

Dažnio ir laiko intervalų matavimas

Šiame skyriuje nagrinėjamos matavimo priemonės ir metodai skirti periodinių virpesių dažniui ir periodui matuoti. Aptariami ir skaitmeniniai impulsų trukmės bei laiko intervalų tarp impulsų matavimo metodai.

Elektronikos įtaisuose ir sistemose naudojamų periodinių virpesių dažnių ir periodų diapazonas yra labai platus ir nėra universalus metodo arba matavimo priemonės, kuri tiktų visam tokiam plačiam dažnių ir periodų intervalui. Todėl yra sukurta ir naudojama daug įvairių matavimo metodų ir priemonių.

Metodai ir priemonės yra nagrinėjami juos suskirsčius į analoginius ir skaitmeninius.

Daugiau dėmesio yra skiriama šiuo metu plačiau naudojamų skaitmeninių matavimo metodų ir priemonių pristatymui, tačiau nagrinėjami ir kiti dar gana plačiai naudojami būdai: rezonansiniai ir heterodininio dažnių palyginimo.

5.1. Bendrosios žinios ir klasifikavimas

Periodinio virpesio *periodu* T vadinamas mažiausias laiko tarpas per kurį pasikartoja laisvai pasirinkta virpesio momentinė vertė ir jos

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

kitimo laike dėsningumas: $s(t) = s(t+kT)$, $k = 1, 2, 3, \dots$. Periodo, kaip ir kitų laiko intervalų SI sistemos matavimo vienetas yra *sekundė* (s). Periodinio virpesio *dažnis* apibrėžiamas kaip dydis atvirkščias periodui: $f = 1/T$. Dažnio matavimo vienetas SI sistemoje yra *hercas* ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$). Realūs virpesiai nėra griežtai periodiniai, jų periodui būdingas ir lėtas tolydusis kitimas (*dreifas*) ir greitai svyravimai (*fluktuacijos*). Kintantis laike tokių artimų periodiniams (*kvaziperiodinių*) virpesių dažnis vadinamas *momentiniu dažniu*.

Realaus, artimo harmoniniam (*kvaziharmoninio*), virpesio $s(t) = A(t) \cos \Psi(t) = A(t) \cos \{[(\omega_0 + \Delta\omega(t))t + \varphi(t)]\}$ *momentinis kampinis dažnis* apibrėžiamas kaip jo momentinės fazės Ψ kitimo greitis: $\omega(t) = \frac{d\Psi}{dt}$. Jis matuojamas *radianais per sekundę* (rad/s). Tokio virpesio kampinį dažnį, dažnį ir periodą sieja žinoma priklausomybė: $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$. Idealaus harmoninio virpesio visi minėti parametrai yra pastovūs dydžiai.

Sklindant harmoniniam virpesiui plokščios elektromagnetinės bangos pavidalu vienalytėje terpėje su pastoviais elektromagnetiniais parametrais, jos nueitas kelias per periodą – *bangos ilgis* yra

atvirkščiai proporcingas virpesio dažniui: $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\varepsilon\mu}}$; čia v yra

bangos greitis terpėje, ε ir μ – atitinkamai terpės elektrinė ir magnetinė konstantos, o c – šviesos greitis vakuume, lygus 299 792 458 m/s tiksliai.

Laiko intervalai matuojami tarp pasirinktų to paties virpesio momentinių verčių (pavyzdžiui, artimo stačiakampiui impulsinio virpesio priekinio fronto trukmė arba paties impulso trukmė) arba tarp dviejų skirtingų virpesių pasirinktų momentinių verčių.

Kaip minėta, dažnis nėra idealiai pastovus, todėl paprastai išmatuojamas *vidutinis dažnis* per tam tikrą laiką. Dažnai ir virpesio periodas nustatomas kaip daugelio periodų vidutinė vertė.

Dažnis ir laiko intervalai yra šiuo metu tiksliausiai išmatuojamai fizikiniai dydžiai. Naudojant grupinį laiko ir dažnio etaloną sudarytą iš cezio, rubidžio ir vandenilio kvantinių generatorių gaunama sekundės bei herco santykinė suminė kvadratinė neapibrėžtis apie $\pm 10^{-12}$.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

Elektronikos įtaisuose ir sistemose naudojamų periodinių virpesių dažnių diapazonas yra labai platus. Virpesių dažnius tenka matuoti nuo mažesnių už 0,001 Hz iki aukštesnių už 1000 GHz. Kaip minėta, nėra universalaus metodo arba matavimo priemonės, kuri tiktų visam nurodytam dažnių intervalui. Sprendžiant konkretų matavimo uždavinį, pasirenkamas toks būdas arba priemonė, kuris garantuoja reikiamą rezultato tikslumą. Kuris parametras bus matuojamas – periodas, dažnis ar bangos ilgis – irgi priklauso nuo matavimo uždavinio. Matuojant žemus dažnius, dažnai matuojamas periodas, nes jis gaunamas ilgas ir šiuo atveju jį galime išmatuoti tiksliau nei dažnį. Vidutiniuose dažniuose dažniausiai matuojamas virpesio dažnis, o labai aukštuose dažniuose dažnai matuojamas virpesio bangos ilgis.

Dažnio matavimui sukurta daugybė įvairių metodų. Pagal naudojamus matavimo principus ir priemones jie gali būti suskirstyti į tokias grupes:

1. **Palyginimo būdai** – kai matuojamasis dažnis surandamas jį palyginant su pakankamu tikslumu žinomu kito virpesio dažniu. Šie metodai gali būti sugrupuoti į tokias grupes:

- 1.1. Oscilografiniai metodai;
- 1.2. Heterodinavimo metodai;
- 1.3. Rezonansiniai metodai.

2. **Tiesioginio matavimo būdai** – kai dažnis išmatuojamas tiesiogiai dažnio matuokliais (*dažniamačiais*) arba periodo matuokliais ir po to apskaičiuojamas dažnis. Dažniamačius skirsto į tokias rūšis:

- 2.1. Elektromechaniniai dažniamačiai;
- 2.2. Kondensatoriniai dažniamačiai;
- 2.3. Skaitmeniniai periodo ir dažnio matuokliai.

Pastaruoju metu dažnio matavimo praktikoje labai paplito skaitmeniniai matuokliai, kadangi jie gali matuoti dažnius, dažnių santykį, periodus ir laiko intervalus labai plačiame dažnių ruože (pavyzdžiui, nuo 10 Hz iki 10 GHz). Jų matavimo tikslumas irgi yra aukštas. Tokie matuokliai teikia matavimo rezultatus skaitmeniniu pavidalu, todėl gali būti paprastai integruojami į matavimo–informacines sistemas arba valdomi mikroprocesoriais. Tačiau, kai dažniai yra didesni už apie 600 MHz, tiesioginis skaitmeninis dažnio

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

matavimas yra neįmanomas dėl nepakankamos elektronikos grandinių loginių elementų veikimo spartos. Todėl didesni dažniai yra sumažinami juos perkeltiant žemyn t.y. panaudojamas virpesių heterodinavimo metodas. Centimetrinių ir milimetrinių bangų diapazonuose jau tenka naudoti rezonansinius dažniamačius sugraduotus bangos ilgio vienetais – *bangomačius*.

