
Signalų parametrų matuokliai

Šiame skyriuje nagrinėjamos matavimo priemonės yra skiriamos elektronikos grandinėse naudojamų signalų parametrams matuoti.

Tokios matavimų priemonės nėra labai plačiai paplitusios, tačiau pilnesniam matavimo priemonių pristatymui jas būtina paminėti.

Dažnai tenka nustatyti, kaip pakinta harmoninio signalo spektro sąstatas jam perėjus per netiesinę grandinę. Tam tikslui naudojami signalų netiesinių iškraipymų matuokliai. Telekomunikacijų inžinerijoje, matavimų technikoje susiduriame su moduluotaisiais signalais. Todėl tenka matuoti signalų moduliacijos parametrus. Dar platesnė problema yra signalų spektrų tyrimas. Galima juos būtų apskaičiuoti iš signalų laikinių funkcijų, gautų oscilografais, pritaikius Furjė transformaciją. Tačiau, dėl realių signalų laikinio aprašymo netikslumų, taip nustatyti spektrai būtų labai netikslūs. Todėl praktikoje signalų spektrų tyrimui naudojamos aparatinės priemonės – spektro analizatoriai. Skaitmeninių signalų tyrimui pasitelkiamos specialios matavimo priemonės – loginiai analizatoriai.

Aptartosios matavimų priemonės ir pristatomos šiame skyriuje.

7. Signalų parametų matuokliai

7.1. Spektro analizatoriai

7.1.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas

Signalas $x(t)$ savybės dažnių srityje yra pilnai aprašomos jo spektrais. Signalas aprašomas jo spektru gaunamas atlikus signalo tiesioginę Furjė transformaciją:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Gautoji kompleksinė funkcija yra vadinama **spektrinio tankio funkcija** ir turi savyje informaciją apie tai, kaip kinta signalo intensyvumas (amplitudė) ir fazė, kintant dažniui. Signalas amplitudžių spektrą vaizduoja spektrinio tankio funkcijos modulio dažninė priklausomybė, o fazių spektrą – spektrinio tankio funkcijos fazės dažninė priklausomybė. Kadangi realiai spektras analizuojamas baigtiname laiko intervale t_A , tai gaunamas baigtinės signalo trukmės spektras, vadinamasis **einamasis spektras**:

$$S_e(j\omega) = \int_0^{t_A} x(t) e^{-j\omega t} dt.$$

Didėjant matavimo laikui t_A , baigtinės signalo trukmės spektras, artėja prie tikrojo spektro. Periodinio signalo analizės laikas turi būti bent didesnis už signalo periodą, kad būtų vertinamas signalo periodiškumas.

Elektrinių signalų spektro analizė naudojama periodinių ir impulsinių signalų savybių vertinimui dažnių srityje. Ji naudojama įvairių objektų netiesinių savybių kiekybiniam vertinimui, vaizdų atpažinimo procesuose, telekomunikacijų inžinerijoje ir kitur. Tam panaudojami prietaisai vadinami **spektro analizatoriais**. Kartais juos dar vadina harmonikų analizatoriais. Spektro analizatoriais yra matuojamas spektrinio tankio funkcijos modulis, t.y. jais matuojamas signalų amplitudžių spektras.

Spektro analizė **analoginiais** analizatoriais vykdoma signalą filtruojant juostiniais filtrais, o **skaitmeniniais** analizatoriais – vykdant diskretizuoto signalo sparčiąją Furjė transformaciją (SFT).

Analoginiuose filtriniuose spektro analizatoriuose naudojami du signalo filtravimo būdai: nuoseklūs ir lygiagretūs. **Nuosekliu**

7. Signalų parametru matuokliai

filtravimo būdu paeiliui surandamos spektro komponentės, o lygiagrečiuoju – vienu metu. Paprastesnis ir labiau paplitęs yra nuoseklusis filtravimo būdas. Lygiagretusis būdas kartais naudojamas aukštų dažnių ir nepasikartojančių signalų spektro analizei.

Naudojami ir analoginiai *dispersiniai* spektro analizatoriai, kuriuose signalo spektras yra gaunamas išnaudojant tam tikrų grandinių (pavyzdžiui, akustinių paviršinių bangų vėlinimo linijų) grupinio vėlinimo laiko priklausomybę nuo dažnio [10].

Skaitmeniniuose spektro analizatoriuose signalas su analoginiu–skaitmeniniu keitikliu keičiamas diskrečiuoju ir po to, panaudojant SFT algoritmus, skaičiuojamas ir atvaizduojamas jo spektras.

Pagrindiniai spektro analizatorių parametrai yra:

- analizuojamų dažnių ruožas
- dažnio skiriamoji geba
- analizės laikas arba analizės sparta
- amplitudės matavimo paklaida
- amplitudės matavimo dinaminis diapazonas.

Šie parametrai yra tarpusavyje susiję, pavyzdžiui, sutrumpinus analizės laiką, sumažėja skiriamoji geba.

Analizuojant plačiajuosčius signalus su didele analizės sparta dėl pereinamųjų procesų išauga dinaminės spektro matavimo paklaidos: spektras praplatėja bei sumažėja jo amplitudės ir pasislenka jų maksimumai. Todėl analizės sparta turi būti suderinta su tiriamojo signalo savybėmis.

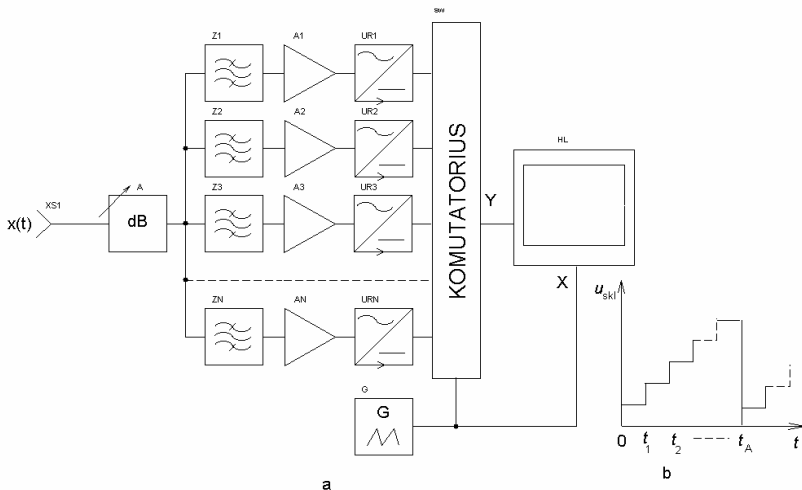
7.1.2. Analoginiai filtriniai lygiagrečios analizės spektro analizatoriai

Filtrinio lygiagrečios analizės spektro analizatoriaus struktūrinė schema yra pavaizduota 7.1a paveiksle. Jį sudaro įėjimo signalą normuojantis atenuatorius A ir N juostinių filtrų ($Z_1...Z_N$) su stiprintuvais ($A_1...A_N$) ir amplitudės detektoriais ($UR_1...UR_N$). Detektorių teikiamos įtampos komutuojamos komutatoriumi SW suderintai su atvaizdavimo įtaiso horizontalia skleistine. Skleistinės įtampa tiesiškai auganti laiptuota (7.1b pav.), todėl spektro atvaizdavimo įtaisas HL paeiliui rodo kiekvieno detektoriaus išėjimo

7. Signalų parametų matuokliai

signalų amplitudes, esant atitinkamiems dažniams, t.y. amplitudžių spektrą.

