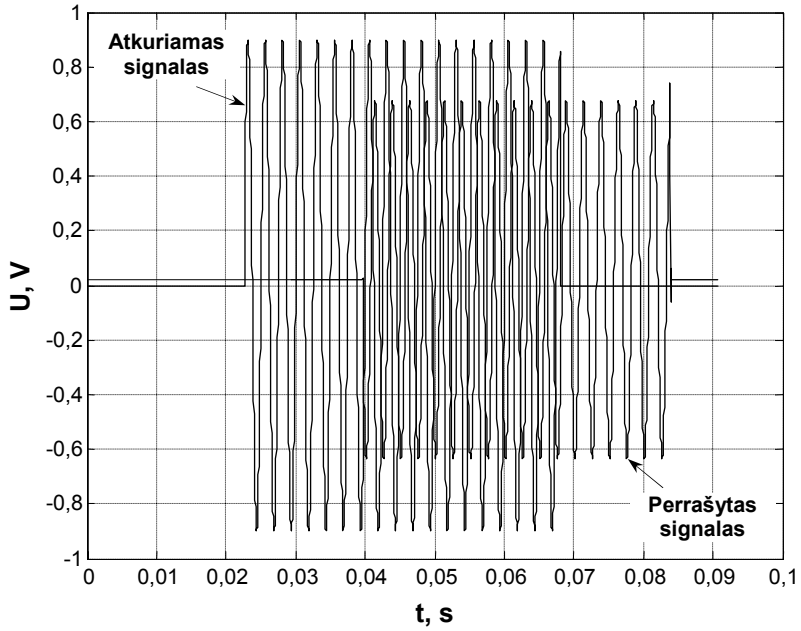
Antrasis formatas skiriasi nuo pirmojo tuo, kad papildomai nurodomas duomenų tipas (žr. 2.1 lentelę).

WAVRECORD funkcija gali dirbti tik esant 32 bitų *Windows* operacinei sistemai.

Funkcijos SOUND (WAVPLAY) ir WAVRECORD gali veikti sinchroniškai, t.y. atkurti garso signalą iš operatyviojoje atmintyje esančio vektoriaus ir perrašyti jį į kitą vektorių. Galimas, taip pat ir daugkartinis perrašymas. Tai gali pasitarnauti KGS garso įrašymo – atkūrimo trakto kokybės tyrimui. 2.1 paveiksle parodyta MATLAB programa ir signalų oscilogramos, demonstruojančios garso signalo perrašymo procesą.

```
function garsas
n=16; % fizinis ASK skilčių skaičius
f=2000; % generuojamo signalo dažnis
fs=44100;% diskretizavimo dažnis
k=4000;% imčių skaičius, skirtas garso atkūrimui
m=1:k; % masyvo apimtis
y=0.9*sin(2*pi*f*m/fs); % sinusinio signalo formavimas
y(1:1000)=0;
y(3000:4000)=0;
soundsc(y,fs,n); % sinusinio signalo atkūrimas
s=wavrecord(k,fs,1); % sinusinio signalo įrašymas
t=m/fs; % laikas
plot(t,y,t,s,'black');grid;
```

a



b

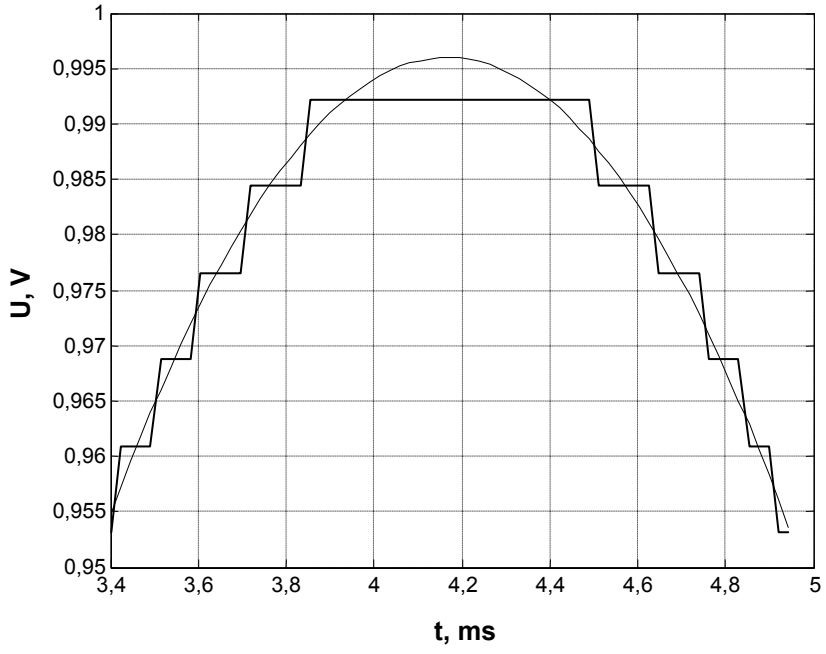
2.1 pav. *Garso signalo perrašymo procedūra: a – MATLAB programa; b – atkuriamo ir perrašomo signalų grafikai*

Programų paketu MATLAB galima modeliuoti idealaus ASK darbą garso dažnių ruože. Tam tinka funkcija WAVWRITE (*Y, F_S, NBITS, 'WAVEFILE'*), kuri duomenis *Y* įrašo į „*.wav“ formato failą pavadinimu *WAVEFILE* diskretizavimo dažniu F_S ir taikant *NBITS* bitų skaičių. Bitų skaičius gali būti nustatytas 8, 16, 24 arba 32. Stereo duomenys aprašomi kaip dviejų stulpelių matrica.

Nuskaityti „*.wav“ failą galima taikant funkciją [*Y, F_S, NBITS*]=WAVREAD. 2.2 paveiksle pateiktas idealaus ASK imitacinis modelis.

```
function ASK
nbit=8;
f=60; % Hz
fs=44100; % Hz
t=(150:218)/fs; % s
u=0.996*sin(2*pi*f*t);
wavwrite(u,fs,nbit,'ask');
s=wavread('ask');
t=t*1000; % ms
plot(t,u,t,s);
```

a



b

2.2 pav. *Imitacinis idealaus ASK modelis: a – modeliuojanti programa; b – laiko diagramos fragmentas, iliustruojantis idealaus ASK darbą*

MATLAB taip pat palaiko AU formato garso duomenų failus. Pirmiausia jie buvo pradėti naudoti SUN kompiuteriuose, kompiuteriuose NeXT žinomi SND pavadinimu. Šiuo metu šis formatas plačiai taikomas Internete. Pagrindinis AU privalumas – paprastumas.

Naudojamos dvi MATLAB funkcijos – AUWRITE ir AUREAD, rašyti į failą ir skaityti iš failo.

AUWRITE (*Y, F_S, BITS, 'AUFILE'*) iš vektoriaus *Y* pavadinimu *AUFILE* įrašo „*.au“ formato garso failą su nurodytu diskretizavimo dažniu F_S ir bitų skaičiumi *BITS*.

[*Y, F_S, BITS*]=AUREAD (*'AUFILE'*,[*N*1 *N*2]) iš failo *AUFILE* nuo *N*1 iki *N*2 imties nuskaito duomenis, diskretizavimo dažnį F_S ir bitų skaičių *BITS*.

Be minėtų funkcijų, garso signalų apdorojimui realiuoju laiku gali pasitarnauti dar dvi MATLAB funkcijos – ANALOGINPUT ir ANALOGOUTPUT. Abi jos gali dirbti 32 bitų MS *Windows* operacinėje sistemoje, taikydamos atitinkamas kompiuterio garso sistemos tvarkykles (programines priemones).

2.2 Kompiuterių garso sistemų kokybės tyrimo metodo parinkimas ir pagrindimas

Kompiuterio garso sistemą vertinsime pagal pagrindinę jos funkciją – garso įrašymo ir atkūrimo kokybę. Lemiamą vaidmenį čia atlieka kodavimo ir dekodavimo įtaiso pagrindinės sudedamosios dalys – ASK ir SAK. Dauguma šiuolaikinių KGS leidžia dupleksinį darbo režimą, t.y. garso atkūrimą ir įrašymą tuo pačiu metu. Todėl tyrimui taikysime schemą (2.3 pav.), išnaudojančią šią galimybę.

KGS kokybės tyrimui buvo pasirinktas efektyviųjų skilčių metodas, kadangi jis leidžia kiekybiškai ir vienareikšmiškai skaičiumi įvertinti ASK kokybę ir remiasi tiek signalo ir triukšmo santykio matavimo metodu, tiek priartinimo prie idealios sinusinės kreivės metodu.

Vertinimo kriterijumi naudosime ASK efektyviųjų skilčių skaičių (ESS), nes tai viena pagrindinių skaitinių charakteristikų, įvertinanti analoginio signalo keitimo kokybę.

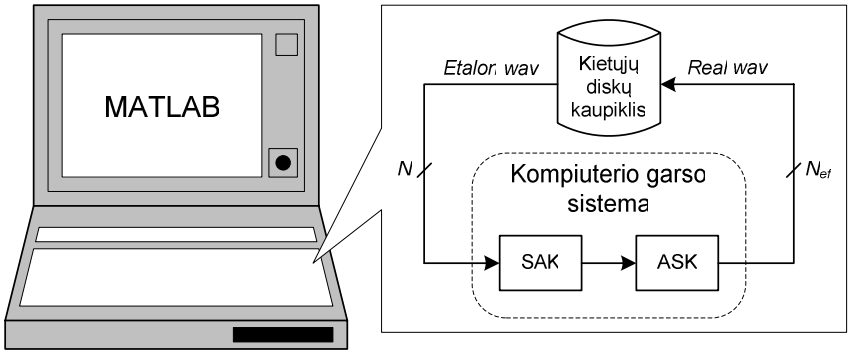
Pirmiausia, su sudaryta specialia MATLAB programa „Test“ (P1.1) sukuriamas etaloninis *Etalon.wav* failas, imituojantis sinusinio virpesio diskretizavimą ir pakeitimą skaitmeniniais kodais idealiu *N* skilčių ASK.

Programos įėjimo parametrai:

- etaloninio signalo dažnis (*f*),
- diskretizavimo dažnis (f_s),

- fizinis ASK skilčių skaičius (N).

Programa, taip pat į ekraną išveda diskretizuoto ir analoginio etaloninio signalo grafikus (2.2 pav., b).



2.3 pav. *Matavimų schema: N – fizinis ASK skilčių skaičius; N_{ef} – ASK efektyviųjų skilčių skaičius*

Toliau šis failas atkuriamas tiriamosios garso sistemos SAK ir tuo pačiu metu ASK perrašomas į kitą *Real.wav* failą (*Full Duplex* režimu). Atkūrimo ir įrašymo procedūroms naudojama MS *Windows Sound Recorder* programa. Perrašytas failas skiriasi nuo etaloninio tiek, kiek abu keitikliai SAK ir ASK turėjo įtakos praėjusiam per juos signalui.

Kiekybiniam KGS atkūrimo ir įrašymo trakto kokybės įvertinimui pagal perrašyto *Real.wav* failo duomenis, apskaičiuojamas ASK efektyviųjų skilčių skaičius pagal žinomą formulę:

$$N_{ef} = N - \log_2 \frac{S_r}{S_i}, \tag{2.1}$$

čia N – fizinis ASK skilčių skaičius, S_r ir S_i – realaus ir idealaus ASK kvantavimo paklaidų vidutinės kvadratinės vertės.

Apskaičiuota N_{ef} vertė priklausys ne tik nuo ASK, bet ir nuo SAK savybių, todėl ją galima laikyti kompleksiniu garso sistemos kokybės kriterijumi. Praktika rodo, kad norint neįvertinti SAK įtakos, jo skilčių skaičius turėtų būti bent viena skiltimi didesnis už ASK skilčių skaičių.

Idealaus ASK atveju kvantuojamo analoginio signalo momentinė vertė pataiko į bet kurią kvantavimo intervalo vietą su beveik vienoda tikimybe, todėl kvantavimo paklaidos vidutinė kvadratinė vertė [78, 99-103] apskaičiuojama įvertinant vienodos tikimybės skirstinį:

$$S_i = \frac{q}{\sqrt{12}}, \tag{2.2}$$

čia q – ASK žemiausiosios skilties vertė.

Realaus ASK kvantavimo paklaidos vidutinė kvadratinė vertė apskaičiuojama atžvilgiu sinusinio virpesio mažiausiųjų kvadratų metodu:

$$S_r = \min(E), \tag{2.3}$$

čia

$$E = \sqrt{\frac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k}\left\{x_i - \left[A\sin\left(2\pi\frac{f}{f_s}i + \varphi\right) + C\right]\right\}^2}, \tag{2.4}$$

x_i – i-asis skaičius ASK išėjime; A, φ ir C – sinusinio virpesio amplitudė, pradinė fazė ir nuolatinė dedamoji; f ir f_s – signalo ir diskretizavimo dažniai.

Tikslo funkcija (2.4) yra daugiaekstremalinio charakterio (2.4 pav.), todėl ją minimizuojant, reikia imtis priemonių, nukreipiančių paiešką į globalinio minimumo suradimą. Be to, sudarant paieškos algoritmą svarbu nustatyti tarpusavio ryšį tarp kintamųjų.

Kaip rodo anksčiau atlikti tyrimai [113] dažnio f ir pradinės fazės φ optimalios vertės negali būti surastos nepriklausomai viena nuo kitos, nes yra tarpusavyje susijusios. Amplitudė A ir nuolatinė dedamoji C neturi įtakos optimalioms f ir φ vertėms (2.5 pav.), todėl gali būti surastos atskirai, taikant klasikinį dalinių išvestinių metodą:

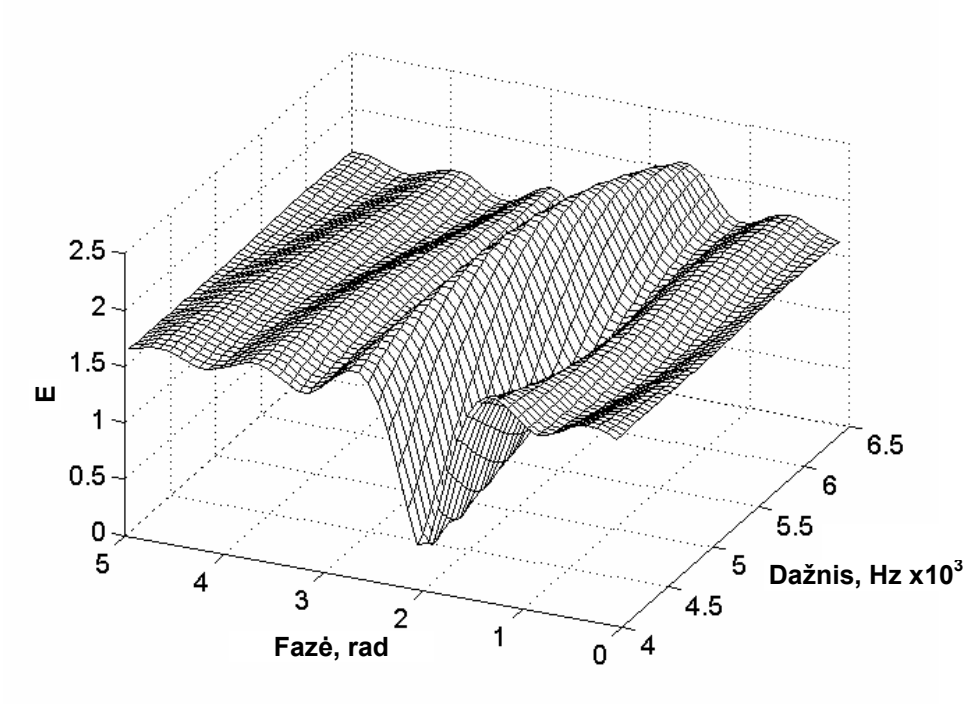
$$\begin{cases} \dfrac{\partial E}{\partial A} = 0, \\ \dfrac{\partial E}{\partial C} = 0. \end{cases} \tag{2.5}$$

Sprendžiant (2.5) lygčių sistemą gauname:

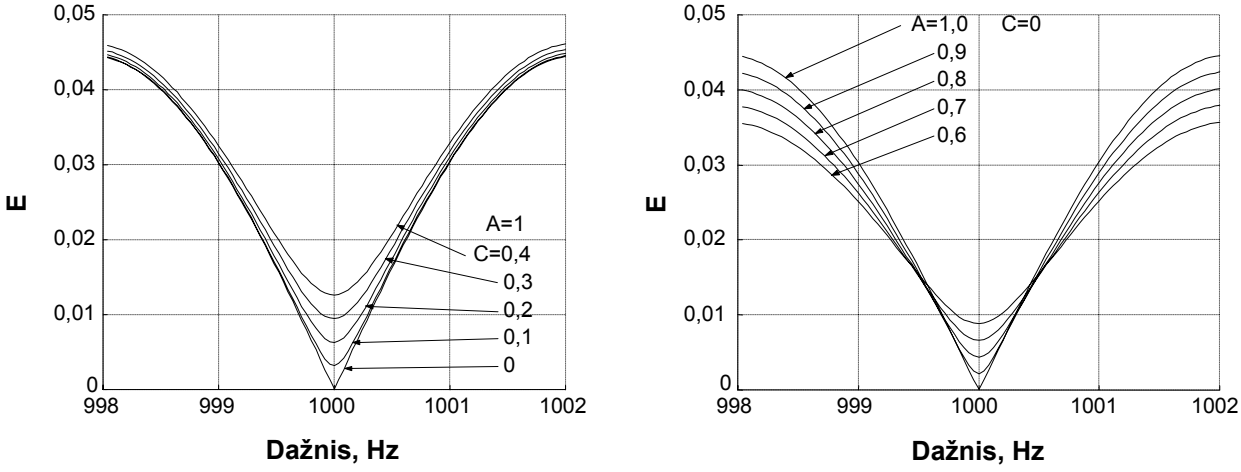
$$A_{opt.} = \frac{k \cdot B1 - B3 \cdot B4}{k \cdot B2 - (B3)^2}, \tag{2.6}$$

čia k – imčių skaičius.

$$C_{opt.} = \frac{B1 - A_{opt.} \cdot B2}{B3}, \tag{2.7}$$



2.4 pav. *Bendras tikslo funkcijos grafinis vaizdas*



a *b*

2.5 pav. *Tikslo funkcijos priklausomybė nuo dažnio: a – esant įvairioms nuolatinės dedamosios vertėms; b – esant įvairioms amplitudėms*

$$B1 = \sum_{i=1}^{k} x_i \sin\left(2\pi \frac{f}{f_s} i + \varphi\right), \tag{2.8}$$

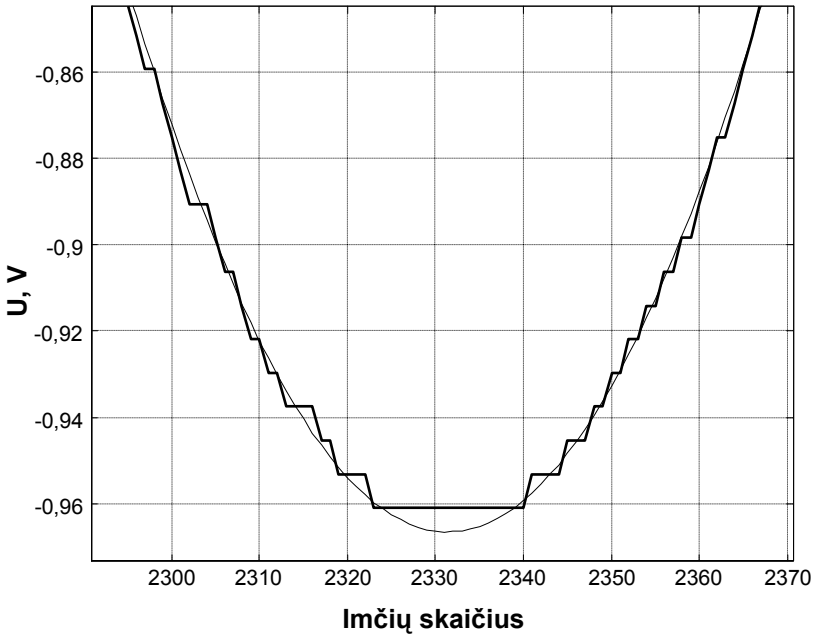
$$B2 = \sum_{i=1}^{k} \sin^2\left(2\pi \frac{f}{f_s} i + \varphi\right), \tag{2.9}$$

$$B3 = \sum_{i=1}^{k} \sin\left(2\pi \frac{f}{f_s} i + \varphi\right), \tag{2.10}$$

$$B4 = \sum_{i=1}^{k} x_i \ . \tag{2.11}$$

Į (2.8)...(2.10) lygtis turi būti įrašomos optimalios dažnio ir pradinės fazės vertės, surastos atskirai.

Taikant aukščiau pateiktas lygtis ir MATLAB kelių kintamųjų funkcijos minimizavimo procedūrą buvo sudaryta programa „Ess“ (P1.2) kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimui. Programa apskaičiuoja ESS ir išveda praėjusio per SAK – ASK traktą ir jį aproksimuojančio signalų grafikus (2.6 pav.).



2.6 pav. *Praėjusio per SAK – ASK traktą ir jį aproksimuojančio signalų fragmentai*

Kadangi tikslo funkcija yra daugiaekstremalinė, programoje numatytos globalinio ekstremumo paieškos priemonės.

Programos įėjimo parametrai:

- etaloninio signalo dažnis *f*,
- fizinis ASK skilčių skaičius *N*,
- imčių skaičius *k*,
- pradinės imties numeris *k1*,
- paskutinės imties numeris *k2*.

Ištirsime imčių skaičiaus ir įrašymo lygio įtaką ESS matavimams, taip pat SAK įtaką ESS, pateiksime kai kurių plačiai vartojamų KGS triukšmines ir ESS priklausomybes nuo dažnio.

2.2.1 Bandymų skaičiaus parinkimas

Tai klasikinis matematinės statistikos uždavinys, kurį sprendžiant užtikrinamas atsitiktinio dydžio pasirinktos skaitinės charakteristikos įverčio tikslumas. Dažnai bandymų (matavimų) skaičius randamas pagal norimą vidurkio nustatymo tikslumą [78, 99-102]. Jeigu bandymų skaičius yra pakankamai didelis (k>100), vidurkio skirstinys artimas normaliajam, tada galima taikyti žinomą formulę:

$$k = \left[\frac{t(P)}{\varepsilon}\right]^2 \sigma^2, \tag{2.12}$$

čia $t = t(P)$ – Stjudento koeficientas randamas iš lygties $2\Phi(t) = P$; $\Phi(t)$ – tikimybių integralas; P – pasikliautinė tikimybė; ε – ESS aritmetinio vidurkio standartinė neapibrėžtis; σ^2 – neapibrėžties dispersija.

Nagrinėjamu atveju atsitiktinis dydis yra ESS. Jo dispersiją lemia ne tik pasirinktas ESS skaičiavimui bandymų skaičius, bet ir realaus signalo charakteristikos – triukšmas, dažnis, dinaminės ASK charakteristikos ir kiti faktoriai. Todėl norimą ESS matavimų tikslumą užtikrinantį bandymų skaičių rasime eksperimentiškai, k kartų matuodami ESS ir statistiškai apdorodami gautus rezultatus.

Tai leis apskaičiuoti ESS matavimų pilnąją neapibrėžtį:

$$PN = \pm\frac{3S}{\overline{N}_{ef}} \cdot 100\%, \tag{2.13}$$

čia S – ESS matavimų standartinė neapibrėžtis; $\overline{N}_{ef}$ – ESS matavimo rezultatų vidurkis.

Apskaičiavus pagal (2.13) formulę ESS matavimų pilnosios neapibrėžties priklausomybę nuo bandymų skaičiaus, vėliau pagal šią priklausomybę galima rasti reikiamą bandymų skaičių, užtikrinantį norimą ESS skaičiavimo tikslumą.

Bandymų skaičiaus k radimui formulė (2.12) nagrinėjamu atveju tiesiogiai negali būti pritaikyta, nes nežinoma neapibrėžties dispersija. Tokiu atveju reikiamą bandymų skaičių galima pasirinkti iš 2.2 lentelės [99].

2.2 lentelė. *Bandymų skaičiaus pasirinkimas*

q \ P	0,9	0,95	0,98	0,99	0,999
0,2	70	99	139	171	277
0,1	273	387	545	668	1089
0,05	1084	1540	2168	2659	4338

Šioje lentelėje: $q = \varepsilon/S$; S – ESS matavimų standartinė neapibrėžtis; ε – ESS aritmetinio vidurkio standartinė neapibrėžtis; P – pasikliautinė tikimybė.

Taigi, apdorojus pasirinkto bandymų skaičiaus rezultatus, su tikimybe P galima tvirtinti, kad:

$$\left| N_{ef\,0} - \overline{N}_{ef} \right| < qS\,, \tag{2.14}$$

čia N_{ef0} – tikroji ESS vertė.

Šiems skaičiavimams atlikti, o taip pat ESS histogramoms gauti, buvo sudaryta MATLAB programa „Dsp“ (P1.3).