Žemų ir vidutinių dažnių (iki kelių šimtų MHz) virpesių atveju, kai nereikia didelio tikslumo, dažnį dažniausiai netiesiogiai matuoja oscilografu. Oscilografas, kaip universali virpesių stebėjimo ir parametrų matavimo priemonė, dažnai būna laboratorijose ir toks jo panaudojimas pasiteisina.

Įvertinus tai kas aukščiau išdėstyta, apsiribosime detalesniu oscilografinių metodų, rezonansinių metodų ir ypač skaitmeninių metodų aptarimu.

5.2. Oscilografiniai dažnio ir laiko intervalų matavimo būdai

Matavimams yra naudojamas elektroninis oscilografas. Dažniui matuoti dažniausiai naudojamas *kalibruotos skleistinės būdas*. Taip pat kartais oscilografas naudojamas kaip palyginimo priemonė (*komparatorius*) palyginant etaloninį kito generatoriaus dažnį su matuojamuoju dažniu – vykdomas palyginimas pagal *Lisažu figūras* arba naudojant *apskritiminės skleistinės metodą*. Kai kurie būdai jau yra aptarti 4 skyriuje nagrinėjant kai kuriuos oscilografinius virpesių parametrų matavimo būdus. Tačiau siekiant juos plačiau aptarti kitų oscilografinių dažnio matavimų kontekste, jis bus pakartotinai smulkiau aptarti.

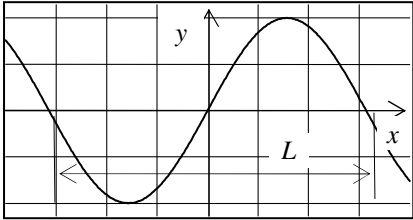
5.2.1. Tiesinės kalibruotos skleistinės būdas

Šis būdas yra labai paprastas: užtenka panaudoti tik oscilografo Y įėjimą. Tačiau matuoti galima tik tada, jei yra žinomos diskretinės kalibruotos skleistinės koeficiento k_y vertės.

Į oscilografo Y įėjimą paduodamas nežinomo dažnio f virpesys. Oscilografo ekrane gauname virpesio vaizdą (oscilogramą) (5.1. pav.).

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

Skleistinės koeficientą k_s parenkame tokį, kad ekrane matytųsi pilnas virpesio periodas. Tada išmatuojame virpesio periodą atitinkantį atstumą L oscilografo skalės padalomis. Žinodami padalos vertę (skleistinės koeficientą), apskaičiuojame signalo periodą pagal formulę:



5.1 pav. Virpesio periodą atitinkantis atstumas oscilografo ekrane

$$T = k_s \cdot L ;$$

čia k_s – panaudotas matuojant skleistinės koeficientas.

Kuomet skleistinės greičio nepakanka, matuojamas kelių periodų ilgis ir gautas rezultatas atitinkamą skaičių kartų

sumažinamas.

Kaip matosi iš aptartos formulės, matuojamas periodas yra palyginamas su oscilografo skleistinės generatoriaus periodu T_s (per skleistinės koeficientą), o matavimo tikslumas priklauso nuo ilgio matavimo tikslumo ir skleistinės koeficiento kalibravimo tikslumo. Ilgio matavimo tikslumas priklauso nuo ekrano darbinės dalies ilgio ir virpesio vaizdo linijos storio. Šiuolaikinių oscilografų ilgio matavimo paklaida paprastai neviršija $\pm 1\%$. Skleistinės koeficiento paklaida analoginiams oscilografams yra apie $\pm(3 \div 5)\%$. Taigi skleistinės koeficiento paklaida riboja šio metodo tikslumą.

5.2.2. Harmoninės skleistinės arba Lisažu figūrų metodas

Matavimo schema pateikta 5.2a paveiksle. Čia G2 yra keičiamo dažnio generatorius, kuris teikia etaloninio dažnio virpesį. Šis virpesys paprastai paduodamas į oscilografo X įėjimą, nes šio kanalo jautris yra mažesnis, o generatoriaus įtampa gali būti pasirinkta reikiamo didumo. Keisdami etaloninio generatoriaus G2 dažnį, esant tam tikrai jo vertei f_0 , oscilografo ekrane gauname tam tikro sudėtingumo Lisažu figūrą (5.2b pav.).

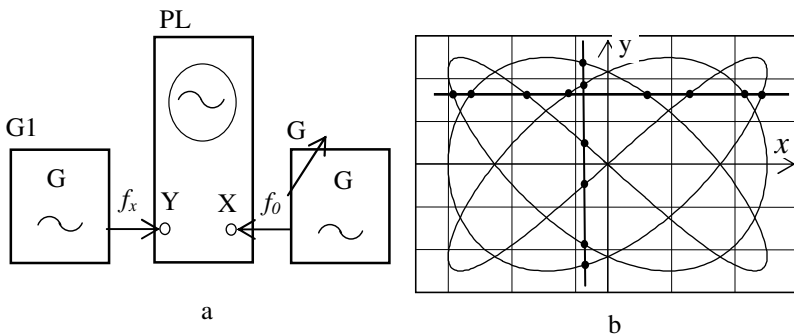
Ant Lisažu figūros brėžiame vertikalią ir horizontalią tieses, kaip parodyta 5.2b paveiksle ir skaičiuojame šių tiesių susikirtimo su

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

figūra didžiausią taškų skaičių n_y ir n_x . Dėl virpesių dažnių fluktuacijų Lisažu figūros vaizdas nėra stabilus. Todėl matavimas paprastai dar įmanomas kai santykis n_y/n_x nemažesnis už 0,1 arba neviršija 10. Nežinomas dažnis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f = f_0 \cdot \frac{n_x}{n_y};$$

čia n_x – maksimalus Lisažu figūros susikirtimų su horizontalia linija skaičius, n_y – maksimalus Lisažu figūros susikirtimų su vertikalia linija skaičius, f_0 – etaloninio generatoriaus virpesio dažnis.



5.2 pav. Matavimo schema, naudojanti Lisažu figūrų metodą (a) ir Lisažu figūros susikirtimo su tiesėmis maksimalaus taškų skaičiaus nustatymas (b)

Kartotinumas patogus tuo, kad galima išmatuoti dažnį žymiai platesniame dažnių ruože nei gali generuoti etaloninis generatorius.