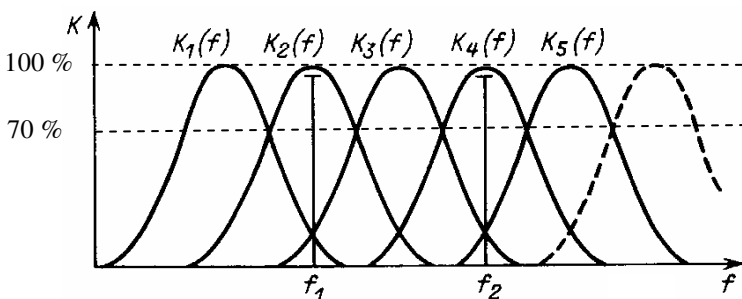
Tokio spektro analizatoriaus savybės lemia filtrų skaičius ir jų dažninės charakteristikos. Skiriamąją gebą nustato filtro praleidžiamų dažnių juostos plotis. Analizės laikas yra atvirkščiai proporcingas filtro juostos pločiui, o analizės sparta sąlygojama filtrų skaičiumi. Filtrų pralaidumo juostos tiriamam dažnių diapazone dažniausiai išdėstomos taip, kad eitų paeiliui (7.2 pav.). Tačiau, dėl naudojamų filtrų savybių, dažnai, didėjant filtro centriniam dažniui, didėja ir jo juostos plotis. Be to, kadangi juostinių filtrų amplitudės–dažninės charakteristikos nėra stačiakampės, tai ir gretimi filtrai praleidžia tam tikrą lygį jiems „nepriklausančių“ spektro komponentių ir vaizduojamas spektras turi daugiau komponentių nei jų yra realiame spektre. Pavyzdžiui, filtrai Z1 ir Z3 praleis tam tikro lygio dažnio f_2 įtampas, todėl abipus šio dažnio spektrinės komponentės matysime ir mažo lygio dažnių f_1 ir f_3 spektrines komponentes, kurių nėra analizuojamame spektre. Todėl tokių analizatorių teikiamas amplitudžių spektras dažniausiai vertinamas pradedant nuo tam tikro lygio amplitudžių.



7.1 pav. Filtrinio lygiagrečios analizės spektro analizatoriaus struktūrinė schema (a) ir skleistinės įtampos laiko diagrama (b)

7. Signalų parametrų matuokliai

Tokių spektro analizatorių pagrindinis privalumas yra jų didelė veikimo sparta (galima stebėti spektro kitimą realiaame laike) ir galimybė analizuoti nepasikartojančių signalų spektrus, trūkumas – norint pasiekti gerą skyros gebą plačiame dažnių diapazone, reikia daug siaurajuosčių filtrų. Todėl tokie spektro analizatoriai yra sudėtingi, brangūs ir retai naudojami.



7.2 pav. Filtrų pralaidumo juostų išdėstymas tiriamam dažnių diapazone

7.1.3. Analoginiai filtriniai nuoseklos analizės spektro analizatoriai

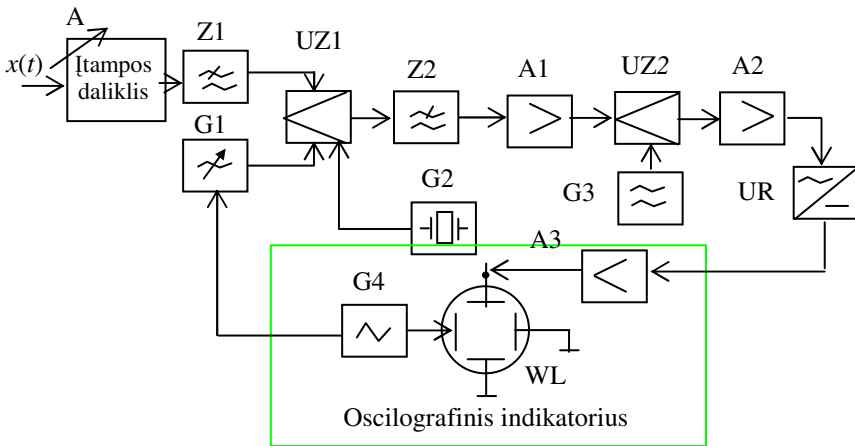
Paprastesni ir plačiau naudojami nuoseklos analizės filtriniai spektro analizatoriai, kuriuose signalo spektras peržiūrimas nuosekliai filtruojant jo komponentes nuo žemiausių iki aukščiausių dažnių. Dažniausiai naudojami vadinamieji **panoraminiai spektro analizatoriai**, kurių atvaizdavimo įtaise yra parodomas tiriamo signalo amplitudžių spektro vaizdas. Kaip atvaizdavimo įtaisas naudojamas oscilografinis indikatorius arba matricų ekranas.

Tokių spektro analizatorių su oscilografiniais indikatoriais struktūrinė schema (7.3 pav.) yra panaši į 6 skyriuje aprašyto panoraminio ADCH matuoklio struktūrinę schemą.

Jo pagrindiniai elementai yra: atenuatorius A, žemųjų dažnių filtras Z1, pirmasis dažnių maišiklis UZ1, keičiamo dažnio heterodinas (valdomas generatorius arba dažnio sintezatorius) G1, juostinis pirmo tarpinio dažnio stiprintuvas (1TDS) A1, antras dažnių maišiklis UZ2, antras pastovaus dažnio heterodinas G3, antras

7. Signalų parametų matuokliai

juostinis tarpinio dažnio stiprintuvas (2TDS) A2, amplitudės detektorius UR ir žemų dažnių stiprintuvas A3.



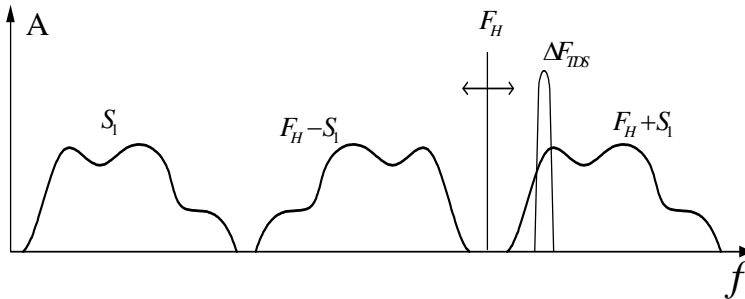
7.3 pav. Nuoseklaus veikimo filtrinio panoraminio spektro analizatoriaus struktūrinė schema

Oscilografinio indikatoriaus Y kreipimo signalas yra įtampa proporcinga spektro dedamųjų amplitudėms, o X kreipimo įtampa teikiama iš skleistinės generatoriaus G4, kuris sinchroniškai keičia ir pirmojo heterodino G1 dažnį.

Čia, vietoj to, kad signalą vienu metu perduoti per daugelį filtrų, kaip tai daroma lygiagrečiuose spektro analizatoriuose, pasinaudojama superheterodininio imtuvo veikimo principu. Tiriamas signalas $x(t)$ maišiklyje UZ1 yra sumaišomas su keičiamo dažnio pirmojo heterodino G1 signalu (dažnis F_H 7.4 paveiksle). Tokiu būdu, tiriamojo signalo spektras S_1 perkeliamas į kitą dažnių sritį (spektrai $F_H - S_1$ ir $F_H + S_1$). Iš pirmo maišiklio išėjusio signalo spektras filtruojamas pirmame tarpinio dažnio stiprintuve (1TDS) A1. Keičiant heterodino dažnį į 1TDS patenka vis kita tiriamo signalo spektro S_1 dalis (7.4 pav.). Spektro analizatoriaus skiriamosios gebos padidinimui naudojamas antrasis dažnio keitimas. 1TDS išėjimo įtampa yra paduodama į antrą dažnio keitiklį UZ2 ir po to išskiriama antru juostiniu tarpinio dažnio stiprintuvu (2TDS) A2. Šio stiprintuvo juostos plotis ir sąlygoja spektro

7. Signalų parametrų matuokliai

analizatoriaus dažnių juostos plotį ir spektro analizatoriaus skyros gebą.



