

Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Šiame skyriuje nagrinėjamos labai plačiai naudojamos matavimo priemonės skirtos virpesių formos stebėjimui ir jų amplitudžių ir laiko parametrų matavimui – elektroniniai oscilografai (*lotyn.* oscillum + *graik.* grafo), užsieninėje literatūroje dar vadinami osciloskopais (*graik.* scopeo).

Šie matavimo prietaisai pasižymi dideliu jautriu, didele įėjimo varža, maža inercija ir taikymo universalumu. Juos naudoja tiriant virpesius nuo labai lėtų iki labai greitai kintančių. Kol kas dominuojančią padėtį užima oscilografai su elektroniniais vamzdžiais, tačiau nemaža jų dalis jau yra su skaitmeniniais signalų apdorojimo ir atminties elementais bei su netradiciniais virpesių formos atvaizdavimo įtaisais.

Oscilografus skirsto pagal vienu metu stebimų virpesių skaičių, praleidžiamų dažnių juostos plotį, virpesio formos atvaizdavimo tikslumą, amplitudžių ir laiko parametrų matavimo tikslumą. Taip pat skiria bendrosios paskirties – universaliuosius ir specialios paskirties, pavyzdžiui, televizinių signalų, oscilografus.

4.1. Bendroji struktūra ir veikimo principas

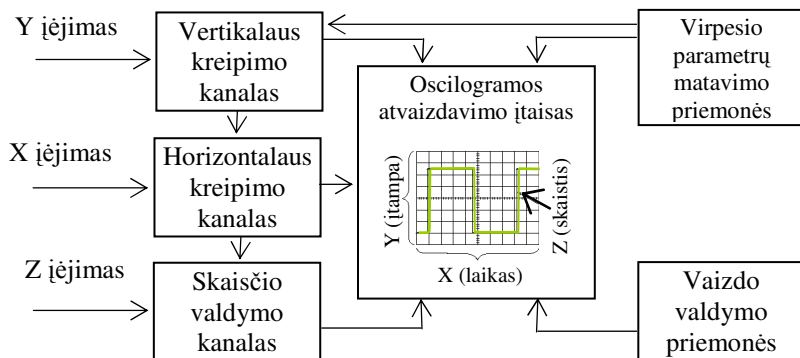
Oscilografai priskirtini prie potencialinio veikimo matavimo

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

priemonių, t.y. stebimas virpesys yra paduodamas į jų įėjimą įtampos pavidalu. Jeigu prisireikia stebėti srovės virpesio formą, tai tenka sukurti šiai srovei proporcingą įtampą ir ją paduoti į oscilografo įėjimą.

Stebimas virpesys yra atvaizduojamas oscilografo atvaizdavimo įtaise XY plokštumoje kaip įtampos laikinė funkcija. Todėl X ašis atitinka laiko ašį, o Y ašis yra virpesio momentinių įtampos verčių ašis. Gautas virpesio vaizdas vadinamas virpesio *oscilograma*.

Elektroninių oscilografų struktūra gali būti labai sudėtinga, tačiau apibendrinus, ją galima pavaizduoti 4.1 paveikslo schema. **Vertikalaus (Y) kreipimo kanalas** įvykdo vaizdo elemento kreipimą vertikalia kryptimi proporcingai momentinei stebimos įtampos vertei $u_y(t)$.



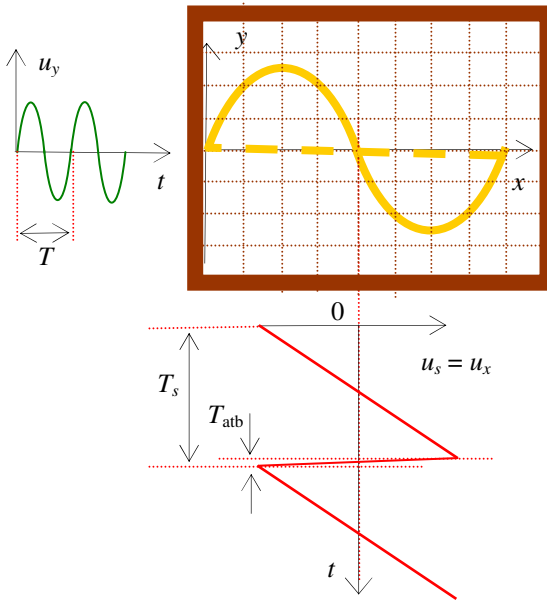
4.1 pav. Apibendrinta oscilografo struktūrinė schema

Horizontalaus (X) kreipimo kanale yra formuojama proporcinga laikui – tiesiškai auganti įtampa $u_x(t)$. Dažnai ji yra suderinama laike – *synchronizuojama* su stebimo proceso įtampa taip, kad šios įtampos ir stebimos įtampos pradžia ir kitimo sparta sutaptų. Kartais horizontaliam kreipimui naudojama išorinė įtampa $u_x(t)$. Toks oscilografo darbo režimas vadinamas XY matavimo režimu.

Vaizdo elementų atvaizdavimas yra vadinamas *vaizdo skleidimu*, o atvaizduojama linija, stebima atvaizdavimo įtaise kai neveikia vertikalus kreipimas – *skleistinė*. Stebint periodinius virpesius ir

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

horizontalus kreipimas yra periodinis. Tuomet skleidimo įtampa $u_s(t)$ yra pjūklo dantų pavidalo. Skleidimo sparta (periodas T_s) yra suderinama su stebimo proceso sparta taip, kad matytųsi vienas ar keli virpesio periodai. Tuomet galima tiksliau išmatuoti jo parametrus. Vaizdo skleidimas vykdomas iš kairės į dešinę ir susideda iš dviejų etapų: tiesioginės skleidimo eigos T_i ir grįžimo į pradžia – atbulinės skleidimo eigos T_{atb} . Atbulinė eiga įvykdoma per galimai trumpesnį laiką, kad būtų pasiruošta vėlesnių periodų skleidimui ir tam laikui grįžimo vaizdas yra blokuojamas, kad nesugadintų oscilogramos vaizdo. Blokavimą vykdo **skaisčio valdymo (Z) kanalas**, tiesioginio skleidimo metu paryškindamas vaizdą. Kartais skaistis valdomas išoriniu signalu $u_z(t)$. Oscilogramos gavimo principas pavaizduotas 4.2 paveiksle.



4.2 pav. Oscilogramos formavimo principas

Skleidimo periodas $T_s \approx T_i$. Vaizdo parametrus: sufokusavimą, skaisčių, padėtų pagal X ir Y ašis galima valdyti. Numatytos ir priemonės leidžiančios tiksliau ir patogiau atlikti matavimus:

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

žymėjimo linijos ir jų valdymas, parametrų verčių teikimas skaitmenine forma ir kitos.

Kaip buvo minėta įžangoje, stebimas virpesys yra teikiamas analoginio dydžio – įtampos pavidalu. Tačiau pagrindiniai šio dydžio keitimai gali būti įvykdyti analoginiais arba skaitmeniniais metodais. Skirtingi tada yra ir oscilografų atvaizdavimo įtaisai. Priklausomai nuo to oscilografus skirsto į *analoginius* ir *skaitmeninius*. Analoginių oscilografų atvaizdavimo įtaisas yra elektroninių spindulių vamzdis (*angl.* CRT – cathode ray tube). Tokius atvaizdavimo įtaisus vadina tradiciniais. Skaitmeninių oscilografų atvaizdavimo įtaisai yra skystųjų kristalų arba plazminiai displėjai. Dažnai naudojami ir hibridiniai – analoginiai–skaitmeniniai oscilografai. Ypač plačiai jie naudojami stebimų procesų vaizdui įsiminti. Taip sudaryti vadinamieji *skaitmeninės atminties oscilografai* (*angl.* DSO – Digital storage oscilloscopes). Oscilografus taip pat skirsto į realaus laiko, kai stebimas virpesys atvaizduojamas realiuoju laiku ir *stroboskopinius* (*angl.* sampling oscilloscopes), kai atvaizduojamos tik periodiškai arba atsitiktinai parinktos atskiros diskrečios virpesio momentinės vertės, išdėstant jas pakeistu (ištęstu) laiko masteliu. Panaudojant stroboskopinius oscilografus tapo įmanoma stebėti labai sparčius periodinius procesus, kurių dažnis yra iki dešimčių GHz.

Šioje knygoje plačiau aptarsime bendrosios paskirties (universaliosius) analoginio veikimo oscilografus ir skaitmeninės atminties hibridinius oscilografus kaip plačiausiai naudojamus.

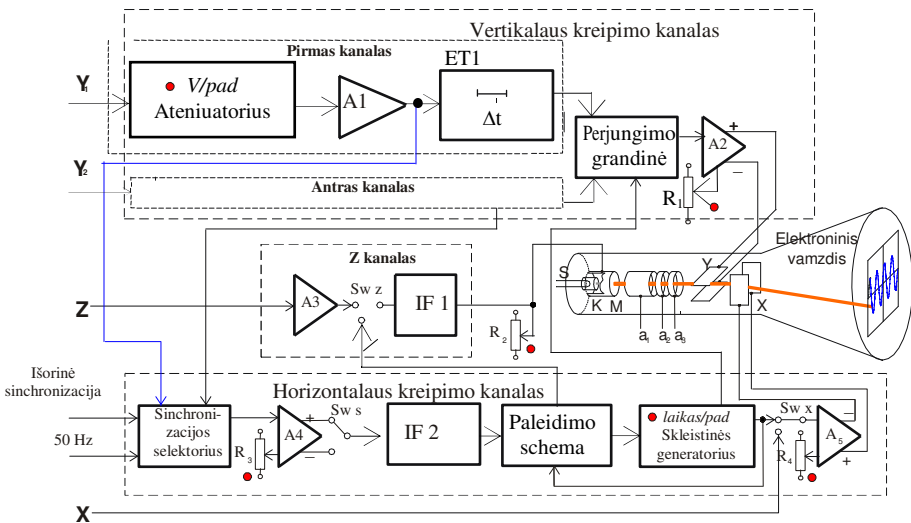
4.2. Bendros paskirties (universaliojo) analoginio oscilografo struktūrinė schema ir savybės

4.2.1. Schemos sudėtis ir bendrasis veikimo principas

Šiuose oscilografuose stebimo virpesio įtampa paduodama į *vertikalaus kreipimo* (*angl.* vertical deflection) kanalą, kuris susideda iš plačiajuosčio kompensuoto rezystyvinio įtampos daliklio

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

(kaip ir voltmetruose), plačiajuosčio nuolatinės įtamos stiprintuvo A1, signalo vėlinimo įtaiso ET1 ir galinio įtamos stiprintuvo A2 iš kurio įtampa yra teikiama į elektroninio vamzdžio (EV) vertikalaus kreipimo plokšteles Y. Jeigu stebimo virpesio amplitudė yra per didelė, tai galima naudoti išorinius rezistyvinius ar talpinus įtamos daliklius. Oscilografo Y įėjimas gali būti padaromas arba atviras arba uždaras nuolatininei tiriamos įtamos dedamajai. Didelės amplitudės virpesius galima paduoti ir tiesiog į EV kreipimo plokšteles, taip apeinant vertikalaus kreipimo kanalo elementus ir išvengiant jų įnešamų virpesio netiesinių ir dažninių iškraipymų.



4.3 pav. Universaliojo analoginio elektroninio oscilografo supaprastinta struktūrinė schema

Vertikalaus kreipimo kanalo įtamos perdavimo koeficientas keičiamas, keičiant atenuatoriaus slopinimą. Rezistoriumi R1 valdomas į vertikalaus kreipimo plokšteles paduodamos nuolatinės įtamos lygis ir skleistinės padėtis pagal Y ašį. Antrojo Y kanalo struktūra yra analogiška.

Skleistinės pjūklo dantų formos įtampą generuoja skleistinės generatorius, esantis horizontalaus kreipimo kanale. Jo darbas yra sinchronizuojamas sinchronizacijos impulsais, gaunamais iš

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

pasirinkto sinchronizacijos selektoriumi sinchronizacijos virpesių šaltinio. Galima pasirinkti *vidinę sinchronizaciją* tiriamu virpesiu, *išorinę sinchronizaciją* iš išorinio šaltinio ir *sinchronizaciją* 50 Hz dažniu. Pasirinkti sinchronizacijos virpesiai yra stiprinami stiprintuvu A4 ir jų amplitudė gali būti valdoma rezistoriumi R3. Sinchronizacijos impulsai yra formuojami impulsų formuotuvu IF2 ir paleidimo schema, o formuojančios įtampos ženklas gali būti pasirenkamas perjungikliu SWs. Skleistinės įtampa yra stiprinama galiniu įtampos stiprintuvu A5 ir paduodama į elektroninio vamzdžio X kreipimo plokšteles. Jeigu skleidimui naudojama išorinė įtampa, tai ji paduodama iš gnybto X tiesiog į horizontalaus kreipimo kanalo galinio stiprintuvo A5 įėjimą. Skleistinės padėtį pagal X ašį galima valdyti rezistoriumi R4. Skleistinės generatoriaus dažnis gali būti keičiamas.

Skleistinė yra paleidžiama anksčiau nei į plokšteles paduodama vertikalaus kreipimo įtampa, nes pastaroji yra užlaikoma analoginio vėlinimo schemoje ET1. Todėl oscilogramoje gerai gali būti stebima ir tiriamo virpesio pradinė dalis.

Oscilogramos skaistis padidinamas skleistinės tiesioginės eigos metu impulsais, formuojamais impulsų formuotuvo IF2 iš skleistinės įtampos ir paduodamais į elektroninio vamzdžio moduliatorių M, valdantį elektronų pluošto intensyvumą. Rankiniu būdu skaistis valdomas rezistoriumi R2, keičiančiu nuolatinę moduliatoriaus įtampą. Oscilogramos skaistis gali būti valdomas ir išorine įtampa teikiama iš Z įėjimo per stiprintuvą A2.

4.2.2. Skleistinių rūšys ir parametrai

Kaip minėta, oscilogramos stabilumui būtinas skleistinės ir tiriamo virpesio sinchronizmas. Skleistinės įtampos periodas T_s turi būti lygus arba sveiką skaičių kartų didesnis nei tiriamo virpesio periodas T :

$$T_s = nT, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Kadangi skleistinės įtampa auga proporcingai laikui, tai ir skleistinės taško nueitas kelias X ašyje yra taip pat proporcingas laikui ir gali būti naudojamas kaip tiriamo proceso laiko matas. Skleistinės ilgis L_s priklauso nuo skleistinės įtampos amplitudės ir

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

elektroninio vamzdžio jautrio X kreipimo plokštelių įtampai. Paprastai stengiamasi, kad skleistinės ilgis būtų kiek galima didesnis, nes tada atstumus galima išmatuoti tiksliau ir tiksliau bus nustatomi tiriamų virpesių laiko parametrai. Paprastai skleistinės ilgis sudaro ne mažiau 90 % elektroninio vamzdžio ekrano horizontalaus matmens.