Matavimo paklaida priklauso tik nuo etaloninio generatoriaus dažnio paklaidos, jei n_x ir n_y yra suskaičiuoti tiksliai.

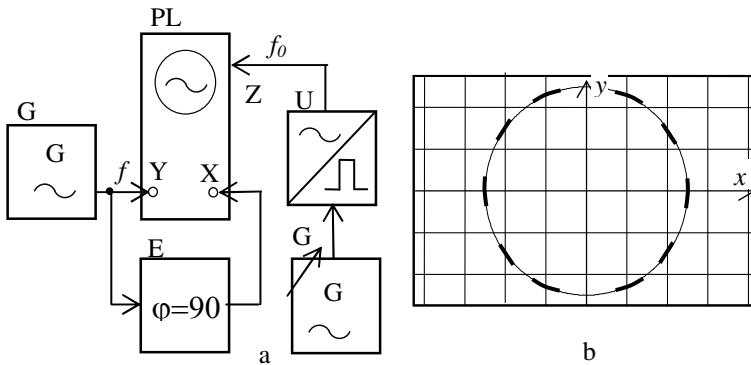
5.2.3. Apskritiminės skleistinės metodas

Šiam metodui panaudojami visi trys oscilografo įėjimai – X, Y, Z. Per Z įėjimą yra valdomas oscilogramos skaistis. Matavimo schema pateikta 5.3a paveiksle.

Matuojamo dažnio virpesys atlieka oscilografo spindulio skleidimą vertikalia kryptimi tiesiogiai, o horizontalia kryptimi per fazės sukiklį, pasukantį virpesio fazę 90 laipsnių kampą. Taigi

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

vyksta spindulio harmoninė skleistinė ortogonaliois kryptimis ortogonaliais harmoniniais virpesiais. Tokiu atveju oscilografo ekrane gaunamas ovalo vaizdas. Parinkus oscilografo X ir Y kanalų kreipimo koeficientus, galime gauti apskritimo vaizdą. Tai ir yra *apskritiminė skleistinė*. Etaloninio dažnio generatorius G_2 teikia dažnį f_0 , o iš jo virpesio impulsų formuotuvas IF formuoja trumpus impulsus, paduodamus į Z įėjimą. Oscilografo ekrane gauname apskritimu išsidėsčiusias skaisčio žymes (6.3b pav.), kurių ilgis priklauso nuo suformuotų impulsų trukmės.



5.3 pav. Matavimo schema, naudojanti apskritiminės skleistinės metodą (a) ir oscilografo ekrane apskritimu išsidėsčiusias skaisčio žymes (b)

Jeigu $f_0 = mf$, kur m – sveikas skaičius, ekrane gauname m skaisčio žymių. Matuojamas dažnis yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f = \frac{f_0}{m}.$$

Kadangi virpesių dažniai nėra idealiai stabilūs, tai skaisčio žymės sukasi bei svyruoja. Vaizdas trumpam sustabdomas, parinkus tam tikrą etaloninio generatoriaus dažnį. Kad neapsiriktume skaičiuodami, taškų skaičius turėtų neviršyti 20. Toks yra ir didžiausias galimas dažnių kartotinumai.

Šio metodo matavimo tikslumas irgi priklauso tik nuo etaloninio generatoriaus dažnio paklaidos.

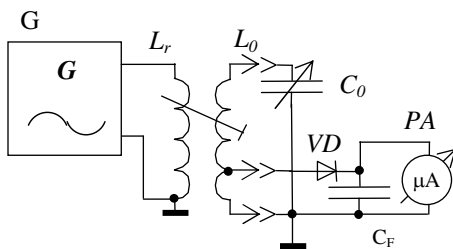
5.3. Rezonansiniai dažnio matavimo būdai

Naudojami radijo virpesių dažniams matuoti. Matuojamų dažnių diapazonas nuo 50 kHz iki 50 GHz. Šis būdas netinka žemiems dažniams matuoti, nes reikia geros kokybės kontūrų.

Matuojamasis dažnis yra palyginamas su kalibruoto virpesių kontūro rezonansiniu dažniu. Šį metodą realizuojantys matuokliai – **rezonansiniai dažniamačiai** – sudaryti iš etaloninių elementų rezonansinių virpesių kontūro, kurio rezonanso dažnį galima keisti tam tikrose ribose ir rezonanso indikatorius. Juo dažniausiai būna paprasčiausias detektorinis voltmetras.

Kai dažniai yra iki kelių šimtų megahercų, virpesių kontūrą sudaro iš diskrečių elementų: keičiamos etaloninės induktyvumo ritės L_0 ir etaloninio orinio kintamosios talpos kondensatoriaus C_0 (5.4 pav.).

Dažnis randamas suderinant virpesių kontūrą rezonansui matuojamajam dažniui ir atskaitant kontūro rezonanso dažnį iš jo kintamosios talpos kondensatoriaus sugraduotos skalės. Siekiant gauti platesnį matuojamųjų dažnių diapazoną, dažniamačio ritės, kaip minėta, daromos keičiamomis, o kondensatoriaus skalė graduojama sąlyginiais vienetais pagal etaloninį dažniamatį. Kiekvienai ritei sudaromos atskiros dažniamačio gradavimo lentelės, leidžiančios pagal skalės atskaitas apskaičiuoti dažnį.



5.4 pav. Rezonansinis dažniamatis su ryšio rite

Kadangi įneštinės reaktyviosios varžos išderina kontūrą, o įneštinės aktyviosios varžos mažina jo kokybę, tai dažniamačio kontūro ryšys su matuojamojo dažnio virpesių šaltiniu ir rezonanso

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

indikatoriumi privalo būti silpnas. Ryšiui su virpesių šaltiniu sudaryti naudojama ryšio ritė L_r . (5.4 pav.).

Ryšys su indikatoriumi dažniausiai įvykdomas dalinai prijungiant jį prie virpesių kontūro ir jo ineštinių varžų įtaka kontūro parametrams ir tuo pačiu jo rezonansiniam dažniui ir kokybei sumažėja.