7.4 pav. Nuoseklaus veikimo filtrinio spektro analizatoriaus spektro keitimo principas

Dažnio atskaitymo tikslumui padidinti naudojamas kvarcinis generatorius G2, kurio harmonikos sumaišomos su pirmojo heterodino dažniu ir sudaro dažnių žymes.

Nuoseklaus veikimo spektro analizatoriai gaminami įvairiems dažnių ruožams (iki dešimčių GHz), yra gana tikslūs, tačiau sudėtingi ir brangūs. Jų analizės laikas yra didesnis, nei lygiagretaus tipo spektro analizatorių.

Dauguma radijo dažnių spektrų tyrimui naudojamų ir gaminamų spektro analizatoriai yra būtent šio tipo (7.5 pav.).



7.5 pav. Agilent firmos spektro analizatoriaus vaizdas

7. Signalų parametrų matuokliai

Analoginių filtrinių nuoseklaus veikimo spektro analizatorių svarbiausi trūkumai yra tokie:

- maža skyros geba ir mažas dažnio nustatymo tikslumas;
- nepakankamas dažnio kitimo tiesiškumas dėl valdančios pirmo heterodino dažnį skleistinės įtampos netiesiškumo ir heterodino moduliacinės charakteristikos netiesiškumo;
- nesutampa heterodino dažnio svyravimo ir tuo pačiu spektro analizės ciklai;

- mažas amplitudžių matavimo dinaminis diapazonas.

Kai kurių iš paminėtų trūkumų galima išvengti analizuojant spektrus skaitmeniniais metodais.

7.1.4. Skaitmeniniai spektro analizatoriai

Skaitmeniniai spektro analizatoriai, tai prietaisai apskaičiuojantys spektrą iš diskretizuoto analizuojamo signalo, naudojant *diskretinę Furjė transformaciją* (DFT).

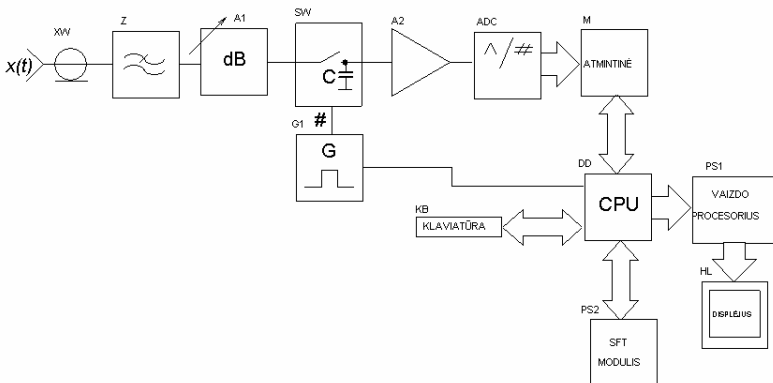
Jeigu diskretizacijos žingsnis yra Δt , tai per analizės laiką t_A yra gaunama N diskrečių signalo verčių. Padarius prielaidą, kad tokios vertės buvo ir laiko intervalais t_A prieš analizę ir egzistuos tais pačiais laiko intervalais po analizės, signalo realizacijos diskretinę funkciją $x(k)$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots, (N-1)$ galime laikyti periodine funkcija su periodu $t_A = N\Delta t$. Tokio diskretinio signalo spektrinio tankio funkcija yra taip pat diskretinė ir periodinė ir surandama pritaikius diskretinę Furjė transformaciją. Vieno jos periodo spektrinis tankis aprašomas taip:

$$S(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} x(k) e^{-\frac{j2\pi k}{N}n}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots, (N-1).$$

Tai kompleksinio kintamojo funkcija. Gaunama N šios funkcijos verčių, nutolusių dažnių ašyje atstumais $1/N\Delta t$. Tik $N/2$ verčių nesikartoja. Paprastai nagrinėjami tik vadinami „fizikiniai“ spektrai, kurių dažniai yra teigiami ir tokių dažnių skaičius yra $N/2$. DFT skaičiavimai yra ilgi, nes visų N verčių radimui reikia atlikti $2N^2$ matematinių operacijų ir tai užima daug laiko. Skaičiavimų trukmei sumažinti naudojami pagreitinanti DFT algoritmai vadinami *sparčiąja Furjė transformacija* (SFT). Algoritmų savybės priklauso nuo to

7. Signalų parametru matuokliai

kaip pasirenkamas diskretų skaičius N . Paprasčiausias ir daugiausiai paplitęs yra SFT algoritmas, kai pasirenkama $N = 2^p$, kai p – lyginis skaičius. Tuomet tereikia atlikti $(3N/2)\log_2 N$ skaičiavimo operacijų. Taigi skaičiavimo operacijų skaičius sumažėja $(4N)/3\log_2 N$ kartų. Kai $N = 2^{10} = 1024$, operacijų skaičius sumažėja daugiau kaip 100 kartų. Naudojant SFT, šiuolaikinėmis mikroprocesorinėmis sistemomis apskaičiuoti netgi didelio masyvo N spektrą dažnai nesudaro problemų, todėl sparčiosios Furjė transformacijos algoritmai įdiegiami daugelyje skaitmenizuotų matavimo prietaisų, pavyzdžiui, kaip oscilografo su skaitmenine atmintimi papildoma funkcija. Skaitmeninių spektro analizatorių struktūrinė schema yra artima oscilografo su skaitmenine atmintimi struktūrinei schemai (7.6 pav.). Jame analizuojamo signalo $x(t)$ lygis yra suderinamas su diskretizatoriaus SW veikimui reikiamu lygiu plačiajuosčiu atenuatoriumi A1. Diskretizacijos dažnis kaip ir kiti parametrai pasirenkamas klaviatūra KB, o impulsai formuojami generatoriumi G. Diskretinės signalo vertės yra perduodamos buferiniu stiprintuvu A2 į skaitmeninį–analoginį keitiklį ADC, o iš jo – į atmintinę. Kai atmintinėje M sukaupiama N diskrečių signalo verčių, jos perduodamos į SFT modulį ir apskaičiuojamas signalo spektras, kurio spektrograma yra atvaizduojama grafiniame displėjuje HL.



7.6 pav. Skaitmeninio spektro analizatoriaus apibendrinta struktūrinė schema

7. Signalų parametrų matuokliai

Skaitmeniniai spektro analizatoriai pasižymi tam tikromis tik jiems būdingomis savybėmis:

- jie gali analizuoti ir analoginius ir skaitmeninius signalus ir yra palyginti pigūs;
- turi ypač didelę skyros gebą. Jeigu naudojama SFT veikianti pagal $N = 2^p$ algoritmą, tai tas tolygu q ekvivalentinių lygiagrečios analizės filtrų naudojimui su praleidžiamų dažnių juostos pločiu -3 dB lygyje $0,88f_{\max}/q$. Pavyzdžiui, kai $N = 2^{10} = 1024$, tai atitinka 400 ekvivalentinių lygiagrečios analizės filtrų su praleidžiamų dažnių juostos pločiu -3 dB lygyje $0,88f_{\max}/400$;
- spektrų analizės rezultatus galima saugoti atskiroje atmintinėje ir vėliau naudoti spektrų palyginimui;
- analizės režimus galima valdyti rankiniu arba programiniu būdu, valdyti distanciniu būdu, analizatorių susieti su kitomis matavimo priemonėmis į informacinę–matavimo sistemą;
- signalo diskretinių verčių duomenis galima panaudoti statistinei ir kitokiai analizei.