Programos įėjimo parametrai:

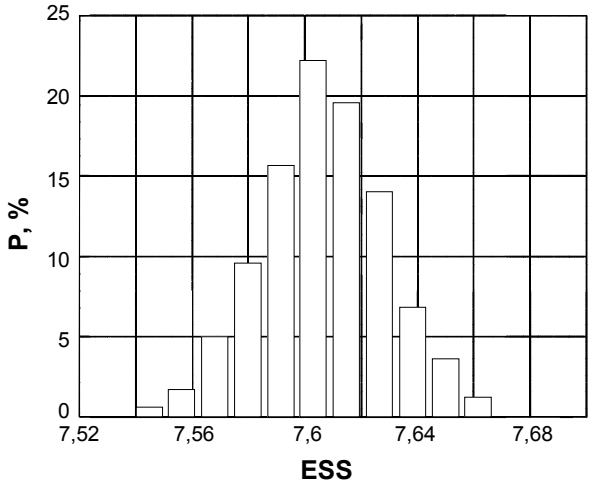
- etaloninio signalo dažnis f,
- fizinis ASK skilčių skaičius N,
- imčių skaičius k,
- bandymų skaičius N_b.

Programa apskaičiuoja:

- ESS (N_{ef}) histogramą,

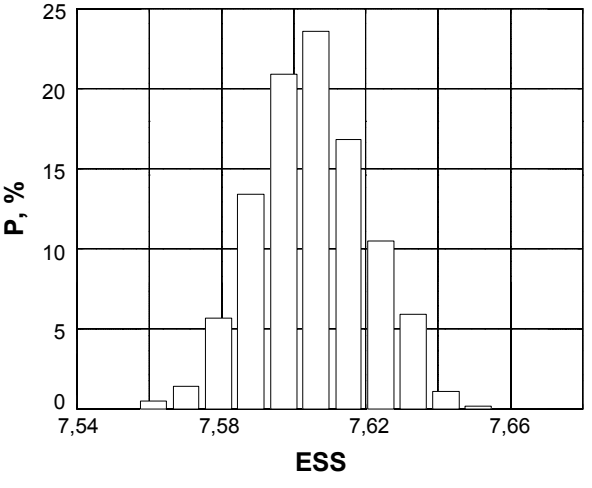
- matavimų pilnąją neapibrėžtį (*PN*) $\delta_{\max}$,
- skirstinio asimetrijos koeficientą *A*,
- skirstinio ekscesą *E*.

ESS skaičiavimai atliekami atsitiktinėse *Real.wav* failo vietose, todėl gaunamos vis skirtingos ESS vertės. Taigi ESS yra atsitiktinis (tiksliau pseudoatsitiktinis) skaičius, turintis savo skirstinį. Dviejų pasirinktų kompiuterių garso sistemų ESS histogramos pateiktos 2.7 paveiksle.



$\overline{N}_{ef} = 7{,}6123$
$PN = 0{,}8603$ %
$A = -0{,}0107$
$E = -0{,}0886$
$f = 1000$ Hz
$N_b = 1000$

a



$\overline{N}_{ef} = 7{,}6094$
$PN = 0{,}6015$ %
$A = 0{,}0239$
$E = -0{,}0882$
$f = 1000$ Hz
$N_b = 1000$

b

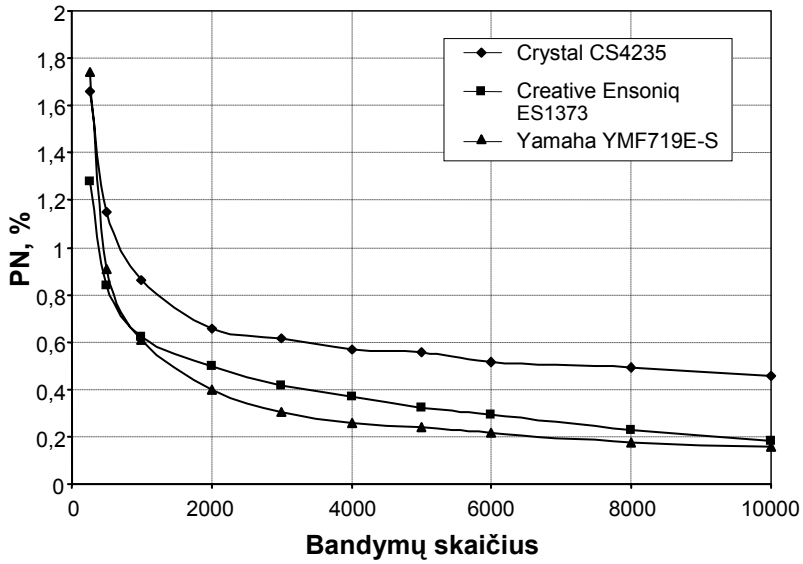
2.7 pav. *Efektyviųjų skilčių skaičiaus histogramos: a – „Crystal CS4235“, b – „Yamaha YMF719E-S“*

Apskaičiuoti asimetrijos ir eksceso koeficientai neprieštarauja normaliojo skirstinio hipotezei, todėl *PN* skaičiavimams tolerancijų laukas priimtas lygus 6 standartiniams nuokrypiams.

Taigi, atliekant vienkartinį ESS matavimą, yra neišvengiama matavimų neapibrėžtis. Norint ją sumažinti, reikia didinti ESS skaičiavimams pasirinktą bandymų skaičių.

Bandymų skaičiaus suradimui buvo pasirinktos trys kompiuterių garso sistemos: „Crystal CS4235“, „Creative Ensoniq ES1373“ ir „Yamaha YMF719E-S“.

Skaičiavimų rezultatai pateikti 2.8 paveiksle.



2.8 pav. *Efektyviųjų skilčių skaičiaus matavimų pilnosios neapibrėžties priklausomybių nuo bandymų skaičiaus grafikai*

Grafikai rodo, kad norint užtikrinti $PN \approx 1$ %, ESS matavimams pakanka 1000 bandymų.

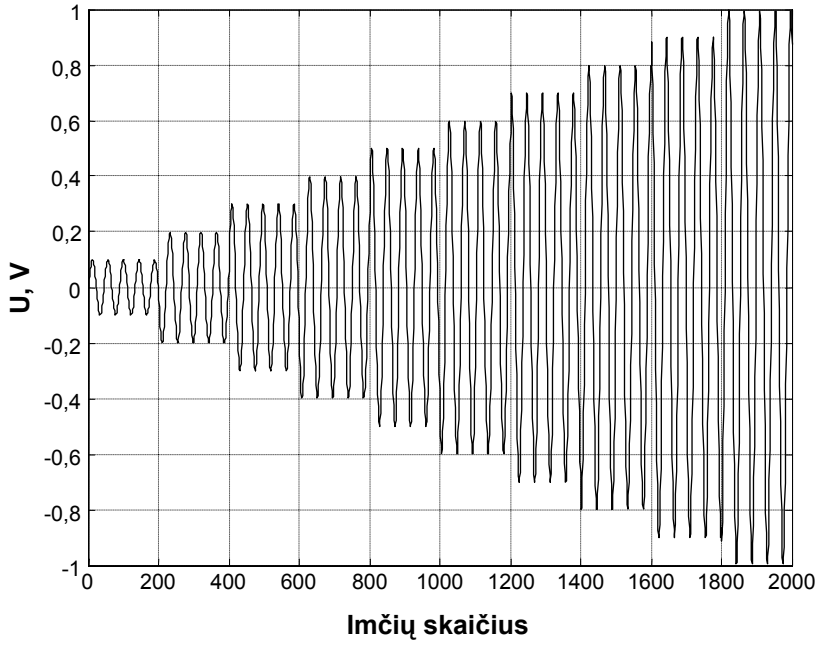
2.2.2 Įrašymo lygio parinkimas

Matuojant ASK efektyviųjų skilčių skaičių, reikalaujama, kad įėjimo signalo dviguba amplitudė apimtų visą keitiklio kodų skalę. Tačiau, esant dideliam keitiklio skilčių skaičiui (16 ir daugiau), tai pasiekti nėra paprasta, todėl įėjimo įtampa nustatoma šiek tiek mažesnė. Įrašymo lygio įtaka garso dažnių ruožo ASK efektyviųjų skilčių skaičiui bandyta įvertinti autoriaus darbuose [112, 114, 115, 119, 120]. Tačiau vėlesni tyrimai parodė, kad išvados, padarytos vienų keitiklių atžvilgiu, ne visada tinka kitiems.

Įrašymo lygio įtakai detaliau tirti buvo sudaryta MATLAB programa, susidedanti iš poliamplitudinio signalo modeliavimo ir ESS skaičiavimo blokų. Poliamplitudinio signalo modeliavimo programa „Tsta“ (P1.4) modeliuoja fiksuoto 1000 Hz dažnio ir šuoliu didėjančios amplitudės sinusinius virpesius (2.9 pav.) ir įrašo juos į testinį *Etalon.wav* failą.

Programos įėjimo parametrai:

- etaloninio signalo dažnis *f*,
- diskretizavimo dažnis f_s,
- fizinis ASK skilčių skaičius *N*,
- amplitudžių eilutė *AA*,
- amplitudžių skaičius *M*,
- imčių skaičius, tenkantis vienai amplitudei *L*.



2.9 pav. *Supaprastinto poliamplitudinio signalo, įrašymo lygio įtakai tirti, fragmentas*

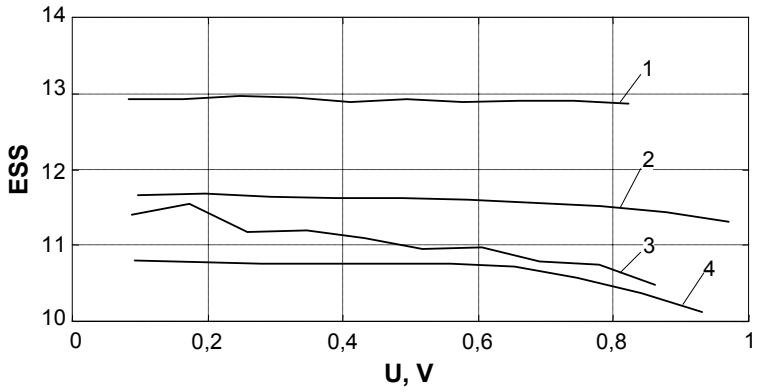
Antroji programa „Essa“ (P1.5) apskaičiuoja ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybę nuo įėjimo signalo amplitudės.

Programos įėjimo parametrai:

- etaloninio signalo dažnis *f*,
- fizinis ASK skilčių skaičius *N*,
- imčių skaičius *k*,

- pradinės imties numeris *k1*,
- paskutinės imties numeris *k2*,
- imčių skaičius, tenkantis vienam dažniui *L*.

Kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybių nuo įėjimo signalo amplitudės skaičiavimo rezultatai pateikti 2.10 paveiksle.



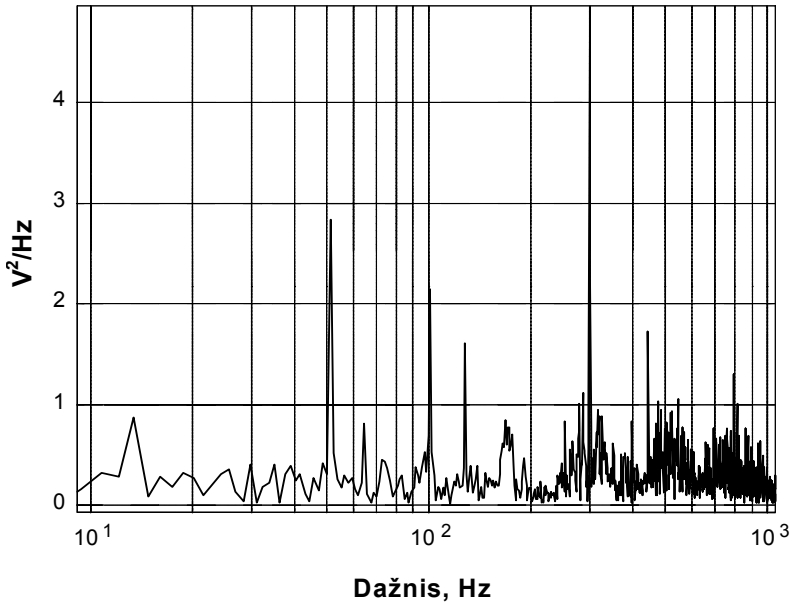
2.10 pav. *Kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybės nuo įėjimo signalo amplitudės: 1 – „Crystal CS4235“; 2 – „Opti 82C931LC“; 3 – „ESS ES1869“; 4 – „Yamaha YMF719E-S“*

Iš 2.10 paveikslo. matyti, kad dauguma tirtų kompiuterių garso sistemų yra nekokybiškos. Šių garso sistemų realių ASK ESS gerokai skiriasi nuo jį atitinkančio idealaus ASK skilčių skaičiaus, kuris pagal paso duomenis turėtų būti lygus 16. ESS priklausomybės nuo amplitudės turi nežymiai krentantį pobūdį. Kritimo statumas yra tuo mažesnis, kuo aukštesnė ASK kokybė, t.y. kuo didesnė ESS vertė (1 – oji kreivė 2.10 pav.). Nekokybiškų garso sistemų („ESS ES1869“, „Yamaha YMF719E-S“) ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus mažėjimą prie didesnių įėjimo signalo verčių galima paaiškinti tuo, kad, dengiant vis didesnę keitiklio kodų skalę, didėja vidutinė kvadratinė triukšmo vertė. Kiekvienam atskiram ASK ekstrapoliacijos būdu galima rasti ESS vertę, esant didžiausiai įėjimo signalo vertei. Apskaičiuoti bendrą pataisos koeficientą, įvertinantį ESS sumažėjimą didėjant įėjimo įtampai, būtų nekorektiška.

Jeigu įrašymo lygis yra 0,8 ... 0,95 V ribose (kas yra nesunkiai pasiekiama), gausime nuo 1,5 iki 0,2 % didesnį kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičių, nei esant 1 V įrašymo lygiui.

2.2.3 Triukšmų įtakos tyrimas

Kompiuterių garso sistemų ASK savųjų triukšmų įvertinimui buvo daromi įrašai, įžeminus ASK įėjimą, esant diskretizavimo dažniui 44,1 kHz ir 8 bei 16 skilčių skaičiui. Visų tirtų kompiuterių garso sistemų savųjų triukšmų įtampų spektrinių tankių analizė parodė, kad nemažą įtaką ASK savųjų triukšmų lygiui turi maitinimo tinklo harmonikos. Vienos iš KGS („Crystal CS4235“) triukšmo įtampos spektras pateiktas 2.11 paveiksle, kuriame irgi išsiskiria maitinimo tinklo harmonikos.



2.11 pav. *Kompiuterio garso sistemos „Crystal CS4235“ triukšmo įtampos spektras*

Šio eksperimento rezultatų apdorojimui ir triukšmo įtampos vidutinei kvadratinei vertei apskaičiuoti, buvo sukurta MATLAB programa „Triukšmas“ (P1.6). Skaičiavimų rezultatai pateikti 2.3 lentelėje.

Programos įėjimo parametrai:

- imčių skaičius *k*,
- pradinės imties numeris *k1*,
- paskutinės imties numeris *k2*.

2.3 lentelė. *Kompiuterių garso sistemų ASK savųjų triukšmų efektinių įtampų vidutinių kvadratinių verčių skaičiavimo rezultatai*

KGS tipas	$U_{tr.}$, μV	
	$N = 8$	$N = 16$
Creative Ensoniq ES1373	0	132,41
Crystal CS4235	0	412,92
ESS ES1869	0	217,72
Yamaha YMF719E-S	0	185,17
Opti 82C931LC	247,05	363,82
ESS ES1948 (Maestro-1)	3800	238,08
VIA AC'97	3400	227,41
Trident 4DWave-DX	1000	735,24

2.3 lentelėje pateiktų rezultatų analizė rodo, kad kompiuterių garso sistemos, kurių savųjų triukšmų įtampos yra didesnės, kaip taisyklė, turi mažesnį ESS ir ryškų jo mažėjimą aukštų dažnių srityje. Prie tokių ištirtų garso sistemų galima priskirti pavyzdžiui: „ESS ES1948 (Maestro-1)“, „VIA AC'97“, „Trident 4DWave-DX“.

2.2.4 SAK įtakos efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimui tyrimas

Jau buvo minėta (2.2 skyrius), kad norint neįvertinti SAK įtakos ESS matavimų rezultatams, jo skilčių skaičius turėtų būti bent viena skiltimi didesnis už ASK skilčių skaičių. Šios tezės patikrinimui buvo atliktas specialus eksperimentas. Tyrimui buvo suformuoti du etaloniniai „*.wav“ failai su 44,1 kHz diskretizavimo dažniu ir 16 bei 8 skilčių skaičiumi. Panaudojus 2.3 paveiksle pateiktą matavimų schemą, kiekvienai KGS atitinkamai buvo sukurta po du realius „*.wav“ failus su 44,1 kHz diskretizavimo dažniu ir 8 skilčių skaičiumi. Pasinaudojant 2.2 skyriuje pateiktu metodu, buvo ištirtos aštuonios skirtingų firmų kompiuterių garso sistemos. Šio eksperimento rezultatai pateikti 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. *SAK įtaka ESS skaičiavimų rezultatams*

KGS tipas	N_{ef1} (SAK 16 skilčių)	N_{ef2} (SAK 8 skilčių)	Skirtumas δ_S, %
Creative Ensoniq ES1373	6,65	6,59	0,91
Crystal CS4235	7,91	7,52	5,04
ESS ES1869	7,98	7,69	3,79
Yamaha YMF719E-S	8,02	7,69	4,19
Opti 82C931LC	7,26	7,16	1,42
ESS ES1948 (Maestro-1)	4,78	4.44	7.38
VIA AC'97	7,38	7,15	3,12
Trident 4DWave-DX	3,74	3,74	0,04

Lentelėje įrašytas dydis δ_S apskaičiuotas pagal formulę:

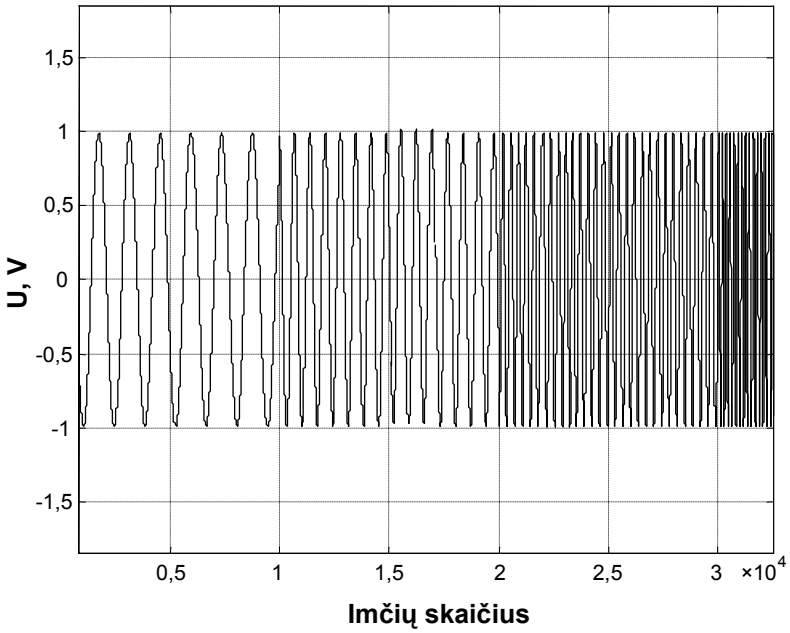
$$\delta_S = \frac{2\left(N_{ef1} - N_{ef2}\right)}{N_{ef1} + N_{ef2}} \cdot 100\% . \tag{2.15}$$

čia N_{ef1} – apskaičiuotas ESS, kai SAK turi 16 skilčių ir ASK 8 skiltis; N_{ef2} – apskaičiuotas ESS, kai SAK ir ASK turi po 8 skiltis.

Kaip matyti iš 2.4 lentelės, kai SAK yra 16 skilčių, ESS yra iki 7,4 % didesnis. Taigi, jeigu neįvertinsime SAK įtakos, gausime keliais procentais mažesnį kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičių.

2.2.5 Efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybių nuo dažnio matavimas

ESS priklausomybių nuo dažnio matavimams buvo sukurtos specialios MATLAB programos „Tst“ ir „Essd“. Abiem joms suteiktas ciklinis charakteris. Pirmoji programa „Tst“ (P1.7), dirbdama ciklišKai, sukuria poliharmoninį etaloninį failą *Etalon.wav* su pasirinkta dažnių eilute ir artima vienetui amplitude (2.12 pav.).



2.12 pav. *Poliharmoninio etaloninio signalo fragmentas*

Poliharmoninį etaloninį signalą sudaro skirtingų dažnių vienodos amplitudės atkarpos. Dažniai parinkti taip, kad jų santykis su diskretizavimo dažniu būtų iracionalus skaičius.

Programos įėjimo parametrai:

- diskretizavimo dažnis f_s,
- fizinis ASK skilčių skaičius N,
- dažnių eilutė *ff*,
- dažnių skaičius M,
- imčių skaičius, tenkantis vienam dažniui L.

Kaip ir esant fiksuotam dažniui, matavimų eigoje šis poliharmoninis failas atkuriamas tiriamosios garso sistemos SAK ir tuo pačiu metu ASK perrašomas į kitą „*.wav“ failą, taikant 2.3 paveiksle pateiktą schemą.

Reikia pažymėti, kad šiuo atveju realus „*.wav“ failas formuojamas naudojant vienkartinę atkūrimo ir įrašymo procedūrą, kas žymiai sutrumpina matavimų laiką. Tačiau čia turi būti tenkinamas vienas reikalavimas: tarp atkūrimo ir įrašymo procesų paleidimo momentų laiko tarpas turi būti minimalus. Tarkime šis laiko tarpas yra Δt. Tuomet situacija pirmojo dažnio atkarpoje gali būti dvejopa. Jeigu pirmiau įjungiamas atkūrimas, paskui įrašymas, tai pirmojo dažnio atkarpos ilgis sutrumpėja dydžiu, atitinkančiu Δt. Priešingu atveju ši atkarpa pailgėja, nes priekyje atsiranda Δt dydžio pauzė (tylos atkarpa). Taigi, abiem atvejais pirmojo dažnio atkarpa skiriasi nuo kitų, todėl tai turi būti įvertinta sudarant ESS skaičiavimo programą.

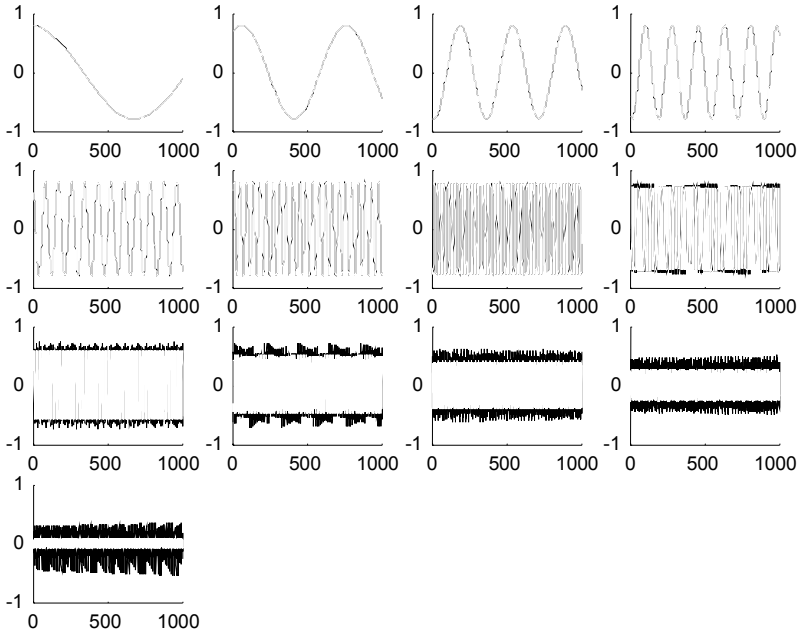
Sukurtas realus „*.wav“ failas turi visą informaciją apie signalo iškraipymus tiriamosios garso sistemos SAK – ASK trakte pasirinktame dažnių ruože. Šiame faile esančios informacijos apdorojimui buvo sudaryta MATLAB programa „Essd“ (P1.8).

Programos įėjimo parametrai:

- fizinis ASK skilčių skaičius N,
- dažnių eilutė *ff*,
- imčių skaičius k,
- pradinės imties numeris *k1*,
- paskutinės imties numeris *k2*,
- imčių skaičius, tenkantis vienam dažniui L.

Antroji programa „Essd“ apskaičiuoja ESS kiekvienam dažniui ir išveda ESS priklausomybės nuo dažnio grafiką.

Grubių skaičiavimo klaidų išvengimui programoje numatyta vizuali kontrolė. Į ekraną išvedami juodos spalvos diskretizuoto signalo ir baltos spalvos analoginio signalo grafikai tose pačiose koordinačių sistemose (2.13 pav.).