Rezonansinių dažniamačių matavimo paklaidos gaunamos dėl jo kontūro rezonansinio dažnio gradavimo netikslumo ir jo nestabilumo, atsirandančio dėl kontūro elementų parametrų kitimo laike ir dėl klimatinų sąlygų įtakos, ypač veikiant temperatūrai ir kintant kontūro geometriniais matmenimis. Metodo paklaida gaunama dėl kontūro netikslaus suderinimo rezonansui su matuojamuoju dažniu. Ji priklauso nuo indikatoriaus skyros gebos ir kontūro kokybės ir, kai naudojamas detektorinis voltmetras su tiesiniu režimu veikiančiu detektoriumi, kaip žinoma yra lygi:

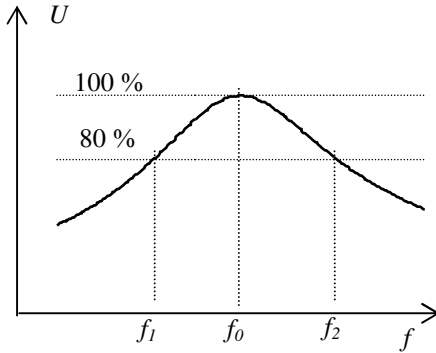
$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \frac{\sqrt{\frac{\Delta U}{U_0}}}{2Q_e};$$

čia U_0 – indikatoriaus rodmuo esant rezonansui, ΔU – mažiausias stebimas indikatoriaus rodmens pokytis, esant kontūro išderinimui nuo rezonanso per Δf , o Q_e – kontūro ekvivalentinė kokybė.

Formulė gauta kai rezonanso kreivė atitinka silpną ryšį. Kai ryšys artėja prie kritinio, rezonanso kreivės viršūnė tampa plokštesnė ir ši paklaida dar padidėja. Kaip matome esminė galimybė mažinti paklaidą yra didinti kontūro kokybę. Sumažinti šios paklaidos įtaką galima taikant vadinamąjį „šakutės“ būdą (5.5 pav.). Kontūras išderinamas simetriškai į abi puses nuo rezonanso iki tam tikro vienodo indikatoriaus rodmens ir skaičiuojamas gautų dažnių aritmetinis vidurkis: $f = f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}$.

Pastaruoju metu rezonansiniai dažniamačiai praktiškai naudojami tik superaukštųjų dažnių diapazonuose. Juose kaip virpesių kontūrai naudojamos arba koaksialinių linijų rezonansinės atkarpos arba tūriniai rezonatoriai.

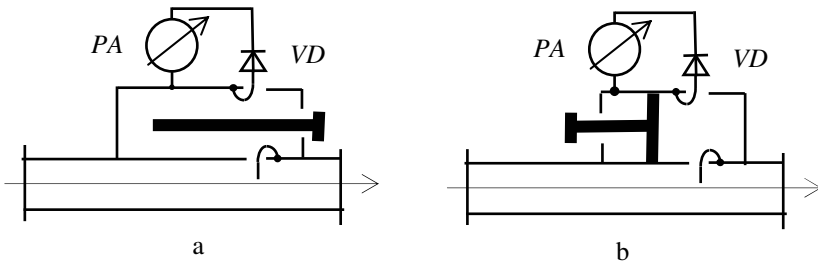
5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas



5.5 pav. Virpesių kontūro rezonanso kreivė ir šakutės metodas

Rezonansinis dažniamatis (bangomatis) su koaksialinės linijos rezonansine keičiamo ilgio atkarpa ir bangolaidis, kuriuo sklindančios bangos ilgį jis matuoja, surišamas ryšio kilpa (5.6a pav.). Atviros gale linijos ilgis keičiamas mikrometriniu sraigtu ir pagal indikatoriaus rodmens maksimumą fiksuojamas rezonanso momentas.

Bangos ilgis atskaitomas mikrometrinio sraigto skalėje. Tokie bangomačiai naudojami dažniams nuo 600 MHz iki 10 GHz. Didesniems dažniams naudojami bangomačiai su tūriniais rezonatoriais (5.6b pav.).



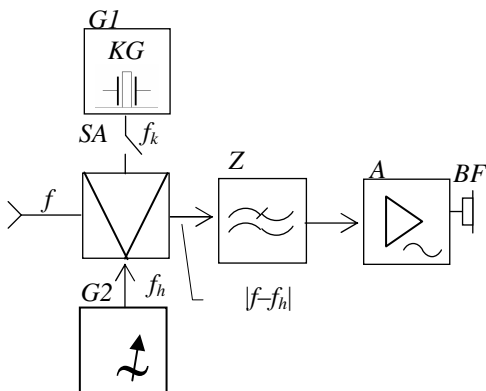
5.6. pav. Rezonansinių bangomačių sandaros schemas: su koaksialine linija (a) ir su tūriniu rezonatoriumi (b)

Rezonansinių dažniamačių ribinė paklaida siekia nuo $\pm 0,01\%$ preciziniams dažniamačiams su tūriniais rezonatoriais iki $\pm 5\%$ dažniamačiams su diskretiniais LC elementais. Jiems reikia pakankami galingo virpesių šaltinio ir jautraus indikatoriaus. Pastaruoju metu rezonansiniai dažniamačiai naudojami išimtinai centimetrinių, milimetrinių ir trumpesnių bangų diapazonuose.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

5.4. Heterodininiai dažnio matavimo būdai

Tiriamo virpesių šaltinio dažnis yra lyginamas su etaloninio generatoriaus – heterodino dažniu. Matuojamų dažnių ruožas yra nuo 50 kHz iki 50 GHz. Jį sąlygoja heterodino savybės. Palyginimas vykdomas pagal diferencialinį nulinį būdą, t.y. stengiamasi surasti tokį heterodino dažnį, kuris būtų lygus matuojamajam dažniui, o šių dažnių skirtumas taptų lygus nuliui. Kadangi virpesiai sumaišomi maišiklyje UZ, tai dažnių skirtumą gali sukurti bet kuri heterodino ir matuojamo dažnio virpesio harmonika. Todėl iš tikrųjų palyginimas vyksta pagal tokią sąlygą: $pf_h - qf = 0$; čia p ir q yra heterodino ir matuojamojo dažnio virpesių šaltinio harmonikų numeriai.



5.7 pav. Heterodininio dažniamačio struktūrinė schema.

Heterodininis metodas yra daugiareikšmis ir siekiant nepadaryti grubių klaidų, reikia apytiksliai žinoti matuojamąjį dažnį ir jo ieškoti iš anksto pasirinktame sugraduotos heterodino skalės taške. Apie tai, kad dažnių skirtumas tapo lygus nuliui dažniausiai sprendžiama klausantis dažnių skirtumo signalo telefono ausine BF, t.y. naudojamas akustinės indikacijos principas.

Dažnių skirtumui nustatyti dažnai naudojama telefono ausinė.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

Akustinės indikacijos metodo paklaida yra ± 20 Hz – dėl ausies girdimo dažnio ribos. Dažnių palyginimui vietoje ausinės gali būti naudojamas žemo dažnio dažniamatis.

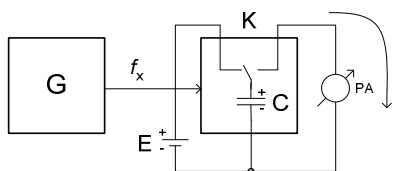
Instrumentinę paklaidą lemia heterodino dažnio paklaida – jo dažnio skalės sugradavimo paklaida, jo dažnio temperatūrinis dreifas ir kitimas laike. Šiai paklaidos daliai sumažinti, prieš matuojant heterodinas pasirinkto matavimui skalės taško aplinkoje patikrinamas pagal vidinio kvarcinio generatoriaus G1 tam tikrą harmoniką ir, esant reikalui, paderinamas t.y. sukalibruojamas.