Tačiau skaitmeniniai spektro analizatoriai pasižymi ir tam tikrais jiems būdingais trūkumais:

- analizuojamų signalų dažnių ruožas ribojamas diskretizacijos dažniu, kuris turi būti lygus Naikvisto dažniui. Esant dideliame signalo dažniui, kai signalas yra periodinis gali būti naudojamas stroboskopinio keitimo principas. Tada viršutinė analizuojamų dažnių ruožo riba gali siekti dešimtis GHz;
- diskretizacijos dažnį riboja analoginio–skaitmeninio keitiklio ir duomenų rašymo į atmintinę sparta;
- kitas duomenų kaupimo į atmintį ciklas galimas, tik kai iš jos bus nuskaityti duomenys ir atlikta SFT. Todėl analizės spartai padidinti kartais naudojama sparčioji buferinė atmintinė sudaryta iš dviejų atskirų blokų. Kai į vieną bloką vyksta duomenų įrašymas, tai tuo metu iš kito atmintinės bloko skaitomi duomenys siunčiami į SFT modulį. Po to blokų funkcijos sukeičiamos vietomis;

7. Signalų parametru matuokliai

- kadangi spektras gaunamas periodiškai pasikartojantis, tai esant plataus spektro signalui, dėl nepakankamos diskretizavimo spartos (netenkinama Naikvisto dažnio sąlyga) galimas *spektrų persiklojimas* (angl. aliasing). Todėl signalo spektras dirbtinai ribojamas žemųjų dažnių filtru, įjungtu analizatoriaus įėjime;

- ribotas amplitudės matavimo dinaminis diapazonas dėl kvantavimo triukšmo, skaičiavimo paklaidų, diskretizavimo žingsnio nestabilumo ir analoginių schemos elementų vidinių triukšmų. Kvantavimo triukšmas priklauso nuo analoginio–skaitmeninio keitiklio skilčių skaičiaus n ir diskretų skaičiaus N ir riboja dinaminį diapazoną iki $D = 10\lg(3N^2/4)$ dB;

- analizuojant ilgą tolygiai kintantį analoginį signalą, dėl baigtinio analizės laiko yra vertinama tik jo dalis ir signalas lygtai stebimas pro baigtinės trukmės „lango“. Todėl gaunamas spektro iškraipymas sąlygojamas vadinamuoju *Gibbso* reiškiniu. „Lango“ įtaka yra vertinama signalą padauginant iš tam tikros svorio funkcijos. Jeigu ji per analizės laiką nekinta, tai toks „langas“ vadinamas *stačiakampiu*. Spektro iškraipymų sumažinimui naudojamos „lango“ funkcijos, mažėjančios į abi puses nuo centro ir mažinančios „lango“ pakraščių įtaką. Naudojamos *Hanningo*, *Hammingo*, *Blackmano*, *Gauso* ir kitos „lango“ funkcijos.

7.2. Netiesinių iškraipymų matuokliai

Perduodant signalus per netiesines grandines, pakinta jų spektrai: atsiranda spektro komponentių harmonikos. Netiesinių grandinių sukeltų spektro iškraipymų vertinimui naudojamas *harmonikų koeficientas*, kuris parodo harmonikų ir pirmosios harmonikos įtampų efektinių verčių santykį:

$$k_h = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1} = \frac{U_h}{U_1}, \quad (7.1)$$

čia U_h – harmonikų įtamos efektinė vertė ir U_1 – pirmosios harmonikos efektinė įtampa.

7. Signalų parametrų matuokliai

Kaip išplaukia iš (7.1) formulės, harmonikų koeficiento matavimui reikia įvykdyti tokius veiksmus: nuslopinti režekciniu (užtvariniu) filtru signalo pirmąją harmoniką ir išmatuoti aukštesnių harmonikų efektinę įtampą po to išskirti juostiniu filtru signalo pirmąją harmoniką ir, išmatavus jos efektinę įtampą, surasti harmonikų įtampos ir pirmosios harmonikos įtampos santykį. Toks matavimas būtų pernelyg sudėtingas, nes harmonikų koeficientas dažnai matuojamas įvairių dažnių signalams ir pirmosios harmonikos išskyrimui tektų panaudoti perderinamą juostinį filtrą, kurio aparatinė realizacija yra sudėtinga.

Kadangi realiose grandinėse signalų netiesiniai iškraipymai paprastai neviršija 10 %, tai harmonikų įtampa ir sudaro tik tokią dalį signalo pirmosios harmonikos įtampos. Todėl Visa signalo įtampa mažai skiriasi nuo pirmosios harmonikos įtampos ir (7.1) formulėje pirmosios harmonikos įtampa gali būti pakeista visa signalo įtampa. Gautas taip parametras irgi naudojamas signalo netiesinių iškraipymų vertinimui ir vadinamas **netiesinių iškraipymų koeficientu**:

$$k_{\gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U} = \frac{U_h}{U}. \quad ((7.2))$$

Ir harmonikų koeficientas ir netiesinių iškraipymų koeficientas dažnai išreiškiami procentais. Tuo atveju ryšį tarp jų nustato tokia formulė:

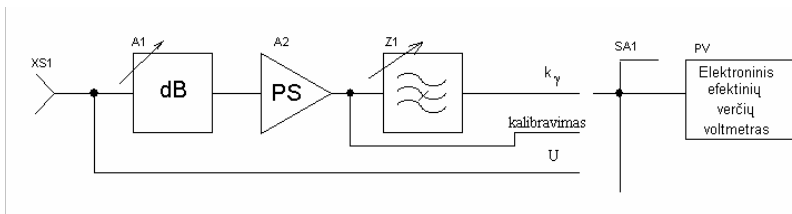
$$k_h = \frac{k_{\gamma}}{\sqrt{1 - \left(\frac{k_{\gamma}}{100}\right)^2}} \%,$$

kuri rodo, kad kai netiesinių iškraipymų koeficientas yra mažesnis už 10 %, tai šių koeficientų vertės yra praktiškai vienodos.

Netiesinių iškraipymų koeficiento matavimas yra paprastesnis, nes, kaip rodo (7.2) formulė, šiuo atveju pakanka tik nuslopinti režekciniu (užtvariniu) filtru signalo pirmąją harmoniką ir išmatuoti aukštesnių harmonikų efektinę įtampą bei ją palyginti su visa signalo efektine įtampa.

Analoginio netiesinių iškraipymų koeficiento matuoklio, veikiančio aptartuoju algoritmu, struktūrinė schema yra parodyta 7.7

paveiksle.



7.7 pav. Netiesinių iškreipimų matuoklio struktūrinė schema

Kadangi tiriama įtampa ir harmonikų sumos įtampa yra neharmoninės, tai jų efektinė vertė turi būti matuojama su tikrosios vidutinės kvadratinės vertės voltmetru (žr. 3 skyrių). Prietaisas perjungiklio SA1 padėtyje U gali būti naudojamas kaip tikrųjų vidutinių kvadratinių verčių voltmetras. Kalibravimo režime yra pasirenkama skalės vertė, o netiesinių iškreipimų koeficientas išmatuojamas, nuslopinus režekcinio filtro atitinkamo dažnio pirmosios harmonikos virpesį.