2.13 pav. *Kompiuterio garso sistemos „Trident 4DWave-DX“ ASK darbą charakterizuojantys grafikai*

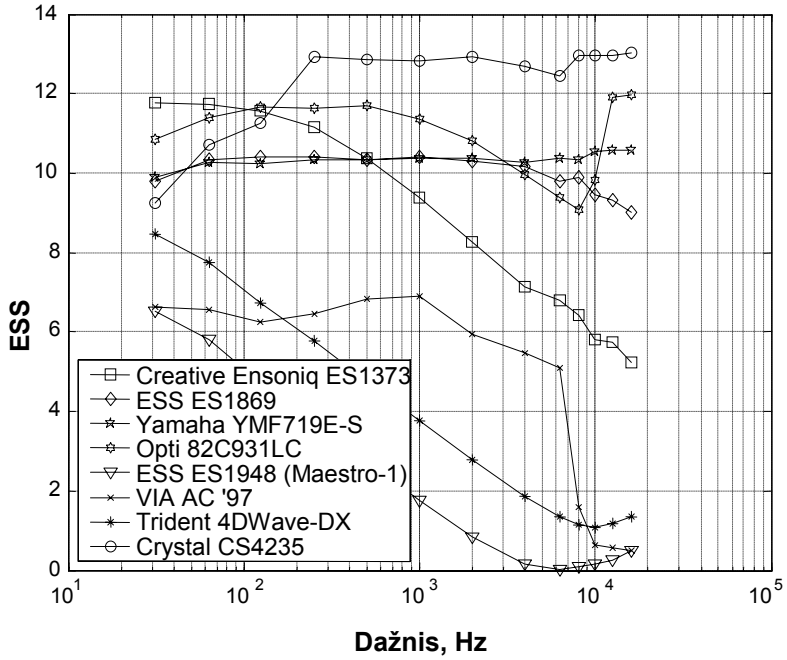
Jeigu skaičiavimai atlikti sėkmingai, tai juodos spalvos diskretizuoto signalo grafiką pilnai uždengia baltos spalvos analoginio signalo grafikas. Jeigu grafikuose matyti juodos spalvos, tai gali reikšti grubią klaidą, parengiant pradinius duomenis arba įrašyto signalo nukrypimus nuo sinusinio dėl triukšmo įtakos.

Naudojantis sudarytomis programomis buvo ištirti aštuonių tipų kompiuterių garso sistemų ASK ir gauti jų ESS priklausomybių nuo dažnio grafikai (2.14 pav.).

Paveiksle matyti gana didelis ESS priklausomybių nuo dažnio išsibarstymas. Be to, pusė iš jų turi ryškiai krentantį pobūdį aukštesniuosiuose dažniuose. Tai galima paaiškinti kompiuterio vidinių triukšmo šaltinių daroma įtaka. Tai patvirtina ir 2.13 paveiksle pateikti paskutinieji 5 grafikai, kuriuose juoda spalva reiškia nukrypimus nuo signalo sinusinės formos.

Pateikti grafikai taip pat leidžia tarpusavyje palyginti eilę tirtų kompiuterių garso sistemų. Iš jų matyti kokias garso sistemas galima būtų rinktis, norint jas taikyti kokybiškam garso įrašymui arba matavimo tikslams, kaip patogius matavimo signalų įvesties ir išvesties prievadus garso

dažnių ruože. Tai „Yamaha YMF719E-S“, „ESS ES1869“, „Crystal CS4235“ ir kitos, turinčios tolygią ESS priklausomybę nuo dažnio.



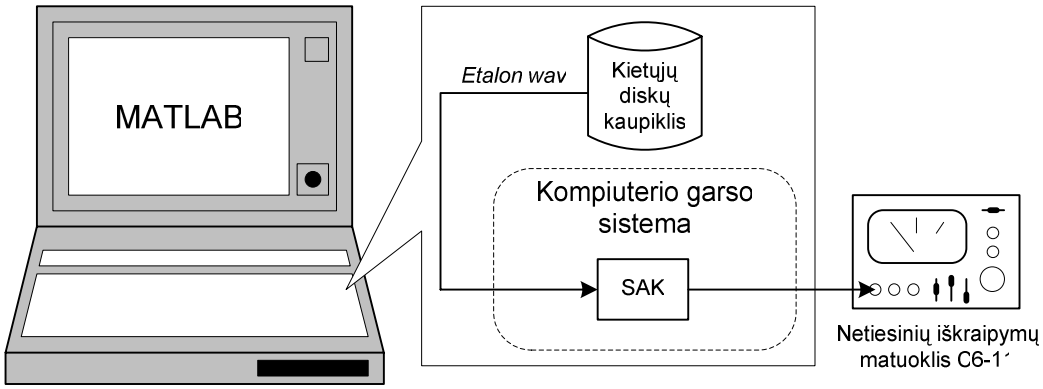
2.14 pav. *Kompiuterių garso sistemų efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybių nuo dažnio grafikai: f_s = 44,1 kHz, N = 16*

2.3 Kompiuterių garso sistemų atkūrimo kanalų tyrimas

Kodavimo ir dekodavimo įtaisas, būdamas KGS pagrindas, lemia ir jos kokybę. Kokybinius įrašymo ir atkūrimo kanalų rodiklius ir charakteristikas galima išmatuoti atskirai. Tokiems matavimams tenka naudoti išorinius matavimo prietaisus. Matuojant atkūrimo kanalo amplitudinę, dažninę amplitudės charakteristikas bei netiesinius iškraipymus, prie sistemos linijinio išėjimo buvo jungiamas automatinis netiesinių iškraipymų matuoklis „C6-11“. Visos garso sistemos buvo tirtos tuo pačiu netiesinių iškraipymų matuokliu, tame pačiame kompiuteryje. Matavimo schema pateikta 2.15 paveiksle.

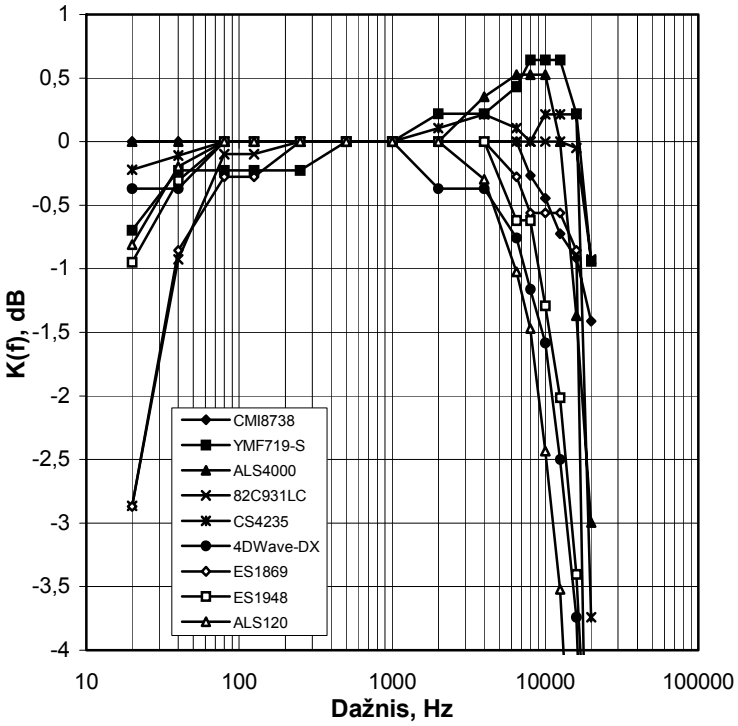
Testinis įėjimo signalas buvo gaunamas atkuriant specialiai tam MATLAB‘u suformuotą *Etalon.wav* failą. Matuojant dažnines amplitudės charakteristikas, testinio signalo lygis buvo imamas 20 dB žemesnis už nominalų.

Taikant minėtą matavimo metodą buvo ištirtos „C-Media” (CMI8738), „Yamaha” (YMF719E-S), „Avance Logic” (ALS4000 ir ALS120), „Opti” (82C931LC), „Cirrus Logic” (CS4235), „Trident” (4DWave-DX), „ESS” (ES1869 ir ES1948) ir „Creative Labs” (SB Live!) firmų kompiuterių garso sistemos.



2.15 pav. *Kompiuterių garso sistemų atkūrimo kanalų matavimo schema*

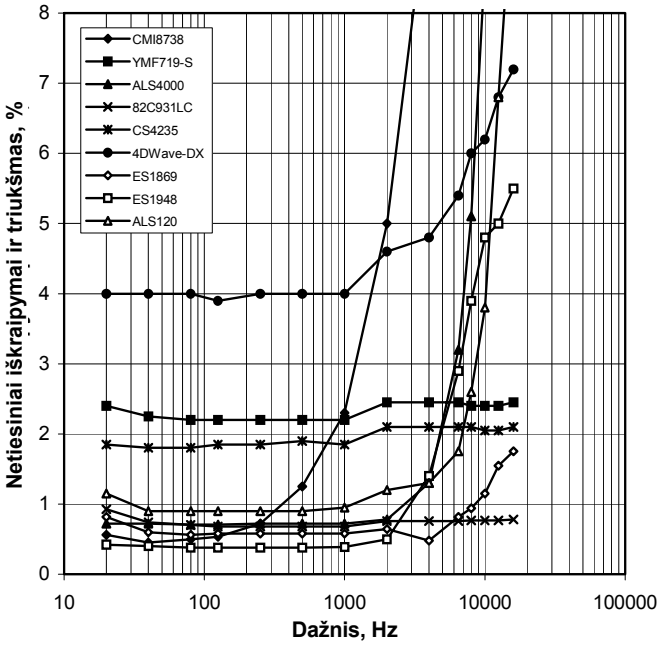
Išmatavus garso sistemų atkūrimo kanalų dažnines amplitudės charakteristikas, gauti 2.16 paveiksle parodyti rezultatai.



2.16 pav. *Įvairių tipų kompiuterių garso sistemų atkūrimo kanalų dažninės amplitudės charakteristikos*

Iš dažninių amplitudės charakteristikų matyti, kad dauguma garso sistemų pagal praleidžiamų dažnių juostos plotį atitinka buitinei garso atkūrimo aparatūrai keliamus reikalavimus [64, 104, 105], nors jų kaina neviršija keliasdešimt litų.

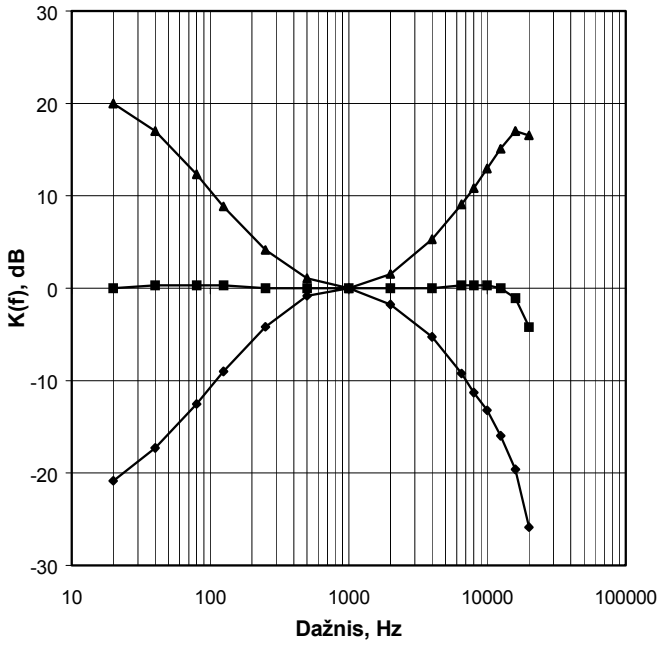
Svarbus garso sistemos atkūrimo kanalą apibūdinantis parametras yra signalo netiesiniai iškraipymai, kiekybiškai įvertinami netiesinių iškraipymų (harmonikų) koeficientu. Tačiau dėl netiesinių iškraipymų matuoklio specifikos, išmatuojamas kompleksinis dydis – netiesiniai iškraipymai ir triukšmas (NI+T, angl. *Total Harmonic Distortion plus Noise* THD+N). Dėl triukšmo signalo spektro netolygumo dydis NI+T priklauso nuo dažnio. Tai matyti iš 2.17 paveiksle pateiktų matavimo rezultatų.



2.17 pav. *Įvairių tipų kompiuterių garso sistemų atkūrimo kanalų netiesinių iškraipymų ir triukšmo priklausomybės nuo dažnio*

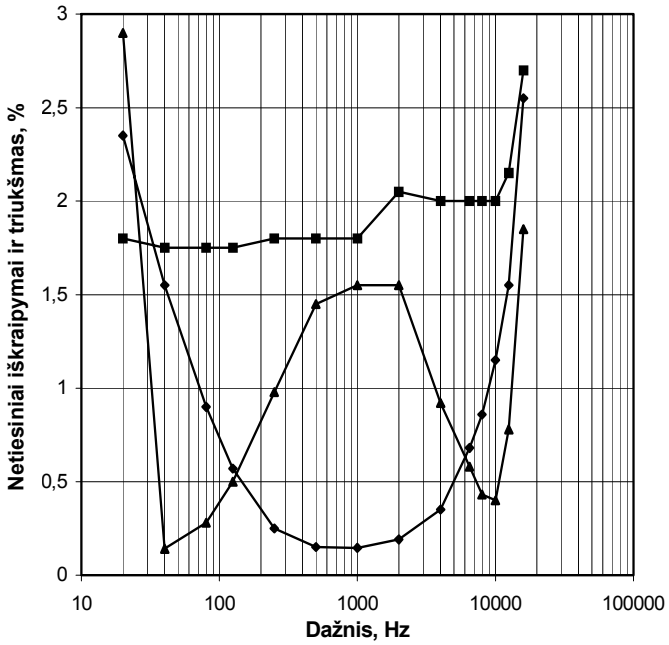
Palyginti didelius netiesinius iškraipymus ir triukšmą galima paaiškinti tuo, kad garso sistema yra kompiuterio sisteminio bloko viduje, kur nemaža triukšmo šaltinių, tokių kaip aušintuvų ventiliatoriai, diskasukių varikliai, magnetinių galvučių elektromagnetiniai pastūmos mechanizmai ir kt. Literatūros [64, 104, 105] duomenimis, nebrangios garso atkūrimo aparatūros netiesiniai iškraipymai, esant 1000 Hz dažniui, gali siekti iki 10 %.

Taip pat buvo ištirta kur kas tobulesnė, šiuo metu labai populiari kompiuterių garso sistemų gamybos pradininkės, firmos *Creative Labs* sistema „SB Live!". Joje yra numatyta galimybė reguliuoti atkuriamo garso tembrą. Šios garso sistemos garso tembro reguliavimo galimybės parodytos 2.18 paveiksle.



2.18 pav. *Firmos Creative Labs garso sistemos „SB Live!" garso tembro reguliavimo galimybės*

Garso sistemos „SB Live!" netiesinių iškraipymų ir triukšmo priklausomybių nuo dažnio matavimo rezultatai pateikti 2.19 paveiksle.



2.19 pav. *Firmos Creative Labs garso sistemos „SB Live!" atkūrimo kanalo netiesinių iškraipymų ir triukšmo priklausomybės nuo dažnio prie įvairių tembro reguliatoriaus padėčių (kreivių žymenys atitinka 2.18 pav. kreivių žymenis)*

Tiriant netiesinių iškraipymų priklausomybę nuo atkuriamo signalo lygio, kaip ir reikėjo tikėtis, iškraipymų didėjimo, didinant signalo lygį, dėl maskuojančio triukšmo veikimo nepastebėta, išskyrus amplitudės ribojimo atvejį.

2.4 Išvados

1. Išnagrinėtos programų paketo MATLAB funkcijos, palaikančios kompiuterio garso sistemą ir sudarytas idealaus ASK programinis modelis.
2. MATLAB terpėje sukurta ir patikrinta kompiuterių garso sistemų ASK tyrimo programinė įranga.
3. Eksperimentiškai ištirta bandymų skaičiaus, įrašymo lygio, triukšmų ir SAK įtaka efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo rezultatams ir parodyta kad:

   – norint užtikrinti nedidesnę kaip 1 % efektyviųjų skilčių skaičiaus matavimo pilnąją neapibrėžtį, reikia atlikti nemažiau kaip 1000 bandymų (matavimų);

   – parinkus įrašymo lygį 0,8 ... 0,95 V ribose (kas yra nesunkiai pasiekiama), gaunamas nuo 1,5 iki 0,2 % didesnis kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičius, nei esant 1 V įrašymo lygiui;

   – didžiausią įtaką efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo rezultatams turi į ASK suindukuoti trukdžiai;

   – apskaičiuotas ASK efektyviųjų skilčių skaičius priklauso ir nuo SAK savybių: kai SAK turi tą patį skilčių skaičių kaip ir ASK, gausime keliais procentais mažesnį ASK efektyviųjų skilčių skaičių, kaip rodo praktika SAK įtakos galima neįvertinti, jeigu jo skilčių skaičius bent viena skiltimi didesnis už ASK skilčių skaičių.
4. Dažniausiai taikomų kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybių nuo dažnio tyrimas parodė, kad pigiausių kompiuterių garso sistemų („ESS ES1948“, „Trident 4DWave-DX“) efektyviųjų skilčių skaičius yra beveik du kartus mažesnis už geriausių („Yamaha YMF719E-S“, „Crystal CS4235“ ir kt.). Tą patį galima pasakyti ir apie kompiuterių garso sistemų atkūrimo kanalų netiesinių iškraipymų ir triukšmo priklausomybes nuo dažnio.

3. KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ KOKYBĖS VERTINIMO KRITERIJŲ PATIKIMUMO IR TIKSLUMO ANALIZĖ

Kompiuterinių garso sistemų (KGS) analoginių-skaitmeninių keitiklių (ASK) efektyviųjų skilčių skaičius (ESS) yra vienas iš dažniausiai taikomų parametrų, leidžiantis objektyviai vertinti jų dinamines savybes. Palyginti sudėtingas ESS skaičiavimo algoritmas ir didelė skaičiavimų apimtis, taikant šiuolaikinius kompiuterius ir jų programinę įrangą, jau nebesudaro problemų. Tačiau pati skaičiavimo metodika, kurioje idealaus ASK kvantavimo paklaidos skirstinys, esant sinuso formos testiniam signalui priimamas kaip vienodos tikimybės, kelia tam tikrų abejonių. Be to, reikalavimas, kad testinis signalas panaudotų visus ASK kodus, nelengvai įvykdomas ir tai turi įtakos skaičiavimų rezultatams (žr. 2.2.2 poskyrį).

Paminėtų klausimų tyrimui skirtas šis skyrius. Skyriaus medžiaga paskelbta [115, 117, 119, 120] darbuose.

3.1 Kvantavimo paklaidos skirstinys, taikant sinuso formos testinį signalą

ASK kvantavimo paklaida – tai skirtumas tarp momentinės analoginio signalo vertės ir jai artimiausio diskretinio lygmens. Skaičiuojant ESS, reikia atsižvelgti į realaus ir jį atitinkančio idealaus ASK kvantavimo paklaidas bei vidutines kvadratines šių paklaidų vertes S_r ir S_i. Skaičiuojama pagal žinomą formulę:

$$ESS = N - \log_2 \frac{S_r}{S_i}, \tag{3.1}$$

čia N – fizinis ASK skilčių skaičius.

ESS matavimams dažniausiai taikomas sinuso formos testinis signalas. Realaus ASK kvantavimo paklaidos vidutinė kvadratinė vertė S_r apskaičiuojama pagal formulę:

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{K-1}\sum_{n=1}^{K}(a_n - b_n)^2}, \tag{3.2}$$

čia K – matavimų skaičius, a_n – signalo reikšmių ASK išėjime masyvas; b_n – mažiausių kvadratų metodu surasto aproksimuojančiojo sinusinio signalo reikšmių masyvas.

Žinant dažnį, mažiausių kvadratų metodu nustatomi kiti aproksimuojančiojo signalo parametrai, t.y. nuolatinė dedamoji ir sinuso amplitudė bei pradinė fazė.

Sinuso formos signalo taikymas ASK testuoti aptartas standarte IEEE Std 1241-2000 [40], kur kalbama apie kvantavimo paklaidos vienodos tikimybės skirstinį:

$$f(x) = \frac{1}{q} = \frac{2^N - 1}{2}, \tag{3.3}$$

čia x – kvantavimo paklaida; q – kvantavimo intervalas.

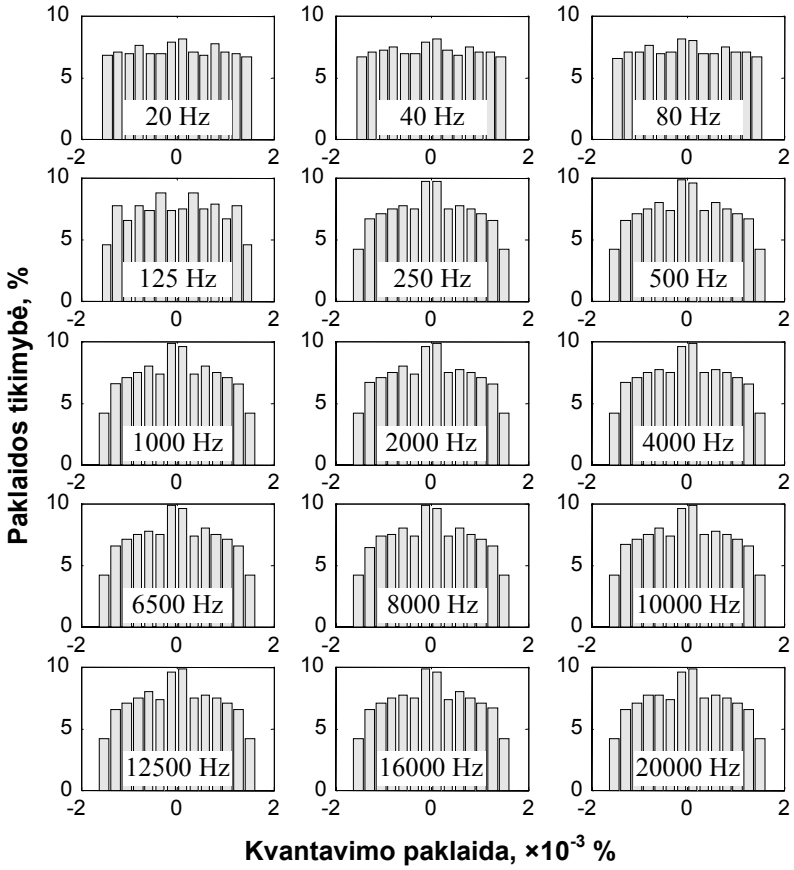
Įvertinus (3.3) ir tarus, kad kvantavimo paklaidos matematinė viltis lygi nuliui, apskaičiuojama idealaus ASK kvantavimo paklaidos vidutinė kvadratinė vertė:

$$S_I = \sqrt{\frac{1}{q}\int_{-q/2}^{q/2} x^2 dx} = \frac{q}{\sqrt{12}}, \tag{3.4}$$

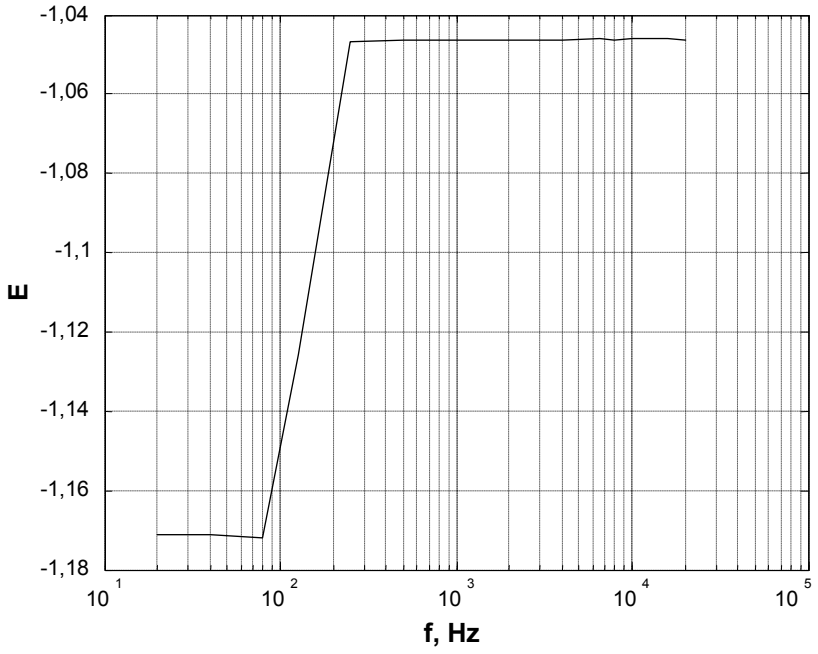
Tačiau, kaip rodo skaičiavimai, taikant sinuso formos testinį signalą idealaus ASK kvantavimo paklaidos skirstinys skiriasi nuo vienodos tikimybės skirstinio. Tai matyti iš toliau pateiktų kvantavimo paklaidos histogramų (3.1 pav.), gautų programų paketu MATLAB modeliuojant idealaus ASK darbą dažnių ruože. Statistiniam stabilumui užtikrinti kiekvienam dažniui buvo imama po 15000 imčių.