Tai vieni tiksliausių aukštų dažnių diapazono dažnio matuokliai.

5.5. Kondensatoriniai dažnių matavimo būdai

Matavimo ribos yra nuo dešimčių Hz iki dešimčių MHz.

Dažniamačiai veikia kondensatoriaus įkrovimo/iškrovimo principu. Nežinomo dažnio virpesys paduodamas į komutatorių K (5.8. pav.). Teigiamas pusperiodis komutatorių nustato į vieną padėtį, neigiamas – į kitą. Komutatorius valdo kondensatoriaus įkrovimą ir iškrovimą. Kondensatorius yra iškraunamas per magnetoelektrinį prietaisą PA, kuriuo teka impulsinė srovė i . Prietaisas matuoja vidutinę šios srovės vertę.



5.8 pav. Kondensatorinio dažniamačio veikimo principo schema.

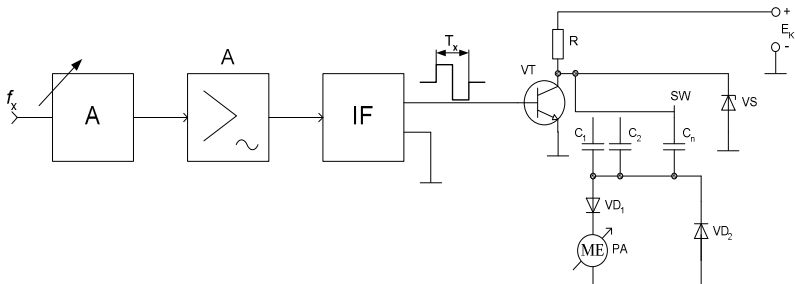
Matavimo lygtis gaunama tokia:

$$f = I_0 \frac{1}{CE}.$$

Tai tiesinė lygtis, todėl gauname dažniamatį su tolydine skale.

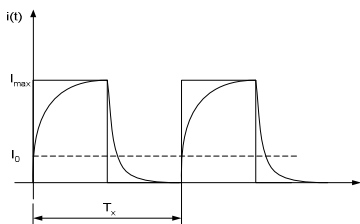
Dažniamačio funkcinė schema pavaizduota 5.9 paveiksle. VS stabilizuoja įtampą, iki kurios bus įkrautas kondensatorius.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas



5.9 pav. Kondensatorinio dažniamačio funkcinė schema.

Keičiant C , keičiamos skalių ribos – diapazonai. Mažinant talpą, didinamas matuojamas dažnis. Kad išmatuotumėme mažą dažnį, reikia didelės talpos kondensatoriaus, o didelės talpos kondensatorių talpa išsibarsčiusi. Didinant dažnį taip pat atsiranda apribojimai, nes reikia mažų talpų kondensatorių, o kondensatorių talpų mažinimą riboja parazitinės talpos – C talpa turi būti bent dešimtis kartų didesnė nei parazitinė. Esant dideliems dažniams, dėl integruojančių grandžių veikimo, prasideda impulsų integravimas (5.10 pav.). Ribinė kondensatorinių dažniamačių paklaida $\pm(1 \div 2) \%$.



5.10 pav. Impulsų integravimas.

5.6. Skaitmeniniai dažnio ir laiko intervalų matavimo metodai

Šiuo metu plačiai taikomi, nes skaitmeninės technologijos gerai išvystytos. Naudojami dažniams matuoti nuo μHz iki GHz eilės ir užtikrina didžiausią matavimų tikslumą ir darbo našumą.

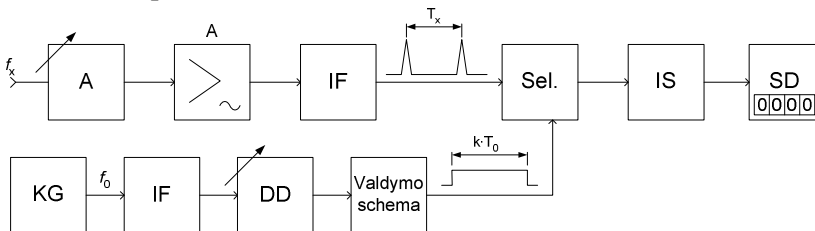
5.6.1. Skaitmeninis dažnio matavimas

Matuojamo virpesio dažnis f nustatomas skaičiuojant virpesio periodų skaičių N per tam tikrą kalibruotą laiką t_0 :

$$f = \frac{N}{t_0}.$$

Tai netiesioginio matavimo būdas, nes rezultatas priklauso nuo t_0 . Jei t_0 bus kartotinis sekundei dekadomis, tai bus tiesioginis matavimas. Pavyzdžiui, jei skaičiuosime periodus per $t_0 = 1$ s, tai rezultatas bus išreikštas Hz, jei per 1 ms, tai rezultatą gausime išreikštą kHz, ir t.t.

Paprasčiausia struktūrinė skaitmeninio dažniamačio schema pateikta 5.11 paveiksle.



5.11 pav. Skaitmeninio dažniamačio struktūrinė schema.

Iėjimo signalas pradžioje padaromas priimtinu impulsų skaitikliui, t.y. suderinamas su toliau esančia skaitmenine dalimi. Tai padaro įėjimo grandinė, kurią sudaro atenuatorius A , plačiajuostis stiprintuvas, impulsų formuotuvus IF . Selektorius impulsų formuotuvo suformuotus skaitinius impulsus praleidžia į impulsų skaitiklį IS tik tada kai veikia valdantis laiko žymių impulsas, kurio trukmė yra kalibruota. Laiko žymes formuoja speciali schemas dalis, kuri sudaryta iš kvarcinio generatoriaus KG , impulsų formuotuvo IF , dažnio daliklio DD ir valdymo schemos. Laiko žymės trukmė yra kvarcinio generatoriaus dažnį dalinančio dažnio daliklio dalinimo koeficientu k ilgesnė už kvarcinio generatoriaus periodą T_0 : $t_0 = k T_0$. Tada skaitmeninio dažnio matavimo lygtis užrašoma taip:

$$f = \frac{N}{kT_0}.$$

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

Nuo laiko žymių formavimo tikslumo labai priklauso dažnio matavimo tikslumas. Kvarciniai generatoriai dažniausiai būna 1 MHz, 5 MHz arba 10 MHz dažnio. Impulsų skaitiklis skaičiavimo rezultatą perduoda į skaitmenų displejų. Kaip minėta, reikia, kad kalibruoto laiko intervalo trukmė būtų dešimtainiu koeficientu kartotina sekunde, tada rezultatas bus gaunamas kaip tiesioginio matavimo ir jo nereikės perskaiciuoti.