Elektroninio vamzdžio ekrano darbinė dalis yra vertikalioji ir horizontalioji kryptimis tinkleliu sudalinta į padalus, pagal kurias yra atskaitomi vaizdo matmenys. Kai tiriami įvairios spartos procesai, tai tenka keisti ir skleistinės periodą ir kinta skleistinės greitis: kuo spartesnis stebimas procesas tuo spartesnė naudojama skleistinė. Taigi stebimų procesų laiko parametrai yra nustatomi juos palyginant su skleistinės periodo trukme. Praktiniam naudojimui patogiau yra norminti ir naudoti ne skleistinės greitį arba skleistinės periodą, o dydį, kuris parodo koks laikas tenka vienai skleistinės padalai. Šis dydis yra atvirkščias skleistinės greičiui ir vadinamas *skleistinės koeficientu*:

$$k_s = \frac{1}{v_s} = \frac{T_s}{L_s} \text{ (laikas/padala).}$$

Skleistinės koeficientai yra keičiami, keičiant skleistinės generatoriaus periodą ir yra kalibruoti dydžiai. Jie nustato vadinamą *oscilografo laiko bazę* (angl. time base). Kartais ir visas oscilografo X kanalas yra vadinamas laiko bazės formavimo kanalu. Nuo laiko bazės kalibravimo tikslumo priklauso laiko parametrų matavimo paklaidos (žr. toliau apie matavimus oscilografu).

Labai svarbu, kad skleistinės įtampa kistų *tiesiniu dėsniu*. Jeigu dėsnis skiriasi nuo tiesinio, tai gaunami laiko mastelio iškraipymai: tam tikros stebimo proceso dalys gali būti vaizduojamos sulėtintos, arba paspartintos. Skleistinės įtampos dėsnio nuokrypa nuo tiesinio yra norminamas oscilografo parametras. Paprastai priklausomai nuo oscilografo tikslumo klasės nuokrypis nuo tiesinio dėsnio leidžiamas ne didesnis už (3–20) %. Skleistinės generatoriuje tiesiškai auganti įtampa yra gaunama integruojant paleidimo schemas kuriamus stačiakampės formos įtampos impulsus.

Be periodinės skleistinės yra naudojama ir *laukianti skleistinė*. Ji naudojama retų impulsų stebėjimui. Ši skleistinė sinchronizuojama su impulso pradžia ir jos tiesioginės eigos trukmė yra artima ne impulsų periodui, o impulso trukmei. Tuomet impulso vaizdas yra

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

išdėstomas per visą skleistinės ilgį ir jo atskirų stadijų laiko ir amplitudžių parametrų vertės gali būti detaliau ištirtos ir išmatuotos.

Naudojama ir **pagreitinė skleistinė** (pavyzdžiui, 10 kartų), kai reikia stebėti ypač sparčius procesus. Jos tikslumas yra mažesnis, nes esant didesniam skleistinės generatoriaus dažniui didesnės įtakos turi jo schemos parazitiniai parametrai. Esant pagreitintai skleistinei gaunamas ir mažesnis oscilogramos skaistis.

Kiek norima greitų skleistinių realizuoti negalima, nes elektroninio vamzdžio ekrano elektronams jautraus sluoksnio – **liuminaforo** švytėjimui sužadinti reikia tam tikros energijos dozės ir jeigu ji per trumpa, liuminaforas nešvytės ir ekrane elektronų spindulio palikto vaizdo nematysime. Pavyzdžiui, kai stebimo proceso trukmė būtų 1 ns, tai tokios pageidautume ir skleistinės tiesioginės eigos trukmės. Jeigu skleistinės ilgis yra 100 mm, tai skleistinės greitis turėtų būti 100 000 km/s, t.y. artimas šviesos greičiui!

Be tiesinės vidinės skleistinės naudojama ir **išorinė skleistinė**, kurios įtampa paduodama į oscilografo X įėjimą (XY režimas). Dažniausiai tai būna harmoninė įtampa ir toks darbo režimas kartais vadinamas **harmoninės skleistinės** režimu.

Skleistinės ilgiui padidinti kartais specializuotuose oscilografiniuose laiko intervalų matavimo prietaisuose naudojama **apskritiminė** arba **spiralinė** skleistinės.

Pagrindinis oscilografo sinchronizavimo režimas yra **vidinė sinchronizacija** tiriamu signalu, kurios sinchroimpulsai formuojami iš signalo įtampos, imamos iš vertikalios kreipimo kanalo prieš vėlinimo įtaisą.

Jeigu oscilografiniai matavimai vykdomi naudojant matavimo generatorių, tai kaip sinchronizavimo virpesius galima naudoti tokio generatoriaus teikiamus sinchronizavimo virpesius. Tokių virpesių prijungimui oscilografuose yra numatytas išorinės sinchronizacijos gnybtas ir **išorinės sinchronizacijos** režimas.

Tiriant kintamosios srovės lygintuvų, impulsinių maitinimo šaltinių, dažnio keitiklių ir kitų įtaisų, kurių pirminis maitinimo šaltinis yra 50 Hz dažnio pramoninis elektros tinklas yra naudojama **sinchronizacija 50 Hz dažniu**.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

4.2.3. Vertikalaus kreipimo kanalas ir jo savybės

Oscilografų elektroninių vamzdžių elektronų spindulio nuokrypis priklauso nuo jų kreipimo sistemų jautrio įtampai ir paduodamos į kreipimo sistemą įtampos didumo.

Universaliųjų oscilografų elektroninių vamzdžių elektronų spindulio (pluošto) kreipimo sistemos yra **kondensatorinio** tipo. Tai plokštėlės, prie kurių prijungus įtampą, yra sukuriamas tam tikro stiprio elektros laukas, veikiantis tarp jų skriejančius elektronus elektros lauko jėga ir keičiančius jų judesio trajektoriją.

Kai kreipimo plokštelių įtampa yra pastovi, elektronus veikianti jėga irgi nekinta ir jie veikiami visą laiką kol yra tarp plokštelių. Šis laikas priklauso nuo kreipimo plokštelių ilgio l ir išskriejusių į kreipimo sistemą elektronų greičio v_e . Elektronų greitį nustato antrojo (greitinančio) anodo įtampa U_{a2} :

$$v_e = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_{a2}}.$$

Elektronų pralėkimo per kreipimo sistemą laikas yra lygus:

$$\tau_k = \frac{l}{v_e}.$$

Elektrinio lauko stipris priklauso nuo įtampos U tarp plokštelių ir atstumo tarp jų d : $E = \frac{U}{d}$. Kai elektronai išlekia iš kreipimo sistemos, tolesnį atstumą iki ekrano l_{ek} jie skrieja neveikiami lauko jėgų, pagal liestinę išskriejimo iš sistemos taškui. Įvertinus šias prielaidas, gaunamas toks ryšys tarp stebimo ekrane vaizdo taško nuokrypio h ir prijungtos prie plokštelių nuolatinės įtampos bei vamzdžio parametru:

$$h = \frac{l(l_{ek} + l/2)}{2dU_{a2}} U = S_u U,$$

čia S_u yra vamzdžio kreipimo sistemos **statinis jautris įtampai** vertinamas mm/V arba padalomis/V.

Statinis jautris gali būti didinamas, keičiant vamzdžio parametrus nuo kurių jis priklauso:

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

1. Didinant kreipimo plokštelių ilgį. Tačiau taip didinamas pralėkimo laikas ir kaip pamatysime vėliau yra bloginamos kreipimo sistemos dinaminės savybės.
2. Mažinant greitinančio anodo įtampą. Tačiau gali nepakakti elektronų kinetinės energijos liuminaforo sužadininui ir kad matytųsi oscilograma reikės labai padidinti trečiojo anodo įtampą, kuri ir taip siekia kelias dešimtis kilovoltų.
3. Mažinti atstumą tarp kreipimo plokštelių. Tačiau šiuo atveju didėja plokštelių tarpelektrocinė talpa ir mažėja vertikalaus stiprinimo kanalo praleidžiamų dažnių juostos plotis. Be to, kai plokštelės ilgos ir mažas atstumas tarp jų, elektronai po kreipimo gali užkliūti už plokštelių ir neišlėkti iš sistemos. Tam, kad išvengtų užkliuvimo efekto plokštelės yra išdėstomos ne lygiagrečiai, o prasiskiriančios. Tačiau šiuo atveju elektrinis laukas gaunamas labai nepastovus: kinta elektrinio lauko stipris išilgai kreipimo sistemos.
4. Didinti atstumą nuo kreipimo sistemos iki ekrano. Tuo tikslu Y kreipimo sistema yra išdėstoma toliau nuo ekrano. Labai didinti šį atstumą negalima, nes ir taip oscilografai nėra labai patogūs prietaisai dėl jų elektroninių vamzdžių didelio ilgio.

Elektroninių vamzdžių statinis jautris yra apie (1–5) mm/V arba apie (0,1–0,5) padalos/V. Visas vertikalaus kreipimo kanalo statinis jautris gaunamas didesnis, vertikalaus kanalo įtampos perdavimo koeficiento (įvertinant stiprintuvų stiprinimo koeficientus ir atenuatoriaus bei išorinių įtampos daliklių dalinimo koeficientus) K_y sąskaita:

$$S_y = S_{hy} K_y.$$

Matuojant oscilografu įtampas ir žinant jo jautrį, galima apskaičiuoti matuojamos įtampos vertes. Tačiau patogiau yra naudoti ne oscilografo jautrį, o jam atvirkščią dydį, vadinamą **kreipimo koeficientu** (angl. deflection factor):

$$k_y = \frac{1}{S_y}, \text{ V/padalai}$$

Kai oscilografuojama kintamoji įtampa, elektronus, skriejančius per kreipimo sistemą veikia kintanti kreipimo jėga ir jų įgytas sistemoje nuokrypis nustatomas kaip vidutinis dydis per praskriejimo pro kreipimo sistemą laiką. Jis vadinamas dinaminio nuokrypiu ir priklauso nuo signalo laikinės funkcijos $u(t)$:

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

$$h_d(t) = \frac{1}{\tau_k} \int_t^{t+\tau_k} S_y u(t) dt.$$

Nustatykime dinaminio kreipimo ryšį su signalo dažninėmis savybėmis. Apskaičiuokime dinaminį nuokrypį, kai stebimas harmoninis virpesys:

$$h_d(t) = \frac{1}{\tau_k} \int_t^{t+\tau_k} S_y U_m \sin(\omega t + \varphi) dt = S_y \frac{\sin \pi f \tau_k}{\pi f \tau_k} U_m \sin(2\pi f t + \varphi + \pi f \tau_k).$$

Gautoji formulė rodo, kad pakinta nuokrypio dydis ir atsiranda papildomas fazės poslinkis, tačiau jis iškraipymų nesukelia, nes yra proporcingas dažniui.

Nuokrypio dydžio pasikeitimą vertina **dinaminio kreipimo jautriu**, kuris priklauso nuo dažnio ir kartu su kitų kanalo elementų dažninėmis savybėmis nustato kanalo amplitudės dažninę charakteristiką ir praleidžiamų dažnių juostos plotį:

$$S_{yd} = S_y \frac{\sin \pi f \tau_k}{\pi f \tau_k} = S_{hy} K_y(f) \frac{\sin \pi f \tau_k}{\pi f \tau_k}.$$

Kai $f = \frac{n}{\tau_k}$, $n = 1, 2, 3, \dots$, dinaminis jautris tampa lygus nuliui,

nes per praskriejimo laiką įvyksta sveikas skaičius virpesio periodų ir vidutinis nuokrypis yra lygus nuliui. Atitinkami kartotiniai dažniai yra vadinami **kritiniais** kondensatorinės sistemos dažniais. Pirmasis kritinis dažnis f_1 apriboja maksimalų tokios kreipimo sistemos veikimo dažnį. Pavyzdžiui, kai $\tau_k = 1$ ns, tai $f_1 = 1$ GHz. Kadangi

ribinis dažnis nustatomas kai jautris sumažėja $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707$ nuo jo statinio dydžio, tai vien dėl kreipimo sistemos įtakos gauname tokį ribinį dažnį: $f_r \approx 0,44 f_1 = \frac{0,44 v_e}{\tau_k l}$, kuris praktiškai ir riboja

oscilografo su kondensatorine kreipimo sistema kanalo praleidžiamų dažnių juostos plotį iki maždaug 500 MHz.

Greitaveikiuose analoginiuose oscilografuose naudoja vadinamas **bėgančios bangos** kreipimo sistemas. Jose elektronas yra veikiamas iki jo greičio sulėtintos bėgančios elektromagnetinės bangos elektrinio lauko

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

išilginės komponentės. Kreipimo sistema apkrauta apkrovos varža suderinta su jos bangine varža. Tuomet judantį kreipimo sistema elektroną per visą kreipimo laiką veikia nekintančio stiprumo elektrinis laukas ir jo nuokrypis gaunamas didesnis. Tačiau dėl tokių sistemų konstrukcinių ypatybių ir dėl jų banginės varžos priklausomybės nuo dažnio irgi gaunama ribota pralaidumo juosta apie (1 – 1,5) GHz.

Oscilografuojant impulsinius signalus svarbi yra oscilografo *pereinamoji charakteristika*, kurios savybės dažniausiai norminamos jos *užaugimo laiku*, susijusiu su kanalo pralaidumo juostos ribiniu

dažniu: $\tau_{osc} \approx \frac{0,35}{f_r}$. Stebima oscilografo ekrane impulso

oscilogramos priekinio fronto trukmė τ_{fs} yra paties impulso priekinio fronto trukmės τ_{fi} ir oscilografo pereinamosios charakteristikos

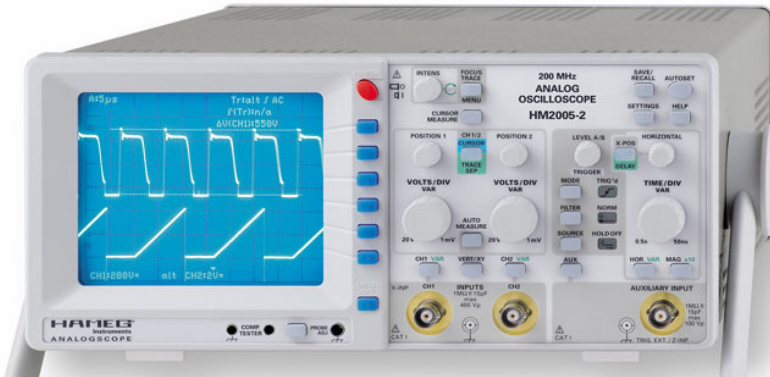
užaugimo laiko τ_{osc} suma: $\tau_{fs} = \sqrt{\tau_{fi}^2 + \tau_{osc}^2}$. Todėl, jeigu

oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikas τ_{osc} ilgas, gausime dideles impulso fronto trukmės matavimo paklaidas. Pagal paneigtinų paklaidų taisyklę (žr. 1 skyrių), kad paklaida neviršytų $\pm 5\%$, reikia, kad $\tau_{osc} \leq \tau_{fi}/3$. Tam, kad paklaida neviršytų $\pm 2\%$, reikia, kad $\tau_{osc} \leq \tau_{fi}/5$.

Šiuolaikiškuose universaliuosiuose oscilografuose įtaisomi *skaitmeniniai amplitudės ir laiko parametrų matuokliai*. Įtampų vertės yra nustatomos įtaisytais skaitmeniniais voltmetrais, kuriuose nuolatinės įtampos, susietos su stumdomomis oscilogramoje žymėjimo linijomis, yra palyginamos su skleistinės tiesiškai kintančia įtampa ir palyginimo rezultate yra formuojamas laiko intervalas, proporcingas žymėjimo linijomis išskirtam įtampų intervalui. Laiko intervalais vertinami ir skaitmeniniu pavidalu teikiami ir laiko žymėjimo linijomis atskirti laiko intervalai. Informacija apie pasirinktas įtampos ir laiko vertes yra generuojama skaitmeniniu pavidalu panaudojant teleteksto arba skaitmenų grafinio generavimo principus ir vaizduojama oscilografo ekrane.