Histogramų forma rodo, kad tik esant patiems žemiausiems testinio signalo dažniams kvantavimo paklaidos skirstinys yra artimas vienodos tikimybės skirstiniui. Tai rodo ir eksceso E vertės (3.2 pav.) (esant vienodos tikimybės skirstiniui, E = –1,2). Be to beveik visose histogramose pastebimas tam tikras formos dėsningumas, kas nėra būdinga vienodos tikimybės skirstiniui. 3.3 paveiksle pateiktos programų paketu MATLAB sumodeliuotos histogramos: a – kvantuojant sinusinį signalą idealiu ASK; b – vienodos tikimybės skirstinys.

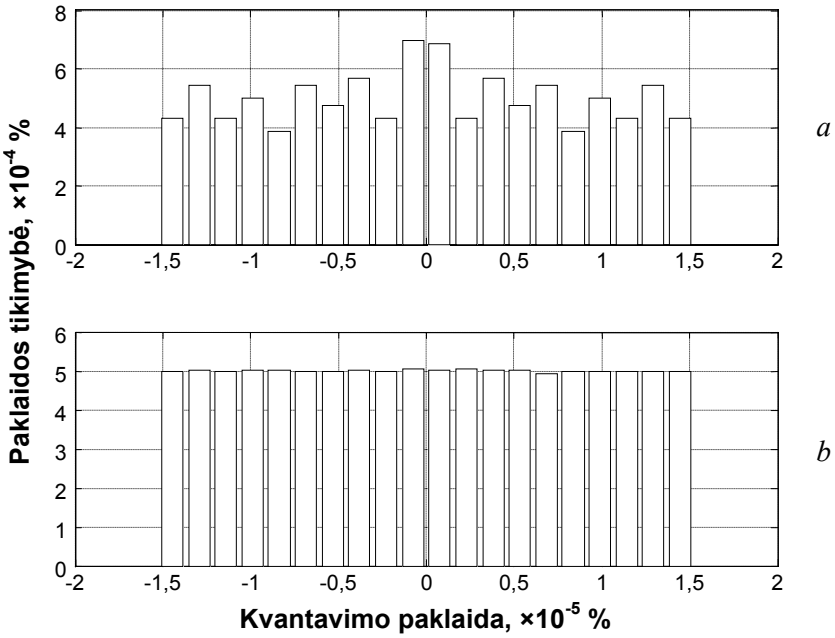
Taigi (3.4) išraiškos taikymas yra teoriškai nepagrįstas ir duoda ESS skaičiavimo metodo paklaidą. Siekiant išvengti šios paklaidos, idealaus ASK kvantavimo paklaidos vidutinė kvadratinė vertė turi būti apskaičiuojama taikant tokį patį algoritmą kaip ir realaus ASK atveju.



3.1 pav. *Idealaus ASK kvantavimo paklaidos histogramos*



3.2 pav. *Idealaus ASK kvantavimo paklaidos skirstinio eksceso priklausomybė nuo dažnio*



3.3 pav. *Kvantavimo paklaidos skirstiniai: a – kvantuojant sinusinį signalą idealiu ASK; b – vienodos tikimybės skirstinys*

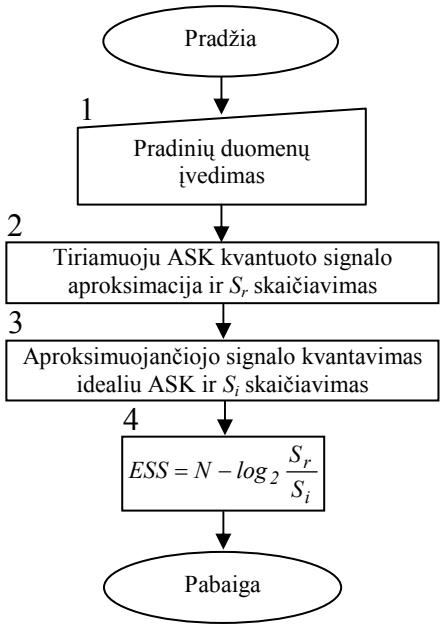
3.2 Efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodas

Eksperimentiškai buvo patikrinti du efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo algoritmo variantai. Pirmasis, kai S_i apskaičiuoti tiksliai pakartojamas S_r skaičiavimo algoritmas, ir antrasis – supaprastintas, kai aproksimuojantysis sinusinis virpesys kvantuojamas idealiu ASK ir, imant aproksimuojančiojo ir kvantuotojo sinusinio virpesio reikšmių skirtumus, apskaičiuojama S_i. Taikant ir vieną, ir kitą algoritmą, rezultatas gaunamas tas pats, todėl buvo pasirinktas antrasis, spartesnis (3.4 pav.).

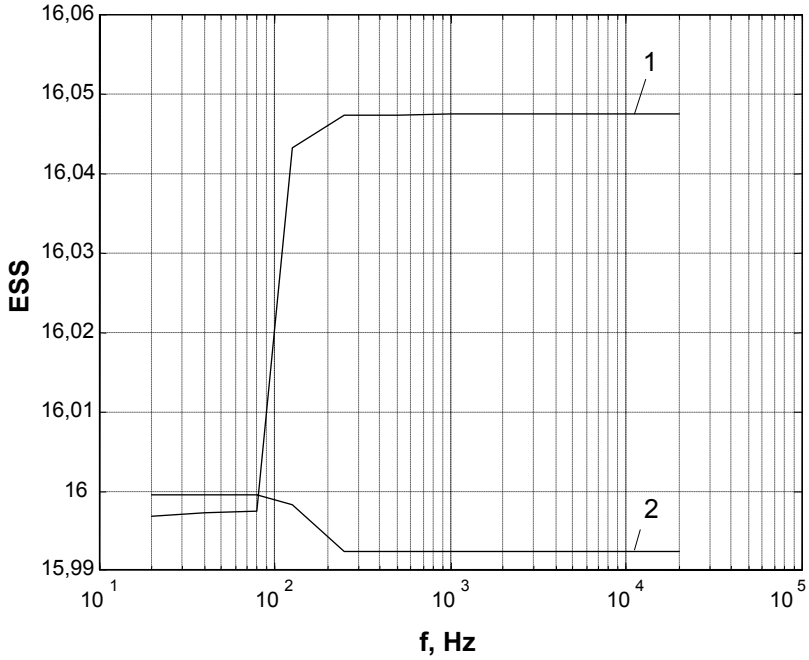
Programų paketu MATLAB sumodeliuoto idealaus 16 skilčių ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybių nuo dažnio grafikai, apskaičiuoti taikant literatūroje numatytą ir siūlomą metodus, pateikti 3.5 paveiksle.

Grafikai rodo, kad skaičiavimams taikant (3.4) išraišką, gaunami nerealūs rezultatai, nes ESS viršija fizinį ASK skilčių skaičių.

Taigi kvantuojant idealiu ASK sinuso formos signalą, kvantavimo paklaidos skirstinys nėra vienodos tikimybės ir į tai reikia atsižvelgti skaičiuojant ESS. Dar daugiau, kvantavimo paklaida tokiu atveju išvis nėra atsitiktinė, ir ESS skaičiavimams taikytinas 3.4 pav. algoritmas.



3.4 pav. *Efektyviųjų skilčių skaičiavimo algoritmas*



3.5 pav. *Idealaus 16 skilčių ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybės nuo dažnio, kai kvantavimo paklaidos vidutinė kvadratinė vertė S_i apskaičiuojama: 1 – taikant (3.4) formulę; 2 – taikant 3.4 pav. algoritmą, imant po 15000 imčių kiekvienam dažniui*

Pagal šį algoritmą efektyviųjų skilčių skaičių skaičiuoja sudaryta MATLAB programa „Ess“. Pirmasis algoritmo blokas įveda programos darbui reikalingus pradinius duomenis:

- etaloninio signalo dažnį *f*,

- fizinį ASK skilčių skaičių N,
- imčių skaičių k,
- pradinės imties numerį $k1$,
- paskutinės imties numerį $k2$.

Antrasis blokas atlieka keletą operacijų:

– persiunčia į kompiuterio operatyviąją atmintį prieš tai tiriamuoju ASK padarytą sinusinio virpesio įrašą „*.wav“ formate;

– pagal įrašo duomenis apskaičiuoja nuolatinę dedamąją ir sinuso amplitudę;

– taikant vieno kintamojo optimizavimo procedūrą apskaičiuoja sinuso pradinę fazę.

Sinusas su taip apskaičiuotais parametrais aproksimuoja tiriamuoju ASK kvantuotą signalą. Turint kvantuotų ir tolydinių sinusinės funkcijos reikšmių masyvus, toliau apskaičiuojama realaus ASK kvantavimo paklaidos vidutinė kvadratinė vertė S_r.

Trečiajame bloke atliekamas antrajame bloke gautos sinusinės funkcijos idealus programinis kvantavimas, nurodant diskretizavimo dažnį ir hipotetinio idealaus ASK skilčių skaičių. Šią procedūrą atlieka MATLAB funkcija WAVWRITE. Turint kvantuotų ir tolydinių sinusinės funkcijos reikšmių masyvus, toliau apskaičiuojama idealaus hipotetinio ASK kvantavimo paklaidos vidutinė kvadratinė vertė S_i.

Ketvirtajame algoritmo bloke apskaičiuojamas kompiuterio garso sistemos ASK efektyviųjų skilčių skaičius.

Pagal tokį patį algoritmą efektyviųjų skilčių skaičių skaičiuoja ir sudaryta MATLAB programa „Essd“, tik šiai programai suteiktas ciklinis charakteris.

3.3 Analoginių signalų formavimas ASK tyrimui

Analoginių-skaitmeninių keitiklių tyrimui reikalingi analoginiai signalai. Lyginant šių signalų formą ASK įėjime ir išėjime galima įvertinti keitiklių statines ir dinamines charakteristikas. Suprantama, kad tokiam vertinimui signalo forma ASK įėjime turi būti tiksliai žinoma. Šiuo metu ASK testavimui dažniausiai taikomas sinusinis signalas. Toks signalas yra geras tuo, kad tiesinė įėjimo grandinė nepakeičia jo formos. Keičiasi tik jo amplitudė ir pradinė fazė.

Sinusinių virpesių generatorių pasirinkimas yra gana didelis, tačiau jų generuojamame virpesyje visuomet yra aukštesniųjų harmonikų. Ypač sunku gauti gero spektrinio grynumo

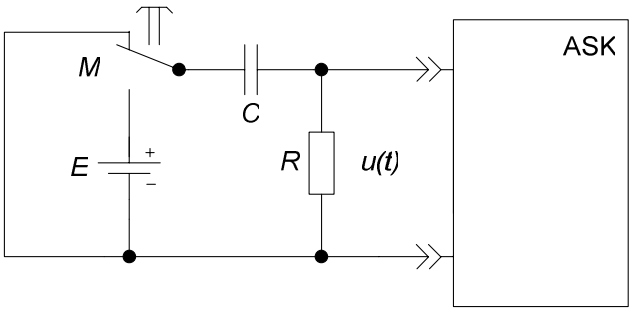
sinusinį virpesį garso dažnių ruože, kur generatoriai dažniausiai yra *RC* tipo. Be to, geros kokybės generatoriai yra gana brangūs.

Kita analoginio signalo forma, kuri yra patogi ASK tyrimams, tai tiesiškai didėjanti arba mažėjanti įtampa. Turint tokį testinį signalą patogu tirti ASK keitimo charakteristikos integralinį ir diferencialinį netiesiškumą, tačiau formuoti tokį signalą sudėtinga. Be to, keitiklio įėjimo grandinė keičia jo formą.

Testinius analoginius signalus gali formuoti ir pereinamieji procesai tiesinėse elektros grandinėse [106-108]. Panagrinėsime tokių signalų taikymo galimybę.

3.3.1 Eksponentinio signalo formavimas

Eksponentinius signalus galima formuoti nuosekliomis *LR* ir *CR* grandinėmis. Paprastesnė ir lengviau realizuojama yra *CR* grandinė (3.6 pav.).



3.6 pav. *Eksponentinio signalo formuotuvas*

Pereinamieji procesai, vykstantys šioje grandinėje prijungus ją prie nuolatinės įtampos šaltinio ir trumpojo jungimo atveju, aprašomi žinomomis lygtimis:

$$u(t) = \pm E e^{-\frac{t}{\tau}}, \tag{3.5}$$

čia $\tau = RC$ – grandinės laiko pastovioji; ženklas „+“ atitinka kondensatoriaus užsikrovimą, „–“ atitinka iškrovos procesą.

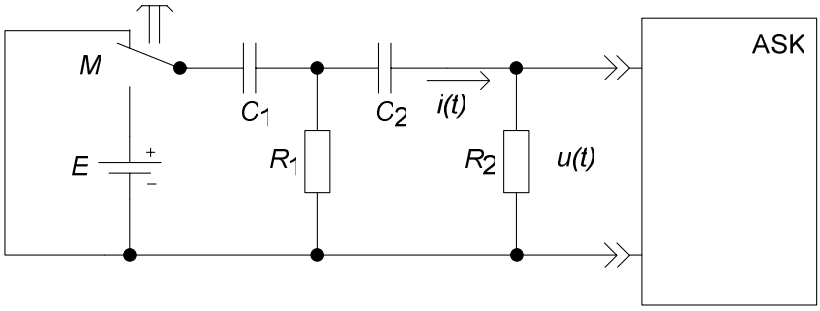
Parenkant įtampos *E* dydį galima perdengti visą keitiklio teigiamų arba neigiamų reikšmių keitimo skalę, o keičiant grandinės laiko pastoviąją τ, eksponentinės įtampos kitimo spartą.

Toks analoginio signalo formuotuvas yra labai paprastas, o jo formuojamo įtampos impulso forma tiksliai žinoma. Formos iškraipymai galėtų atsirasti tik tuo atveju, jeigu elementai *R* ir *C* būtų netiesiniai. Tinkamai parinkus kondensatorių, netiesiškumo šaltiniu gali būti tik keitiklio įėjimo varža, tačiau tai jau yra vienas iš faktorių, lemiantis ASK kokybę, kurios įvertinimui ir yra skirtas šis formuotuvas.

Tam tikri impulso formos iškraipymai galimi ir dėl grandinės atskirų šakų ir elementų induktyvumo bei parazitinės talpos. Įtampos šuolio metu sužadinamas trumpalaikis parazitinis pereinamasis procesas, todėl jo įtaka lengvai eliminuojama atmetus pradinę pagrindinio formuojamo impulso dalį.

3.3.2 Dvipolio aperiodinio signalo formavimas

Aprašytas eksponentinio signalo formuotuvas formuoja vienpolius eksponentinius impulsus, todėl norint ištirti keitiklio darbą visoje jo keitimo skalėje, tenka panaudoti tiek teigiamą, tiek neigiamą eksponentinius impulsus. 3.7 paveiksle pateikta dvipolio aperiodinio signalo formuotuvo schema.



3.7 pav. *Dvipolio aperiodinio signalo formuotuvas*

Mygtuku *M* įjungus arba išjungus įtampos šaltinį *E*, grandinėje vyksta pereinamasis procesas. Šio proceso eiga apskaičiuojama pasitelkiant klasikinę grandinių teoriją. Kadangi grandinėje nuolatinė srovė tekėti negali, šį procesą aprašo antrosios eilės homogeninė diferencialinė lygtis su pastoviais koeficientais:

$$i''(t)+\alpha i'(t)+\beta i(t)=0, \tag{3.6}$$

čia $\alpha = \beta\left(R_1C_1 + R_2C_2 + R_1C_2\right)$; $\beta = \dfrac{1}{R_1R_2C_1C_2}$.

Homogeninės lygties bendrasis sprendinys

$$i(t) = A_1e^{P_1t} + A_2e^{P_2t}; \tag{3.7}$$

čia A_1 ir A_2 – integravimo konstantos; $P_{1,2} = -\dfrac{a}{2} \pm \sqrt{\dfrac{a^2}{4} - \beta}$ – charakteringosios lygties $p^2 + \alpha p + \beta = 0$ šaknys.

Nežinomos integravimo konstantos A_1 ir A_2 randamos iš pradinių sąlygų. Pradiniu laiko momentu, tik prijungus įtampos šaltinį, $i(0) = E/R_2$. Iš čia

$$A_1 + A_2 = E/R_2\,. \tag{3.8}$$

Taikant Kirchhofo dėsnius gaunama:

$$i'(0) = \frac{E}{R_2}\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1R_2C_1} + \frac{1}{R_2C_2}\right) = A_1P_1 + A_2P_2\,. \tag{3.9}$$

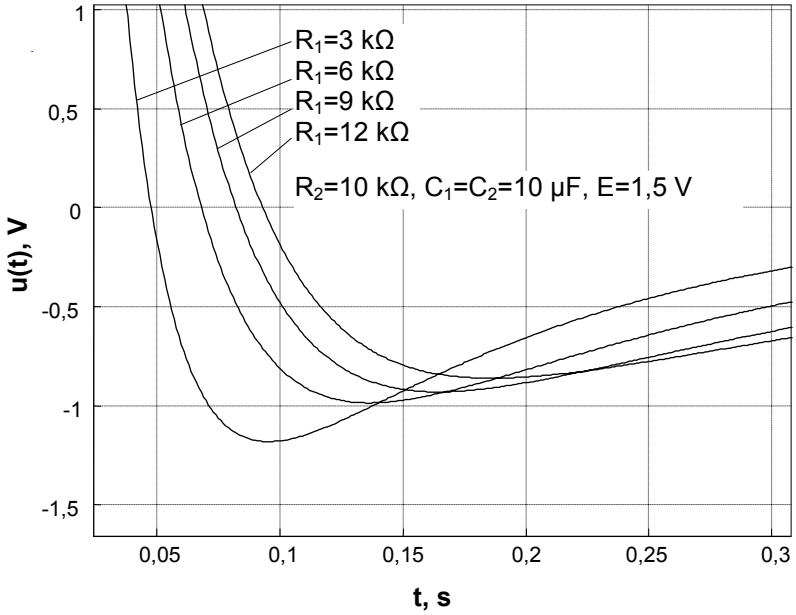
Iš (3.8) ir (3.9) lygčių

$$\begin{cases} A_1 = \dfrac{E}{R_2}\left(1 - \dfrac{\alpha + P_1}{P_1 - P_2}\right); \\ A_2 = \dfrac{E}{R_2} \cdot \dfrac{\alpha + P_1}{P_1 - P_2}. \end{cases} \tag{3.10}$$

Žinant srovę *i*(*t*), įtampos kritimas rezistoriuje R_2

$$u(t) = E\left[\left(1 - \frac{\alpha + P_1}{P_1 - P_2}\right)e^{P_1t} + \frac{\alpha + P_1}{P_1 - P_2}e^{P_2t}\right]. \tag{3.11}$$

Įtampos kitimo grafikai parodyti 3.8 paveiksle.

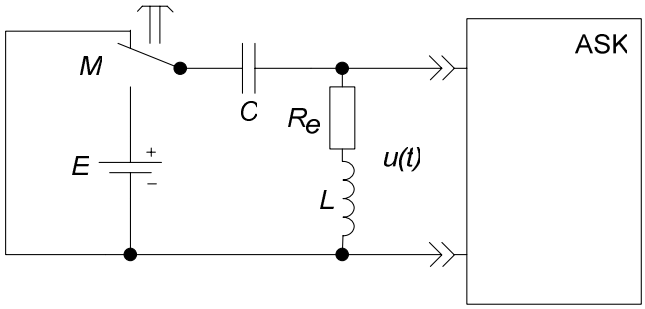


3.8 pav. *Dvipolių aperiodinių impulsų fragmentai, gauti jungiant grandinę prie nuolatinės srovės šaltinio*

Iš grafiko matyti, kad tinkamai parinkus formuotuvo elementų dydžius ir maitinimo šaltinio įtampą, galima gauti gana tolygiai kintančią išėjimo įtampą, apimančią visą ASK keitimo skalę.

3.3.3 Silpstančiųjų periodinių virpesių formavimas

Taikant pereinamuosius procesus *RC* grandinėse galima tirti ASK reakciją į pavienių nesudėtingos formos signalų poveikį. Sudėtingesnės formos analoginį testinį signalą galima gauti virpamuosiuose *LC* kontūruose. Tokio signalo formuotuvo schema atvaizduota 3.9 paveiksle.



3.9 pav. *Silpstančiųjų periodinių virpesių formuotuvas*

Pereinamieji procesai šioje grandinėje, kaip ir 3.7 pav., aprašomi antrosios eilės diferencialine lygtimi, tik šiuo atveju proceso pobūdis priklauso nuo schemos ekvivalentinės aktyviosios varžos R_e dydžio. Jei varža neviršija tam tikros kritinės vertės, turime silpstantįjį periodinį virpesį:

$$u(t) = \frac{E}{\omega_l} e^{-\alpha t} \left(\alpha \sin \omega_l + \omega_l \cos \omega_l t \right), \tag{3.12}$$

čia $\omega_l = \sqrt{\frac{1}{LC_1} + \frac{R_e{}^2}{4L^2}}$ – laisvųjų silpstančiųjų virpesių dažnis; $\alpha = \frac{R_e}{2L}$ – slopinimo koeficientas.

Vietoje vieno kondensatoriaus C (3.9 pav.) galima jungti perjungiamų kondensatorių rinkinį, taip keisti generuojamų silpstančiųjų virpesių dažnį, ir taikyti tokį signalą ASK dažninėms savybėms tirti.

3.3.4 Parazitinių parametrų įtakos įvertinimas

Kiekviena iš nagrinėtų formuotuvų schemų sudaryta iš realių elementų, turinčių savo pagrindinius ir parazitinius parametrus. Aptarsime šių parametrų dydžius ir jų galimą įtaką formuojamų signalų formai.

Jungiamieji laidai

Laido ekvivalentinę schemą sudaro nuosekliai sujungti aktyvioji varža ir induktyvumas. Nepageidautinas šiuo atveju yra induktyvumas. Jo dydį mikrohenriais galima apskaičiuoti taikant empirinę formulę, kurioje l ir d – laido ilgis ir skersmuo centimetrais [109]:

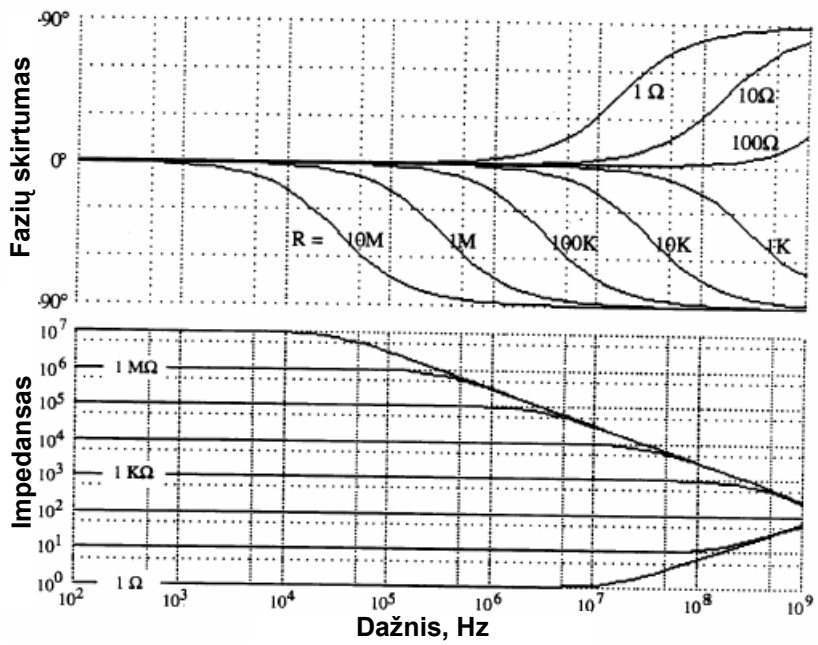
$$L = 0{,}002l\left[\ln \frac{4l}{d} - 0{,}75 \right]. \tag{3.13}$$

Apskaičiavus 1 colio ilgio ir 1 mm skersmens laidininko induktyvumą gauname 16 nH.

Realiose siūlomų formuotuvų konstrukcijose maitinimo šaltinio komutavimas vykdomas herkoniniais perjungikliais, elementai montuojami betarpiškai prie garso sistemos įėjimo kontaktų, todėl jungiamųjų laidų ilgiai yra minimalūs ir jų induktyvumą pagrįstai galima atmesti, kaip nedarantį įtakos formuojamų signalų formai.

Rezistoriai

Rezistoriaus ekvivalentinė schema yra labai paprasta. Ją sudaro rezistoriaus ir nuosekliai įjungtas jo išvadų parazitinis induktyvumas, bei parazitinė talpa tarp rezistoriaus išvadų. Kai formuotuvo schemoje taikomas nedidelės galios cilindrinis rezistorius jo parazitinis induktyvumas neviršija 10 nH, o parazitinė talpa sudaro apie 0,5 pF. Tokio tipo įvairių nominalų rezistorių grandinės impedanso ir fazių skirtumo tarp srovės ir įtampos dažninės charakteristikos pateiktos 3.10 paveiksle [109].