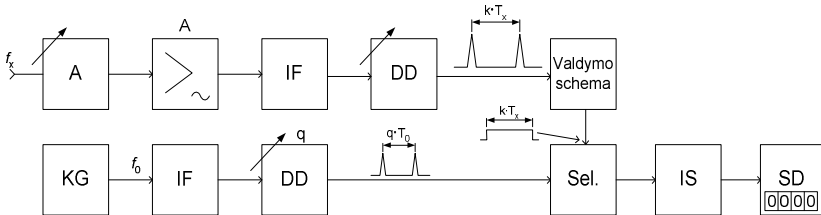
5.6.2. Skaitmeninis periodo matavimas

Periodas matuojamas suskaičiuojant kiek iš kvarcinio generatoriaus periodo T_0 suformuotų laiko žymių telpa į virpesio periodą T

$$T = \frac{q}{k} N T_0,$$

čia: q – kvarcinio generatoriaus dažnio dalinimo koeficientas, k – matuojamų periodų skaičius, N – laiko žymių, tilpusių į k periodų skaičius, T_0 – kvarcinio generatoriaus periodas.

Paprasčiausia struktūrinė periodo matuoklio schema pateikta 5.12 paveiksle.



5.12 pav. Periodo matuoklio struktūrinė schema.

Ši struktūrinė schema labai panaši į skaitmeninio dažniamačio schemą. Panaudotos tos pačios struktūrinės dalys, tik rezultatas gaunamas kitu būdu – selektorių valdo iš įėjimo signalo suformuotos valdančios laiko žymės, o skaičiuojamos iš kvarcinio generatoriaus virpesio laiko žymės.

Dydžiai k ir q , o taip pat ir kvarcinio generatoriaus periodas turėtų būti dekadiniai. Tada rezultato papildomai skaičiuoti nereiktų:

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

rodomas skaičius ir būtų periodas išmatuotas tiesiogiai.

Matavimo tikslumas taip pat priklauso nuo kvarcinio generatoriaus formuojamų laiko žymių tikslumo ir skaičiavimo tikslumo.

5.6.3. Skaitmeninio dažnio ir periodo matavimo paklaidų priežastys

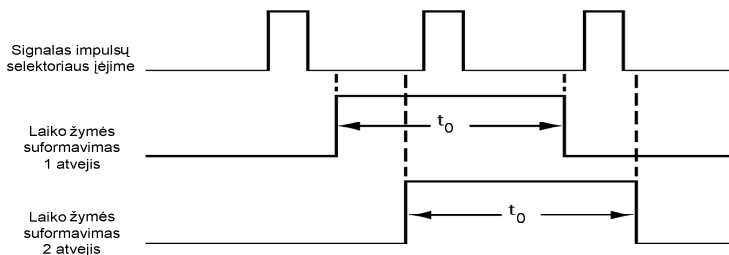
Pagrindinės skaitmeninio dažnio ir periodo matavimo paklaidų dedamosios yra tokios:

- a) metodo paklaida gaunama dėl skaičiavimo diskretiškumo;
- b) kalibruoto laiko intervalo (laiko žymės formavimo) paklaida;
- c) įėjimo grandinės (impulsų formuotuvo) sukeliama paklaida.

Matuojant dažnį, pasireiškia pirmosios dvi, matuojant periodą – visos trys paklaidų rūšys.

Trumpai apžvelgsime minėtas paklaidų rūšis.

Impulsų skaitikliui sumuojant skaitinius impulsus, mažiausiame jo rezultato reikšminiame skaičiuje atsiranda absoliuti ± 1 dydžio skaičiavimo neapibrėžtis (paklaida). Tai apibūdinama kaip diskretizavimo paklaida. Atsiradimo priežastį paaiškina 5.13 paveikslas.



5.13 pav. Diskretizavimo paklaida.

Abiem atvejais kalibruotos laiko trukmės t_0 yra vienodos, o suskaičiuotų impulsų skaičius skiriasi priklausomai nuo laiko žymės veikimo momento.

Antra paklaidos dalis atsiranda dėl kvarcinio generatoriaus virpesio tikrojo dažnio ir jo vardinio dažnio skirtumo bei jo dažnio

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

stabilumo. Dėl šių dydžių neapibrėžčių atsiranda laiko žymių suformavimo paklaidos.

Trečia priežastis tai atsitiktinė paklaida, kuri atsiranda dėl triukšmų įėjime ir iėjimo grandinėje. Kadangi, matuojant periodą, selektorių valdo impulsas suformuotas iš matuojamo virpesio, tai triukšmai įėjime ir formavimo grandinėse sukelia šio impulso trukmės fluktuacijas. Dėl to klaidingai valdomas selektorius.

5.6.4. Dažnio matavimo paklaida

Iš matavimo lygties $f = \frac{N}{kT_0}$, suradę dalines išvestines,

gauname tokią absoliutinės matavimo paklaidos formulę:

$$\Delta f = \frac{\Delta N}{t_0} + \frac{N}{t_0^2} \Delta t_0 .$$

Iš šios formulės gaunama santykinė dažnio matavimo paklaida yra suma dviejų santykinų paklaidų – etaloninio kvarcinio generatoriaus dažnio nestabilumo sukeliama paklaida (adityvi paklaidos dalis) ir diskretinio skaičiavimo sukeliama paklaida (multiplikatyvi paklaidos dalis):

$$\delta_f = \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta N}{N} + \frac{\Delta t_0}{t_0} = \frac{\pm 1}{N} \pm \frac{k \Delta T_0}{k T_0} = \pm \left(\delta_0 + \frac{1}{f \cdot t_0} \right),$$

čia: δ_0 – santykinis etaloninio kvarcinio generatoriaus dažnio nestabilumas – instrumentinė paklaida.

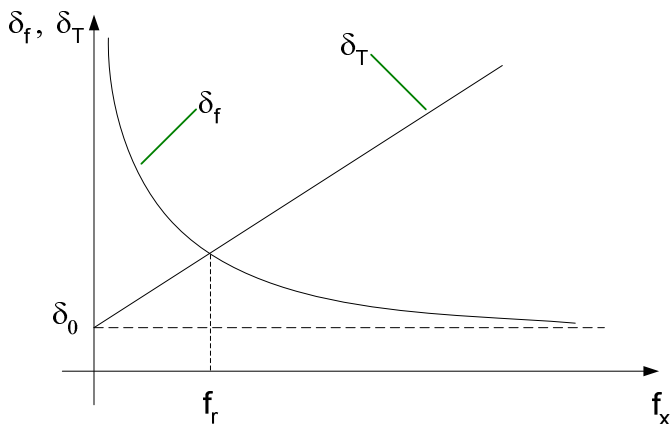
Matuojant žemus dažnius dominuojanti yra diskretinio skaičiavimo (metodo) paklaida, aukštuose – dažnio nestabilumo (instrumentinė) paklaida. Tai paaiškina toks pavyzdys. Tarkime, kad kvarcinio generatoriaus dažnio nestabilumas yra 10^{-7} , tada tokia yra ir instrumentinė paklaida, o metodo paklaida, matuojant 100 MHz dažnį per 1 s bus tik 10^{-8} . Metodo paklaida tampa dominuojanti, kai matuojamas dažnis yra mažas. To paties kvarcinio generatoriaus dažnio nestabilumo ir matavimo laiko atveju, kai matuojamas 100 Hz dažnis, metodo paklaida gaunama jau lygi 10^{-2} .