Universaliojo analoginio oscilografo bendras vaizdas yra parodytas 4.4. paveiksle.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.4 pav. Universaliojo analoginio oscilografo ir jo pagrindinių valdymo elementų vaizdas

4.2.4. Svarbiausios oscilografų savybės

Priklausomai nuo paskirties elektroniniai oscilografai gali būti įvairiai charakterizuojami. Tačiau galima nurodyti pagrindines norminamas savybes, kurios dažniausiai nurodomos visiems universaliesiems elektroniniams oscilografams.

Vertikalaus kreipimo kanalų charakteristikos:

1. Vertikalaus kreipimo kanalų skaičius ir kanalų naudojimo būdai.
2. Vertikalaus kreipimo kanalo praleidžiamų dažnių juostos plotis (paprastai -3 dB lygyje, arba nurodomas kitas netolygumo kriterijus, pavyzdžiui $-0,5$ dB lygyje).
3. Vertikalaus kreipimo kanalo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikas.
4. Kalibruotų kreipimo koeficientų padėčių skaičius. Pavyzdžiui, 14 kalibruotų padėčių nuo 1 mV/pad iki 20 V/pad
5. Kalibruotų kreipimo koeficientų paklaidos. Pavyzdžiui, $1 \text{ mV/pad} - 2 \text{ mV/pad}$: $\pm 5 \%$ (nuo 0 iki 10 MHz (-3 dB lygyje)), $5 \text{ mV/pad} - 20 \text{ V/pad}$: $\pm 3 \%$.
6. Įėjimo varža ir talpa. Pavyzdžiui, $1 \text{ M}\Omega$ ir 15 pF .

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

7. Įėjimo grandinės savybės. Pavyzdžiui, įėjimas atviras nuolatinei įtampai (DC), tik kintamoji įtampa (AC), sujungtas su korpusu (GD).
8. Maksimali įėjimo įtampa. Pavyzdžiui, 400 V (nuolatinė + kintamosios įtamos pikinė vertė).
9. Vertikalaus kreipimo trakto signalo vėlinimo laikas. Pavyzdžiui, apie 70 ns.

Sinchronizacijos charakteristikos

1. Sinchronizavimo dažnių sritis. Pavyzdžiui, nuo 20 Hz iki 250 MHz.
2. Sinchronizavimo frontai: teigiamas arba neigiamas.
3. Sinchronizavimo šaltiniai. Pavyzdžiui, I arba II kanalai pasirenkant, 50 Hz tinklas ir išorinis.
4. Sinchronizavimo tiriamuoju signalu pasirinktys. Pavyzdžiui,
AC (10 Hz – 250 MHz)
DC (0 – 250 MHz)
HF (50 kHz – 250 MHz)
LF (0 – 1,5 kHz)
5. Išorinio sinchronizavimo signalo parametrai. Pavyzdžiui, lygis $\geq 0,3$ V nuo piko iki piko (0–250 MHz)

Horizontaliojo kreipimo kanalo charakteristikos

1. Skleidimo koeficientų verčių diapazonas Pavyzdžiui, nuo 0,5 s/pad iki 50 ns/pad.
2. Skleidimo koeficientų verčių paklaida. Pavyzdžiui, ± 3 %.
3. X ištempimas. Pavyzdžiui, $\times 10$ (tikslumas ± 5 %): iki 5 ns/pad.
4. X stiprintuvo praleidžiamų dažnių juostos plotis. Pavyzdžiui, nuo 0 iki 3 MHz (-3 dB lygyje).
5. X ir Y kanalų fazių poslinkis. Pavyzdžiui, $< 3^\circ$; iki 220 kHz.
6. Įėjimo varža ir talpa.

Kita informacija

1. Kalibratoriaus signalų parametrai. Pavyzdžiui, stačiakampis simetrinis, amplitudė $0,2 \text{ V} \pm 1$ %, 1 kHz.
2. Maitinimo įtampa. Pavyzdžiui, 100 V–240 V $\sim \pm 10$ %, 50/60 Hz.
3. Naudojama galia. Pavyzdžiui, apie 42 W, kai dažnis 50 Hz.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

4. Darbo aplinkos temperatūra. Pavyzdžiui, nuo 0 °C iki +40 °C.
5. Masė.
6. Matmenys (mm): plotis, aukštis, gylis.

4.3. Stroboskopiniai oscilografai

Stroboskopiniai oscilografai naudojami trumpų periodinių arba dirbtinai periodizuotų virpesių oscilografavimui. Juose virpesys yra stebimas ne realiuoju laiku (*angl. real time sampling*), o ištempto mastelio laiku: *stebimas periodinis procesas peržiūrimas per daugelį jo realių periodų* (*angl. equivalent time sampling*). Įvykdoma stebimo proceso laiko mastelio transformacija. Kiek kartų yra pailginamas stebėjimo laikas, tiek kartų ekvivalentiškai procesas tampa lėtesnis ir tokio sulėtinto proceso stebėjimui pakanka oscilografo su siauresne praleidžiamų dažnių juosta. Pagrindiniu stroboskopinio oscilografo elementu yra stroboskopinis keitiklis, prie kurio gali būti prijungtas paprastas oscilografas. Tokie priedai universaliesiems oscilografams būdavo gaminami. Pastaruoju metu stroboskopiniai oscilografai gaminami kaip atskiri prietaisai.

Stroboskopiniame oscilografe tiriamo proceso diskrečiosios vertės yra gaunamos signalą perduodant per greitaveikį komutatorių (stroboskopinį keitiklį) valdomą trumpais strobavimo impulsais. Strobavimo impulsų formai jokių griežtų reikalavimų nėra, svarbu, kad jų trukmė būtų žymiai trumpesnė už tiriamo proceso trukmę. Tam, kad būtų pakankamai tiksliai rekonstruota stebimo virpesio forma, reikia jį diskretizuoti dažniu didesniu už Naikvisto dažnį: $f_d > 2f_{\max}$, o diskretizavimo žingsnis neturi viršyti atitinkančio šį

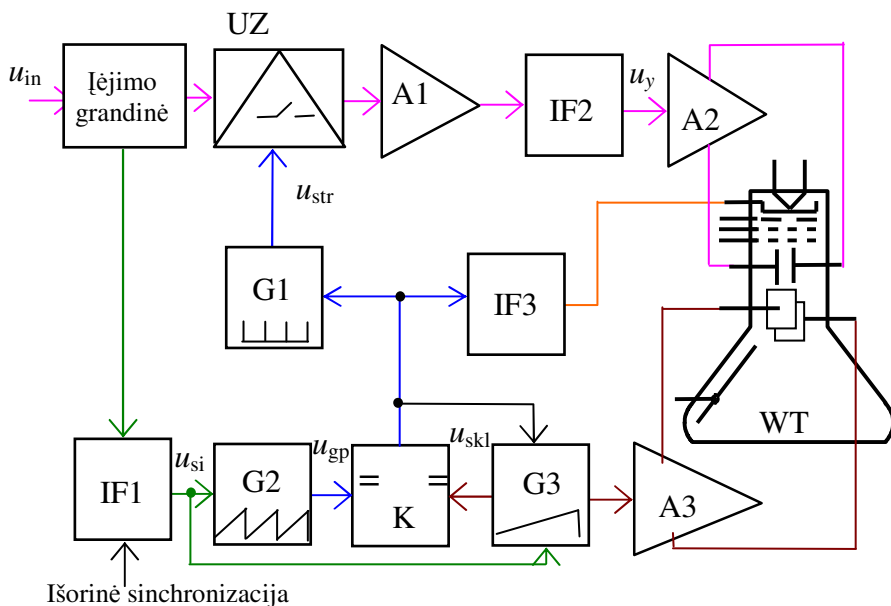
dažnį periodo: $\Delta t \leq \frac{1}{f_d} = \frac{1}{2f_{\max}}$, kur $f_{\max}$ yra didžiausias stebimo

proceso spektro dažnis. Tokių impulsų generavimas nėra techninė problema (sudėtingesnė yra trumpų virpesių stiprinimo neiškraipant jų formos problema). Greitaveikiu komutatoriumi gali būti, pavyzdžiui, diodinis dažnio keitiklis, kurio diodas valdomas strobavimo impulsais. Diskrečios signalo vertės yra imamos ne per vieną periodą: kiekviena sekanti vertė imama sekančio periodo metu arba net praleidus tam tikrą skaičių periodų. Todėl rekonstruotas

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

virpesys gaunamas kaip visuma diskrečių verčių, atskirtų laiko intervalais nelygiais diskretizavimo žingsniui, o ilgesniais. Taip išplečiamas (transformuojamas) stebimo signalo laiko mastelis. Virpesio oscilograma gaunama kaip švytinčių ekrane taškų visuma. Kadangi strobimpulsai yra trumpi, tai ekspozicijos laikas būtų trumpas ir taško švytėjimas būtų labai neintensyvus. Be to, kai diskretų nedaug, gautume labai sukarpytą oscilogramos vaizdą. Todėl, prieš paduodant į vertikalaus kreipimo kanalą, impulsai, atitinkantys signalo diskrečias vertes, yra išplečiami. Tai tik palengvina jų stiprinimą ir perdavimą.

Stroboskopinio oscilografo struktūrinė schema yra pavaizduota 4.5 paveiksle.



4.5 pav. Stroboskopinio oscilografo supaprastinta struktūrinė schema

Sinchronizacijos impulsai formuojami impulsų formuotuvu IF1 iš signalo arba išorinės sinchronizacijos virpesių šaltinio ir maždaug atitinka tiriamo virpesio pradžią. Jais yra sinchronizuojamas greitų pjūklo dantų pavidalo tiesiškai augančios periodinės įtampos

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

generatorius G2 ir skeistinės (lėtai kintančios tiesiškai didėjančios įtampos) generatorius G3. Šių generatorių įtampos yra palyginamos komparatoriuje K ir kai jos susilygina, komparatoriaus įtampos šuolis paleidžia trumpų strobavimo impulsų generatorių G1. Šio generatoriaus įtampos u_{st} impulsai valdo greitaveikį komutatorių UZ. Veikiant strobavimo impulsui, komutatorius yra atviras ir jo išėjime gaunamas momentinės įėjimo įtampos vertei atitinkančios amplitudės impulsas. Šis impulsas yra stiprinamas įtampos stiprintuvu A1 ir išplečiamas impulsų formuotuvu IF2. Sustiprintas galiniu stiprintuvu A2 impulsas patenka į elektroninio vamzdžio vertikalios kreipimo sistemą ir sukelia jo amplitudei proporcingą elektronų spindulio nuokrypį.

Komparatoriaus įtampos šuolis taip pat šuoliu padidina skeistinės generatoriaus G3 įtampą. Ji toliau išlieka stabili iki sekančio strobuojančio impulso veikimo. Todėl per šį laiką horizontalus skleidimas nevyksta ir elektronų spindulys per visą išplėsto vertikalios kreipimo kanalo impulso trukmės laiką veikia ekrano liuminaforą, sukeldamas intensyvią jo švytėjimą. Vertikalios kreipimo kanalo impulso trukmės išplėtimas ir šuoliukais tiesiškai auganti skeistinės įtampa garantuoja signalo diskrečių verčių atvaizdavimą pakankamo skaisčio segmentais.

Skeistinės periodas T_{skl} yra kartotinis signalo periodui T :

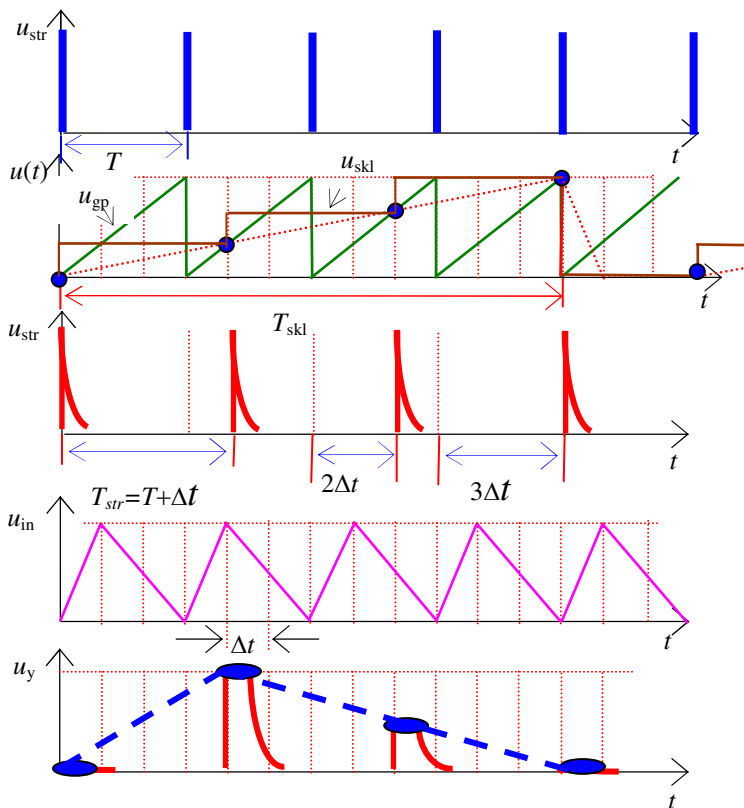
$$T_{skl} = (n + 1)T ,$$

čia n yra signalo imčių (atskaitų) skaičius per jo periodą. Jis, kaip minėta, yra parenkamas pagal Naikvisto diskretizavimo teoremos reikalavimus. Kadangi abiejų lyginamų komparatoriumi įtampų lygiai auga tiesiškai, o jų periodai kartotiniai, tai kiekvienas sekantis strobavimo impulsas gaunamas paslinktas sinchronizavimo impulso atžvilgiu per laiko intervalą kartotinį strobavimo žingsniui Δt (4.6 pav):

$$\Delta t = \frac{T}{n} .$$

Strobavimo impulsų periodas gaunamas didesnis už signalo periodą strobavimo žingsnio dydžiu : $T_{str} = T + \Delta t$, o skeistinės periodas $T_{skl} = nT_{str} = (n + 1)T$.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.6 pav. Stroboskopinio oscilografo pagrindinių įtampų laiko diagramos ($n = 3$)

Signalų diskretizavimas gali būti vykdomas ne kiekvieną jo periodą, o praleidžiant m periodų. Tam reikia tiek kartų sumažinti sinchronizavimo impulsų dažnį. Tada strobavimo periodas yra lygus: $T_{str} = mT + \Delta t$, o skleistinės periodas $T_{skl} = nT_{str} = (mn + 1)T$.

Kadangi signalo oscilograma yra gaunama per skleistinės periodą, tai jo santykis su signalo periodu parodo kiek pasikeičia laiko mastelis ir vadinamas stroboskopinio oscilografo **laiko mastelio transformacijos koeficientu**:

$$K_T = \frac{T_{skl}}{T} = mn + 1.$$

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Laiko mastelio transformacijos koeficientai šiuolaikiškuose stroboskopiniuose oscilografuose gali būti labai dideli. Pavyzdžiui, jeigu $m = 100$ ir $n = 100$, tai $K_T = 10\,000$. Esant oscilografo vertikalaus kreipimo kanalo praleidžiamų dažnių juostos ribiniam dažniui lygiam $f_r = 1$ MHz, stroboskopinio oscilografo ekvivalentinis praleidžiamų dažnių juostos ribinis dažnis gaunamas $f_{rekv} = K_T f_r = 10$ GHz. Tai rodo, kad tokie oscilografai gali būti naudojami greitų periodinių procesų tyrimui. Pavyzdžiui, oscilografas HP 54124T turi ekvivalentinį praleidžiamų dažnių juostos plotį 50 GHz, o pereinamosios charakteristikos užaugimo laiko ekvivalentinę trukmę 7 ps.