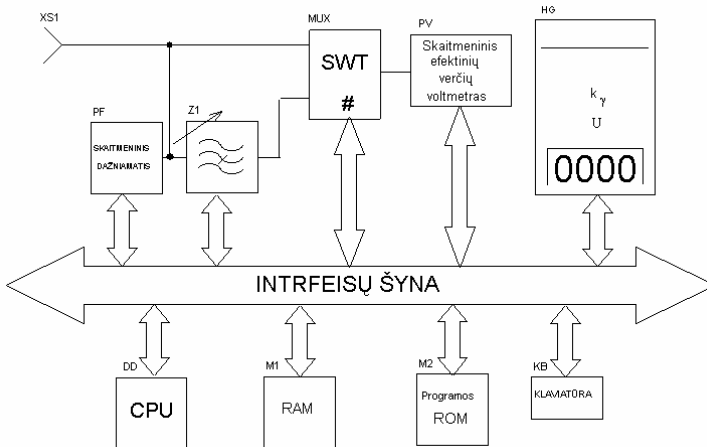
Tokių matuoklių plačiajuosčiai stiprintuvai A2 privalo turėti aukščiausią praleidžiamų dažnių juostos dažnį bent 5–10 kartų didesnį už matuoklio aukščiausią darbo dažnį, kad praleistų atitinkamą skaičių signalo harmonikų. Perderinami režekciniai filtrai paprastai sudaromi naudojant RC grandines – dvigubus T tiltelius (Vino tiltelius). Kenwood firmos analoginio netiesinių iškreipimų koeficiento matuoklio HM-250 vaizdas parodytas 7.8 paveiksle.



7.8 pav. Kenwood firmos netiesinių iškreipimų koeficiento matuoklio HM-250 bendras vaizdas

7. Signalų parametrų matuokliai

Pastaruoju metu dažniau naudojami skaitmeniniai netiesinių iškraipymų koeficiento matuokliai su mikroprocesoriniu valdymu, leidžiantys matuoti netiesinius iškraipymus automatinio režimu (7.9 pav.). Jų veikimo algoritmas nesiskiria nuo anksčiau aprašyto analoginio matuoklio veikimo, tik kalibravimo, režekcinio filtro derinimo ir rezultatų apdorojimo funkcijos yra automatizuotos.



7.9 pav. Skaitmeninio automatinio netiesinių iškraipymų matuoklio struktūrinė schema

Juose signalo dažnis matuojamas skaitmeniniu dažniamačiu PF ir jo matavimo rezultatu yra perderinamas režekcinis filtras Z1. Visa signalo įtampa ir įtampa su nuslopinta pirmąja harmonika per multiplekserį MUX yra perduodama į skaitmeninį tikrųjų efektyviųjų verčių voltmetrą PV. Iš įtampų matavimo rezultatų yra apskaičiuojamas netiesinių iškraipymų koeficientas, o dažnio, įtampos ir netiesinių iškraipymo koeficiento matavimų rezultatai atvaizduojami skaitmenų ir simbolių displėjuje HG. Valdymo programa yra saugoma programos atmintinėje M2, tarpiniai rezultatai – operatyvinėje atmintinėje M1, o nustatymai įvedami ir keičiami klaviatūra KB. Tokio matuoklio bendras vaizdas parodytas 7.10 paveiksle.



7.10 pav. Hameg firmos netiesinių iškraipymų matuoklio HM 8027 bendras vaizdas

Netiesinių iškraipymų matuoklių matavimo ribos yra nuo 0,01 % iki 100 %, o darbo dažnių diapazonas nuo 20 Hz iki 200 kHz.

Pastaruoju metu naudojami ir vadinami *statistiniai netiesinių iškraipymo koeficiento matuokliai*, kurie naudojami kartu su triukšmų pavidalo testinių virpesių šaltiniu. Jais galima geriau įvertinti netiesinių elektronikos grandinių sukeliamus netiesinius signalų iškraipymus. Mat realiai grandinėse atsiranda ne tik signalo harmonikos, bet ir kombinaciniai dažniai. Tokie matuokliai įvertina visas papildomų dažnių signalo komponentes, kurias sukuria elektronikos grandinė.

7.3. Moduliacijos parametų matuokliai

Elektronikos grandinėse susiduriame su moduluotosios amplitudės, dažnio ir fazės virpesiais. Moduliacija gali būti tolydžioji arba diskrečioji. Pastaroji dažnai įvardijama kaip manipuliacija. Sutinkami ir įvairūs impulsinės moduliacijos atvejai, kai videoimpulsų amplitudė, dažnis, trukmė ar jų padėtis laiko ašyje priklauso nuo moduluojančio signalo. Dažnai naudojamos ir moduliacijų ar manipuliacijų kombinacijos.

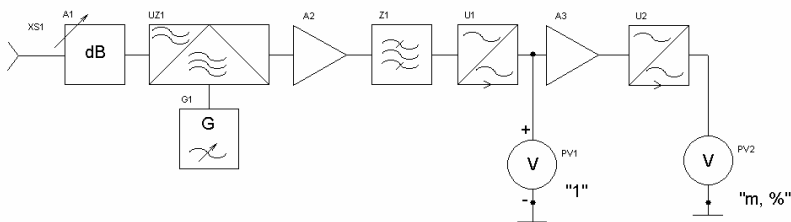
Plačiausiai paplitusios yra amplitudės ir dažnio moduliacijos rūšys, todėl jų parametų matavimo būdus ir nagrinėsime.

Kaip esame aptarę 4 skyriuje, amplitudinės moduliacijos gylį galima išmatuoti oscilografu. Tačiau šis metodas gerai tinka tik harmoniniu dėsniu moduluotų harmoninių virpesių moduliacijos

7. Signalų parametų matuokliai

gylį matavimui. Realių virpesių, moduluotų plačiajuosčiu signalu, moduliacijos gylį taip išmatuoti negalima, nes ekrane matysime tik kintančios amplitudės nestacionarų virpesio vaizdą, kurio parametų išmatuoti nepavyks.

Realių virpesių moduliacijos gylį matuojamas lygintuviniais (detektoriniais) *modulometrais*. Kadangi moduluotieji virpesiai dažniausiai yra radijo dažnio virpesiai, tai tokių matuoklių struktūrinė schema dalinai sutampa su moduluotosios amplitudės radijo signalų superheterodininių imtuvų struktūrine schema (7.11 pav.). Radijo virpesys po atenuatoriaus A1 patenka į dažnių maišiklį UZ, kur sumaišomas su perderinamo dažnio heterodino G dažniu. Tarpinis dažnis išskiriamas tarpinio dažnio stiprintuve A2 su juostiniu filtru Z1 ir detekuojamas pikiniu detektoriumi U1.



7.11 pav. Lygintuvinio modulometro struktūrinė schema

Po detektoriaus gaunamas žemo dažnio virpesys, atitinkantis moduliacijos dėsni. Jo įtampos vidutinė vertė matuojama magnetoelektriniu voltmetru PV1 ir atitinka amplitudės vidutinę vertę. Toliau žemo dažnio virpesys yra stiprinamas ir detekuojamas antru pikiniu detektoriumi su uždaru įėjimu. Jo išėjime gaunama nuolatinė įtampa, proporcinga amplitudės maksimaliam nuokrypiui nuo vidutinės vertės, kuri išmatuojama antru voltmetru PV2. Kai vidutinė amplitudės vertė yra normuoto lygio (keičiama atenuatoriumi A1), tai antrojo voltmetro skalė gali būti sugraduota tiesiog moduliacijos gylį procentais. Kai reikia atskirai pamatuoti moduliuotojo amplitudę radijo virpesio teigiamo ir neigiamo pusperiodžių moduliacijos gylį, keičiamas pirmojo detektoriaus U1 diodo ir voltmetro PV1 įjungimo poliškumas.