5.6.5. Periodo matavimo paklaida

Periodo matavimo paklaidą sudaro diskretinio skaičiavimo, etaloninio dažnio nestabilumo ir impulsų formuotuvo sukeltos paklaidos. Paskutinė išvardintų paklaidų dalis paprastai yra nežymi, todėl periodo matavimo santykinė paklaida, gaunama iš matavimo lygties, išreiškiama tokia formule:

$$\delta_T = \frac{\Delta T}{T} = \frac{\pm 1}{N} \pm \delta_0 = \pm \left(\delta_0 + \frac{qT_0 f}{k} \right).$$

5.14 paveiksle pavaizduotos dažnio ir periodo matavimo santykinų paklaidų priklausomybės nuo matuojamo virpesio dažnio.



5.14 pav. Dažnio δ_f ir periodo δ_T matavimo santykinės paklaidos

Iš grafiko matome, kad iki tam tikro ribinio dažnio f_r reikia matuoti periodą, o virš jo – dažnį. Tada matavimų santykinės paklaidos bus mažiausios. Ties ribiniu dažniu periodo ir dažnio matavimo paklaidos yra vienodos. Ribinis dažnis surandamas sulyginus dažnio ir periodo matavimo santykinės paklaidas. Kai $k = q = 1$, tai $f_r = f_0$. Taigi, ribinio dažnio dydį lemia naudojamo etaloninio dažnio generatoriaus dažnis.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

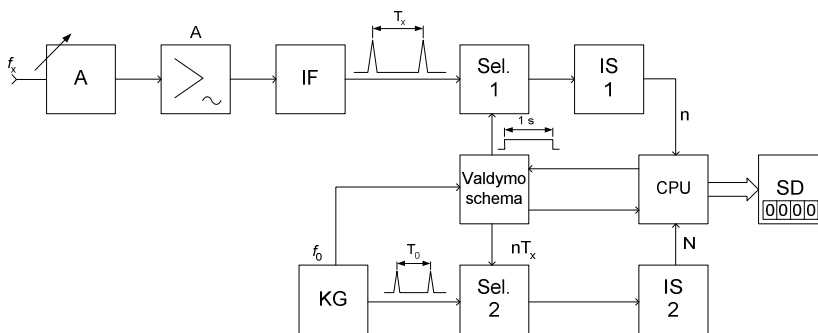
5.6.6. Dažnio ir periodo skaitmeninio matavimo paklaidų mažinimo būdai

Kaip jau minėta anksčiau, skaitmeniniais metodais matuojant, mažuose dažniuose reikia matuoti periodą, aukštuose – dažnį.

Taip pat reikia didinti dažnio ir periodo matavimų laiką, dėl to sumažės metodo paklaida. Matuojant periodą dar galima matuoti kelių periodų trukmę, t.y. didinti k bei mažinti T_0 ir q . Todėl pageidaujamas kiek įmanoma didesnis atraminis dažnis. Dažnai matuojant periodą kvarcinio generatoriaus dažnis yra dauginamas ir q gaunamas mažesnis už vienetą.

Dažnio nestabilumo sukeliama paklaida mažinama stabilizuojant kvarcinio generatoriaus schemos aplinkos temperatūrą, nes temperatūros kitimas yra didžiausias jo dažnį destabilizuojantis veiksnys. Termostabilizacija vykdoma naudojant termostatą. Tokio termostatuoto kvarcinio generatoriaus dažnio nestabilumas yra tik 10^{-9} eilės dydis.

Yra sukurtos specialios skaitmeninių dažniamačių schemos, kurių dažnio matavimo paklaidos plačiame matuojamų dažnių ruože yra pastovios. Tokia schema parodyta 5.15 pav.



5.15 pav. Dažniamatis su vienoda paklaida dažnių ruože.

Valdymo schema ir visas prietaiso darbas kontroliuojamas mikroprocesoriumi CPU. Matavimas susideda iš dviejų ciklų. Valdymo schema suformuoja 1 s trukmės valdymo impulsą pirmam selektoriui ir pirmas impulsą skaitiklis suskaičiuoja per šį laiką

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

atėjusių iš matuojamo dažnio virpesio suformuotų impulsų skaičių n . Mikroprocesorius apskaičiuoja matuojamo virpesio periodą T ir kartu su valdymo schema suformuoja nT trukmės valdymo impulsą antram selektoriui. Per šį laiką antras impulsų skaitiklis suskaičiuoja atėjusių kvarcinio generatoriaus impulsų skaičių N . Sulyginę abu rezultatus, kaip gautus per tą patį 1 s matavimo laiką, gauname dažniamačio matavimo lygtį:

$$f = \frac{n}{N} f_0 .$$

Tokio prietaiso dažnio matavimo metodo paklaida yra tik dydžio N diskretinio skaičiavimo paklaida, nes dydis n suskaičiuojamas ir jau konkretus naudojamas. Ši paklaida gaunama nepriklausoma nuo matuojamo dažnio, t.y. pastovi:

$$\delta_f = \delta_{diskr} = \frac{\pm 1}{N} = \pm \frac{T_0}{1 \text{ s}} = const .$$

5.6.7. Matuojamo dažnio sumažinimo būdai

Dėl ribotos skaitmeninių schemų veikimo spartos didžiausias tiesiogiai išmatuojamas dažnis šiuolaikiniais skaitmeniniais dažniamačiais yra apie 500 MHz. Be to, greitaveikių skaitmeninių dažniamačių savikaina yra didelė, todėl yra naudojami matuojamų dažnių didumo kalibruoto sumažinimo būdai, kurie išplečia matuojamų dažnių ruožą bei sumažina dažniamačių savikainą.