Stroboskopiniai oscilografai kaip ir universalieji yra gaminami ir su keliais vertikalaus kreipimo kanalais.

4.4. Analoginiai oscilografai su skaitmenine atmintimi

Naudojant oscilografus, dažnai reikia fiksuoti oscilogramų vaizdus. Ypač tai svarbu oscilografuojant vienkartinius procesus. Jie reikalingi kaip iliustracijos tiriamų elektronikos ir kitų įtaisų veikimo aprašymams bei kitokiems techniniams dokumentams. Ilgą laiką oscilogramos buvo išsaugomos jas fotografuojant nuo oscilografo ekrano. Tam net buvo sukurtos ir ilgą laiką naudojamos vienkartinio paleidimo skleistinės. Vėliau, vaizdo fiksavimui trumpesniam laikui, pradėti naudoti oscilografai su *atmintimi*. Tokie oscilografai leidžia stebimą oscilogramos vaizdą fiksuoti specialios konstrukcijos elektroninio vamzdžio papildomame mozaikiniame ekrane, esančiame prieš liuminaforą. Vaizdas fiksuojamas potencialinio reljefo pavidalu. Įrašymas vykdomas oscilogramos stebėjimo metu. Vaizdo atkūrimas galimas po daugelio valandų ar net savaičių, priklausomai nuo vamzdžio konstrukcijos ir naudojamos vaizdo fiksavimo technologijos. Tokie oscilografai charakterizuojami papildomais parametrais: *oscilogramos įrašymo greitis* (km/s), *atminties trukmė* kai signalas atkuriamas iškart po įrašymo (min) ir atminties trukmė kai signalas neatkuriamas iškart po įrašymo (h). Tokie oscilografai gaminami ir su stroboskopiniais keitikliais ir leidžia tirti greitus procesus. Tai jų pagrindinis privalumas.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Šiuolaikiškų skaitmeninių signalo apdorojimo ir atminties technologijų panaudojimas leido sukurti hibridinius analoginius – skaitmeninius oscilografus, kuriuose pagrindiniai signalo keitimai ir atvaizdavimo principai yra tokie kaip ir analoginiuose oscilografuose, o oscilogramos duomenys gali būti išsaugoti skaitmeninėje formoje (*angl.* Digital storage oscilloscope – DSO).

Skaitmeninių signalo apdorojimo ir fiksavimo technologijų taikymas leidžia tokiuose oscilografuose įgyvendinti tokias papildomas funkcijas;

- įsiminti signalą ir papildomą informaciją;
- atkurti ir atvaizduoti oscilografo ekrane keletą anksčiau įrašytų į atmintį signalų jų palyginimui ir tyrimui. Informacija gali būti saugoma praktiškai neribotą laiką. Galimas sulėtintas arba paspartintas proceso atkūrimas;
- pateikti ekrane skaitmeniniu pavidalu informaciją apie signalo amplitudės ir laiko parametrus;
- apskaičiuoti ir pateikti signalo realizacijų vidurkį tuo sumažinant triukšmų ir trukdžių įtaką;
- apskaičiuoti ir pateikti signalo realizacijų papildomą informaciją apie signalo laikines (iškraipymai), dažnines (spektros) ir statistines (histogramos) savybes;
- skaitmeninė informacija gali būti lengvai perduodama, susiejant tokį oscilografą į informacines matavimo sistemas su kompiuteriais;
- žymiai supaprastintas oscilografo valdymas. Galima automatinė matavimo paklaidų korekcija

Skaitmeninės atminties oscilografų (SAO) veikimas pagristas signalo diskretizavimu ir kvantavimu naudojant analoginius skaitmeninius keitiklius (ASK).

Tam tikrais laiko momentais, kaip ir stroboskopiniuose oscilografuose, yra imamos signalo momentinės vertės (*angl.* sample) ir ASK keičiamos į tam tikro skiltiškumo dvejetainį kodą (*angl.* binary word). Dvejetainio kodo skilčių skaičius sąlygoja tokio oscilografo vertikaliojo skyros gebą. Dvejetainiai skaičiai yra saugomi oscilografo skaitmeninės atminties įtaise. Informacija, sukaupta atmintyje, toliau yra naudojama vaizduojant signalo oscilogramą.

SAO veikimo sparta žymia dalimi priklauso nuo naudojamo

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

ASK veikimo spartos ir vadinasi *strobavimo (diskretizavimo) sparta*. Didžiausia strobavimo sparta pigesniuose oscilografuose būna nuo 20 iki 200 milijonų imčių per sekundę (*angl. Mega samples per second – MSa/s*). Brangesniuose oscilografų modeliuose strobavimo sparta gali siekti 10 ir daugiau milijardų imčių per sekundę (*angl. Giga samples per second – GSa/s*).

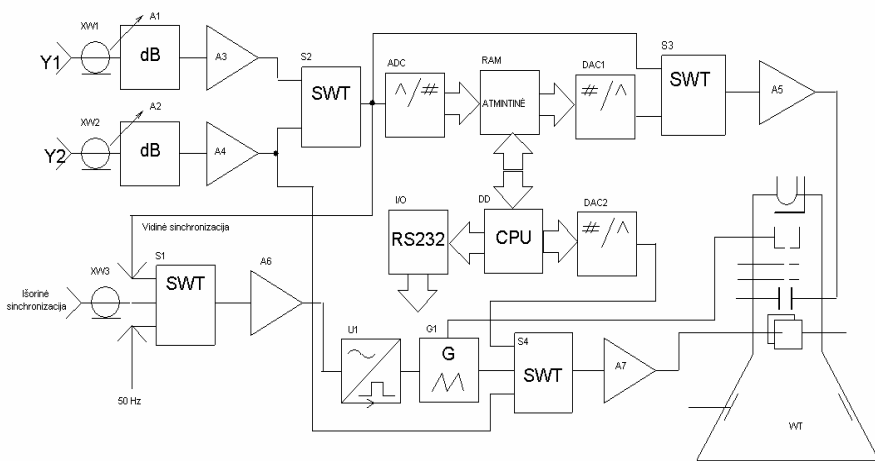
Tokiu būdu, prieš atvaizduojant signalo formą tokio oscilografo ekrane, ji yra išsaugoma oscilografo skaitmeninėje atmintyje. Todėl SAO kaip ir stroboskopiniai oscilografai atvaizduoja signalą ne realiaje laike ir ekrane atvaizduojamas ne realus signalas, o jo rekonstrukcija.

Tačiau skaitmeninė elektronika dar riboja oscilografo veikimo spartą realiaje laike. Todėl dažnai SAO realizuojamas kaip hibridinis oscilografas galintis veikti grynai analoginiu ir SAO režimais (4.7 pav.). Juose signalo formos atvaizdavimui naudojamas tradicinis elektroninių spindulių vamzdis. Kartais tokius oscilografus vadina *kombinuotais oscilografais* (*angl. CombiScope*). Dar galima sutikti pavadinimą *realaus laiko oscilografai su atmintimi* (*angl. real-time and storage oscilloscope - RSO*).

Visi tokio oscilografo struktūros elementai ir darbo režimai yra valdomi mikroprocesoriumi. Jis taip pat naudojamas signalo amplitudžių ir laiko parametrų matavimui bei šios ir pagalbinės informacijos išvedimui į oscilografo ekraną (4.8 pav.). Matavimų palengvinimui naudojamos valdomos žymėjimo linijos (žymekliai). Be to, mikroprocesorius valdo ir apsikeitimą duomenimis su informacine matavimo sistema arba kompiuteriu. Paprastai įmanomas tokių interfeisų naudojimas kaip RS232, GPIB, USB ir t.t. Mikroprocesorius atlieka reikalingus skaičiavimus ir suformuoja valdymo signalus SAK keitikliams, kurių išėjimo signalai paduodami į vertikalios kreipimo ir horizontalios kreipimo kanalų galinius stiprintuvus.

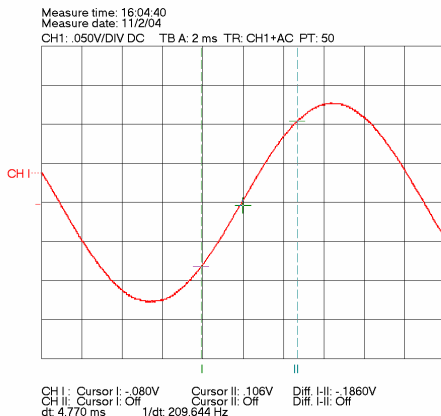
Skaitmeninės atminties oscilografų savybės ir parametrai bei naudojimo ypatumai jiems veikiant skaitmeninės atminties režimu yra *analogiškai skaitmeninių oscilografų atitinkamoms savybėms, todėl šiuos klausimus aptarsime nagrinėdami skaitmeninius oscilografus*.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.7 pav. Skaitmeninės atminties oscilografu supaprastinta struktūrinė schema

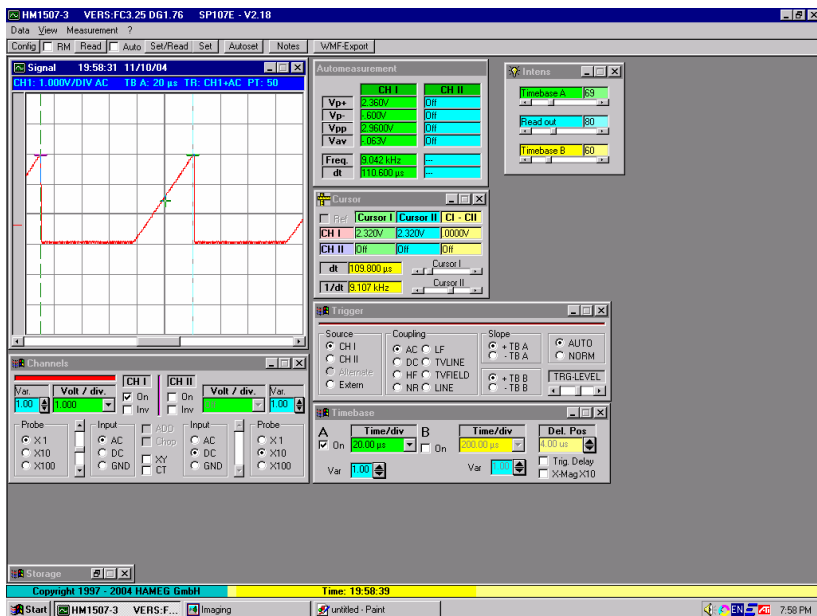
Savo išvaizda universalios paskirties skaitmeninės atminties oscilografai mažai skiriasi nuo tokios pat paskirties analoginių oscilografų ir turi daug vienodos paskirties valdymo įtaisų (4.9 pav.).



4.8 pav. Skaitmeninės atminties oscilografu ekrano vaizdas

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

operacinių sistemų, programų ir duomenų laikmenas, CD ROM įrenginius, visus pagrindinius standartinius prievadus: RS 232, LPT, USB bei populiarių automatizuoto matavimo sistemų interfeisą GPIB. Prie skaitmeninio oscilografo galima prijungti standartinę kompiuterio klaviatūrą ir pelytę.



4.10. Skaitmeninės atminties oscilografo HM 1507 valdymo programos lango vaizdas

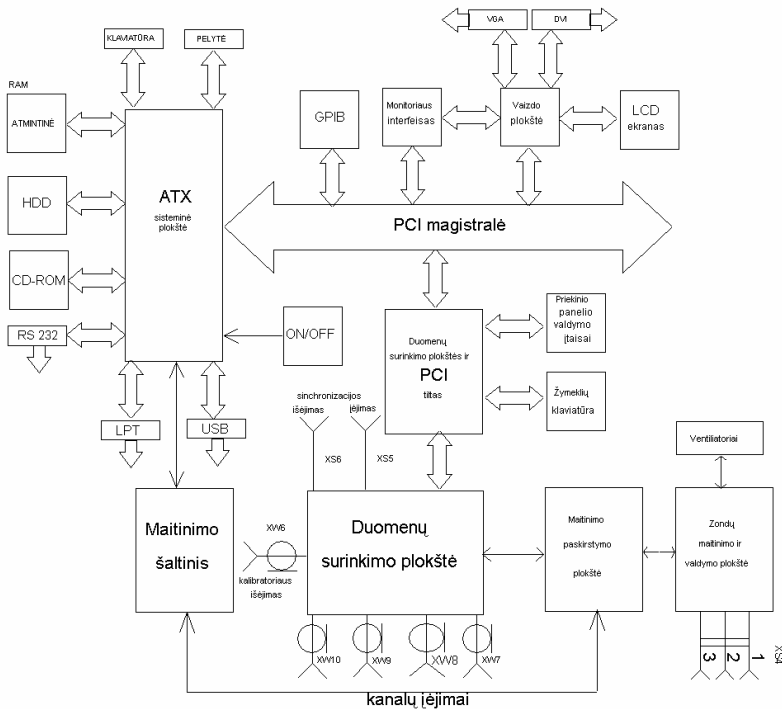
Trys didelės pasaulyje žinomos kompanijos: Agilent, LeCroy ir Tektronix varžosi tarpusavyje, kuri pagamins patį geriausią skaitmeninį oscilografą. Nors jų gaminių parametrai kažkiek skiriasi, tačiau yra artimi, o naudojami schemotechniniai ir technologiniai sprendimai yra panašūs.

Analoginių įtampų įvedimui, išorinių sinchronizavimo signalų įvedimui ir išvedimui bei kalibratoriaus įtampos išvedimui skaitmeniniame oscilografe yra **duomenų surinkimo plokštė** (*angl.* acquisition board) sujungta su kompiuterio PCI magistrale duomenų surinkimo plokštės ir PCI tiltu (*angl.* acquisition PCI bridge). Per šį

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

tiltą taip pat su PCI magistrale susietos oscilografo valdymo klaviatūra ir ekrano žymeklių valdymo klaviatūra esančios oscilografo priekiniame pelyje. Ilustracinė supaprastinta skaitmeninio oscilografo struktūrinė schema yra pavaizduota 4.11 paveiksle.

Duomenų surinkimo plokštė, kaip minėta kuria vertikalaus kreipimo kanalo signalus bei atlieka horizontalaus kreipimo ir sinchronizavimo, strobavimo bei kitų reikiamų signalų kūrimo funkcijas.