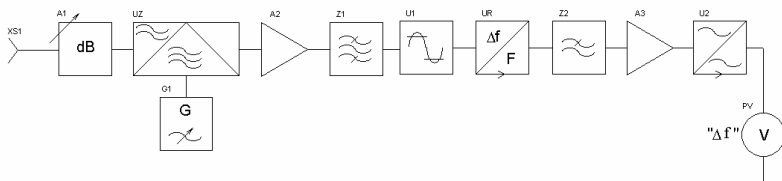
Tokių modulometrų matavimo paklaidos siekia apie $\pm 5\%$.

7. Signalų parametru matuokliai

Pastaruoju metu gaminami modulometrai, kuriuose efektyvios automatinio stiprinimo sistemos dėka, po pirmojo detektoriaus yra palaikoma normuota pastovi amplitudės vertė. Tuomet nereikia pirmojo voltmetro ir amplitudės normavimo procedūros.

Matuojant moduliutojo dažnio virpesių dažnio deviaciją dažniausiai yra naudojamas dažnio detekcijos metodas. Matavimo prietaisai, skirti moduliutojo dažnio radijo virpesių dažnio deviacijai matuoti vadinamo *deviometrais*. Jų struktūrinė schema yra panaši į moduliutojo dažnio radijo signalų superheterodiniųjų imtuvų struktūrinę schemą (7.12 pav.).

Radio virpesys po atenuatoriaus A1 patenka į dažnių maišiklį UZ, kur sumaišomas su perderinamo dažnio heterodino G dažniu. Tarpinis dažnis išskiriamas tarpinio dažnio stiprintuve A2 su juostiniu filtru Z1 ir jo amplitudė apribojama amplitudės ribotuviu U1, sumažinančiu parazitinės amplitudinės moduliacijos įtaką.



7.12 pav. Deviometro struktūrinė schema

Po amplitudės ribotuvo tarpinio dažnio virpesys yra detektuojamas dažnio detektoriumi UR. Detektoriaus detekcijos charakteristika turi būti tiesinė ir jo išėjimo įtampa yra proporcinga paduodamo į jo įėjimą virpesio dažnio deviacijai. Po žemo dažnio filtro ir stiprintuvo, žemojo dažnio virpesys yra detektuojamas pikiniu detektoriumi U2 ir įtampos amplitudė matuojama voltmetru PV. Kadangi įtampos amplitudė yra proporcinga dažnio deviacijai, tai voltmetro PV skalė yra graduojama dažnio deviacijos vienetais. Dažnio detekcijai analoginiuose deviometruose naudojamos schemas, kurių veikimas analogiškas 5 skyriuje aprašyto kondensatorinio dažniamačio veikimui. Deviometrų dažnio deviacijos matavimo paklaida siekia iki $\pm 5\%$.

Kaip matome iš pateiktų modulometro ir deviometro schemų ir jų veikimo aprašymų, dauguma šių matuoklių schemų elementų yra

7. Signalų parametrų matuokliai

vienodi. Todėl dažnai yra gaminami prietaisai, kurie matuoja ir amplitudinės ir dažnio moduliacijos parametrus ir vadinami tiesiog **moduliacijos parametrų matuokliais**. Kaip minėta, juose tarpinio dažnio virpesio amplitudė yra stabilizuojama, todėl jos lygis nėra matuojamas. Šiuolaikiškuose moduliacijos matuokliuose išėjimo įtampos amplitudė yra matuojama ne analoginiais, o skaitmeniniais voltmetrais, kurie, priklausomai nuo pasirinkto matavimo režimo, rodo arba amplitudinės moduliacijos gylį %, arba dažnio deviaciją kHz (7.13 pav.).



7.13 pav. Boonton firmos moduliacijos matuoklio 8210 vaizdas

Laboratorinėmis sąlygomis tiriant dažniu moduluotų generatorių moduliacijos parametrus kartais naudojamas spektrinis **nešančiojo virpesio nuslopinimo** metodas, o kai moduliacijos indeksai yra dideli ($M > 10$) – **dažniamačio** metodas, leidžiantys gauti mažesnes (apie $\pm 0,5$ %) matavimo paklaidas [10].

7.4. Loginiai analizatoriai

Platus skaitmeninių metodų ir mikroprocesorių panaudojimas šiuolaikinėje elektronikoje priverė sukurti specialius tokių grandinių signalų testavimo metodus ir priemones.

Skaitmeninių schemų ir mikroprocesorių naudojimas neleidžia jų testavimui naudoti oscilografų: oscilografų kanalų skaičius yra nedidelis (paprastai ne daugiau 4), o skaitmeninių įtaisų, priklausomai nuo jų skiltiškumo, stebimų procesų skaičius gali siekti 32 ir daugiau. Be to, reikia analizuoti ir vienkartinius bei

neperiodinius skaitmeninius signalus.

Analizuojant skaitmeninių įtaisų veikimą paprastai nereikia matuoti amplitudžių ir tikslių laiko intervalų, kaip kad to reikia tiriant analoginius įtaisus. Skaitmeninių įtaisų atveju pakanka tik atskirti loginius lygius 0 ir 1.

Loginiai analizatoriai – tai labai specializuoti oscilografai, turintys daug įėjimo kanalų ir leidžiantys analizuoti signalų lygius po tam tikro taktinių impulsų skaičiaus. Jų įėjimo signalai yra dvejetainio kodo skaičiai, o išėjimo informacija atvaizduojama analogiškuose kaip kompiuterių displėjuose ir gali būti labai įvairi. Be to, loginiai analizatoriai naudojami ne tik aparatinės įrangos, bet ir programų testavimui.

Jų veikimo principas yra artimas skaitmeninių oscilografų veikimui: įėjimo skaitmeniniai signalai yra įrašomi į analizatoriaus vidinę atmintį, o po to analizuojami ir reikiama informacija tam tikru pavidalu teikiama vartotojui analizatoriaus atvaizdavimo įtaise. Skaitmeninės informacijos apdorojimas ir atvaizdavimas vykdomas panašiai kaip kompiuteriuose.

Loginių analizatorių darbo režimai gali būti įvairūs. Vienas darbo režimas yra **loginių lygių analizės** režimas (*angl.* state analyser). Šiame režime veikiančio analizatoriaus skaitmeninis įėjimo signalas įrašomas jį taktuojant paties proceso sinchrosignalais, o po analizės atvaizduojamas **loginių lygių lentele**, kuri parodo testuojamo įtaiso loginius lygius po kiekvieno taktinio impulso. Tokį darbo režimą vadina analizatoriaus **sinchroniniu** darbo režimu.

Pavyzdžiui, keturių skilčių dvejetainio impulsų skaitiklio pagrindinių išėjimų loginių lygių lentelė yra tokia (1 lentelė):

Skaitmeninių sistemų su mikroprocesoriais atvejais tai gali būti duomenų, adresų ar valdymo šynomis perduodamų duomenų skaitmenų kodai – **skaitmeniniai žodžiai**. Skaitmenys gali būti vaizduojami ne tik dvejetainės skaičiavimo sistemos, bet ir aštuntinės, šešioliktinės, dešimtainės ir kitokios. Testuojant programą, gali būti vaizduojami **programų tekstai** (*angl.* listing).