3.10 pav. *Įvairių nominalų cilindrinių rezistorių impedanso ir fazių skirtumo tarp srovės ir įtampos priklausomybės nuo dažnio, esant parazitinei talpai 0,5 pF ir induktyvumui 10 nH*

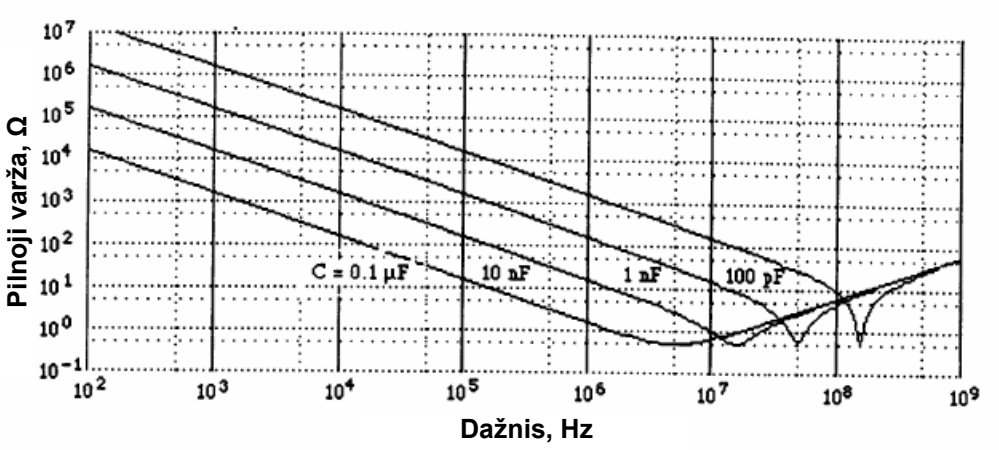
Dar mažesnę talpą ir induktyvumą turi planariniai rezistoriai lituojami į spausdintines plokštes. Pvz.: 1×1,5 mm planarinio rezistoriaus parazitinė talpa C = 0,03 pF, induktyvumas L = 1,2 nH.

Grafikai rodo, kad tinkamai pasirinkus rezistorių, jo parazitinių parametrų įtaka garso dažnių ruože yra nykstamai maža.

Kondensatoriai

Kondensatoriai elektroninėse schemose dažniausiai naudojami signalų (skiriamieji kondensatoriai) nuolatinės srovės blokavimo ir virpamosiose grandinėse. Šiems tikslams elektronikos pramonė gamina platų diapazoną įvairių tipų ir nominalų kondensatorių.

Kondensatoriaus parazitiniai parametrai yra savasis induktyvumas *L* ir nuostolių varža *R*, kurie ekvivalentinėje schemoje sujungti nuosekliai su kondensatoriaus talpa. Tokioje schemoje galimas rezonansas. Savo funkcijas kondensatorius gali atlikti tik dažnių ruože iki rezonanso, nes rezonanso metu jo varža jau yra aktyvinio, o už rezonanso – induktyvinio pobūdžio. 3.11 paveiksle pateikti įvairių talpų kondensatorių pilnosios varžos dažninių priklausomybių grafikai [109].



3.11 pav. *Kondensatorių pilnosios varžos priklausomybės nuo dažnio*

Kaip parodė atlikti elektrolitinių kelių dešimčių mikrofaradų talpos kondensatorių matavimai, jų rezonansas pasireiškia prie kelių šimtų kilohercų.

Taigi realių kondensatorių rezonansinis dažnis dešimtis ir šimtus kartų viršija aukščiausiąjį garso dažnių ruožo dažnį ir todėl parazitinio induktyvumo įtakos formuojant testinius analoginius signalus pagrįstai galima neįvertinti.

Induktyvumo ritės

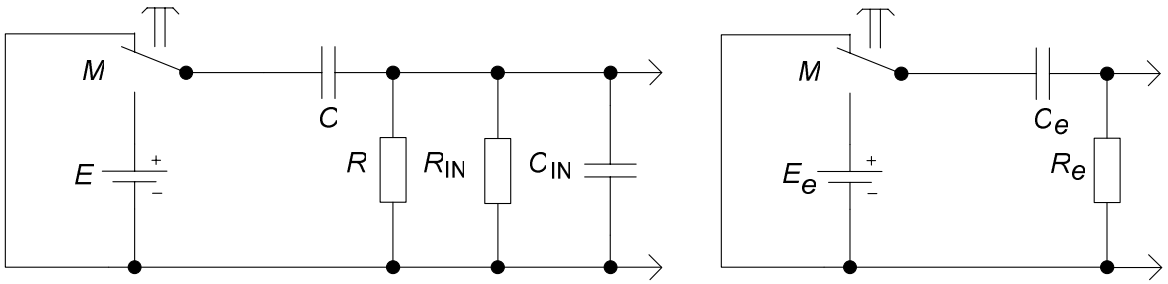
Induktyvumo ritės, be pagrindinio savo parametro – induktyvumo, turi savąją aktyvinę varžą ir talpą. Minimizuoti abu šiuos parametrus nėra paprasta, ypač garso dažnių ruože, kur ritės induktyvumas gali siekti keletą Henrių. Dėl šios priežasties netikslinga taikyti *LR* grandinės eksponentinių signalų formavimui, išskyrus pereinamuosius silpstančiuosius periodinius virpesius.

ASK įėjimo grandinės parametrų įvertinimas

Kai signalo formuotuvas jungiamas betarpiškai prie keitiklio išvadų, galima laikyti, kad garso dažnių ruože ASK įėjimo grandinę sudaro lygiagrečiai sujungti įėjimo varža R_{IN} ir talpa C_{IN}. Panagrinėsime šių parametrų įtaką atskirų formuotuvų generuojamų signalų formai.

Eksponentinio signalo formuotuvas.

Formuotuvo schema įvertinanti parametrus R_{IN} ir C_{IN}, ir šią schemą atitinkanti ekvivalentinė schema pateiktos 3.12 paveiksle.



a *b*

3.12 pav. *Eksponentinio signalo formuotuvai: a – schema įvertinanti ASK grandinės parametrus; b – formuotuvo ekvivalentinė schema*

Ekvivalentinių parametrų dydžiai yra:

$$E_e = E\frac{C}{C + C_{IN}}, \tag{3.14}$$

$$C_e = C + C_{IN}, \tag{3.15}$$

$$R_e = \frac{R \cdot R_{IN}}{R + R_{IN}}. \tag{3.16}$$

Taigi, kaip matyti iš ekvivalentinės schemos, ASK įėjimo grandinės varža ir talpa formuojamo signalo eksponentinės formos nekeičia. Pakinta tik grandinės laiko pastovioji ($\tau_e = R_e C_e$).

Dvipolio aperiodinio signalo formuotuvas.

Didžiausią įtaką formuojamam signalui turi ASK įėjimo varža R_{IN}. Ši varža lygiagrečiai prijungta prie rezistoriaus R_2 (3.7 pav.), todėl ekvivalentinė varža:

$$R_e = \frac{R_2 \cdot R_{IN}}{R_2 + R_{IN}}. \qquad (3.17)$$

Kadangi $R_e < R_2$, paspartėja pereinamasis procesas, tačiau pereinamasis procesas aprašomas tokia pačia (3.11) lygtimi.

Įėjimo talpa C_{IN} yra žymiai mažesnė už kondensatorių C_1 ir C_2 talpą (3.7 pav.), todėl jo įtaka yra paneigtina maža. Tai parodė ir schemos modeliavimas „Multisim“ programa.

Silpstančiųjų periodinių virpesių formuotuvas.

Jungiant silpstančiųjų virpesių formuotuvą (3.9 pav.) prie realaus ASK, lygiagrečiai formuotuvo ritei prisijungia ASK įėjimo varža R_{IN} ir talpa C_{IN}. Varžos R_{IN} įtaka pasireiškia tuo, kad padidėja virpamojo kontūro slopinimo koeficientas δ, ir virpesiai silpsta sparčiau.

Dėl ASK įėjimo talpos C_{IN} padidėja virpamojo kontūro talpa ($C_e = C+C_{IN}$) ir atitinkamai sumažėja laisvųjų silpstančiųjų virpesių dažnis ω_l.

Taigi silpstančiųjų periodinių virpesių aprašymui galioja ta pati (3.12) lygtis, tik su kitomis dažnio ω_l ir slopinimo koeficiento δ reikšmėmis.

3.3.5 Suformuotų signalų taikymas

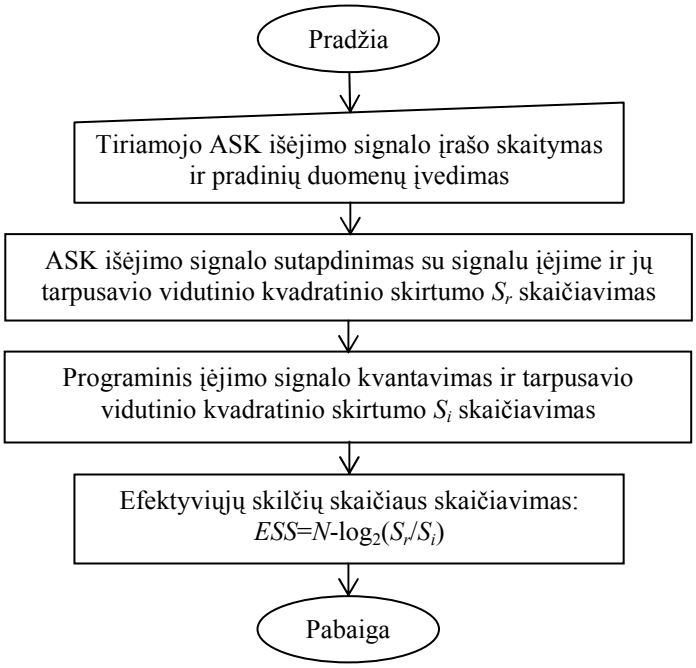
Buvo pagaminti ir eksperimentiškai ištirti: eksponentinio, dvipolio aperiodinio ir silpstančiųjų periodinių virpesių formuotuvai. Šiais formuotuvais suformuoti analoginiai signalai buvo pritaikyti kompiuterio garso sistemos „C-Media“ (CMI-8738) ASK efektyviųjų skilčių skaičiui rasti. Tam pagal 3.13 paveiksle pateiktą algoritmą buvo sudaryta atitinkama MATLAB programa. Programa apskaičiuoja ASK efektyviųjų skilčių skaičių (3.1 lentelė).

3.1 lentelė. *Kompiuterio garso sistemos CMI-8738 ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimų rezultatai, gauti taikant skirtingus testinius signalus*

Analoginio signalo forma	*ESS* (*N*=8)
Eksponentinis ($\tau \approx 1$ ms)	7,95
Dvipolis aperiodinis ($\tau_1 = \tau_2 \approx 1$ ms)	7,92
Silpstantysis periodinis ($f_0 \approx 1000$ Hz)	7,99
Sinusinis virpesys iš išorinio *RC* tipo generatoriaus ($f = 1000$ Hz)	7,91

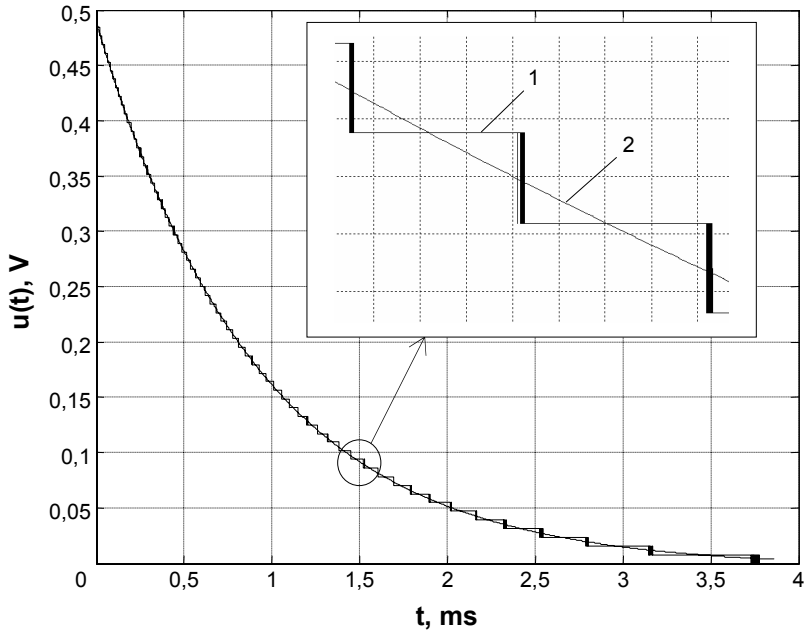
Iš lentelės duomenų matyti, kad ESS skaičiavimų rezultatai, taikant įvairių formų testinius signalus, yra panašūs. Taigi, tiriant kompiuterių garso sistemų ASK kokybę, palyginti brangus

sinusinių virpesių generatorius gali būti keičiamas žymiai pigesniais ir kompaktiškesniais impulsų formuotuvais.

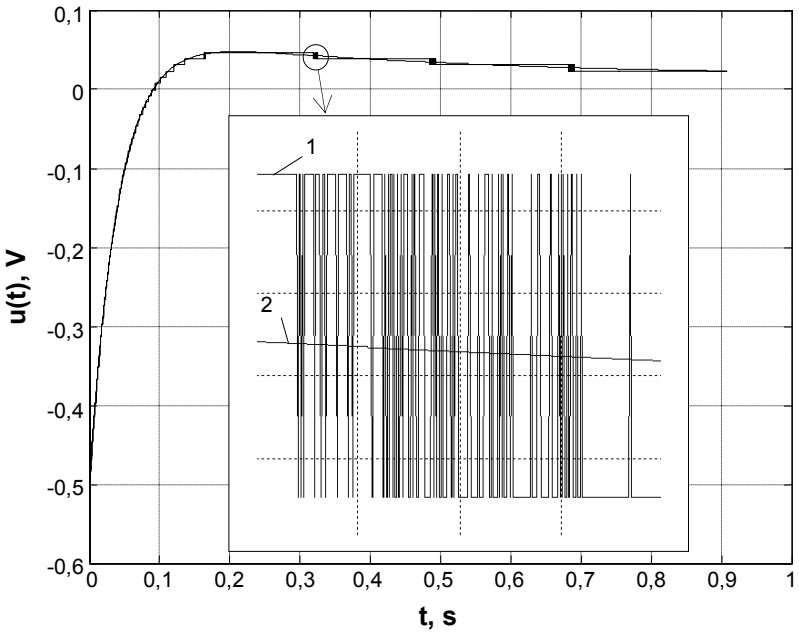


3.13 pav. *Efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo algoritmas*

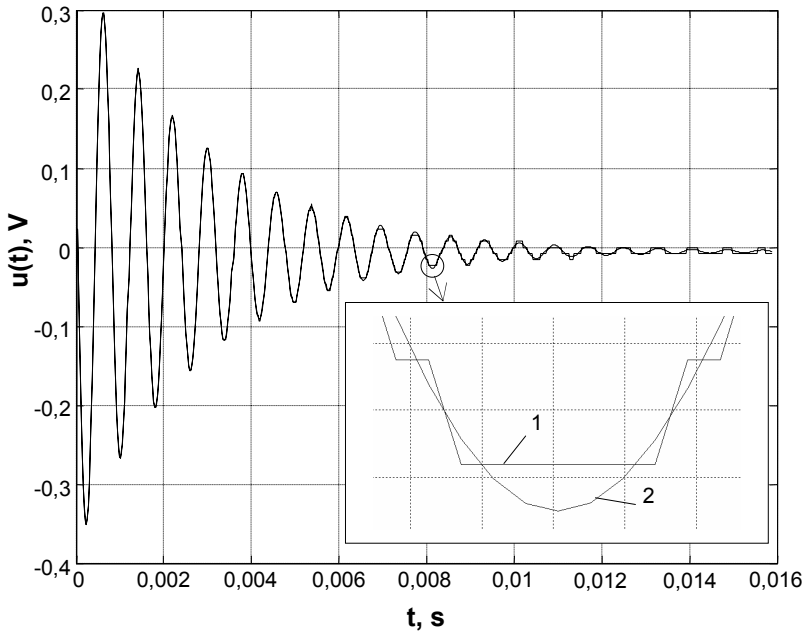
Programa taip pat pateikia signalų ASK įėjime ir išėjime grafikus (3.14 pav.). Tai leidžia vizualiai vertinti kompiuterių garso sistemų ASK darbo kokybę.



a



b



c

3.14 pav. *Eksponentinio – a, dvipolio aperiodinio (grandinės įėjimo trumpojo jungimo atveju) – b ir silpstančiojo periodinio – c signalų grafikai:*
1 – ASK išėjime; 2 – ASK įėjime

3.4 Išvados

1. Kvantuojant idealiu ASK sinuso formos garso dažnių ruožo signalą, kvantavimo paklaidos skirstinys, esant pakankamai dideliam imčių skaičiui, tampa nepriklausomu nuo signalo ir diskretizavimo dažnio santykio, o skirstinio forma skiriasi nuo vienodos tikimybės dėsnio.
2. Standartinė ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodika, pagal kurią sinuso formos testiniam signalui taikomas vienodos tikimybės kvantavimo paklaidos skirstinys, yra nekorektiška, nes apskaičiuotas idealaus ASK efektyviųjų skilčių skaičius viršija fizinį jo skilčių skaičių. To išvengti galima, taikant pasiūlytą ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodą, kadangi šiuo atveju idealaus ir realaus ASK kvantavimo paklaidų vidutinės kvadratinės vertės apskaičiuojamos taikant tą patį algoritmą.
3. Parodyta, kad kompiuterių garso sistemų ASK tyrimui be testinio sinusinio signalo galima taikyti ir tiesinėse elektrinėse grandinėse pereinamųjų procesų metu gaunamus analoginius signalus. Atlikti eksperimentiniai tokių signalų formuotuvų bandymai parodė, kad jie gali būti taikomi kaip alternatyva sinusinių virpesių generatoriams, be to už juos yra žymiai pigesni.
4. Nustatyta, kad parazitinių parametrų įtakos, formuojant analoginius signalus kompiuterių garso sistemų ASK tyrimui, garso dažnių ruože galima neįvertinti.

4. KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ TAIKYMAS

Kaip jau buvo minėta pirmajame skyriuje, šiuolaikinės asmeninių kompiuterių (AK) garso sistemos (nekalbant apie garso kolonėles) paprastai susideda iš dviejų pagrindinių dalių: garso kodavimo ir dekodavimo įtaiso (KDĮ, angl. *Codec*) ir skaitmeninio valdiklio (angl. *Digital Controller* – DC). Šie įtaisai tarpusavyje sujungti specialia ryšio grandimi (angl. AC-*link*). Pagrindinė KDĮ funkcija – garso įrašymas ir atkūrimas per specialiai tam skirtus prievadus, gali būti pritaikyta ir matavimo tikslams garso dažnių ruože. Yra sukurta nemažai virtualių prietaisų: osciloskopų, generatorių, multimetrų ir kt., išnaudojančių šią galimybę. Osciloskopas ir funkcinis generatorius yra ir programų pakete MATLAB. Tokių virtualių prietaisų programuotojai daug dėmesio skiria jų apipavidalinimui, mėgdžiodami realių prietaisų valdymo rankenėles, mygtukus ir kt., tuo tarpu gana svarbios funkcijos (pvz. oscilogramos kopijavimas ir dokumentacija) neretai nenumatomos.

Pateiksime keletą sukurtų AK garso sistemos taikymo pavyzdžių, pasižyminčių funkcionalumu ir taikymo paprastumu. Skyriaus medžiaga paskelbta [118, 120] darbuose.

4.1 Oscilografas

Tiriamasis signalas į oscilografą perduodamas per AK garso sistemos linijinį arba mikrofoninį prievadą. Įėjimo įtampos amplitudė neturi viršyti atitinkamai 1 V ir 0,1 V, kitaip bus reikalingas išorinis įtampos daliklis.

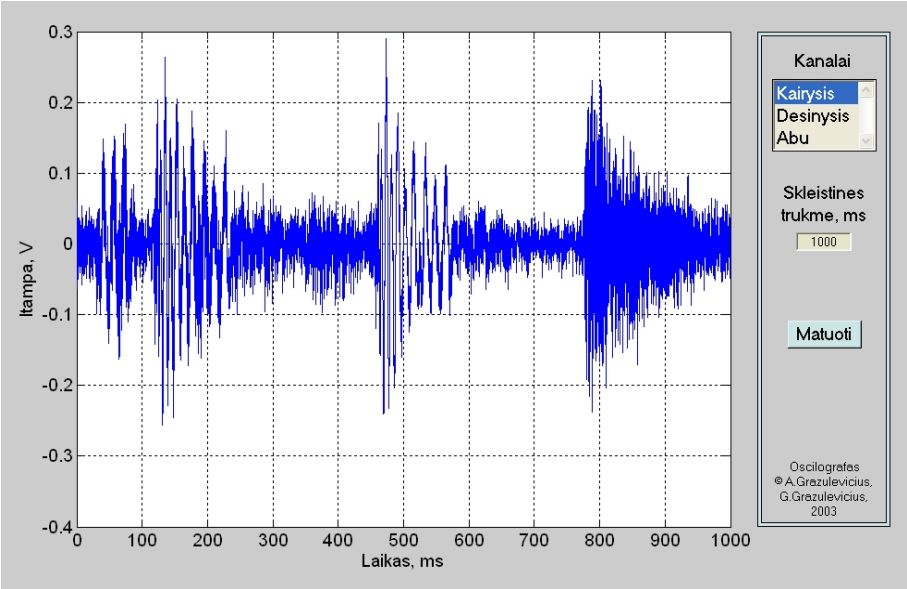
Daugumos šiuo metu AK taikomų garso sistemų analoginiai-skaitmeniniai keitikliai (ASK) yra 16 skilčių ir leidžia nustatyti 44,1 kHz diskretizavimo dažnį. Taigi oscilografo ekrane galima stebėti tik garso dažnių ruožo signalus.

Valdančioji oscilografo programa sudaryta taikant MATLAB grafinį vartotojo interfeisą. Pagrindinę operaciją šioje programoje atlieka MATLAB funkcija, įrašanti analoginį signalą į AK operatyviąją atmintį

$$y = \mathrm{WAVRECORD}\left(N, F_S, CH\right), \tag{4.1}$$

čia N – įrašomų imčių skaičius; F_S – diskretizavimo dažnis; CH = 1 arba 2 – įrašomų kanalų skaičius (mono arba stereo); y – įrašytas į operatyviąją atmintį signalas matricos $N \times CH$ pavidalu.

Virtualus oscilografas [P2.1] parodytas 4.1 paveiksle.



4.1 pav. *Virtualus oscilografas*

Oscilograma fiksuojama standartine MATLAB funkcija „plot (t, y)“, pasirinkus signalo įvesties kanalą (kairysis, dešinysis, abu) ir skleistinės trukmę milisekundėmis. Pasirinkus atitinkamas įrankių juostos funkcijas į tekstinį dokumentą gali būti įkelta tik oscilograma su koordinačių ašimis arba oscilografo bendras vaizdas, kaip parodyta 4.1 paveiksle.

4.2 Spektrografas

Spektras apskaičiuojamas taikant MATLAB greitosios Furjė transformacijos funkciją

$$y = \text{fft}(x, k), \tag{4.2}$$

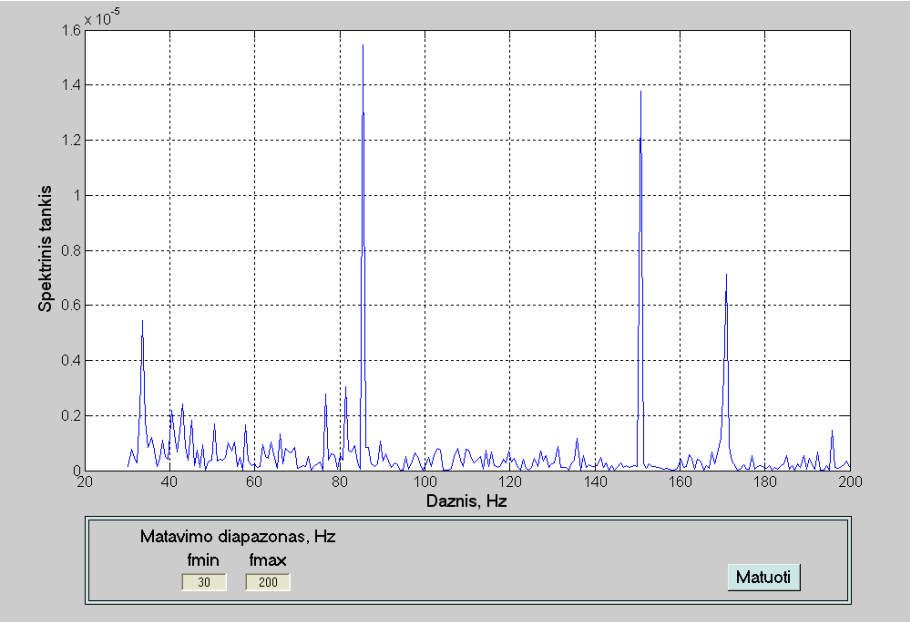
čia x – tiriamojo signalo imčių matrica; $k = 2^n$ (n – sveikas teigiamas skaičius).