4.11 pav. Apibendrinta skaitmeninio oscilografo struktūrinė schema

Duomenų surinkimo plokštės vertikalaus kreipimo kiekvienas kanalas (VKK) susideda iš įėjimo grandinės, nustatančios įėjimo varžą, slopinimo ir stiprinimo elementų, valdančių kreipimo koeficientą, strobavimo grandinės su analoginės atminties elementu (*angl.* sample-and-hold circuit), labai spartaus ASK keitiklio,

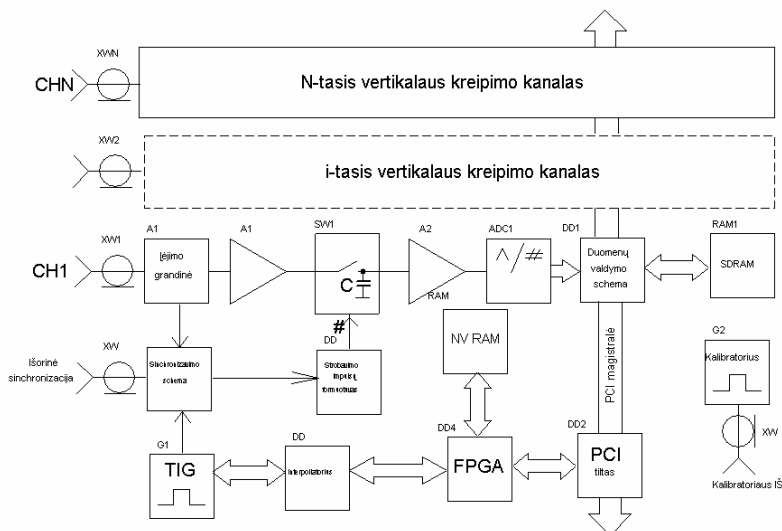
4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

duomenų valdymo schemas susietos su PCI magistrale ir VKK sparčiaja atmintine (SDRAM) (4.12 paveikslas).

Iėjimo grandinė plačiajuosčiuose skaitmeniniuose oscilografuose paprastai turi 50 Ω įėjimo varžą ir garantuoja iki 20 GHz praleidžiamų dažnių juostą. Signalų perdavimui iš tiriamų grandinių gali būti naudojami aktyvūs zondai (*angl.* active probes) su reaktyvumu ir nuostolių kompensavimu. Todėl numatomi papildomi gnybtai tokių zondu maitinimui ir valdymui.

Ivesties stiprintuvai yra pagaminti SiGe technologijos dvipolių tranzistorių lustų pagrindu. Tokių tranzistorių veikimo ribinis srovės stiprinimo dažnis siekia 210 GHz. Todėl tokios technologijos stiprintuvų ribiniai dažniai siekia iki 15 GHz. Jų stiprinimą galima valdyti šuoliais arba tolygiai – ši operacija yra visiškai kalibruota.

Strobavimo grandinė (dar vadinama strobavimo vartais – angl. sampling gate) turi greitaveikį tranzistorinį raktą ir analoginį atminties įtaisą – momentinį įėjimo įtampos lygį įsimenantį kondensatorių C. Veikiant strobavimo impulsui, raktas užsidaro ir kondensatorius įkraunamas iki momentinio įėjimo įtampos lygio.



4.12 pav. Skaitmeninio oscilografo duomenų surinkimo plokštės
supaprastinta struktūrinė schema

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Priekinis stiprintuvas veikia įtampos šaltinio režimu, t.y. turi labai mažą išėjimo varžą. Kai strobavimo impulsas neveikia, raktas yra atviras ir kondensatoriaus įtampa nesikeičia. Tada ASK keičia nekintančią įtampą į atitinkamą dvejetainį kodą. Taip gaunamas skaičius proporcingas strobavimo momento įtampos momentinei vertei ir išvengiama keitimo paklaidos, susijusios su keičiamos įtampos kitimu per ASK keitimo laiką. Jeigu sekančio strobavimo momentu signalo įtampa yra didesnė, tai atminties kondensatorius papildomai įkraunamas iki veikiančios momentinės įtampos lygio, o jeigu mažesnė – tai atminties kondensatorius iškraunamas iki veikiančios įtampos lygio per priekinio stiprintuvo mažą išėjimo varžą.

Skaitmeninių oscilografų **ASK keitikliai** priklauso greičiausiai veikiančių tiesioginio lygiagretaus keitimo keitiklių (*angl.* flash) kategorijai. Jie irgi gaminami SiGe technologijos pagrindu ir gali veikti iki 40 GSa/s keitimo sparta.

Po ASK keitiklių duomenys patenka į labai sparčią **duomenų surinkimo atmintinę**, pagamintą pagal CMOS–SDRAM technologiją. Tokios atmintinės sukurtos specialiai oscilografams. Atmintinė surenka ASK keitiklių teikiamus duomenis keitimo sparta. Kiekvienoje iš ASK keitiklių ateinančioje duomenų imtyje yra vienas informacijos baitas, todėl atmintinė privalo apdoroti šiuos duomenis per realų laiką. Atminties moduluose yra po kelis lustus kiekvienam ASK keitikliui.

Tačiau tokios sparčios magistralės, į kurią sutilptų toks spartus srautas nėra. Skiriasi ir magistralės skiltiškumas. Todėl SDRAM atminties duomenys specializuotose (*angl.* application-specific integrated circuit (ASIC)) duomenų valdymo mikroschemose yra perkoduojami ir paketais siunčiami į specialią FPGA (*angl.* field-programmable gate arrays) tipo atsargos atmintinę (*angl.* cache) NV RAM, o iš jos per PCI magistralę yra perduodami centriniam procesoriui ir jame apdorojami, pavyzdžiui, atliekami skaičiavimai reikalingi interpoliavimui ir signalo atvaizdavimui bei kitos matematinės operacijos.

NV RAM atmintis nustato kanalo signalo įrašo ilgį. Imant duomenis iš SDRAM atmintinės gali būti įterpta išrinkimo (*angl.* decimation) operacija. Pakeitus laiko bazę, pavyzdžiui, sumažinus

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

skleidimo spartą, kad būtų perdengtas didesnis laiko tarpas, tik ASK keitikliai veikia pilna sparta, o NV RAM pasirenka tiksliai tuos duomenis, kurie jai tuo metu reikalingi tvarkymui ir atvaizdavimui.

Laiko bazės pradinis taktavimas visuomet vykdomas didžiausiu dažniu, atitinkančiu ASK spartą, o sinchrosignalų tirtis (drebinėjimas *angl.* jitter) būna mažesnis negu šimtai femtosekundžių. Didžiausio dažnio sinchrosignalas nustato galimą trumpiausią laiko bazę. Labai svarbu, kad sinchronizacijos blokas būtų labai spartus ir kad trumpą signalą būtų galima stebėti paleidžiant oscilografą tiesiog nuo jo.

Toliau trumpai aptarsime specifines skaitmeninių (taip pat ir skaitmeninės atminties) oscilografų savybes.

Vienas iš svarbiausių skaitmeninio oscilografo parametrų yra jo vertikalios kreipimo kanalo ASK skilčių (*angl.* bit) skaičius. Jis nustato skaitmeninio oscilografo *vertikalios kreipimo skiriamąją gebą* (*angl.* vertical resolution). Kuo didesnis ASK skilčių skaičius, tuo didesnė vertikali skiriamoji geba ir tuo daugiau įtampos lygių galima atskirti signalo formoje. Žinant ASK skilčių skaičių n , galima apskaičiuoti maksimalų įtampos lygių skaičių N :

$$N = 2^n - 1.$$

Paprastai ieškoma kompromiso tarp ASK veikimo spartos ir jo skiltiškumo. Todėl spartūs ASK paprastai būna 8 bitų skiltiškumo. Jie atskiria $2^8 - 1 = 255$ skirtingus įtampos lygius. Daugelyje atvejų tai leidžia pakankamai detalai išanalizuoti signalus ir atlikti matavimus su priimtiniu tikslumu. 8 skilčių ASK kvantavimo ribinė paklaida neviršija $\pm 0,4\%$.

Vertikalios kreipimo kanalo signalo įrašo *atmintinės talpa* yra dažnai nepakankamai priekabiaai vertinamas skaitmeninių oscilografų parametras, bet jis yra vienas iš pačių svarbiausių. Skaitmeniniuose oscilografuose signalo imtys yra saugomos buferinėse MV RAM atmintinėse. Imčių skaičius, kuris gali būti išsaugotas atmintyje, vadinasi *įrašo ilgis* (*angl.* record length) ir yra išreiškiamas baitais (B) arba kilo baitais (kB). 1 kB atitinka $2^{10} = 1024$ baitų. Kartais vietoje termino įrašo ilgis vartojimas terminas rinkinio ilgis (*angl.* acquisition length).

Kiekvienam strobavimo dažniui būtent atmintinės talpa pasako, kiek ilgai, iki persipildant atminčiai, oscilografas sugebės registruoti signalą.

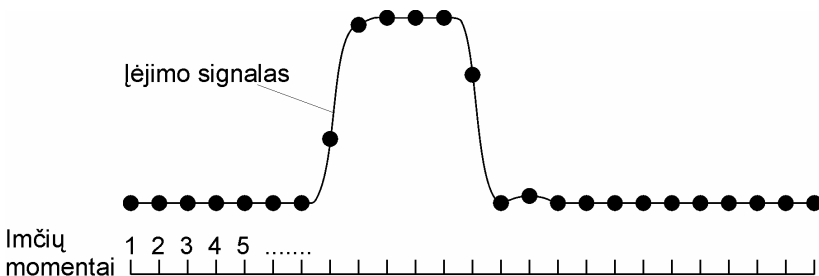
4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Strobavimo dažnio ir atmintinės talpos santykis yra labai svarbus: didelio strobavimo dažnio, bet mažos atmintinės oscilografos gali išnaudoti savo dažnines savybes tiktai pačioje greičiausioje iš turimų laiko bazių. Jeigu tiriamas lėtas procesas ir naudojama lėta skleistinė, tai, esant dideliame strobavimo dažniui, atmintinėje gali tilpti tik labai maža tiriamo proceso dalis.

Priklausomai nuo to, kaip vykdomas strobavimas, skiriami du pagrindiniai strobavimo būdai: strobavimas realiame laike ir strobavimas ekvivalentiniame laike (stroboskopinis keitimas). Pastarasis irgi būna dviejų tipų: nuoseklus strobavimas ekvivalentiniame laike ir atsitiktinis strobavimas ekvivalentiniame laike.

Strobavimas realiaame laike (*angl.* real time sampling) yra toks, kai visos imtys, reikalingos signalui atvaizduoti, yra imamos vieno signalo periodo (arba vienkartinio signalo realizacijos) metu nuoseklia tvarka.

Toks strobavimo būdas tinka pasikartojantiems signalams tirti, kurių spektro viršutinis dažnis yra bent 2,5 karto mažesnis už strobavimo dažnį (tenkina Naikvisto diskretizavimo teoremos reikalavimus). Tokia strobavimo sparta yra vadinama *Naikvisto strobavimo sparta* (*angl.* the Nyquist sample rate). Strobavimas realiame laike yra vienintelis būdas, leidžiantis tirti vienkartinius arba pereinamųjų procesų signalus (4.13 paveikslas). Būtent todėl jis dar dažnai vadinamas *vienkartinio bandymo strobavimu* (*angl.* single – shot sampling). Strobavimo realiame laike atveju oscilografo *praleidžiamų dažnių juosta* riboja ne tik jo analoginės dalies praleidžiamų dažnių juosta, bet ir strobavimo sparta.



4.13 pav. Strobavimo realiame laike iliustracija

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Kartais oscilografų gamintojai deklaruoja skaitmeninio oscilografo praleidžiamų dažnių juostos aukščiausią ribinį dažnį (*angl.* cutoff frequency) pagal Naikvisto strobavimo spartą. Tačiau aišku, kad tokios spartos realaus signalo atvaizdavimui nepakanka.

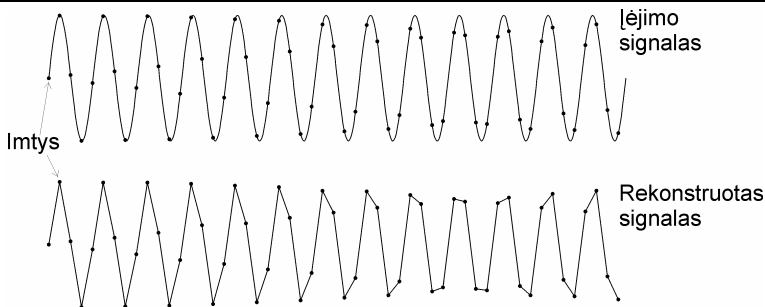
Sukauptų atmintyje imčių reikšmės gali būti atvaizduojamos kaip *taškai* (*angl.* dots) oscilografo ekrane. Tačiau tokį atvaizdavimo būdą galima naudoti tada, kai strobavimo sparta viršiją signalo spektro viršutinį dažnį mažiausiai 25 kartus.

Reprezentatyvesniam signalo vaizdavimui ekrane atvaizduojami ne tik jo imčių taškai, bet ir jie sujungiami tam tikromis linijomis, kurios užpildo tarpus tarp taškų. Ši procedūra vadinama *interpoliavimu*. Netgi, pavyzdžiui, kai strobavimo sparta viršija sinusinio signalo dažnį maždaug 5 kartus, t.y. tiriamo signalo vieno periodo metu imamos 5 imtys ir naudojamas interpoliavimas tiesėmis, jau sunku nuspręsti kokia iš tikrųjų yra signalo forma (4. 14 paveikslas). Norint gauti pakankamai kokybišką signalo vaizdą, reikia sukaupti mažiausiai 25, o kartais ir 100 imčių per signalo periodą. Todėl skaitmeninis oscilografas su 20 GHz realaus laiko strobavimo dažniu garantuoja praktiškai tik (200 – 800) MHz praleidžiamų dažnių juostos plotį.

Naudojamas interpoliavimo būdas nusako kaip vaizdo taškus tarpusavyje sujungti, kad atstatytas vaizdas geriau atitiktų matuojamą. Tam yra apskaičiuojamos kai kurios signalo funkcijos (*vidurkis, standartinis nuokrypis, tikimybės tankio funkcija, galios spektro funkcija ir autokoreliacinė funkcija*), kurios suteikia informaciją, apie tai kaip taškus reikia jungti. Oscilografuose paprastai naudojami du pagrindiniai interpoliavimo būdai: interpoliavimas tiesėmis ir sinuso funkcijos segmentais.

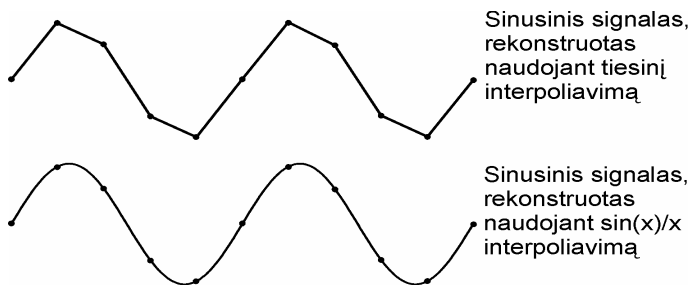
Interpoliavimo *tiesių atkarpomis* (*angl.* linear interpolation) atveju taškai sujungiami tiesėmis. Toks interpoliavimo būdas labiau tinka tiriant staigiai besikeičiančius signalus, pvz. stačiakampio formos impulsus. Jį galima naudoti tada, kai strobavimo sparta viršiją signalo spektro viršutinį dažnį mažiausiai 10 kartų. Toks interpoliavimas oscilografuose dažnai naudojamas pagal nutylėjimą.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.14 pav. Signalų ir jo rekonstrukcijos vaizdas strobuojant 5 kartus per periodą

Interpoliavimas (*$\sin x/x$ funkcijos segmentais* (angl. sine-wave interpolation)) yra geresnis. Šiuo atveju gretimi taškai yra sujungiami kreivėmis. Toks interpoliavimo būdas yra sudėtingesnis, nes reikalauja daugiau matematinių skaičiavimų. Bet jis geriau atkuria signalo aukštadažnes dedamąsias (4.15 paveikslas). Todėl ($\sin x/x$) interpoliavimo atveju strobavimo sparta gali viršyti signalo spektro viršutinį dažnį tik 2,5 karto.