Pavyzdžiui, analizuojant loginiu analizatoriumi 4 skilčių dvejetainio impulsų skaitiklio pagrindinių išėjimų loginius lygius, gautume loginio analizatoriaus atvaizdavimo įtaise loginių lygių lentelę, panašią kaip parodyta 7.14 paveiksle.

7. Signalų parametrų matuokliai

7.1 lentelė. Keturių skilčių dvejetainio skaitiklio pagrindinių išėjimų loginiai lygiai

Būsena	Q1	Q2	Q3	Q4
pradinė	0	0	0	0
po 1 takto	0	0	0	1
po 2 takto	0	0	1	0
-----	-----	-----	-----	-----
po 7 takto	0	1	1	1
po 8 takto	1	0	0	0
-----	-----	-----	-----	-----
po 15 takto	1	1	1	1

Analizuojant loginių lygių lenteles, galime matyti ar testuojamas įtaisas arba programa veikia teisingai ir jeigu ne, tai po kurio jo (jos) darbo takto įvyko klaida.

Kitas loginių analizatorių darbo režimas yra *loginių laiko diagramų* atvaizdavimo režimas (*angl.* timing analyser). Šiame režime yra atvaizduojamos testuojamo įtaiso išėjimuose veikiančių įtampų laiko diagramos.

Pavyzdžiui, jeigu 4 skilčių dvejetainis impulsų skaitiklis veikia gerai, tai jo pagrindinių išėjimų įtampų laiko diagramos yra tokios kaip pavaizduota 7.15 paveiksle.

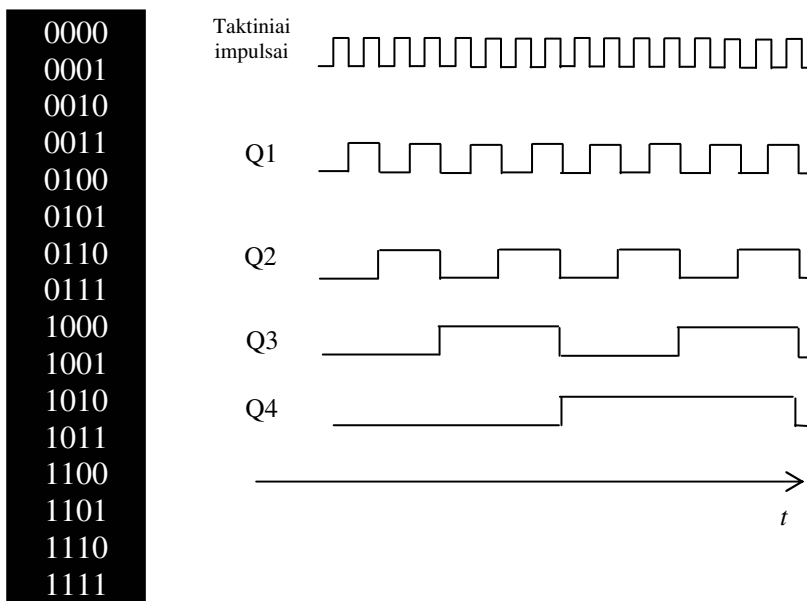
Analizuojant skaitmeninių sistemų įtampų laiko diagramas, galima gauti daugiau informacijos apie juose vykstančius procesus ir greičiau lokalizuoti jų darbo klaidas: pastebėti impulsų frontų iškraipymus, poslinkius laike, parazitinius impulsus ir kitas.

Kad nebūtų prarasta informacija apie proceso savybes, reikia įrašymą į atmintį vykdyti su žymiai (5 – 10) didesne sparta nei testuojamo įtaiso ar sistemos taktavimo sparta. Todėl signalų diskretizavimui ir įrašymui į vidinę atmintį naudojamas loginio analizatoriaus vidinis taktinių impulsų generatorius. Toks loginio analizatoriaus darbo režimas vadinamas *asinchroniniu*.

Loginių laiko diagramų atvaizdavimo režime turi būti ir žymiai didesnė vidinės atminties talpa. Pavyzdžiui, analizuojant 4 skilčių dvejetainio skaitiklio loginius lygius, pakanka 4 bitų vieno kanalo

7. Signalų parametrų matuokliai

atminties talpos, o visa reikiama talpa yra: $4 \times 16 = 64$ bitai. Tuo tarpu analizuojant to paties skaitiklio logines laiko diagramas reikia įrašyti 5 kanalų po $10 \times 16 = 160$ bitų arba iš viso 800 bitų informacijos. Didėjant testuojamo įtaiso skilčių skaičiui, šie skaičiai labai išauga. Todėl šiuolaikinių loginių analizatorių bendra kanalų atminties talpa siekia iki 128 megabaitų.



7.14 pav. Loginių lygių lentelė

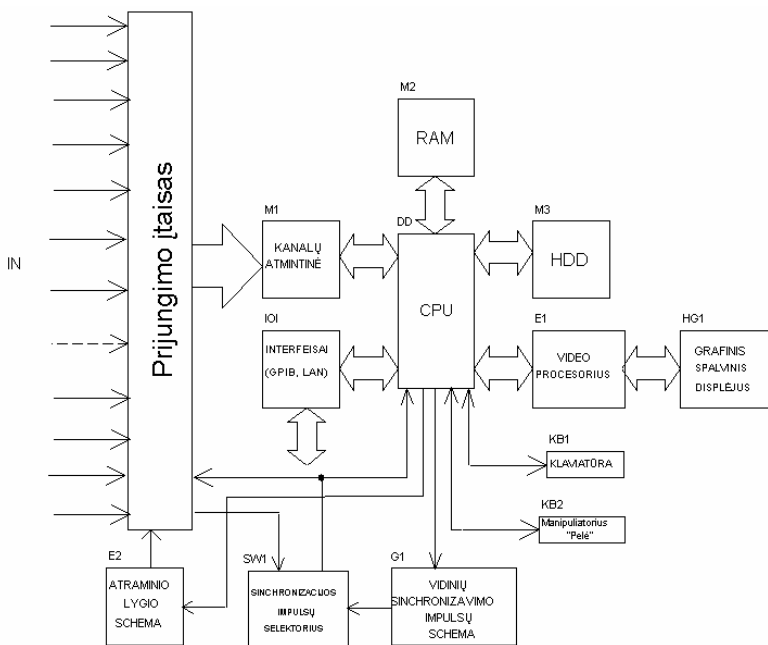
7.15 pav. Įtampų laiko diagramos 4 skilčių dvejetainio skaitiklio išėjimuose

Loginių analizatorių kanalų skaičius, kaip minėta, turi būti didelis. Pavyzdžiui, testuojant 8 bitų mikroprocesorinę sistemą, reikia analizuoti 8 bitų duomenų, 16 bitų adresų ir 8 bitų valdymo šynas. Todėl tokios sistemos testavimui reikia ne mažiau 32 kanalų loginio analizatoriaus. Šiuolaikinių loginių analizatorių kanalų skaičius siekia iki 240. Asinchroninio darbo režimo duomenų kaupimo sparta (diskretizavimo dažnis) siekia iki 4 GHz, o kanalo sparčiosios atmintinės talpa – iki 64 kilobaitų.