Taikant (4.2) funkciją, gaunama kompleksinė spektro forma, todėl prieš išvedant spektro grafiką apskaičiuojamas signalo energetinis spektras

$$z = \frac{y.* y_C}{k}, \tag{4.3}$$

čia $y_C = \text{conj}(y)$ – matricai *y* jungtinės matricos apskaičiavimo procedūra.

Atlikus šią procedūrą gaunamas signalo energetinis spektras ir išvedamas jo grafikas. Virtualus spektrografas [P2.2] parodytas 4.2 paveiksle.



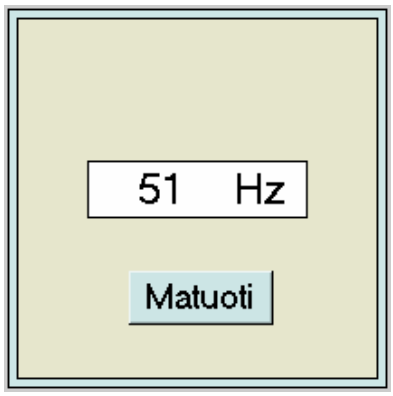
4.2 pav. *Virtualus spektrografas*

Kaip ir oscilografe, čia taikomos tos pačios signalo įvesties ir rezultatų grafinės išvesties priemonės. Valdančiojoje programoje numatytas dažnių ruožo, kuriame bus apskaičiuotas tiriamojo signalo spektras, pasirinkimas (4.2 pav.). Be to, kompiuterio ekrane pele apibrėžus norimą spektrogramos vietą, vaizdą galima padidinti kiek norima kartų.

4.3 Dažniamatis

Dažniamačio veikimo principas pagrįstas matuojamojo signalo spektrine analize. Paprastai dažnis matuojamas periodinių vienokios ar kitokios formos, taip pat ir sinusinių virpesių, kurių spektras yra diskretusis su vyraujančia pirmąja harmonika. Pirmiausia su MATLAB procedūra (4.1) padaromas reikiamos trukmės matuojamojo virpesio įrašas. Signalas perduodamas į AK per garso sistemos linijinį arba mikrofoninį įėjimą. Toliau taikant (4.2) ir (4.3) apskaičiuojamas įrašyto signalo energetinis spektras ir galiausiai, panaudojant didžiausios masyvo reikšmės suradimo procedūrą, randamas pirmosios harmonikos dažnis, kuris ir yra matavimo rezultatas.

Virtualus dažniamatis [P2.3] parodytas 4.3 paveiksle.



4.3 pav. *Virtualus dažniamatis*

Matuojamųjų dažnių ruožas priklauso nuo signalo diskretizavimo dažnio F_s. Jei šis dažnis yra 44,1 kHz, matavimus galima atlikti visame garso dažnių ruože. Didžiausią įtaką matavimų skiriamajai gebai Δf turi diskretizavimo dažnis F_s ir imčių skaičius N:

$$\Delta f = \frac{F_s}{N}. \tag{4.4}$$

Esant programoje numatytiems F_s = 44100 Hz ir $N = 2^{20}$, skiriamoji geba Δf gaunama 0,042 Hz.

4.4 Akustinis tachometras

Akustinio tachometro veikimas panašus į dažniamačio. Garso signalas priimamas mikrofonu ir įrašomas į AK operatyviąją atmintį, taikant (4.1) MATLAB funkciją. Toliau pasirenkamas matavimo diapazonas ir šiame diapazone, taikant (4.2) ir (4.3) MATLAB funkcijas, apskaičiuojamas signalo energetinis spektras. Kadangi mechanizmų besisukančių elementų sukelti garsai turi periodinį pobūdį, tai jų spektre vyrauja pirmoji harmonika. Šios harmonikos dažnis gali būti randamas taikant masyvo didžiausios vertės paieškos funkciją.

Virtualus akustinis tachometras [P2.4] parodytas 4.4 paveiksle.



4.4 pav. *Virtualus akustinis tachometras*

Prieš matavimą paprastai yra žinomas diapazonas, kuriame galima tikėtis matavimo rezultato. Šis diapazonas ir nurodomas tam skirtose akustinio tachometro langeliuose. Vienintelė sąlyga – garsas, kurį sukuria tiriamasis objektas ir kurį priima mikrofonas, turi būti vyraujantis tarp kitų garso signalų. Akustinio tachometro skiriamoji geba – 2,5 apsisukimai per minutę.

4.5 Akustinis tachometras-savirašis

Akustinio tachometro-savirašio paskirtis – akustinio tachometro parodymų registravimas. Programoje yra numatytas matavimo diapazono, matavimų skaičiaus ir periodo nustatymas. Akustiniu tachometru-savirašiu galima ilgą laiką registruoti įvairių besisukančių elementų apsisukimų per minutę skaičių.

Virtualus akustinis tachometras-savirašis [P2.5] parodytas 4.5 pav., a.

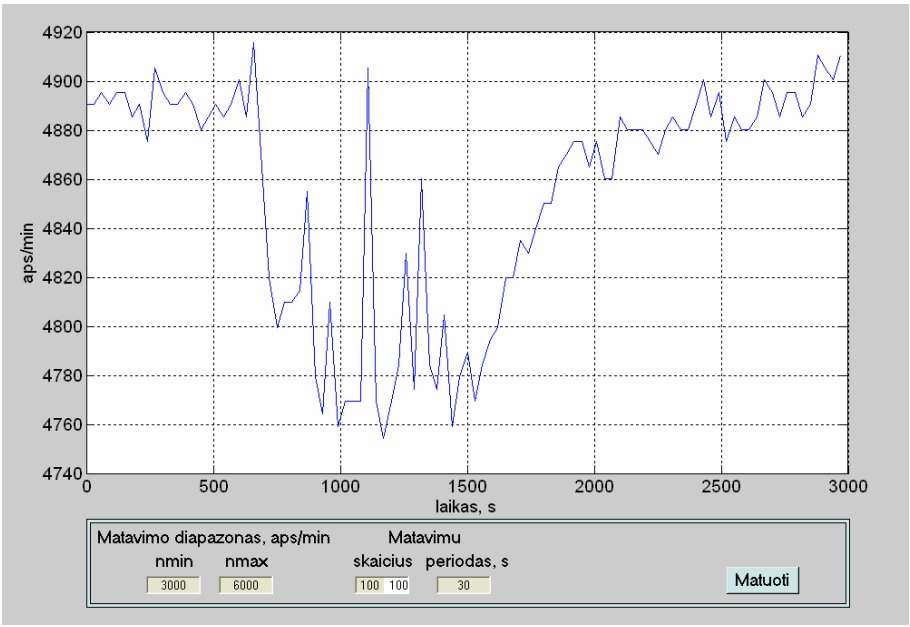
Matavimai gali būti registruojami laiko intervalais nuo 30 sekundžių iki kelių valandų. Akustinio tachometro-savirašio skiriamoji geba – 2,5 apsisukimai per minutę.

4.6 Akustinio triukšmo savirašis

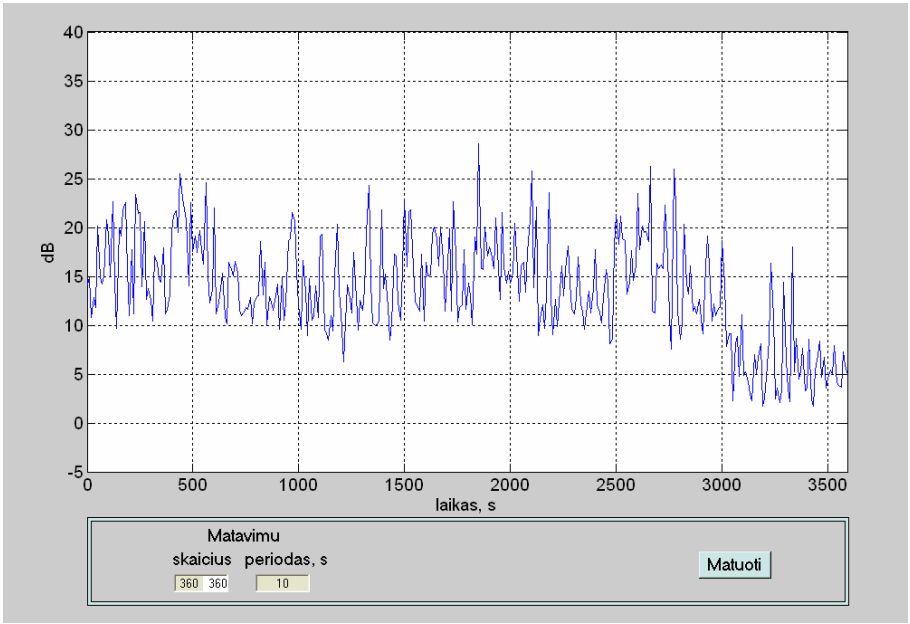
Akustinio triukšmo savirašis [P2.6] (4.5 pav., b) turi panašų vartotojo interfeisą kaip ir akustinis tachometras-savirašis. Skirtumas tik tas, kad čia nereikia nurodyti matavimo diapazono. Jis yra priimtas pastovus nuo -10 iki +90 dB. Akustinio triukšmo garsumo lygis apskaičiuojamas taikant formulę:

$$N_{dB} = 20\lg\left(\frac{U_{tr}}{U_{tr0}}\right), \tag{4.5}$$

čia U_{tr} – mikrofono duodama efektinė įtampos reikšmė; U_{tr0} – mikrofono duodama efektinė įtampos reikšmė kai garsumo lygis atitinka girdimumo ribą.



a



b

4.5 pav. *Virtualūs: a – akustinis tachometras-savirašis; b – akustinio triukšmo savirašis*

4.7 Įrenginių atpažinimas pagal garsą

Atpažinimas pagal garsą yra įprastas reiškinys kasdieninėje praktikoje. Po ilgesnės ar trumpesnės eksploatacijos žmogus lengvai atpažįsta savo buitinius prietaisus pagal jų keliamą akustinį triukšmą. Tačiau tai padaryti jau būtų nelengva, jeigu pagal keliamą triukšmą ir be vizualių atpažinimo ženklų reikėtų atpažinti prietaisą kitų tokių pat prietaisų tarpe. Tą galima būtų padaryti pasitelkiant ekspertus, kurie pagal kompiuterio pateiktas akustinio triukšmo laiko diagramas, jų spektrų grafikus ir kitą grafinę informaciją, padarytų sprendimą. Pagaliau ekspertas gali priimti sprendimą ir be kompiuterio pagalbos, tiesiog pasikliaudamas savo klausa, panašiai kaip tai daro gydytojas diagnozuodamas širdies arba plaučių susirgimus.

Taikant ekspertinį metodą sprendimai yra subjektyvūs, todėl gali būti klaidingi. Norint to išvengti atpažinimo procesą reikia automatizuoti, kaip tai yra daroma atpažįstant žmogų pagal balsą [110]. Tam buvo panaudota KGS ir programų paketu MATLAB sukurta identifikavimo programa „Ident“ [P2.7]. Programa, taikydama „WAVRECORD“ procedūrą, įrašo tiriamojo įrenginio akustinį triukšmą į AK operatyviąją atmintį. Kitų įrenginių tokie pat įrašai yra AK duomenų bazėje nuolatinėje atmintyje. Identifikavimui pasirinktas spektrų palyginimo metodas. Spektrai apskaičiuojami taikant programų paketo MATLAB greitosios Furjė transformacijos „fft“ ir konjunkcijos „conj“ procedūras:

$$\begin{cases} y = \mathrm{fft}(x, k); \\ z = \dfrac{y.*\mathrm{conj}(y)}{k}. \end{cases} \tag{4.6}$$

čia x – akustinio triukšmo įrašas „*.wav“ failo pavidalu; k – įrašo imčių skaičius.

Apskaičiuojami, taip pat, ir duomenų bazėje esančių įrašų spektrai.

Atpažinimo kriterijumi pasirinktas spektrų skirtumo standartinė neapibrėžtis:

$$SN(j) = \mathrm{std}(z - z(j)), \tag{4.7}$$

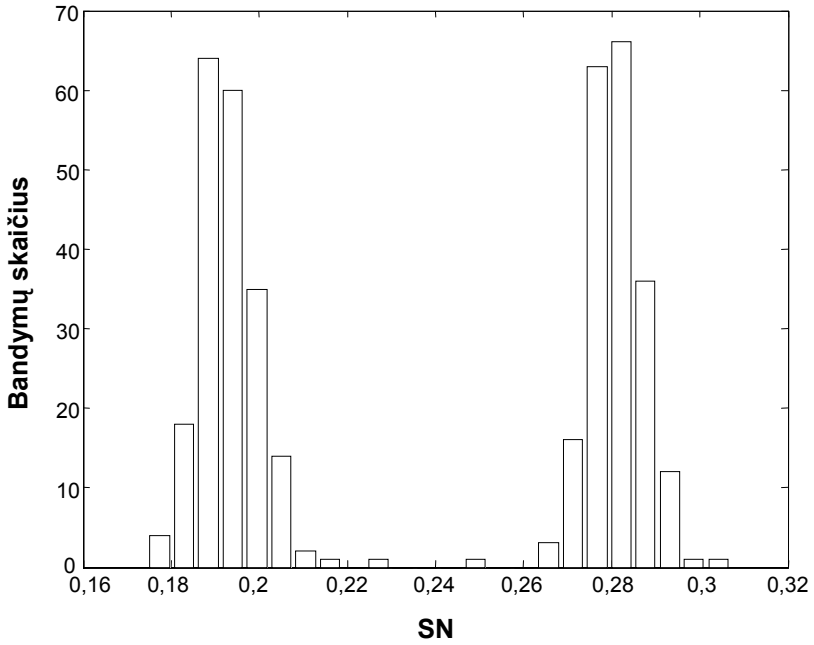
čia std – programų paketo MATLAB standartinės neapibrėžties skaičiavimo procedūra; z – tiriamojo įrenginio akustinio triukšmo spektras; $z(j)$ – kitų įrenginių akustinio triukšmo spektrai.

Kriterijus apskaičiuojamas ne visame garso dažnių ruože, o tik būdingame tiriamajam įrenginiui (20 ... 300 Hz). Taip pavyksta sumažinti išorinio akustinio triukšmo įtaką.

Įrenginys atpažįstamas pagal funkcijos (4.7) minimumą:

$$x\min = \min\left(SN\left(j\right)\right). \tag{4.8}$$

Atpažinimo kriterijaus (4.7) selektyvumui patikrinti buvo eksperimentuojama su dviem vienodais įrenginiais – firmos *Conner* kietųjų diskų kaupikliais sąlyginai pavadintais „conner1“ ir „conner2“. Tam buvo sukurta speciali MATLAB programa „Histo“ [P2.8], atliekanti daugkartinius pasirinkto kietųjų diskų kaupiklio akustinio triukšmo spektro skaičiavimus ir pagal (4.7) lygtį apskaičiuojanti pasirinktojo ir AK atmintyje esančių kietųjų diskų kaupiklių spektrų skirtumo standartines neapibrėžtis *SN1* ir *SN2*. Šių dydžių histogramos pateiktos 4.6 paveiksle.



4.6 pav. *Atpažinimo kriterijaus histogramos*

Iš 4.6 pav. matyti, kad identifikavimo (atpažinimo) kriterijaus histogramos nepersidengia, taigi pasižymi pakankamu selektyvumu, kad galima būtų taikyti įrenginių atpažinimui pagal jų keliamą akustinį triukšmą.

Vykdant atpažinimo programą, mikrofonas pakaitomis buvo perstatomas nuo vieno kietųjų diskų kaupiklio ant kito. Iš 20 bandymų atpažinimo klaidų nepasitaikė.

4.8 Išvados

1. Taikant programų paketą MATLAB sukurti virtualūs: oscilografas, spektrografas, dažniamatis ir akustinis tachometras galintys dirbti garso dažnių ruože tiek kontaktiniu, tiek ir nuotoliniu būdu per garso lauką. Gautos oscilogramos ir spektrogramos gali būti dokumentuojamos ir su (ir be) grafinių vartotojo sąsajos elementų.
2. Sukurtas virtualus akustinio triukšmo savirašis skirtas ilgalaikiam (savaitės), periodiniam, norimo laiko intervalo akustinio ir elektromagnetinio triukšmo matavimui bei registravimui. Rezultatai gaunami laiko diagramos pavidalu.
3. Sukurtas virtualus nekontaktinis tachometras-savirašis, skirtas ilgalaikiam mechanizmų su besisukančiais elementais darbo stebėjimui ir registravimui.
4. Taikant programų paketą MATLAB ir kompiuterio garso sistemą sukurta programa įrenginių atpažinimui pagal jų skleidžiamą garsą.

5. DARBO REZULTATAI

1. Atliktas kompiuterių garso sistemų tyrimas parodė, kad vienas iš svarbiausių funkcinių įtaisų, lemiančių kompiuterių garso sistemų kokybę yra ASK, kurio pagrindinė charakteristika yra efektyviųjų skilčių skaičius.

2. Programų paketo MATLAB tyrimas parodė jo galimybes kompiuterių garso sistemų parametrams tirti: leido sukurti idealaus ASK programinį modelį, kompiuterių garso sistemų ASK tyrimo programinę įrangą ir eilę virtualių matavimo prietaisų.

3. Eksperimentiškai ištirta bandymų skaičiaus, įrašymo lygio, triukšmų ir SAK įtaka efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo rezultatams ir parodyta kad:
   – norint užtikrinti nedidesnę kaip 1 % efektyviųjų skilčių skaičiaus matavimo pilnąją neapibrėžtį, reikia atlikti nemažiau kaip 1000 bandymų (matavimų);
   – parinkus įrašymo lygį 0,8 ... 0,95 V ribose (kas yra nesunkiai pasiekiama), gaunamas nuo 1,5 iki 0,2 % didesnis kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičius, nei esant 1 V įrašymo lygiui;
   – didžiausią įtaką efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo rezultatams turi į ASK suindukuoti trukdžiai;
   – apskaičiuotas ASK efektyviųjų skilčių skaičius priklauso ir nuo SAK savybių: kai SAK turi tą patį skilčių skaičių kaip ir ASK, gausime keliais procentais mažesnį ASK efektyviųjų skilčių skaičių, kaip rodo praktika SAK įtakos galima neįvertinti, jeigu jo skilčių skaičius bent viena skiltimi didesnis už ASK skilčių skaičių.

4. Dažniausiai taikomų kompiuterių garso sistemų ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybių nuo dažnio tyrimas parodė, kad pigiausių kompiuterių garso sistemų efektyviųjų skilčių skaičius yra beveik du kartus mažesnis už geriausių. Tą patį galima pasakyti ir apie kompiuterių garso sistemų atkūrimo kanalų netiesinių iškraipymų ir triukšmo priklausomybes nuo dažnio.

5. Parodyta, kad kvantuojant idealiu ASK sinuso formos signalą, kvantavimo paklaidos skirstinys, esant pakankamai dideliam imčių skaičiui, tampa nepriklausomu nuo signalo ir

diskretizavimo dažnio santykio, o skirstinio forma skiriasi nuo vienodos tikimybės skirstinio.

6. Standartinė ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodika, pagal kurią sinuso formos testiniam signalui taikomas vienodos tikimybės kvantavimo paklaidos skirstinys, yra nekorektiška. Tą patvirtina tai, kad pagal šią metodiką apskaičiuotas idealaus ASK efektyviųjų skilčių skaičius viršija fizinį jo skilčių skaičių. Netikslumo išvengti galima, taikant pasiūlytą ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus skaičiavimo metodą, kadangi šiuo atveju idealaus ir realaus ASK kvantavimo paklaidų vidutinės kvadratinės vertės apskaičiuojamos, taikant tą patį algoritmą.

7. Parodyta, kad kompiuterių garso sistemų ASK tyrimui be testinio sinusinio signalo galima taikyti ir tiesinėse elektrinėse grandinėse pereinamųjų procesų metu gaunamus analoginius signalus. Atlikti eksperimentiniai tokių signalų formuotuvų bandymai parodė, kad jie gali būti taikomi kaip alternatyva sinusinių virpesių generatoriams, be to už juos yra žymiai pigesni.

8. Garso sistema leidžia išplėsti kompiuterio galimybes, realizuojant virtualius matavimo prietaisus. Sukurti oscilografas, spektrografas, dažniamatis, akustinis tachometras, akustinis tachometras-savirašis ir akustinio triukšmo savirašis, išskyrus programą, nereikalauja praktiškai jokių papildomų elementų. Pagrindinis sukurtų matavimo prietaisų privalumas – galimybė atlikti matavimus garso dažnių ruože tiek kontaktiniu, tiek ir nuotoliniu būdu per garso lauką. Esant kompiuteriui budinčiame režime, savirašis gali ilgą laiką (savaites) registruoti akustinio triukšmo arba tachometro parodymus. Sukurta programa įrenginių atpažinimui pagal jų skleidžiamą garsą.

LITERATŪRA

Kitų autorių darbai

1. **Carullo A., Ferraris F., Parvis M., Vallan A.** An audio-card based RF spectrum analyzer for educational purposes. IEEE INSTRUMENTATION & MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, PROCEEDINGS. VAIL, COLORADO, MAY 20-22, 2003. – p.p. 1551-1554.
2. **Hwang J. K.** Innovative communication design lab based on PC sound card and Matlab: A software-defined-radio OFDM modem example. 2003 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING, VOL III. PROCEEDINGS – IMAGE & MULTIDIMENSIONAL SIGNAL PROCESSING. HONG KONG, PEOPLES R CHINA. APR 06-10, 2003. – p.p. 761-764.
3. **Haley K. L., Diakaki A.** Reliability and effectiveness of computer-mediated single word intelligibility testing in speakers with aphasia and apraxia of speech. JOURNAL OF MEDICAL SPEECH-LANGUAGE PATHOLOGY. WILLIAMSBURG, VIRGINIA, DEC 2002. – No 10(4). – p.p. 265-269.
4. **Saliga J., Michaeli L.** Software for metrological characterisation of PC sound cards. COMPUTER STANDARDS & INTERFACES. LISBON, PORTUGAL, MAR 2003. – No 25(1). – p.p. 45-55.
5. **Sypin E. V., Povernov E. S.** Research of an possibility of multichannel sound registration system building on the basis of a single-channel sound card of the computer IBM PC. SIBERIAN RUSSIAN WORKSHOPS AND TUTORIALS ON ELECTRON DEVICES AND MATERIALS, EDM 2002, VOL 2, PROCEEDINGS. Biysk Technol Inst, Biisk, Russia, 2002. – p.p. 60-63.
6. **Rahman M. D. S., Uddin N. H. M. S.** A PC-based audio-visual alphabet learning system. International journal of electrical engineering education. January, 1998. – No 35(1). – p.p. 37-46.
7. **Mehrl D., Hagler M.** Active learning using inexpensive sound cards for circuits and communications experiments. 28Th annual frontiers ir education conference – conference proceedings, vols 1-3. IEEE, 1998. – p.p. 1102-1106.

8. **Painter E., Spanias A.** A MATLAB software tool for the introduction of speech coding fundamentals in a DSP course. 26Th annual frontiers ir education conference – conference proceedings, vols 1-3. IEEE, 1996. – p.p. 603-608.
9. **Vorlander M., Thaden R.** Auralisation of airborne sound insulation in buildings. Acustica. January, 2000. – No 86(1). – p.p. 70-76.
10. **De Jesus J.D., Calvo J. S. V., Fuente A. I.** Surveillance system based on data fusion from image and acoustic array sensors. IEEE aerospace and electronic systems magazine. February, 2000. – No 15(2). – p.p. 9-16.
11. **Sherman D.** Program turns PC sound card into a function generator. EDN. September, 1999. – No 44(18). – p.p. 142-143.
12. **Holler P.** A software oscilloscope for DOS computers with an integrated remote control for a video tape recorder. The assignment of acoustic events to behavioral observations. Computer methods and programs in biomedicine. December, 1995. – No 48(3). – p.p. 229-235.
13. **Faber U., Grussner S., Jager M.** Online 3D-spectrogram of the Doppler signal. Ultraschall in der medizin. February, 2000. – No 21(1). – p.p. 20-25.
14. **Bensky T. J., Frey S. E.** Computer sound card assisted measurements of the acoustic Doppler effect for accelerated and unaccelerated sound sources. American journal of physics. December, 2001. – No 69(12). – p.p. 1231-1236.
15. **Mariani T., Lenci L., Petracchi D., Ascoli C.** Characterizing tuning forks as nanomechanics sensors through thermal noise spectra measured by a personal computer sound card. Measurement science & technology. January, 2002. – No 13(1). – p.p. 28-32.
16. **Widmalm S. E., Djurdjanovic D., McKay D. C.** The dynamic range of TMJ sounds. Journal of oral rehabilitation. May, 2003. – No 30(5). – p.p. 495-500.
17. **Grabowski N. A., Barner K. E.** Data visualization methods for the blind using force feedback and sonification. Telemanipulator and telepresence technologies V. Proceedings of the society of photo-optical instrumentation engineers. 1998. –p.p. 131-139.
18. **Haley K. L., Diakaki A.** Reliability and effectiveness of computer-mediated single word intelligibility testing in speakers with aphasia and apraxia of speech. Journal of medical speech-language pathology. December, 2002. – No 10(4). – p.p. 265-269.