4.15 pav. Sinusinio signalo atvaizdavimas naudojant įvairius interpoliavimo būdus

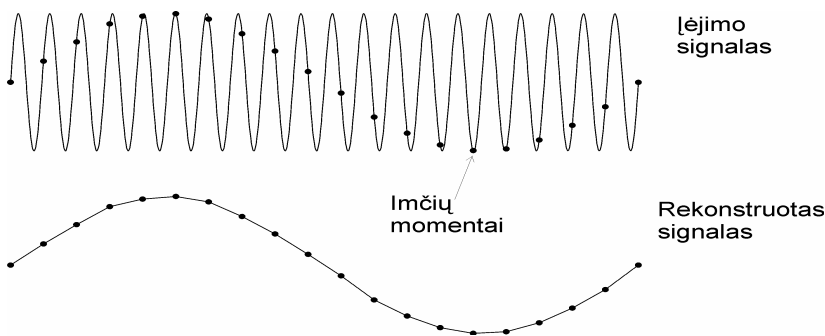
Kuo didesnis strobavimo dažnio ir signalo dažnio santykis, tuo mažesnė tikimybė vadinamo *susitapatinimo* (pakaitos) reiškinio (angl. aliasing). Jis galimas kai strobavimo dažnis yra artimas ir kiek mažesnis už signalo dažnį. Tada kiekviena sekanti imtis imama iš sekančio periodo ir po truputį atsilieka. Todėl gaunamas efektas kaip stroboskopiniame oscilografe: užfiksuotas signalas gaunamas žymiai

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

ilgesnio periodo nei yra iš tikro, nors jo amplitudė yra artima tiriamo signalo amplitudei (4.16 paveikslas). Rekonstruoto signalo dažnis yra lygus signalo ir strobavimo dažnių skirtumui. Tokį signalo vaizdą kartais vadina **signalu šmėkla** (*angl.* signal ghost).

Siekiant išvengti susitapatinimo reiškinių, kartais ribojamas analoginės dalies praleidžiamų dažnių juostos ribinis dažnis iki dydžio net keturis kartus mažesnio už strobavimo dažnį. Tačiau tai apriboja oscilografo praleidžiamų dažnių juostos plotį ir pailgina pereinamosios charakteristikos užaugimo laiko trukmę.

Skaitmeniniuose oscilografuose yra įdiegtas automatinis darbo režimo nustatymas (*angl.* autose). Oscilografas automatiškai nusistato tinkamus matuojamam signalui horizontalaus ir vertikalų kreipimo koeficientus. Šis režimas taip pat padeda išvengti susitapatinimo reiškinių.

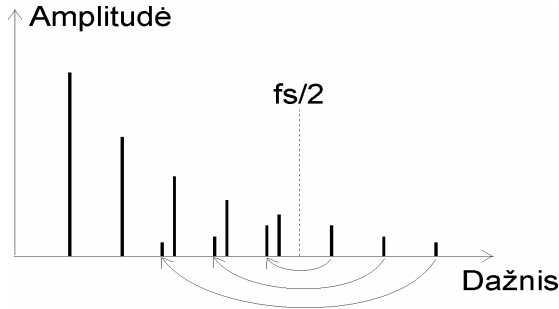


4.16 pav. Susitapatinimo reiškinių iliustracija

Esant įtarimui, kad pasireiškia susitapatinimas, patartina patikrinimui panaudoti analoginį oscilografą. Analoginiuose oscilografuose susitapatinimo reiškinys yra negalimas.

Kai strobavimo dažnis yra per mažas, lyginant su Naikvisto dažniu, gaunamas iškraipytas ir tiriamo signalo spektras (4.17 pav.). Signalų dažnio dedamosios virš $f_{str}/2$ yra išverčiamos, perkeltiant jas į žemesnių dažnių sritį (*angl.* fold back). Šis efektas gali įnešti spektro matavimo paklaidas, kai iš imčių apskaičiuojamas ir atvaizduojamas signalo spektras.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.17 pav. Susitapatinimo reiškinio veikimas dažnių srityje: aukštadažnių signalo komponentų išvertimas ir perkėlimas į žemesnių dažnių sritį

Strobavimas realiame laike leidžia gauti informaciją apie signalo formą *prieš sinchronizacijos įvykį* (angl. pre-triggering). Strobavimas ir imčių įrašymas vyksta visą laiką tarp dviejų sinchronizacijos įvykių ir todėl signalo vaizdas gali būti rekonstruotas pradedant bet kuria pasirinkta jo imtimi. Galima signalo vaizdo rekonstrukciją pradėti pasirenkant vėlesnes už sinchronizavimo įvykį imtis. Atvaizdavimo vėlavimą galima valdyti. Tai vadinamas vėluojantis atvaizdavimas *po sinchronizacijos įvykio* (angl. post-triggering by a variable hold-off time).

Realiame laike strobuojant impulsinį signalą, dėl nepakankamos strobavimo spartos gali atsirasti papildomos jo laiko parametrų matavimo paklaidos.

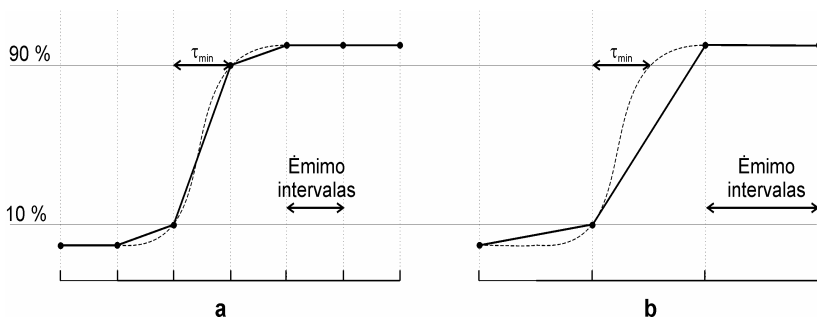
Impulsinių signalų tyrimo metu dažnai matuojamos impulsų užaugimo ir kritimo *laikų trukmės* (angl. rise time, fall time). Kaip jau buvo aptarta anksčiau, analoginio oscilografo atveju, minimali fronto trukmė, kuria galima išmatuoti, priklauso nuo VKK praleidžiamų dažnių juostos pločio. Skaitmeniniuose oscilografuose ta trukmė priklauso ir nuo analoginės dalies praleidžiamų dažnių juostos pločio ir nuo naudojamo strobavimo būdo bei strobavimo intervalo trukmės. Tam, kad būtų galima tiksliau ištirti impulso užaugimo ir kritimo laikų trukmes, jose turėtų tilpti tam tikras imčių skaičius.

Idealiausiu atveju tam, kad būtų galima tiksliau nustatyti 10 % ir 90 % impulso amplitudės lygius, pagal kuriuos matuojami impulsų

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

užaugimo ir kritimo laikai, į laiko intervalą tarp šių lygių turėtų tilpti bent 10 signalo imčių. Tačiau dažnai pagrindinis tikslas yra tik išmatuoti trukmę. Todėl minimali impulso fronto augimo (kritimo) trukmė τ_{fmin} , kuri gali būti išmatuota, neturi būti mažesnė nei strobavimo intervalas T_{str} (4.18a paveikslas). Žinant realaus laiko strobavimo spartą, pvz., $f_{str} = 200$ MHz, tą trukmę galima lengvai apskaičiuoti: $\tau_{fmin} = 1/200 \text{ MHz} = 5 \text{ ns}$.

Impulsai, kurių frontų trukmės yra mažesnės nei strobavimo intervalas, bus atvaizduojami iškraipytai, nes kaip kinta įtampa tarp imčių lieka nežinoma (4.17b paveikslas). Iš kitos pusės, 4.17a paveiksle pavaizduotas idealus atvejis kai dviejų gretimų imčių laiko momentai sutampa su impulso fronto vietomis, kurių vertės sudaro 10 % ir 90 % impulso amplitudės. Realiai tokios situacijos tikimybė labai maža. Todėl frontų trukmės matavimo rezultatas priklauso ne tik nuo realaus laiko strobavimo intervalo trukmės, bet ir nuo imčių momentų padėties laiko skalėje signalo fronto atžvilgiu. Todėl kartais rekomenduojama, kad fronto augimo trukmė viršytų strobavimo intervalą bent 2 kartus. Literatūroje galima sutikti ir kitų rekomendacijų (kad viršytų 1,6 karto arba 5 kartus).



4.18 pav. Minimalios matuojamos fronto trukmės priklausomybė nuo strobavimo intervalo

Oscilografo analoginės dalies praleidžiamų dažnių juostos įtaka frontų trukmės matavimo rezultatui, be abejo, išlieka.

Tiriant sparčius pasikartojančius signalus, kurių spektro viršutinis dažnis viršija 40 % realaus laiko strobavimo dažnio, naudojami *strobavimo ekvivalentiniame laike* (angl. equivalent

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

time sampling) būdai. Šių būdų esmė yra panaši į analoginiuose stroboskopiniuose oscilografuose naudojamą signalo keitimą. Visos imtys, reikalingos signalo formai (*angl.* waveform) atvaizduoti, imamos ne iš vieno signalo periodo, o iš kelių. Kiekviena nauja imtis arba imčių grupė yra imama po kiekvieno naujo sinchronizacijos įvykio.

Esant tokiam strobavimo režimui, po kiekvieno sinchronizacijos įvykio oscilografas įrašo į atmintį informaciją apie mažą signalo dalį: vieną arba kelias imtis. Po kito sinchronizacijos įvykio įrašoma informacija apie kitą to signalo dalį (imtys įrašomos į kitas atminties vietas) ir taip toliau. Kai atmintyje surenkamos visos imtys, reikalingos signalo formai atkurti, oscilografas atvaizduoja signalą savo ekrane. Visas procesas periodiškai kartojasi.

Toks strobavimo būdas leidžia kelis kartus praplėsti oscilografo praleidžiamų dažnių juostą, nes signalo dažnis gali būti net didesnis už strobavimo spartą. Nors fizikinė strobavimo sparta ir išlieka ta pati, strobavimo ekvivalentiniame laike sparta gaunasi didesnė nei strobavimo realiame laike atveju, nes signalo periodui gali tekti daugiau imčių. Tačiau reikia neužmiršti, kad tokiu būdu galima tirti tik idealiai pasikartojančius signalus ir signalo analizė vyksta per daugelį periodų ir strobavimą valdančių sinchrosignalų tirtis turi būti labai maža.

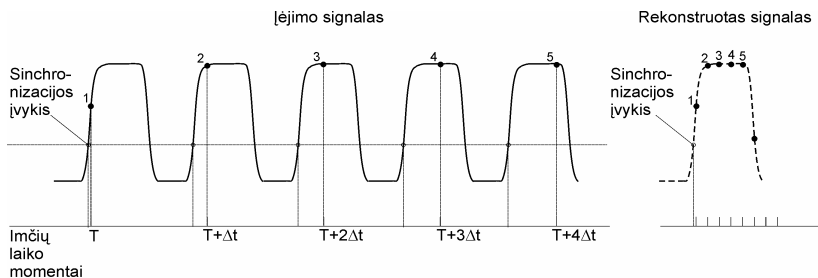
Naudojami du strobavimo ekvivalentiniame laike metodai: nuoseklus strobavimas ekvivalentiniame laike ir atsitiktinis strobavimas ekvivalentiniame laike.

Nuoseklus strobavimas ekvivalentiniame laike (*angl.* sequential equivalent time sampling arba sequential repetitive sampling) yra visai toks pats kaip analoginiame stroboskopiniame oscilografe.

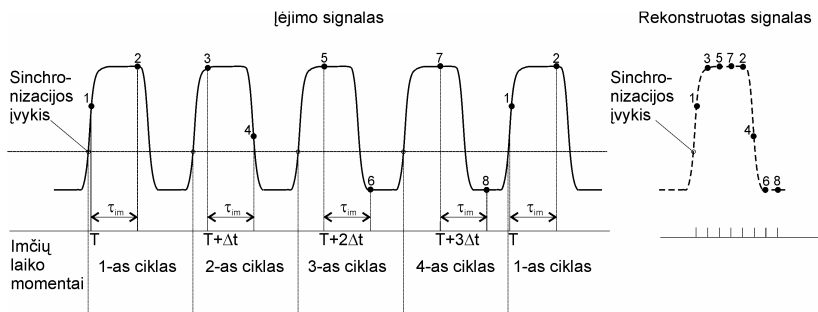
Imtys arba jų grupės yra imamos paeiliui iš kiekvieno signalo periodo (arba kartotinio periodo) nustatyta tvarka (4.19 paveikslas). Pirmą imtis paimama iš karto po pirmo sinchronizacijos įvykio ir įrašoma į atitinkamą atminties vietą. Antra imtis imama po antrojo sinchronizacijos įvykio, bet su tam tikru nustatytu vėlinimu Δt . Po trečiojo sinchronizacijos įvykio strobavimas vėlinamas $2\Delta t$ ir taip toliau. Taigi, n – toji imtis imama suvėlinta laike $(n - 1)\Delta t$ sinchronizacijos įvykio momento atžvilgiu. Kaip minėta, vieno periodo metu gali būti imama ne viena imtis, bet imčių grupė (4. 20

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

paveikslas). Toks būdas leidžia žymiai greičiau užpildyti atmintį signalo įrašu.



4.19 pav. Nuoseklaus strobavimo ekvivalentiniame laike iliustracija



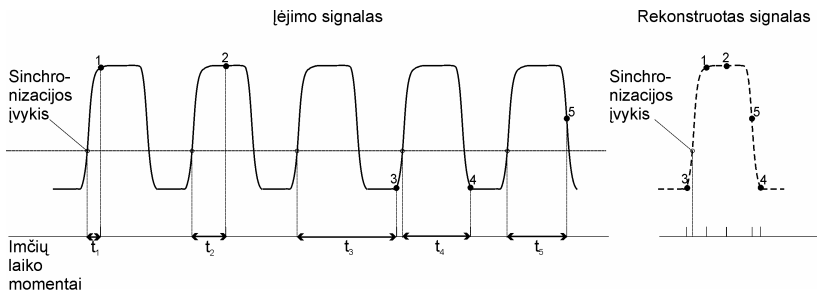
4.20 pav. Nuoseklaus strobavimo imčių grupėmis ekvivalentiniame laike iliustracija

Nuoseklaus strobavimo ekvivalentiniame laike ekvivalentinė strobavimo sparta lygi $1/\Delta t$. Dydis Δt gali būti dešimčių – šimtų ps eilės, todėl oscilografo ekvivalentinė praleidžiamų dažnių juosta gaunasi žymiai platesnė nei kai strobuojama realiaame laike. Tačiau, imtys yra įrašomos į atmintį tik po synchronizacijos įvykio. Todėl prarandama informacija apie signalo formą prieš synchronizacijos įvykį.

Atsitiktinis strobavimas ekvivalentiniame laike (angl. random equivalent time sampling arba random repetitive sampling) vykdomas, kai imtys imamos atsitiktiniais laiko momentais. Kol imtis yra imama ir įrašoma į atmintį, sistema laukia sekančio

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

sinchronizacijos signalo.



4.21 pav. Atsitiktinio strobavimo ekvivalentiniame laike iliustracija

Kai gaunamas sinchronizacijos signalas, laiko apskaičiavimo sistema suformuoja atsitiktinį laiko intervalą t_1 , t_2 , t_3 .. (4.21 pav.) iki sekančio strobavimo momento. Priklausomai nuo apskaičiuotos strobavimo laiko intervalo trukmės, imtis įrašoma į atitinkamą atminties vietą ir laukiama sekančio sinchronizacijos momento. Vieno signalo periodo metu gali būti imama ne viena imtis, bet imčių grupė. Imčių skaičius grupėje irgi gali būti atsitiktinis.