Apibendrinta loginio analizatoriaus struktūrinė schema yra

7. Signalų parametų matuokliai

pavaizduota 7.16 paveiksle.



7.16 pav. Apibendrinta loginio analizatoriaus struktūrinė schema

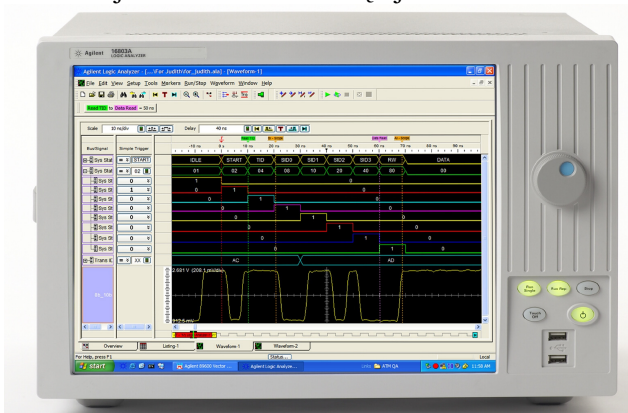
Analizatoriaus kanalų *prijungimo įtaisai* sudaro galimybę paduoti tiriamus skaitmeninius signalus į analizatoriaus įėjimus. Prijungimo elementai yra kabeliais prijungti prie analizatoriaus ir todėl juos patogiai galima prijungti prie tiriamos sistemos elementų išvadų. Kartais jie grupuojami į grupes ir baigiasi kontaktinėmis kaladėlėmis, skirtomis prijungti prie standartinių jungčių naudojamų skaitmeninėse sistemose ir gamintojų numatytų specialiai sistemos testavimui.

Kanalo prijungimo elemento schemoje paprastai naudojami analoginiai komparatoriai, palyginantys signalo loginius lygius su atraminiu lygiu, nustatomu vartotojo. Atraminio lygio keitimo galimybė įgalina analizuoti įvairios logikos – TTL, KMOP, emiterinių ryšių ir kitos – elementų sistemas. Svarbiausias reikalavimas kanalo prijungimo elementui yra tas, kad jis nepakeistų

7. Signalų parametų matuokliai

grandinės elektrinio režimo. Todėl elemento įėjimo varža turi būti didelė (siekia iki 1 MΩ), o įėjimo talpa maža (paprastai mažesnė už 5 pF).

Šiuolaikiškų loginių analizatorių centrinių procesorių darbo dažnis siekia 3 GHz, operatyvinė atmintis iki 1 gigabaito, o standžiųjų diskų talpa 80 gigabaitų ir daugiau. Jų atvaizdavimo įtaisai yra spalviniai grafiniai lietimui jautrūs skystųjų kristalų ekranai (7.17 pav.), o informacijos įvedimui ir analizatoriaus valdymui naudojamos kompiuterių klaviatūros ir manipulatoriai („pelės“). Ryšiui su kitais matavimo–informacinių sistemų elementais naudojama GPIB ir LAN sąsajos.



7.17 pav. Agilent firmos 34 kanalų 16800 serijos loginio analizatoriaus vaizdas

Kaip matome 7.16 paveiksle, loginio analizatoriaus struktūra, atmetus duomenų surinkimo elementus, nesiskiria nuo kompiuterio. Todėl jis paprastai naudoja paplitusias operacines sistemas ir valdomas su jomis suderinamomis programomis. Yra atvejų, kai loginiai analizatoriai sudaromi personalinių kompiuterių pagrindu panaudojant duomenų įvedimui lygiagretųjį kompiuterio prievadą arba su kompiuterio duomenų ir adresų magistrale susijamą aparatinę dalį.

Pagrindiniai loginių analizatorių parametrai yra kanalų skaičius, kanalo atmintinės talpa, įrašymo sparta, sinchronizavimo ir paleidimo būdai bei informacijos apdorojimo ir atvaizdavimo

7. Signalų parametrų matuokliai

galimybės.

Loginių analizatorių naudojimas reikalauja aukštos aptarnaujančio personalo kvalifikacijos. Todėl gamybos ar eksploatacijos sąlygomis jie naudojami retai. Šiomis sąlygomis dažniau naudojamas *signatūrų analizės* metodas.

Analizuojami duomenys yra paverčiami skaitmeniu – signatūra, dažniausiai šešioliktainio kodo keturių ženklų skaičiumi. Speciali testavimo programa, numatyta projektavimo metu ir instaliuota testuojamoje sistemoje, generuoja kontroliniuose sistemos taškuose duomenų sekas ir *signatūrų analizatoriuje* jie paverčiami signatūromis. Šios signatūros yra lyginamos su etaloninėmis signatūromis. Toks sistemų testavimas tampa panašus į analoginių grandinių tikrinimą oscilografais ir voltmetrais, kai jų įtampas ir oscilogramas grandinių kontroliniuose taškuose yra lyginamos su gamintojo nurodytomis norminėmis vertėmis principinėse elektrinėse tokių grandinių schemose.

7.5. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Ką vadina virpesio spektru?
2. Kokį ryšį nustato tiesioginė Furjė transformacija?
3. Kodėl skiriasi tikrasis (teorinis) ir realiai išmatuotas signalų spektrai?
4. Kokios yra spektro analizatorių rūšys?
5. Kaip sudaromi filtriniai lygiagretaus veikimo spektro analizatoriai?
6. Kaip sudaromi filtriniai nuoseklaus veikimo spektro analizatoriai?
7. Koks dispersinių spektro analizatorių sudarymo principas?
8. Iš kokių pagrindinių elementų sudaryti skaitmeniniai spektro analizatoriai?
9. Koks esminis diskretinės Furjė transformacijos skirtumas nuo tolydžiosios?
10. Koks sparčiosios Furjė transformacijos esminis pranašumas?

7. Signalų parametru matuokliai

11. Kokie svarbiausi spektro analizatorių metrologiniai parametrai?

12. Kokį signalo parametrą vadina harmonikų koeficientu?

13. Kas yra netiesinių iškraipymų koeficientas ir kuo jis skiriasi nuo harmonikų koeficiento?

14. Nubraižykite paprasčiausio netiesinių iškraipymų koeficiento matuoklio struktūrinę schemą ir paaiškinkite jo veikimą.

15. Kaip sudarytas ir veikia automatinis netiesinių iškraipymų matuoklis?

16. Koks parametras vadinamas amplitudinės moduliacijos gyliu?

17. Kaip matuojamas amplitudinės moduliacijos gylis oscilografu?

18. kaip sudarytas ir veikia lygintuvinis (detektorinis) amplitudinės moduliacijos gylio matuoklis – modulometras?

19. Kokius parametrus vadina dažninės moduliacijos indeksu ir dažnio deviacija?

20. Kaip sudarytas ir veikia dažnio deviacijos matuoklis – deviometas?

21. Kokį skaitmeninių įtaisų ir sistemų analizės režimą vadina loginių lygių analizės režimu?

22. Kokį skaitmeninių įtaisų ir sistemų analizės režimą vadina loginių laiko diagramų analizės režimu?

23. Kokius matavimo prietaisus vadina loginiais analizatoriais?

24. Iš kokių pagrindinių elementų sudarytas loginis analizatorius?

25. Koks yra loginio analizatoriaus kanalo prijungimo įtaiso pagrindinis elementas?

26. Kokie svarbiausi elektriniai reikalavimai keliami prijungimo įtaisams?

27. Kokį skaitmeninių įtaisų ir sistemų analizės būdą vadina signatūrų analize ir kada jis dažniausiai naudojamas?