19. **Zafar A., Overhage J. M., McDonald C. J.** Continuous speech recognition for clinicians. Journal of the American medical informatics association. Jun, 1999. – No 6(3). – p.p. 195-204.
20. **Holma T., Laitakari K., Sorri M., Winblad I.** New speech-in-noise test in different types of hearing impairment. Acta oto-laryngologica. 1997. – p.p. 71-73.
21. **Laitakari K.** Speech recognition in noise – Development of a computerized test and preparation of test material. Scandinavian audiology. 1996. – No 25(1). – p.p. 29-34.
22. **Tecirlioglu R. T., Hayes E. S., Trounson A. O.** Semen collection from mice: electroejaculation. Reproduction fertility and development. 2002. – No 14(6). – p.p. 363-371.
23. **Rah D. K., Ko Y. I., Lee C., Kim D. W.** A noninvasive estimation of hypernasality using a linear predictive model. Annals of biomedical engineering. July, 2001. – No 29(7). – p.p. 587-594.
24. **Ye W. X., Zhou S. J., Liu M. X., Cao Y.** An otoacoustic emissions test instrument using sound card. I. System implementation. IEEE-EMBS Asia pacific conference on biomedical engineering. Proceedings, PTS 1&2. 2000. – p.p. 523-524.
25. **Ye W. X., Zhou S. J., Liu M. X., Ye D. T., Qi Y. S., Nie Y. J.** An otoacoustic emissions test instrument using sound card. II. Clinical practice. IEEE-EMBS Asia pacific conference on biomedical engineering. Proceedings, PTS 1&2. 2000. – p.p. 527-528.
26. **Xiao S. Z., Cao Z. H., Zhou S. Y., Fu L., Gao F.** A prototype of heart sound database. Proceedings of annual international conference of the IEEE engineering in medicine and biology society 20. 1998. – p.p. 1210-1211.
27. **Al-Aynati M. M., Chorneyko K. A.** Comparison of voice-automated transcription and human transcription in generating pathology reports. Archives of pathology & laboratory medicine. Jun, 2003. – No 127(6). – p.p. 721-725.
28. **Guler I., Hardalac F., Barisci N.** Application of FFT analyzed cardiac Doppler signals to fuzzy algorithm. Computers in biology and medicine. November, 2002. – No 32(6). – p.p. 435-444.
29. **Guler I., Hardalac F., Muldur S.** Determination of aorta failure with the application of FFT, AR and wavelet methods to Doppler technique. Computers in biology and medicine. July, 2001. – No 31(4). – p.p. 229-238.

30. **McCullagh P. J., Gent G. P., McAllister H. G.** Multimedia stimulation for psychophysiological investigation. Medical informatics Europe ’99. 1999. – p.p. 631-635.
31. **Bott E., Siechert C. C.** Microsoft Windows XP Inside Out, Deluxe Edition. Microsoft Press. October 16, 2002. – 1504 p.
32. **Bruce E. Peetz, Arthur S. Muto, J. Martin Neil.** Measuring waveform recorder performance. Hewlett – Packard Co. Jornal. November, 1982.
33. **Аминев А. М., Бахтиаров Г. Д., Тимофеев А. Л.** Методы и средства контроля динамических параметров быстродействующих АЦП. Зарубежная радиоэлектроника. – М.: 1989. № 4. – С. 36-55.
34. **Martin Neil, Arthur S. Muto.** Tests unearth a - d converter's real - world performance. Hewlett - Packard Co, 1982. – p.p. 127-132.
35. **А.-Й. К. Марцинкявичюс, Э.-А. К. Багданскис, Р. Л. Пошюнас, Б. В. Драган, Й. М. Кажукаускас, И. Д. Кучинскас.** Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.: ил.
36. **A. Marcinkevičius.** Signalų apskaičiavimas plačiajuosčiuose ASK. Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 1998. – Nr. 1(14).
37. **A. Marcinkevičius.** Signalų netiesinėse ASK komparatorių grandinėse apskaičiavimas ASK. Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 1999. – Nr. 3(21).
38. **Walt Kester.** Mixed-Signal and DSP Design Techniques. Analog Devices, Inc. All rights reserved. 2000.
39. IEEE Std 1057-1994. IEEE Standard For Digitizing Waveform Recorders. IEEE Instrumentation and Measurement Society. **Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.** All rights reserved. December 30, 1994.
40. IEEE Std 1241-2000. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. IEEE Instrumentation and Measurement Society. **Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.** All rights reserved. December 7, 2000.
41. **Julian Dunn.** Measurement Techniques for Digital Audio. Audio Precision, Inc. All rights reserved. January, 2002.
42. **Julian Dunn.** Analog-to-Digital Converter Measurements. Technote (TN-24). Audio Precision, Inc. All rights reserved. 2000.

43. PC Audio Device Performance Tests. **Audio Precision, Inc.** All rights reserved. May, 2000.
44. **Richard C. Cabot.** Fundamentals of Modern Audio Measurement. Audio Precision, Inc. All rights reserved. 2000.
45. **B. Metzler.** Audio Measurement Handbook. Audio Precision, Inc. All rights reserved. 1993.
46. **AES17-1991 (ANSI S4.51-1991).** AES standard method for digital audio engineering – Measurement of digital audio equipment. Audio Engineering Society, Inc. 1991.
47. **Steven Harris & Clif Sanchez.** Personal Computer Audio Quality Measurements. Cirrus Logic, Inc. Crystal Audio Division. All rights reserved. 1997.
48. Understanding Data Converters/ Application Report. **Texas Instruments, Inc.** All rights reserved. 1999.
49. **Steven R. Norsworthy, Richard Schreier, Gabor C. Temes.** Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design, and Simulation. IEEE. November, 1996. – 448 p.
50. **James C. Candy, Gabor C. Temes.** Oversampling Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design and Simulation. John Wiley & Sons. January, 1992. – 499 p.
51. **David F. Hoeschele.** Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Conversion Techniques. Wiley-Interscience; 2nd Edition. April, 1994. – 97 p.
52. Analog-Digital Conversion Handbook. **Analog Devices, Inc.** All rights reserved. Prentice Hall, 3rd edition. July, 1997. – 720 p.
53. **Paul G. A. Jespers.** Integrated Converters: d to a and a to d Architectures, Analysis and Simulation. Oxford University Press. July, 2001. – 456 p.
54. **Michael J. Demler.** High-Speed Analog-To-Digital Conversion. Academic Press, 1st edition. January, 1991. – 218 p.
55. **Orest G. Symko.** Physics of Hi-Fi: Analog to Digital. Kendall/Hunt Publishing Company. March, 1995.
56. **Kevin M. Daugherty.** Analog to Digital Conversion: A Practical Approach. McGraw-Hill Professional. September, 1993. – 213 p.
57. **Martin Schetzen, Vinay K. Ingle.** Discrete Systems Laboratory Using MATLAB. Brooks Cole; 1 edition. December, 1999. – 144 p.
58. **Eugene R. Hnatek.** A User's Handbook of D/A and A/D Converters. Krieger Publishing Company; Reprint edition. August, 1988.

59. **Dieter Seitzer, Gunter Pretzl.** Electronic Analog-To-Digital Converters: Principles, Circuits, Devices, Testing. John Wiley & Sons. January, 1984.
60. **G. B. Clayton.** Data Converters. Halsted Press. June, 1982. – 455 p.
61. **K. R. Fowler.** Part 7: Analog-to-Digital Conversion ir Real-Time Systems. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. Septemper, 2003. – pp. 58-64.
62. **K. R. Fowler.** Electronic Instrument Design. New York, Oxford Univ. Press. 1996.
63. **S. Harris.** Dynamic techniques test high-resolution ADCs on PCs. Electron Design. September, 1987. – p.p. 109-112.
64. **Смирнов Д. В., Логутенко О. И.** Аппаратные средства мультимедиа. Аудиосистема PC. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 1999. – 384 с.: ил.
65. **Борзенко А., Федоров А.** Мультимедиа для всех. – М.: Компьютер пресс, 1995. – 252 с.
66. **Гласс Б.** Высококачественные звуковые карты. Мир ПК, 1994. – С. 24-28.
67. **Курило А.** Аудиомания-2. Мир ПК, 1998. – С. 154-164.
68. **Куэйн Д. Р.** Звуковые платы на любой вкус. PC Magazine. Russian Edition, 1995. – С. 87-113.
69. **Петелин Р. Ю., Петелин Ю. В.** Персональный оркестр в PC. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 1998. – 240 с.
70. **Петелин Р. Ю., Петелин Ю. В.** Звуковая студия в PC. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 1998. – 256 с.
71. **Радзишевский А.** Компьютерная обработка звука. – М.: Нолидж, 2000. – 240 с.: ил.
72. **Day D., Hilley V.** Soundblaster: Making Waves With Multimedia. Learning Express, 1995. – 239 p.
73. Audio Codec '97. Revision 2.2. **Intel Corporation.** All rights reserved. September, 2000.
74. Audio Codec '97. Revision 2.3. **Intel Corporation.** All rights reserved. April, 2002.
75. PC 97 Hardware Design Guide. The Official Reference for Designing PC's and Peripherals for the Microsoft® Windows® Family of Operating Systems. **Microsoft Corporation.** All rights reserved. 1995-1996.
76. PC 99 System Design Guide. A Technical Reference for Designing PC's and Peripherals for the Microsoft® Windows® Family of Operating Systems. **Intel Corporation and Microsoft Corporation.** All rights reserved. 1997-1999.

77. PC 2001 System Design Guide. A Technical Reference for Designing PC's and Peripherals for the Microsoft® Windows® Family of Operating Systems. **Intel Corporation and Microsoft Corporation.** All rights reserved. 1999-2000.
78. **D. Eidukas.** Elektroninių sistemų metrologija: Mokomoji knyga. – Kaunas: Technologija, 2001. – 310 p.
79. **Mucahit Kozak, Izzet Kale.** Oversampled Delta-Sigma Modulators: Analysis, Applications and Novel Topologies. Kluwer Academic Publishers. June, 2003. – 226 p.
80. **D. C. Pinkowitz.** Fast Fourier transform speeds signal-to-noise analysis for A/D converters. Digital Design. Vol. 16, No. 6. 1986. – pp. 64-66.
81. **Julian Dunn.** Digital-to-Analog Converter Measurements. Technote (TN-25). Audio Precision, Inc. All rights reserved. 2001.
82. **Roger Derry.** PC Audio Editing, Second Edition. Focal Press; Book & CD-Rom edition. November, 2002. – 264 p.
83. **Liadov M.** RightMark Audio Analyzer Soundtest Explanation. iXBT.com/Digit-Life. All rights reserved. 2002.
84. RightMark Audio Analizer. **iXBT.com/Digit-Life.** All rights reserved. 2002.
85. Creating Graphical User Interfaces. **The MathWorks Inc.** All rights reserved. November, 2000.
86. **Patrick Marchand, O. Thomas Holland.** Graphics and GUIs with MATLAB, Third Edition. CRC Press; 3 edition. December, 2002. – 512 p.
87. **Brian D. Hahn.** Essential MATLAB for Scientists and Engineers. Butterworth-Heinemann; 2nd edition. January, 2002. – 320 p.
88. **Amos Gilat.** MATLAB: An Introduction with Applications. John Wiley & Sons; 1st edition. February, 2003. – 304 p.
89. **Потемкин В. Г.** MATLAB. Справочное пособие. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1997. – 350 с.
90. **Дьяконов В.** MATLAB. Обработка сигналов и изображений. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.: ил.
91. **Дьяконов В., Круглов В.** MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.: ил.
92. **Потемкин В. Г., Рудаков П. И.** Система MATLAB 5 для студентов. – 2-е изд., испр. и дополн. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 448 с.

93. **Потемкин В. Г.** Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x: – В 2-х т. Том 1. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 366 с.
94. **Потемкин В. Г.** Система инженерных и научных расчетов MATLAB 5.x: – В 2-х т. Том 2. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 304 с.
95. **Мартынов Н. Н., Иванов А. П.** MATLAB 5.x. Вычисления, визуализация, программирование. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2000. – 336 с.
96. **Adrian Biran, Moshe Breiner, Arthur H. Bell.** Matlab 6 for Engineers. Pearson Education UK. September, 2002.
97. **Duane Hanselman, Bruce R. Littlefield.** Mastering MATLAB 6. Prentice Hall; 1st edition. December, 2000. – 832 p.
98. **Дьяконов В.** MATLAB 6: учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.: ил.
99. **Румшиский Л. З.** Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
100. **D. Eidukas.** Informacinės matavimo sistemos. – KTU, 1992. – 178 p.
101. **V. Vekteris, A. Kasparaitis, S. Kaušinis, R. Kanapėnas.** Matavimų teorija ir praktika. – Vilnius: Žiburys, 2000. – 380 p.
102. Основы научных исследований / под ред. **В. И. Кутова**. – М.: Высш. школа, 1989. – 400 с.
103. **V. Valiukėnas, P. J. Žilinskas.** Tarptautinis pagrindinių ir bendrųjų metrologijos terminų žodynas. 2-asis patais. leid. Vilnius: Mokslo ir enciklopedijos leidybos institutas, 1998. – 96 p.
104. **Золотухин И. П., Изюмов А. А., Райзман М. М.** Цифровые звуковые магнитофоны. – Томск: Радио и связь, 1990. – 160 с.
105. **Никамин В. А.** Цифровая звукозапись. Технологии и стандарты. – СПб: Наука и техника, 2002. – 256 с.: ил.
106. **J. Sveikata.** Grandinių teorija. – Kaunas: Technologija, 2000. – 244 p.
107. **R. Kirvaitis, R. Martavičius.** Analoginės schemos. – Vilnius, 2000.
108. **R. Krivickas.** Skaitmeninis signalų apdorojimas. – V.: Mokslas, 1984. – 128 p.
109. **M. Mc. Whorter.** EE344, High Frequency Laboratory. Stanford Univ., 1995.
110. **A. Lipeika, J. Lipeikienė, L. Telksnys.** Development of Isolated Word Speech Recognition System. INFORMATICA, 2002. Vol. 13, No. 1. – p.p. 37-46.

Autoriaus straipsniai disertacijos tema

111. **G. Gražulevičius.** x86 mikroprocesoriai: vakar, šiandien, rytoj. Antrosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“, įvykusios Vilniuje 1999 m. kovo 19 d., medžiaga. Elektronika ir elektrotechnika. Vilnius, Technika 1999. – P. 49-55.
112. **G. Gražulevičius.** Garso kortų keitiklių tyrimas. Ketvirtosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos "Lietuva be mokslo - Lietuva be ateities", įvykusios Vilniuje 2001 m. kovo 16 d., medžiaga. Elektronika ir elektrotechnika. – Vilnius: Technika, 2001. – P. 115-121.
113. **A. Gražulevičius, G. Gražulevičius.** Audiokontrolerių keitiklių tyrimas. Elektronika '99. Tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga. – Kaunas: Technologija, 1999. – P. 81-82.
114. **A. Gražulevičius, G. Gražulevičius.** Kompiuterinių audiokontrolerių keitiklių tyrimas. Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2000. – Nr. 5(28), – P. 53-57.
115. **A. Gražulevičius, G. Gražulevičius.** Kompiuterinių garso sistemų analoginių-skaitmeninių keitiklių tyrimas. Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2001. – Nr. 1(30), – P. 22-25.
116. **G. Gražulevičius.** Kompiuterinių garso sistemų atkūrimo kanalų tyrimas. Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2002. – Nr. 2(37), – P. 73-76.
117. **G. Gražulevičius, A. Gražulevičius.** Signalų formavimas analoginiu-skaitmeninių keitiklių tyrimui. Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 1(43), – P. 52-55.
118. **G. Gražulevičius, A. Gražulevičius.** Asmeninio kompiuterio garso sistemos taikymas elektroakustiniams signalams ir mechaniniams virpesiams tirti. Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 7(49), – P. 44-46.
119. **А. Гражулявичюс, Г. Гражулявичюс, Ю. Скудутис.** Исследование аудиосистем компьютеров с помощью пакета MATLAB. Электроника и связь. Киев, 2003. № 18, – С. 113-116.
120. **A. Gražulevičius, G. Gražulevičius, J. Skudutis.** Investigation of Computer Audio Systems // Scientific Proceedings of Riga Technical University in series 7: “Telecommunications and Electronics”, vol. 4. Riga, 2004. – p.p. 59-64.

1 PRIEDAS. MATLAB PROGRAMOS KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ TYRIMUI

P1.1 MATLAB programa „Test“

```
function test
% programa imituoja idealaus ASK darbą
% 2003 03 22 versija
clear
f=997; % etaloninio signalo dažnis
fs=44100; % diskretizavimo dažnis
N=16; % fizinis ASK skilčių skaičius
k=0:1000000; % masyvo apimtis
y=.996*sin(2*pi*f*k/fs);
wavwrite(y,fs,N,'etalon');
```

P1.2 MATLAB programa „Ess“

```
function ess
% programa apskaičiuoja ASK efektyviųjų skilčių skaičių
% sideal skaičiuojamas komanda „wavwrite“ kvantuojant atstatytą sinusą ir
% apskaičiuojant gaunamą tokiu būdu vidutinį kv. nuokrypį
% 2003 07 03 versija
clear
f=997; % etaloninio signalo dažnis
N=16; % fizinis ASK skilčių skaičius
k=1000; % imčių skaičius
k1=1; % pradinės imties numeris
k2=k1+k-1; % paskutinės imties numeris
[s,fs]=Wavread('real',[k1 k2]);
s=s(:,1);
xmin=min(s); xmax=max(s);
A=(xmax-xmin)/2; % pradinė amplitudė
c=(xmax+xmin)/2; % nuolatinė dedamoji
fi=fminbnd('sss',-6.3,6.3,optimset('tolx',1e-14),...
s,A,c,k1,k2,f,fs);% fi - tiksli pradinė fazė
t=k1:k2;
b1=sum(s.*sin(2*pi*f*t/fs+fi)');
b2=sum(sin(2*pi*f*t/fs+fi).^2);
b3=sum(sin(2*pi*f*t/fs+fi));
b4=sum(s);
```

```
A=(k*b1-b3*b4)/(k*b2-b3^2); % tiksli amplitudė
c=(b1-A*b2)/b3; % tiksli nuolatinė dedamoji
z=A*sin(2*pi*f*t/fs+fi)+c; % atstatytas sinusas
sreal=std(s-z'); % realaus ASK kvantavimo triukšmas
wavwrite(z,fs,n,'etalon1'); % atstatyto sinuso kvantavimas
zz=Wavread('etalon1');
sideal=std(zz-z');% idealaus ASK kvantavimo triukšmas
Nef=n-log2(sreal/sideal), % efektyviųjų skilčių skaičius
plot(t,s,t,zz,'r'); zoom; grid;
```

Paprogramis„sss“:

```
function y=sss(fi,s,A,c,k1,k2,f,fs)
t=k1:k2;
s1=(A*sin(2*pi*f*t/fs+fi)+c)';
y=sum((s-s1).^2);
```

P1.3 MATLAB programa „Dsp“

```
function dsp
% Programa apskaičiuoja ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus matavimo pilnąją
% neapibrėžtį, priklausomai nuo bandymų skaičiaus ir išveda efektyviųjų
% skilčių skaičiaus histogramą
% 2003 04 26 versija
clear
f=997; % etaloninio signalo dažnis
N=16; % fizinis ASK skilčių skaičius
k=1000; % imčių skaičius
k1=10000; % pradinės imties numeris
psl=100; % poslinkis
Nb=1000; % bandymų skaičius
his=10;% histogramos intervalų skaičius
for i=1:Nb
k2=k1+k-1; % paskutinės imties numeris
[s,fs]=Wavread('real',[k1 k2]);
xmin=min(s);xmax=max(s);
A=(xmax-xmin)/2; % pradinė amplitudė
c=(xmax+xmin)/2; % nuolatinė dedamoji
[fi]=fmin('sss',-7,7,[0,1e-14],s,A,c,k1,k2,f,fs); % fi - tiksli pradinė fazė
t=k1:k2;
b1=sum(s.*sin(2*pi*f*t/fs+fi)');
b2=sum(sin(2*pi*f*t/fs+fi).^2);
```

```
b3=sum(sin(2*pi*f*t/fs+fi));
b4=sum(s);
A=(k*b1-b3*b4)/(k*b2-b3^2); % tiksli amplitudė
c=(b1-A*b2)/b3; % tiksli nuolatinė dedamoji
z=A*sin(2*pi*f*t/fs+fi)+c;
q=2/(2^n-1); % žemiausiosios skilties vertė
sideal=q/sqrt(12); % keitimo paklaida idealiu atveju
y=sss(fi,s,A,c,k1,k2,f,fs);
sreal=sqrt(y/(k-1));% keitimo paklaida realiu atveju
Nef(i)=n-log2(sreal/sideal);% efektyviųjų skilčių skaičius
k1=k1+psl;
end
vidurkis=mean(Nef);
vkn=std(Nef);
RSP=3*vkn*100/vidurkis; % efektyviųjų skilčių skaičiaus matavimo pilnoji neapibrėžtis
mi=min(Nef)-0.0000001;
ma=max(Nef)+0.0000001;
in=(ma-mi)/his;
e=mi:in:ma;
q=histc(Nef,e);
bar(e,q); colormap(white);
```

Paprogramis „sss“:

```
function y=sss(fi,s,A,c,k1,k2,f,fs)
t=k1:k2;
s1=(A*sin(2*pi*f*t/fs+fi)+c)';
y=sum((s-s1).^2);
```

P1.4 MATLAB programa „Tsta“

```
function tsta
% programa suformuoja etaloninį poliamplitudinį signalą
% 2003 02 23 versija
f=997; % etaloninio signalo dažnis
fs=44100; % diskretizavimo dažnis
N=16; % fizinis ASK skilčių skaičius
A=[0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 0.996]; % Amplitudė
M=10;% amplitudžių skaičius
L=100000;% imčių skaičius, tenkantis vienai amplitudei
k=1:M*L; % masyvo apimtis
y=A(floor((k-1)/L)+1).*sin((k-1)*2*pi*f/fs);
```

```
wavwrite(y,fs,N,'etalon');
[s,fs]=Wavread('etalon');
plot(s);grid
```

P1.5 MATLAB programa „Essa“

```
function essa
% Programa apskaičiuoja ASK efektyviųjų skilčių skaičiaus priklausomybę nuo signalo
% amplitudės
% 2003 03 22 versija
clear
f=997; % etaloninio signalo dažnis
N=16; % fizinis ASK skilčių skaičius
k=30000;% imčių skaičius
k1=10000; % pradinės imties numeris
k2=k1+k-1;% paskutinės imties numeris
fd=10; % fonto dydis
L=100000; % imčių skaičius, tenkantis vienam dažniui
for i=1:10
[s,fs]=Wavread('ampl16',[k1 k2]); s=s(:,1);
xmin=min(s);xmax=max(s);
A=(xmax-xmin)/2; % pradinė amplitudė
c=(xmax+xmin)/2; % nuolatinė dedamoji
fi=fminbnd('sss',-6.3,6.3,...
optimset('tolx',1e-24),s,A,c,k1,k2,f,fs); % fi - tiksli pradinė fazė
t=k1:k2;
b1=sum(s.*sin(2*pi*f*t/fs+fi)');
b2=sum(sin(2*pi*f*t/fs+fi).^2);
b3=sum(sin(2*pi*f*t/fs+fi));
b4=sum(s);
A=(k*b1-b3*b4)/(k*b2-b3^2); % tiksli amplitudė
c=(b1-A*b2)/b3; % tiksli nuolatinė dedamoji
z=A*sin(2*pi*f*t/fs+fi)+c; % atstatytas sinusas
y=sss(fi,s,A,c,k1,k2,f,fs); % skirtumų kvadratų suma
sreal=sqrt(y/(k-1)); % keitimo paklaida realiu atveju
wavwrite(z,fs,n,'pas'); % kvantavimo procedūra
[zz,fs]=Wavread('pas');
y1=sss(fi,zz,A,c,k1,k2,f,fs);
sideal1=sqrt(y1/(k-1));
q=2/(2^n-1);% žemiausiosios skilties vertė
sideal2=q/sqrt(12); % keitimo paklaida idealiu atveju
Nef1(i)=n-log2(sreal/sideal1);
```

```
Nef2(i)=n-log2(sreal/sideal2);
set(gca,'fontsize',fd);
k1=k1+L;k2=k2+L; %figure (1)
set(gca,'fontsize',fd);
figure (1)
subplot(3,4,i);
hold on;
plot(s,'black');
plot(z,'w');hold off;AA(i)=A;
end
figure(2);
plot(AA,efss1,'b'); grid; hold off;
```

Paprogramis „sss“:

```
function y=sss(fi,s,A,c,k1,k2,f,fs)
t=k1:k2;
s1=(A*sin(2*pi*f*t/fs+fi)+c)';
y=sum((s-s1).^2);
```

P1.6 MATLAB programa „Triukšmas“

```
function triuksmas
% Programa "Triukšmas" apskaičiuoja ASK savųjų
% triukšmų įtampos vidutinę kvadratinę vertę
% 2003 03 22 versija
clear
k=1000; % imčių skaičius
k1=100000; % pradinės imties numeris
k2=k1+k-1; % paskutinės imties numeris
[s,fs]=Wavread('Real',[k1 k2]);
tr=std(s)
plot(s); grid;
```