Esant pačiam sparčiausiam skleistinės koeficientui (mažiausias laikas/padalai), visų imčių įrašymas į atmintį atsitiktiniu būdu gali užimti labai daug laiko. Oscilografo ekvivalentinė praleidžiamų dažnių juosta gaunasi irgi žymiai platesnė negu naudojant strobavimą realiaame laike. Be to, šiuo atveju yra gaunama informacija apie signalo formą prieš sinchronizacijos įvykį. Bet ekvivalentinė praleidžiamų dažnių juosta gaunasi siauresnė negu nuoseklaus strobavimo atveju. Be to, dėl sinchrosignalų tirties yra apsunkintas tikslus laiko tarpo tarp sinchronizacijos momento ir strobavimo momento nustatymas.

Čia pateikti tik strobavimo ekvivalentiniame laike pagrindiniai būdai. Kiekvienas skaitmeninių oscilografų gamintojas steigiasi tobulinti strobavimo algoritmus. Todėl skirtinguose oscilografuose jie gali šiek tiek skirtis.

Jau buvo minėta, kad naudojama strobavimo sparta turi būti siejama su signalo imčių atmintinės talpa ir naudojamu skleistinės koeficientu, padaugintu iš horizontalios skalės padalų skaičiaus. Dažniausiai naudojamos skalės su 10 padalų, todėl strobavimo

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

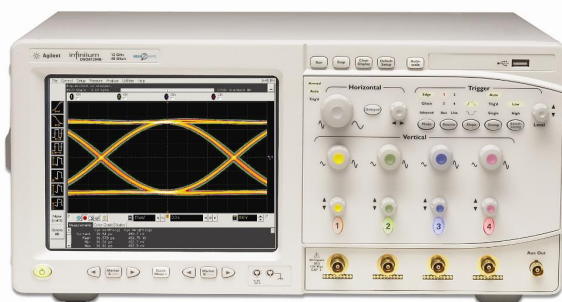
dažnis gali būti apskaičiuotas taip:

$$f_{\text{str}} = \text{atmintinės talpa} / 10 \cdot k_s.$$

Žinant oscilografo maksimalią realaus laiko strobavimo spartą ir kiek signalo imčių sutalpinama į atmintį, galima apskaičiuoti mažiausią skeistinės koeficiento vertę.

Svarbu žinoti šį laiko parametą, kadangi jis nustato geriausią įmanomą oscilografo laiko skiriamąją gebą matuojant vienkartinius (nepasikartojančius) signalus.

Skaitmeniniuose oscilografuose oscilogramos skaisčio intensyvumas nepriklauso nuo signalo kitimo spartos kaip kad yra analoginiuose oscilografuose. Todėl prarandamas „trečias matmuo“ – skaisčio intensyvumas. Todėl yra sukurti vadinamieji **skaitmeninio liuminaforo** oscilografai (*angl.* digital phosphor oscilloscopes), kurių oscilograma panaši kaip analoginių oscilografų, t.y. priklausomai nuo signalo savybių kinta ir jo atvaizdo skaisčio intensyvumas. Tai leidžia gauti daugiau informacijos apie signalą. Juose specialus vaizdo procesorius (*angl.* waveform imaging processor), priklausomai nuo ateinančios iš ASK imties kitimo spartos, pritaiko atvaizdavimo algoritmą, atlikdamas skaitmeninę cheminių liuminaforo švytėjimo procesų emuliaciją. Tam šis procesorius naudoja informaciją sukauptą jo duomenų bazėje. Taip gaunama trimatė informacija apie signalą: amplitudė, laikas ir švytėjimo intensyvumas (skaistis) priklausomai nuo signalo kitimo dinamikos.



4.22 pav. Agilent technologies firmos skaitmeninio oscilografo DSO81304B vaizdas

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Sparčiai tobulėjant skaitmeninės elektronikos technologijoms, nuolat tobulinami ir skaitmeninių oscilografų parametrai. Pavyzdžiui, firmos Agilent technologies skaitmeninis oscilografas DSO81304B (4.22 paveikslas) turi 4 vertikalaus kreipimo kanalus, 13 GHz praleidžiamų dažnių juostos plotį ir gali veikti su 40 GSa/s strobavimo dažniu, kai naudojami du kanalai. Jų skleistinės koeficientas keičiamas nuo 5 ps/padalai iki 20 s/padalai, o kreipimo koeficientai – nuo 1 mV/padalai iki 1 V/padalai.

4.6. Matavimai oscilografais

4.6.1. Įtampos matavimas

Kaip esame aptarę 3 skyriuje, pagrindinis kintamosios įtampos parametras yra jos efektinė vertė U . Tačiau, matuojant oscilografu, paprastai yra matuojama įtampos sklaidos intervalas U_{pp} , kuris atitinka matuojamos įtampos maksimalios ir minimalios momentinių verčių skirtumą. Dažniausiai efektinė vertė lengvai apskaičiuojama, taikant atitinkamus įtampos amplitudės koeficientus. Pavyzdžiui, sinusinės įtampos atveju efektinė vertė gaunama dalinant U_{pp} iš $2,83$ ($2\sqrt{2}$).

Sinusinės įtampos įvairių verčių santykiai parodyti 4.23 paveiksle. U_m – amplitudės vertė, U_{pp} – įtampos sklaidos intervalas (įtampos didumas nuo piko iki piko), u – momentinė vertė tam tikru laiko momentu. Įtampos vertės oscilogramoje užima tam tikrą vertikalios ašies padalų skaičių.

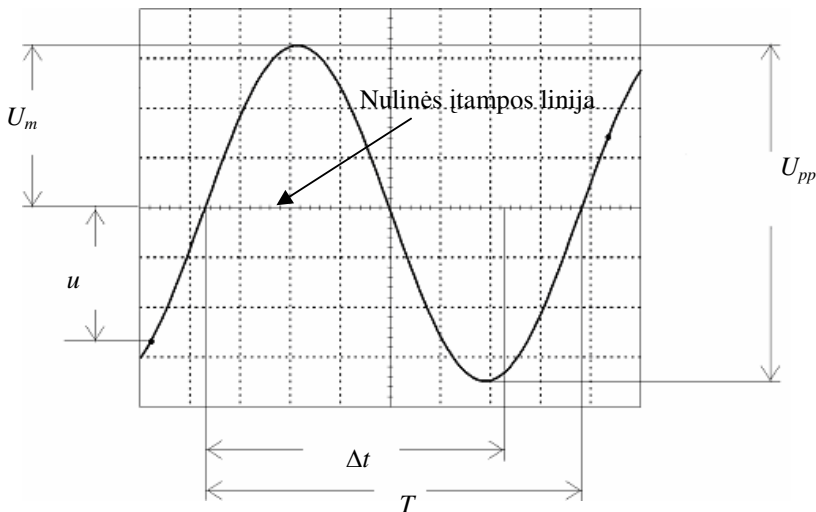
Visos įtampos vertės yra matuojamos atskaičiuojant kiek padalų H jos užima (vertinant ir padalos dalis) ir dauginant šį dydį iš nustatyto šiam oscilografo vertikalaus kreipimo kanalui kreipimo koeficiento k_y :

$$u = k_y H . \quad (4.1)$$

Matuojant įtampų vertes oscilografu, reikia laikytis tam tikrų taisyklių. Reikia, kad H būtų artimas oscilografo ekrano vertikaliam matmeniui. Tam tikslui yra pasirenkamas reikiamas kreipimo koeficientas. Vertikalaus kreipimo koeficiento vertės turi būti

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

kalibruotos. Todėl šis įtamos matavimo būdas vadinamas **kalibruoto kreipimo būdu**. Visada reikia atsižvelgti į tai, ar naudojamas išorinis įtamos daliklis ar ne. Jeigu, pavyzdžiui, naudojamas daliklis 1:10, tai formulės (4.1) rezultatas turi būti padaugintas iš 10.

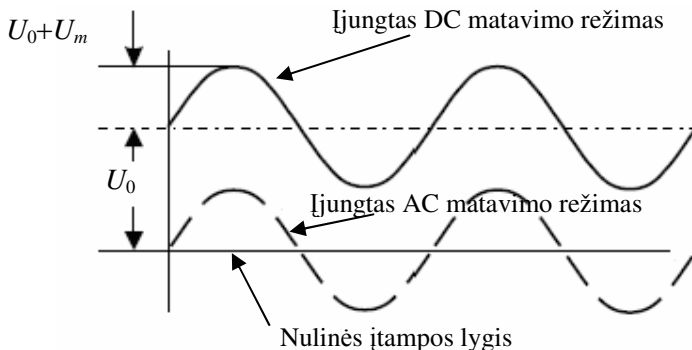


4.23 pav. Sinusinės įtamos įvairios vertės oscilografo ekrane

Dažnai periodinis signalas gali turėti ir nuolatinę dedamąją U_0 . Todėl reikia patikrinti, kuriame lygyje yra **įtamos nulio linija**. Tam atitinkamo Y kanalo įėjimas sujungiamas su korpusu. Tada matoma skleistinė linija ir atitinka nulinę įtampą. Jeigu reikia, tai šį lygį galime pastumti aukštyn arba žemyn su atitinkamais reguliatoriais. Toliau, prijungus tiriamą signalą, stebime ar jo kitimas vyksta apie nulinę liniją ar ne. Jeigu kitimas yra paslinktas, tai rodo, kad yra nuolatinė įtamos dedamoji, kuri irgi gali būti išmatuota (4.24. paveikslas). 4.24 paveikslas brūkšninė linija vaizduoja kaip atrodytų oscilograma, jeigu Y įėjimas būtų uždarytas signalo nuolatinei dedamajai (kintamosios įtamos matavimo režimas AC, *angl.* alternating current). Kai Y įėjimas atviras signalo nuolatinei dedamajai (suminės įtamos matavimo režimas DC, *angl.* direct current). oscilograma pasilenka nuolatinės įtamos ženklo kryptimi

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

ir galime išmatuoti nuolatinę įtampą dedamąją U_0 ir suminės įtampos didžiausią vertę $U_0 + U_m$.



4.24 pav. Nuolatinės ir kintamos įtampos sumos matavimas

4.6.2. Laiko intervalų matavimas

Dažniausiai oscilografu tiriami periodiniai signalai. Jų pagrindinis laiko parametras, kaip žinoma, yra *periodas*.

Signalų periodo trukmė T (4.23. pav.) arba bet kuris kitas signalo laiko intervalas Δt (gali būti ir mažesnis ir didesnis už periodą) yra apskaičiuojami dauginant oscilografo horizontalios skleistinės koeficientą k_s , išreikštą *laiko vienetai/padalai*, iš matuojamą laiko intervalą atitinkančių oscilografo horizontalios skalės padalų skaičiaus L arba l :

$$T = k_s L, \quad \Delta t = k_s l. \quad (4.2)$$

Jeigu reikia, signalo dažnis f yra apskaičiuojamas:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{k_s L}.$$

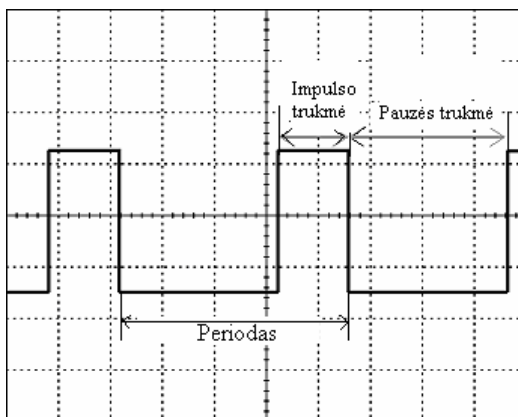
Matuojant signalų laiko parametrus oscilografu reikia, kad matuojamo laiko intervalo užimamas matmuo būtų artimas skleistinės ilgiui. Tam reikia pasirinkti atitinkamą skleistinės koeficientą. Turi būti nustatytos kalibruotos skleistinės koeficiento vertės. Todėl toks laiko intervalų matavimo būdas yra vadinamas

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

kalibruotos skleistinės būdu. Reikia patikrinti ar neaktyvuotas *skleistinės greičio padidinimo režimas* X-MAG (*angl.* X magnification). Jeigu taip, tai X ašies mastelis yra pakeistas (dažniausiai dešimt kartų pagreiktas (x10)) ir (4.2) formulės teikiamas rezultatas turi būti padalintas iš 10.

Periodiniai impulsinės formos signalai irgi charakterizuojami periodu ir dažniu. Tačiau jie yra charakterizuojami ir kitais specifiniais laiko parametrais: *impulso trukmė* (pločiu), atstumu tarp impulsų (*pauzės trukmė* arba pločiu) (4.25 pav.) ir impulsų *frontų trukmėmis* (4.26 pav.).

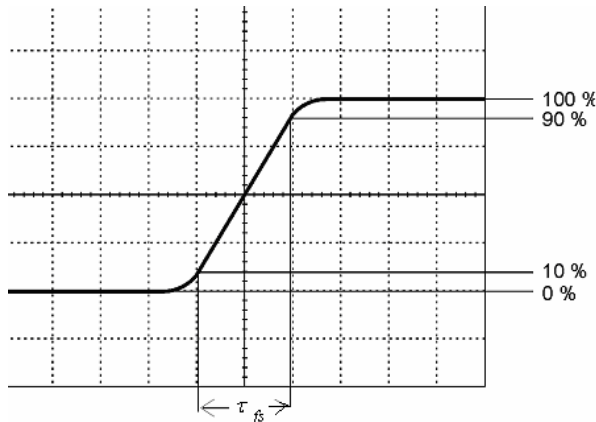
Kaip išsiaiškinome 3 skyriuje, impulso fronto užaugimo laikas ir fronto kritimo laikas yra vieni svarbiausių impulsų parametrų. Kaip žinome, šis laikas matuojamas kaip atstumas laike tarp dviejų taškų, atitinkančių 10 % ir 90 % nuo impulso amplitudės (4.26 pav.).



4.25 pav. Pagrindiniai impulsinių signalų laiko parametrai

Tai daroma siekiant išvengti pereinamųjų procesų ir kitų faktorių sukeliamų impulsų iškraipymų įtakos matavimo tikslumui. Iš oscilogramos impulso fronto užaugimo (kritimo) laikas apskaičiuojamas dauginant horizontalų atstumą tarp dviejų taškų, atitinkančių 10 % ir 90 % nuo impulso amplitudės, išreikštą horizontalios skalės padalomis iš skleistinės koeficiento kalibruotos vertės.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas



4.26. pav. Impulso fronto užaugimo laiko matavimas.

Kaip buvo aptarta 4.2.3 punkte, matuojant trypas impulsų frontų trukmes, matavimo rezultata gali itakoti oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikas, nes išmatuotas oscilografo ekrane fronto trukmės laikas yra paties impulso fronto trukmės ir oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikų suma:

$$\tau_{fs} = \sqrt{\tau_{fi}^2 + \tau_{osc}^2} \quad (4.3)$$

Jeigu oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikas yra artimas impulso fronto trukmei, tai jis gali labai padidinti matavimo rezultata. Todėl reikia, kaip minėta 4.2.3 punkte, pasirinkti oscilografą su tinkamu pereinamosios charakteristikos užaugimo laiku, arba jį įvertinti, apskaičiuojant rezultata:

$$\tau_{fi} = \sqrt{\tau_{fs}^2 - \tau_{osc}^2} .$$

Oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laikas paprastai nurodomas oscilografo aprašyme. Jeigu tokio parametro nėra, tai jis apskaičiuojamas iš oscilografo praleidžiamų dažnių juostos pločio. Reikia neužmiršti, kad juostos plotis priklauso ir nuo to kokie jungiamieji kabeliai ir zondai naudojami.

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Skaičiuojant oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laiko trukmę iš jo praleidžiamų dažnių juostos pločio patogiu naudoti tokį modifikuotą formulės variantą:

$$t_{osc,ns} = \frac{350}{\Delta f_{MHz}}.$$

4.6.3. Dažnio matavimas oscilografu XY režime

XY darbo režimo atveju vienas iš signalų yra paduodamas į Y kanalą, o antras į X kanalą.

Šiuo atveju oscilografo laiko bazė nenaudojama. Horizontalų kreipimą vykdo prie X kanalo prijungta išorinė įtampa.

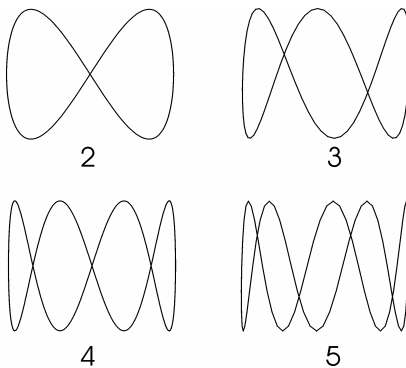
Naudojant šį režimą, galima palyginti prie Y ir X kanalų prijungtų harmoninių virpesių dažnį. Abejomis kryptimis kreipimas vyksta harmoniniais dėsniais. Kai dažniai yra kartotiniai, įvykdoma sinchronizacijos sąlyga ir ekrane gaunamas tam tikros Lissazū figūros vaizdas (4.27 pav.). Pagal figūros pobūdį galime apskaičiuoti dažnių kartotinumą. Kai vienas iš dažnių yra tiksliau žinomas, antrojo virpesio dažnį galima apskaičiuoti. Kurį virpesį jungti prie kurio kanalo principinio skirtumo nėra. Tačiau oscilografo X kanalo praleidžiamų dažnių juosta yra siauresnė, todėl prie jo geriau jungti žemesnio dažnio virpesį. Tikslaus dažnio virpesio dažnis turi būti keičiamas, kad galima būtų įvykdyti sinchronizacijos sąlygą ir gauti stabilios Lissazū figūros vaizdą. Detaliau šis dažnio matavimo būdas yra nagrinėjamas 5 skyriuje.

4.6.4. Fazių skirtumo matavimas oscilografu

To paties dažnio harmoninių virpesių fazių skirtumą galima išmatuoti oscilografu, turinčiu du ar daugiau vertikalios kreipimo kanalų. Naudojamas sudvejintas oscilografo vertikalios kreipimo kanalų darbo režimas (*angl.* dual mode). Oscilografo laiko bazė sinchronizuojama vienu iš signalų. Signalų fazių skirtumas, išreikštas laipsniais, yra apskaičiuojamas išmatavus oscilogramoje (4.28 pav.) atstumą l atitinkantį signalų laiko skirtumą ir atstumą L , atitinkantį signalo periodą, pagal formulę:

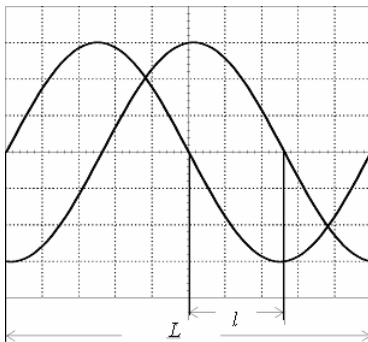
4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

$$\Delta\varphi = \frac{t}{T} \cdot 360^\circ = \frac{l}{L} 360^\circ.$$



4.27 pav. Lissazu figūrų formos kai vertikalaus kreipimo kanalo signalo dažnis 2, 3, 4 arba 5 kartus didesnis už horizontalaus kreipimo kanalo signalo dažnį

Tam, kad matavimų tikslumas būtų didesnis reikia, kad signalo periodas užimtų beveik visą oscilografo ekrano ilgį. Pageidautina, kad abiejų signalų aukščiai būtų vienodi. Abi oscilogramos turi būti išdėstytos simetriškai ekrano nulinio lygio linijos atžvilgiu. Kai signalai turi nuolatinę dedamąją reikia naudoti nuolatinei dedamajai uždara oscilografo įėjimą (AC darbo režimas).



4.28 pav. Fazių skirtumo matavimas oscilografu dviejų kanalų sudvejintu darbo režimu

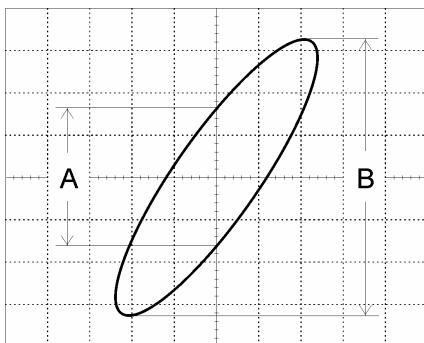
4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

Kai fazių skirtumai maži, geriau naudoti Lissažu figūrų metodą. Naudojamas oscilografo XY darbo režimas. Signalai, kurių fazių skirtumas matuojamas yra paduodami į X ir Y įėjimus. Kadangi signalų dažnis yra vienodas, gaunama paprasčiausia Lissažu figūra – elipsė. 4.29 pav. parodytas stebimos Lissažu figūros vaizdas ir oscilogramos matmenys, kurie naudojami fazių skirtumo apskaičiavimui.

Išmatavus atstumus A ir B oscilografo ekrane, įtampų fazių skirtumas apskaičiuojamas taip:

$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{A}{B}.$$

Fazių skirtumo ženklas lieka nežinomas. Šio matavimo metodo ypatumai bus nagrinėjami 5 skyriuje.



4.29 pav. Fazių skirtumo matavimas elipsės būdu

Charakteringos Lissažu figūros, gaunamos kai fazių skirtumas yra 0° , 45° , 90° ir 180° laipsniai, yra parodytos 4.30 paveiksle.



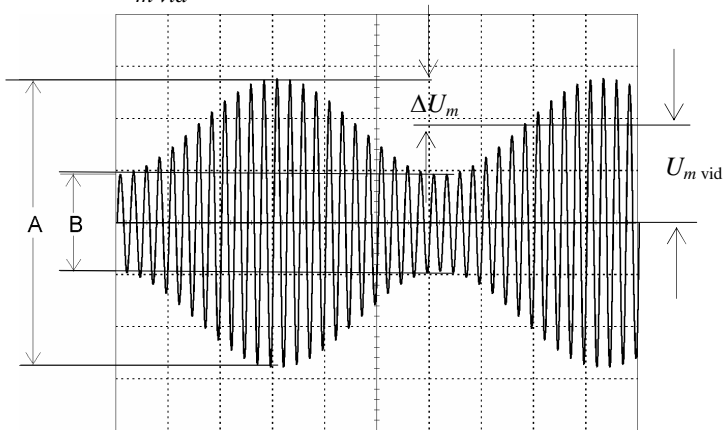
4.30 pav. Lissažu figūros, stebimos kai yra įvairūs signalų fazių skirtumai

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

4.6.5. Amplitudinės moduliacijos gylio matavimas oscilografu

Kai aukšto dažnio harmoninio virpesio amplitudė yra valdoma žemesnio dažnio virpesiu, turime moduluotosios amplitudės virpesį. Kai moduluojantis virpesys taip pat yra harmoninis, tai per moduluojančio virpesio periodą aukštojo dažnio virpesio amplitudė įgyja didžiausią ir mažiausią vertes (4.31 pav.). Jeigu moduliacija yra simetrinė, tai amplitudės nuokrypis ΔU_m nuo vidutinės amplitudės vertės $U_{m \text{ vid}}$ gaunamas vienodas. Nuokrypio santykinė vertė rodo amplitudinės moduliacijos gylį. Dažniausiai jis yra reiškiamas procentais:

$$m = \frac{\Delta U_m}{U_{m \text{ vid}}} 100, \%$$



4.31 pav. Amplitudinės moduliacijos gylio matavimas

Paprasčiausias metodas matuoti harmoninės amplitudinės moduliacijos gylį oscilografu yra paduoti moduluotą virpesį į oscilografo Y įėjimą ir susinchronizuoti jo laiko bazę taip, kad ekrane stabiliai matytųsi moduluoto virpesio gaubtinės periodas. Tada galima iš oscilogramos nustatyti vidutinį amplitudės dydį ir nuokrypį nuo amplitudės. Kadangi abu dydžiai būtų skaičiuojami naudojant tą patį kreipimo koeficientą, tai galima imti tik juos vertinančių oscilogramos atkarpų santykį, neperskaičiuojant jų į įtampas. Kai moduliacija simetriška, tai moduliacijos gylį yra

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

patogiau skaičiuoti pagal amplitudžių sklaidos dydžius: didžiausią A ir mažiausią B :

$$m = \frac{A - B}{A + B} \cdot 100, \%$$

Matuojant moduliacijos gylį šiuo metodu vertikalaus kreipimo koeficientas parenkamas toks, kad matmuo A užimtų beveik visą ekrano aukštį. Tada gaunamos mažesnės atstumų matavimų paklaidos ir tikslesnis matavimo rezultatas.

Patekti įvairių virpesių parametrų matavimo pavyzdžiai neapima visų oscilografais vykdomų virpesių parametrų matavimų atvejų ir yra tik dažniau naudojamų matavimų pavyzdžiai. Visais atvejais oscilogramose matuojami atstumai, todėl reikia, kad matuojant jie būtų kiek galima didesni, tuomet jų ilgio, išmatuoto oscilografo tinkelio padalos žingsniu, matavimo paklaidos bus mažesnės.

4.7. Klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Kokia oscilografų paskirtis ir kaip jie klasifikuojami?
2. Iš kokių svarbiausių struktūrinių dalių susideda analoginis ir analoginis-skaitmeninis elektroniniai oscilografai? Paaiškinkite kaip veikia jo elementai ir kokie reikalavimai jiems keliami.
3. Suformuluokite sąlygas, kurias įvykdžius oscilografo ekrane bus matomas neiškraipytas signalo vaizdas?
4. Kokia analoginių oscilografų vertikalaus kreipimo kanalo signalo vėlinimo linijos paskirtis?
5. Koks dydis vadinamas oscilografo kanalo vertikalaus kreipimo koeficientu? Koks jo ryšys su kanalo jautriu įtampa? Nuo kokių oscilografo schemos elementų savybių priklauso?
6. Kokie oscilografo kanalo įėjimo grandinės parametrai daro įtaką matuojamiems signalo parametrams? Kaip ta įtaka mažinama?
7. Kas yra sinchronizacija? Kokios sinchronizacijų rūšys naudojamos ir kada?
8. Į oscilografo Y įėjimą yra paduota signalo įtampa, o ekrane matomas šviesaus stačiakampio vaizdas. Ką tai reiškia? Ką reikia daryti, kad matytųsi normali signalo oscilograma?

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

9. Kas yra skleistinė ir kokios jų rūšys naudojamos? Kada naudojama periodinė skleistinė?

10. Kada naudojama laukianti skleistinė?

11. Kokį dydį vadina oscilografo skleistinės koeficientu? Koks jo ryšys su skleistinės greičiu? Nuo ko priklauso?

12. Kaip veikia oscilografo skaitmeniniai signalų parametrų matuokliai?

13. Kokios matavimo paklaidų priežastys, matuojant virpesių parametrus oscilografu?

14. Oscilografo skleistinės koeficientai atitinkamai yra, pavyzdžiui, 50 ms/pad. ir 0,2μs/pad (1 pad. = 6 mm). Koks skleistinės greitis?

15. Paaiškinkite koks yra stroboskopinio oscilografo sudarymo principas ir kokie jo parametrai nustato laiko mastelio transformacijos koeficiento dydį?

16. Nubraižykite supaprastintą stroboskopinio keitiklio struktūrinę schemą ir paaiškinkite veikimą. Nuo ko priklauso signalo įtampos momentinių verčių imčių skaičius tenkantis signalo periodui?

17. Kokie svarbiausi skaitmeninės atminties ir skaitmeninių oscilografų struktūrinės schemos elementai?

18. Nuo ko priklauso skaitmeninės atminties ir skaitmeninių oscilografų vertikalios kreipimo kanalo skiriamoji geba?

19. Kaip sudaryta strobavimo schema? Kam reikalingas analoginis įtampos momentinės vertės elementas?

20. Kaip vaizduojama oscilograma skaitmeninės atminties ir skaitmeniniuose oscilografuose? Kas yra interpoliavimas ir koks jis naudojamas skaitmeninės atminties ir skaitmeniniuose oscilografuose?

21. Kaip vykdomas signalo strobavimas realiame laike skaitmeniniuose oscilografuose?

22. Kaip vykdomas signalo strobavimas ekvivalentiniame laike skaitmeniniuose oscilografuose? Kuo skiriasi nuoseklusis ir atsitiktinis strobavimas ekvivalentiniame laike?

23. Kaip susijęs signalo dažnis ir strobavimo dažnis įvairių strobavimo būdų atvejais?

24. Kas yra signalo įrašo ilgis ir nuo ko jis priklauso?

4. Elektroniniai oscilografai ir jų taikymas

25. Kokius virpesių parametrus galima išmatuoti elektroniniu oscilografu/

26. Kokie pagrindiniai oscilografų metrologiniai parametrai?

27. Kaip oscilografu matuojama įtampa?

28. Kaip oscilografu matuojami signalų laiko parametrai?

29. Kokia oscilografo pereinamosios charakteristikos užaugimo laiko trukmė, jeigu jo praleidžiamų dažnių juostos ribinis dažnis yra 700 MHz? Kokias impulsų frontų trukmes juo galima matuoti neviršijant $\pm 5\%$ paklaidos?

30. Kaip oscilografu matuojamas fazių skirtumas?

31. Kokios oscilogramos gaunamos kai matuojamas fazių skirtumas yra $0^\circ, 90^\circ$ ir 180° ?

32. Oscilografu matuojamas fazių skirtumas. Oscilogramos (4.29 pav.) atkarpos gautos tokios: $B = 40$ mm, $A = 20$ mm. Atstumų matavimo standartinės paklaidos yra ± 1 mm. Koks signalų fazių skirtumas ir kokia jo matavimo standartinė paklaida? Nurodymas: reikia naudoti netiesioginių matavimų paklaidų vertinimo metodus.

33. Kaip oscilografu gali būti matuojamas periodinių virpesių dažnis?

34. Kas yra virpesio amplitudės moduliacija?

35. Koks parametras vertina amplitudinės moduliacijos gylį?

36. Kaip oscilografu galima išmatuoti nesimetrinės ir simetrinės amplitudinės moduliacijos gylius/

37. Kaip sinchronizuojamas oscilografas matuojant amplitudinės moduliacijos gylį?

38. Matuojant oscilografu amplitudinės moduliacijos gylį gauti, pavyzdžiui, tokie rezultatai (4.31. pav.): $A = 70$ mm, $B = 10$ mm. Koks moduliacijos gylis ir kokia jo ribinė matavimo paklaida, jeigu A ir B atkarpų matavimo ribinė paklaida yra $\pm 10\%$?