P1.7 MATLAB programa „Tst“

```
function tst
% Programa imituoja idealaus ASK darbą
% 2003 03 22 versija
fs=44100; % diskretizavimo dažnis
N=16; % fizinis ASK skilčių skaičius
```

```
ff=[21.5 44 79 124 248 499 998 1999 3998 5998 7999 9997 12497 15998 19997]; % dažnių eilutė
M=15; % dažnių skaičius
L=40000;%imčių skaičius, tenkantis vienam dažniui
k=1:M*L; % masyvo apimtis
y=0.996*sin(2*pi*ff(floor((k-1)/L)+1).*(k-1)/fs);
Wavwrite(y,fs,N,'etalon');
[s,fs]=Wavread('etalon');
t=1:160000;
plot(t,[y(t)',s(t)]); grid
```

P1.8 MATLAB programa „Essd“

```
function essd
% Programa apskaičiuoja ASK efektyviųjų skilčių dažninę charakteristiką
% sideal skaičiuojamas komanda wavwrite
% kvantuojant atstatytą sinusą ir apskaičiuojant
% gaunamą tokiu būdu vidutinį kv. nuokrypį
% 2003 03 22 versija, taikant "fminbnd" funkcija
clear
N=16; % fizinis ASK skilčių skaičius
disp('Pasirinkite režimą: mono=1, stereo=2');
ste=input('režimas = ');
ff=[21.5 44 79 124 248 499 998 1999 3998 5998 7999 ...
9997 12497 15998 19997]; % dažnių eilutė
for j=1:ste
k=15000;% imčių skaičius
k1=1000;% pradinės imties numeris
k2=k1+k-1;% paskutinės imties numeris
L=40000;% imčių  skaičius, tenkantis vienam dažniui
s=Wavread('real',[k1 k2]);
c=0; % nuolatinė dedamoji
for i=1:15
[s,fs]=Wavread('etalon16',[k1 k2]);
s=s(:,j);
f=ff(i);
xmin=min(s);xmax=max(s);
A=(xmax-xmin)/2; % pradinė amplitudė
fi=fminbnd('sss',-6.3,6.3,optimset('tolx',1e-14),...
s,A,c,k1,k2,f,fs); % fi - tiksli pradinė fazė
t=k1:k2;
b1=sum(s.*sin(2*pi*f*t/fs+fi)');
```

```
b2=sum(sin(2*pi*f*t/fs+fi).^2);
b3=sum(sin(2*pi*f*t/fs+fi));
b4=sum(s);
A=(k*b1-b3*b4)/(k*b2-b3^2); % tiksli amplitudė
if A>0.996
error('Mažink įrašo amplitudę !!!')
end
z=A*sin(2*pi*f*t/fs+fi)+c; % pritaikytas sinusas
sreal=std(s-z'); % realaus ASK kvantavimo triukšmas
Wavwrite(z,fs,n,'etalon');% pritaikyto sinuso kvantavimas
zz=Wavread('etalon');
sideal=std(zz-z');% idealaus ASK kvantavimo triukšmas
Nef(i,j)=n-log2(sreal/sideal); % efektyviųjų skilčių skaičius
k1=k1+L;k2=k2+L; figure (j)
subplot(4,4,i);
hold on;
plot(s,'r ');
plot(z,'w ');hold off;
end
end
for j=1:ste
hold on
figure (3);
semilogx(ff,Nef(:,j));
hold off
end
grid
```

Paprogramis „sss“:

```
function y=sss(fi,s,A,c,k1,k2,f,fs)
t=k1:k2;
s1=(A*sin(2*pi*f*t/fs+fi)+c)';
y=sum((s-s1).^2);
```

2 PRIEDAS. MATLAB PROGRAMOS KOMPIUTERIŲ GARSO SISTEMŲ TAIKYMUI

P2.1 Virtualus oscilografas

```
function oscilografas
% Programa "Oscilografas" dirba su paprogramiu "Osc"
% 2003 06 16 versija
%------------Globalieji kintamieji------------------
global hFig1 hAxses;
global hEd1;
global hTxt1 hTxt2 hTxt3 hList;
global hBut1;
%---------------------------------------------------
hFig1=figure;
set(gcf,'position',[15 35 1000 685]);
hAxes=axes('Parent',hFig1,'Color', [1 1 1],...
   'Units','points',...
   'Position', [70 80 530 400],...
   'FontSize', 12);
%---------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[830 108 144 533],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9]);
%---------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[834 112 136 525],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8]);
%---------------------------------------------------
hEd1=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[872 405 60 20],...
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',12);
%---------------------------------------------------
hTxt1=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[852 430 100 50],...
   'HorizontalAlignment','center',...
   'String','Skleistinės trukmė, ms','fontsize',13);
```

```
%------------------------------------------------------
hTxt2=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[861 592 80 30],...
   'HorizontalAlignment','center',...
   'String','Kanalai','fontsize',13);
%------------------------------------------------------
hTxt3=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[847 115 110 66],...
   'HorizontalAlignment','center',...
   'String','    Oscilografas    © G.Gražulevičius, 2003','fontsize',12);
%------------------------------------------------------
hBut1=uicontrol(hFig1,'Style','pushbutton',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9],...
   'Position',[863 300 80 30],...
   'String','Matuoti','fontsize',13,...
   'Callback','osc');
%------------------------------------------------------
hList=uicontrol(hFig1,'Style','listbox',...
   'Position',[846 512 113 78],...
   'String',{'Kairysis','Dešinysis','Abu'},...
   'fontsize',13);
```

Paprogramis „osc“:

```
function osc
% Programos "Oscilografas" paprogramis
% 2003 06 16 versija
%------------Globalieji kintamieji-----------------
global hFig1 hAxses;
global hEd1;
global hTxt1 hTxt2 hTxt3 hList;
global hBut1;
%------------------------------------------------------
fs=44100;
s1=get(hEd1,'string');
s2=get(hList,'value');
tmax=str2num(s1); % oscilogramos ilgis, ms
k=tmax*fs/1000;n=0:k-1;t=n*1000/fs;
```

```
y=wavrecord(k,fs,2);
if s2==1;z=y(:,1);end;
if s2==2;z=y(:,2);end;
if s2==3;z=y;end;
plot(t,z);
grid; zoom
xlabel('Laikas, ms');
ylabel('Įtampa, V');
```

P2.2 Virtualus spektrografas

```
function spektras
% Programa "Spektras" apskaičiuoja paduodamo į garso
% plokštės įėjimą signalo spektrą ir pateikia jo
% grafiką. Dirba kartu su paprogramiu "Spek"
% 2003 06 16 versija
%--------------Globalieji kintamieji----------------
global hFig1 hAxses;
global hEd1 hEd2;
global hTxt1 hTxt2 hTxt3;
global hBut1;
%-----------------------------------------------------
hFig1=figure;
set(gcf,'position',[15 35 1000 685]);
hAxes=axes('Parent',hFig1,'Color', [1 1 1],...
   'Units','points',...
   'Position', [70 125 630 365],...
   'FontSize', 12);
%-----------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[94 20 842 98],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9]);
%-----------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[98 24 834 90],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8]);
%-----------------------------------------------------
hEd1=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[200 35 50 20],...
```

```
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',12);
%------------------------------------------------------
hEd2=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[270 35 50 20],...
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',12);
%------------------------------------------------------
hTxt1=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[200 62 50 20],...
   'String','fmin','fontsize',13);
%------------------------------------------------------
hTxt2=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[270 62 50 20],...
   'String','fmax','fontsize',13);
%------------------------------------------------------
hTxt3=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'Position',[142 84 240 24],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'HorizontalAlignment','center',...
   'String','Matavimo diapazonas, Hz','fontsize',13);
%------------------------------------------------------
hBut1=uicontrol(hFig1,'Style','pushbutton',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9],...
   'Position',[800 35 80 30],...
   'String','Matuoti','fontsize',13,...
   'Callback','spek');
```

Paprogramis „spek“:

```
function spek
% Programos "Spektras" paprogramis.
% 2003 06 16 versija
% --------------Globalieji kintamieji----------------
global hFig1 hAxses;
global hEd1 hEd2;
global hTxt1 hTxt2 hTxt3;
global hBut1;
%------------------------------------------------------
```

```
format bank;
fi=2^19;% failo ilgis
fs=44100;
x1=wavrecord(24*fs,fs,1);
x1=x1(101:100+fi);
k=2^19; % imčių skaičius
y1=fft(x1,k); % greitoji Furjė transformacija
z1=y1.*conj(y1)/k;
s1=get(hEd1,'string');
s2=get(hEd2,'string');
fmin=str2num(s1);
fmax=str2num(s2);
n1=round(fmin*k/fs);
n2=round(fmax*k/fs);
f=fs*(n1:n2)/k; % dažnis, Hz
plot(f,z1(n1:n2));grid
xlabel('Daznis, Hz','fontsize',14);
ylabel('Spektrinis tankis','fontsize',14);
zoom
```

P2.3 Virtualus dažniamatis

```
function dazniamatis
% Programa "Dažniamatis" dirba kartu su paprogramiu "daz"
% 2003 06 16 versija
%-------------Globalieji kintamieji-----------------
global hFig1;
%-----------------------------------------------------
hFig1=figure;
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[179 105 210 210],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9]);
%-----------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[184 110 200 200],...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8]);
%-----------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[223 199 122 32],...
   'BackgroundColor',[1 1 1]);
```

```
%-------------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'Position',[224 200 120 30],...
   'BackgroundColor',[1 1 1],...
   'HorizontalAlignment','right',...
   'String','Hz  ','fontsize',20);
%-------------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','pushbutton',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9],...
   'Position',[246 140 80 30],...
   'String','Matuoti','fontsize',13,...
   'Callback','daz');
```

Paprogramis „daz“:

```
function daz
% Programos "Dažniamatis" paprogramis. 2003 06 16 versija
%-------------Globalieji kintamieji----------------
global hFig1;
%-------------------------------------------------------
fi=2^19;% failo ilgis
fs=44100;n1=20;n2=20000;
x1=wavrecord(24*fs,fs,1);
x1=x1(50001:50000+fi);
k=2^19; % imčių skaičius
y1=fft(x1,k); % greitoji Furjė transformacija
z1=y1.*conj(y1)/k;
mx=max(z1(n1:n2));
for i=n1:n2;
if z1(i)==mx;
n=round(i*fs/k);
end
end
nn=num2str(n);
%-------------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[1 1 1],...
   'Position',[234 200 60 30],...
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',20,...
   'string',nn);
```

P2.4 Virtualus akustinis tachometras

```
function tachometras
% Programa "Tachometras" pagal mechanizmų keliamo akustinio
% triukšmo spektrą apskaičiuoja besisukančių elementų
% apsisukimų skaičių per minutę.
% Dirba kartu su paprogramiu "Tach".
% 2003 06 16 versija
%--------------Globalieji kintamieji----------------
global hFig1 hAxses;
global hEd1 hEd2;
global hTxt1 hTxt2 hTxt3 hTxt4;
global hBut1 s1 s2 n;
%-----------------------------------------------------
hFig1=figure;
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[179 105 210 210],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9]);
%-----------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[184 110 200 200],...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8]);
%-----------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[209 239 61 31],...
   'BackgroundColor',[1 1 1]);
%-----------------------------------------------------
hEd1=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[215 160 60 20],...
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',12);
%-----------------------------------------------------
hEd2=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[295 160 60 20],...
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',12);
%-----------------------------------------------------
hTxt1=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[220 182 50 15],...
```

```
   'String','nmin','fontsize',12);
%------------------------------------------------------
hTxt2=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[300 182 50 15],...
   'String','nmax','fontsize',12);
%------------------------------------------------------
hTxt3=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'Position',[270 240 100 30],...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'HorizontalAlignment','center',...
   'String','aps/min','fontsize',20);
%------------------------------------------------------
hTxt4=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'Position',[186 203 195 23],...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'HorizontalAlignment','center',...
   'String','Matavimo diapazonas','fontsize',14);
%------------------------------------------------------
hBut1=uicontrol(hFig1,'Style','pushbutton',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9],...
   'Position',[245 120 80 30],...
   'String','Matuoti','fontsize',13,...
   'Callback','tach');
```

Paprogramis„tach“

```
function tach
% Programos "Tachometras" paprogramis.
% 2003 06 16 versija
%2003 05 21: n=statyta fs=5512.5 Hz ir t=24*fs
% Toks pakeitimas padidina skiriamąją gebą iki 10 aps/min
%--------------Globalieji kintamieji----------------
global hFig1 hAxses;
global hEd1 hEd2;
global hTxt1 hTxt2 hTxt3 hTxt4;
global hBut1 s1 s2 n;
%------------------------------------------------------
format bank;
k=2^19;% failo ilgis
```

```
fs=44100;
mk=5; % Mastelio koef. fs=5512.5 - mk=5
x1=wavrecord(24*fs,fs,1);
x1=x1(50001:50000+k);
y1=fft(x1,k); % greitoji Furjė transformacija
z1=y1.*conj(y1)/k;
s1=get(hEd1,'string');
s2=get(hEd2,'string');
nmin=str2num(s1);
nmax=str2num(s2);
n1=nmin/mk;
n2=nmax/mk;
mx=max(z1(n1:n2));
for i=n1:n2;
if z1(i)==mx;
n=round(i*60*fs/k);
end
end
nn=num2str(n);
%-------------------------------------------------------
hTxt4=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[1 1 1],...
   'Position',[210 240 59 29],...
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',20,...
   'string',nn);zoom;
```

P2.5 Virtualus akustinis tachometras-savirašis

```
function proces
% Programa "Proces" pagal mechanizmų keliamo akustinio
% triukšmo spektrą apskaičiuoja besisukančių elementų
% apsisukimų skaičiaus per minutę kitimą laikę.
% Dirba kartu su paprogramiu "Pr",
% matavimų intervalas - 30...10000s,
% Skiriamoji geba - 5 aps/min;
% 2003 06 16 versija
%--------------Globalieji kintamieji----------------
global hFig1 hAxses;
global hEd1 hEd2 hEd3 hEd4;
global hTxt1 hTxt2 hTxt3 hTxt4 hTxt5 hTxt6 hTxt7;
```

```
global hBut1 s1 s2 n;
%-----------------------------------------------------
hFig1=figure;
set(gcf,'position',[15 35 1000 685]);
hAxes=axes('Parent',hFig1,'Color', [1 1 1],...
   'Units','points',...
   'Position', [70 125 630 365],...
   'FontSize', 14);
%-----------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[94 20 842 98],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9]);
%-----------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[98 24 834 90],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8]);
%-----------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[396 35 51 20],...
   'BackgroundColor',[1 1 1]);
%-----------------------------------------------------
hEd1=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[160 35 60 20],...
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',12);
%-----------------------------------------------------
hEd2=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[240 35 60 20],...
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',12);
%-----------------------------------------------------
hEd3=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[390 35 60 20],...
   'HorizontalAlignment','left','fontsize',12);
%-----------------------------------------------------
hEd4=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[480 35 60 20],...
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',12);
```

```
%-----------------------------------------------------
hTxt1=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[166 59 50 25],...
   'String','nmin','fontsize',13);
%-----------------------------------------------------
hTxt2=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[246 59 50 25],...
   'String','nmax','fontsize',13);
%-----------------------------------------------------
hTxt3=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[389 59 65 25],...
   'String','skaičius','fontsize',13);
%-----------------------------------------------------
hTxt4=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[467 59 95 25],...
   'String','periodas, s','fontsize',13);
%-----------------------------------------------------
hTxt6=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'Position',[105 85 260 25],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'HorizontalAlignment','center',...
   'String','Matavimo diapazonas, aps/min','fontsize',13);
%-----------------------------------------------------
hTxt7=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'Position',[420 85 95 25],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'HorizontalAlignment','center',...
   'String','Matavimų','fontsize',13);
%-----------------------------------------------------
hBut1=uicontrol(hFig1,'Style','pushbutton',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9],...
   'Position',[800 35 80 30],...
   'String','Matuoti','fontsize',13,...
   'Callback','nv');
```

Paprogramis „pr“:

```
function pr
% Programos "Proces" paprogramis
% 2003 06 16 versija
%--------------Globalieji kintamieji----------------
global hFig1 hAxses;
global hEd1 hEd2 hEd3 hEd4;
global hTxt1 hTxt2 hTxt3 hTxt4 hTxt5 hTxt6 hTxt7;
global hBut1 s1 s2 n;
%-----------------------------------------------------
fi=2^19;% failo ilgis
fs=44100;
ms=get(hEd3,'string');
m1=str2num(ms); % matavimų skaičius
mp=get(hEd4,'string');
m2=str2num(mp); % matavimų periodas
ts=(m1-1)*m2; % suminis matavimų laikas
s1=get(hEd1,'string');
s2=get(hEd2,'string');
nmin=str2num(s1);
nmax=str2num(s2);
n1=nmin/5;
n2=nmax/5;
tic;
for j=1:m1
x1=wavrecord(24*fs,fs,1);
x1=x1(50001:50000+fi);
k=2^19; % imčių skaičius
y1=fft(x1,k); % greitoji Furjė transformacija
z1=y1.*conj(y1)/k; % apskaičiuojamas energetinis. spektras
mx=max(z1(n1:n2));
for i=n1:n2;
if z1(i)==mx;
n=i*fs/k;
end
end
nn(j)=n*60; % aps/min
tt(j)=toc; % programos vykdymo laikas
tp=m2*j-tt(j); % papildomas laikas
```

```
pause(tp); % išlyginamoji pauzė, kad gauti reikiamą intervalą
t(j)=toc-m2; % laiką skaičiuosime nuo nulio
plot(t,nn);
axis([0 ts nmin nmax]); % koordinačių. ašių nustatymas
grid;
xlabel('laikas, s');
ylabel('aps/min');
%-----------------------------------------------------
hTxt6=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[1 1 1],...
   'Position',[422 35 27 18],...
   'HorizontalAlignment','right','fontsize',12,...
   'string',j);
%-----------------------------------------------------
end
zoom;
```

P2.6 Virtualus akustinio triukšmo savirašis

```
function proc
% Programa "Proc" norimu laiko intervalu matuoja
% ir registruoja akustinį triukšmą
% laiko diagramos pavidalu
% Dirba kartu su paprogramiu "p". 2004 05 21 versija
%--------------Globalieji kintamieji---------------
global hFig1 hAxses;
global hEd1 hEd2 hEd3 hEd4;
global hTxt1 hTxt2 hTxt3 hTxt4 hTxt5 hTxt6 hTxt7;
global hBut1 s1 s2 n;
%-----------------------------------------------------
hFig1=figure;
set(gcf,'position',[15 40 1000 685]);
hAxes=axes('Parent',hFig1,'Color', [1 1 1],...
   'Units','points',...
   'Position', [70 125 630 365],...
   'FontSize', 14);
%-----------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[94 20 842 98],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9]);
```

```
%--------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[98 24 834 90],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8]);
%--------------------------------------------------
uicontrol(hFig1,'Style','frame',...
   'Position',[196 35 51 20],...
   'BackgroundColor',[1 1 1]);
%--------------------------------------------------
hEd3=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[190 35 60 20],...
   'HorizontalAlignment','left','fontsize',12);
%--------------------------------------------------
hEd4=uicontrol(hFig1,'Style','edit',...
   'BackgroundColor',[0.9 0.9 0.8],...
   'Position',[280 35 60 20],...
   'HorizontalAlignment','center','fontsize',12);
%--------------------------------------------------
hTxt3=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[189 59 65 25],...
   'String','skaicius','fontsize',13);
%--------------------------------------------------
hTxt4=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'Position',[267 59 95 25],...
   'String','periodas, s','fontsize',13);
%--------------------------------------------------
hTxt7=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'Position',[220 85 95 25],...
   'BackgroundColor',[0.8 0.8 0.8],...
   'HorizontalAlignment','center',...
   'String','Matavimu','fontsize',13);
%--------------------------------------------------
hBut1=uicontrol(hFig1,'Style','pushbutton',...
   'BackgroundColor',[0.8 0.9 0.9],...
   'Position',[770 50 80 30],...
   'String','Matuoti','fontsize',13,...
   'Callback','p');
```

Paprogramis „p“:

```
function p
% Programos "Proc" paprogramis.
% 2004 04 29 versija
%-------------Globaliniai kintamieji----------------
global hFig1 hAxses;
global hEd1 hEd2 hEd3 hEd4;
global hTxt1 hTxt2 hTxt3 hTxt4 hTxt5 hTxt6 hTxt7;
global hBut1 s1 s2 n;
%-----------------------------------------------------
fi=2^16;% failo ilgis
fs=44100; % diskretizavimo dažnis
ms=get(hEd3,'string');
m1=str2num(ms); % matavimų skaičius
mp=get(hEd4,'string');
m2=str2num(mp); % matavimų periodas
ts=(m1-1)*m2; % suminis matavimų laikas
gr=0.001; % apytikriai nustatyta girdimumo riba
tic;
for j=1:m1
x1=wavrecord(5*fs,fs,1);
x1=x1(101:100+fi);
k=2^16; % imčių skaičius
u(j)=std(x1);
u(j)=20*log10(u(j)/gr);
tt(j)=toc; % programos vykdymo laikas
tp=m2*j-tt(j); % papildomas laikas
pause(tp); % išlyginamoji pauzė, kad gauti reikiamą intervalą
t(j)=toc-m2; % laiką skaičiuosime nuo nulio
ampl1=-5;
ampl2=40;
plot(t,u);
axis([0 ts ampl1 ampl2]);grid; % koord. ašių nustatymas
xlabel('laikas, s');
ylabel('dB');
%-----------------------------------------------------
hTxt6=uicontrol(hFig1,'Style','text',...
   'BackgroundColor',[1 1 1],...
   'Position',[222 35 27 18],...
```

```
   'HorizontalAlignment','right','fontsize',12,...
   'string',j);
%-----------------------------------------------------
end
zoom;
```

P2.7 MATLAB programa „Ident“

```
function ident
% Programa "Ident" atpažįsta vieną iš dviejų
% kietųjų diskų kaupiklių pagal jų spektrų panašumą
% su etaloninio įrašo spektru
% 2004 05 07 versija
fmin=20; fmax=100;
fi=2^16;% failo ilgis
fs=44100; % diskretizavimo dažnis
for j=1:5 % atpažinimas kartojamas
x1=wavrecord(2*fs,fs,1);
x1=x1(1001:1000+fi);
k=2^11; % imčių skaičius
y1=fft(x1,k); % greitoji Furjė transformacija
z1=y1.*conj(y1)/k;
n1=round(fmin*k/fs);
n2=round(fmax*k/fs);
z1=z1(n1:n2);
f=fs*(n1:n2)/k; % dažnis, Hz
x2=Wavread('c1');
x2=x2(1001:1000+fi);
y2=fft(x2,k);
z2=y2.*conj(y2)/k;
z2=z2(n1:n2);
vkn1=std(z1-z2); % spektrų skirtumo standartinė neapibrėžtis
x2=wavread('conner2');
x2=x2(1001:1000+fi);
y2=fft(x2,k);
z2=y2.*conj(y2)/k;
z2=z2(n1:n2);
vkn2=std(z1-z2); % spektru skirtumo standartinė neapibrėžtis
vkn=[vkn1 vkn2]
xx=min(vkn);
```

```
xxx=find(vkn==xx);
bandymas=j
if xxx==1 disp(['conner1']);end
if xxx==2 disp(['conner2']);end
end
```

P2.8 MATLAB programa „Histo“

```
function histo
% Programa "Histo" išveda VKN
% pasiskirstymo histogramas
% 2004 05 26 versija
fmin=20; fmax=500;
fi=2^16;% failo ilgis
fs=44100; % diskretizavimo dažnis
m=4; % kartojimų skaičius
for j=1:m
x1=wavrecord(2*fs,fs,1);
x1=x1(1001:1000+fi);
k=2^12; % imčių skaičius
y1=fft(x1,k); % greitoji Furjė transformacija
z1=y1.*conj(y1)/k;
n1=round(fmin*k/fs);
n2=round(fmax*k/fs);
z1=z1(n1:n2);
f=fs*(n1:n2)/k; % dažnis, Hz
x2=Wavread('conner1');
x2=x2(1001:1000+fi);
y2=fft(x2,k);
z2=y2.*conj(y2)/k;
z2=z2(n1:n2);
vkn1(j)=std(z1-z2); % spektrų skirtumo standartinė neapibrėžtis
x2=wavread('conner2');
x2=x2(1001:1000+fi);
y2=fft(x2,k);
z2=y2.*conj(y2)/k;
z2=z2(n1:n2);
vkn2(j)=std(z1-z2); % spektrų skirtumo standartinė neapibrėžtis
bandymas =j
end
```

```
vkn1((m+1):(2*m))=vkn2;
vkn1=sort(vkn1);
mm=length(vkn1);
vkn1=vkn1(1:(mm-2));
is=4*round(3.2*log10(j)+1) % Histogramos intervalų skaičius
[h,n]=hist(vkn1,is); % h - pataikymų skaičiai
bar(n,h); % n - stulpelių centro koordinatės
colormap('white');
```