Yra keli dažnių sumažinimo būdai:

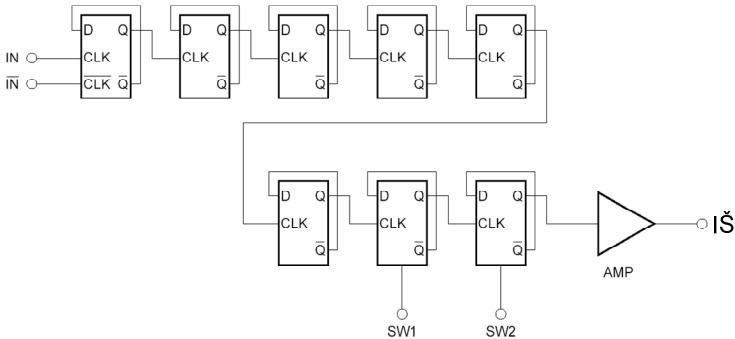
- Dažnio dalijimas, naudojamas dažniams iki 3,5 GHz;
- Heterodinavimas, naudojant etaloninio dažnio kvarcinio generatoriaus harmonikas; matavimai galimi iki 20 GHz;
- Heterodinavimas, naudojant atraminį dažnį kuriamą dažnio sintezatoriumi; matavimai galimi iki 80 GHz;

Dažnio dalijimo būdas

Tai paprastas įėjimo virpesio dažnio dalijimas iš nustatyto koeficiento q . Pakankamai sumažintą dažnį jau galima išmatuoti skaitmeniniu dažniamačiu tiesiogiai. Matavimo rezultatas gaunamas arba išmatuotą dažnį padauginant iš q , arba dažnį matuojant q kartų

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

ilgiau. Paprastai naudojami dvejetainio koeficiento dažnio dalikliai, todėl q parenkamas kartotinis 2. Tačiau kiek kartų padaliname dažnį, tiek kartų didesnė bus diskretizavimo paklaida. Dažnio daliklio **PB1506GV**, dalijančio dažnius iki 3 GHz, gebančio dalinti iš 64, 128 ir 256 struktūrinė schema pateikta 5.16 pav. Įėjimais SW1 ir SW2 galima nustatyti dalijimo koeficientą.



5.16 pav. Dažnio daliklio PB1506GV struktūrinė schema.

Heterodinavimas, naudojant etaloninio dažnio kvarcinio generatoriaus harmonikas

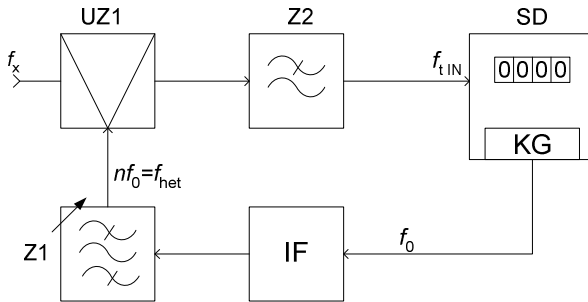
Matavimo struktūrinė schema yra pateikta 5.17 paveiksle. Pagrindinė dalis yra dažnių maišiklis UZ1, kuriame suplakamas įėjimo virpesys su etaloninio dažnio generatoriaus dažniu. Kaip heterodino virpesys yra naudojamos kvarcinio generatoriaus harmonikos. Iš dažnių keitimo proceso metu gaunamo virpesio žemųjų dažnių filtru Z2 yra išskiriamas dažnių skirtumas f_t ir išmatuojamas skaitmeniniu dažniamačiu $f_t = f_{IN}$. Tokio keitimo lygtis yra:

$$f_{IN} = f_t = |f - f_{het}| = |f - nf_0|.$$

Kaip atraminis dažnis naudojamos paties skaitmeninio dažniamačio kvarcinio generatoriaus harmonikos. Jos sukuriamos, formuojant iš kvarcinio generatoriaus trumpus impulsus impulsų formuotuvu IF. Reikiama harmonika išskiriama juostiniu filtru Z1. Iš

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

esmės tokiame dažniamatyje yra apjungti du dažniamačiai: heterodininis ir skaitmeninis.



5.17 pav. Heterodininio – skaitmeninio dažniamačio struktūrinė schema.

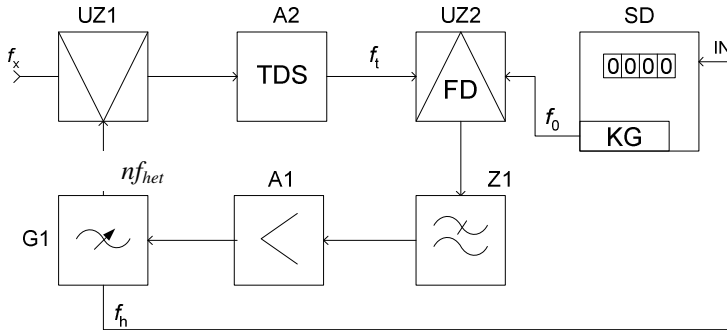
Heterodinavimas, naudojant atraminį dažnį kuriamą dažnio sintezatorium

Naudojant šį metodą, žemo dažnio generatoriaus fazė susiejama su aukšto dažnio įėjimo signalo faze. Kaip heterodino virpesys naudojamas netiesioginės sintezės dažnio sintezatorium. Struktūrinė schema yra pavaizduota 5.18 paveiksle. Atraminis generatorius yra žemadažnio skaitmeninio dažniamačio kvarcinis generatorius. Jo virpesio fazė fazės detektoriuje UZ2 yra lyginama su dažnio maišiklio UZ teikiamo tarpinio dažnio f_t virpesio faze. Fazių skirtumo sukelta įtampa yra valdomas įtampa valdomo generatoriaus G1 dažnis. Jis matuojamas skaitmeniniu dažniamačiu, o jo harmonikos dalyvauja dažnio keitimo procese kaip heterodino virpesys. Matuojamas dažnis apytiksliai yra žinomas, todėl telieka nustatyti kuri generatoriaus G1 harmonika n dalyvauja dažnių keitimo procese. Fazinio generatoriaus G1 dažnio paderinimo sistema palaiko tarpinį dažnį f_t lygų kvarcinio generatoriaus dažniui f_0 . Matuojamas dažnis gaunamas iš tokių formulių:

$$f_t = |f - nf_{het}| = f_0, \quad f = nf_{het} + f_0,$$

čia: n – generatoriaus G1 virpesio harmonikos numeris.

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas



5.18 pav. Skaitmeninis dažniamatis su dažnio sintezatoriumi

Realiai naudojamos sudėtingesnės schemos, kuriose yra ir dažnio fazinio ir dažninio paderinimo kilpos ir dažnio keitimo procesas valdomas mikroprocesoriumi. Taip pavyksta garantuoti keitimą platesniame dažnių ruože. Harmonikos numeris apskaičiuojamas ir pataisa į skaitmenų displejų įvedama automatiškai, todėl vartotojui nereikia atlikinėti jokių skaičiavimų.

5.6.8. Skaitmeninis laiko intervalų matavimas

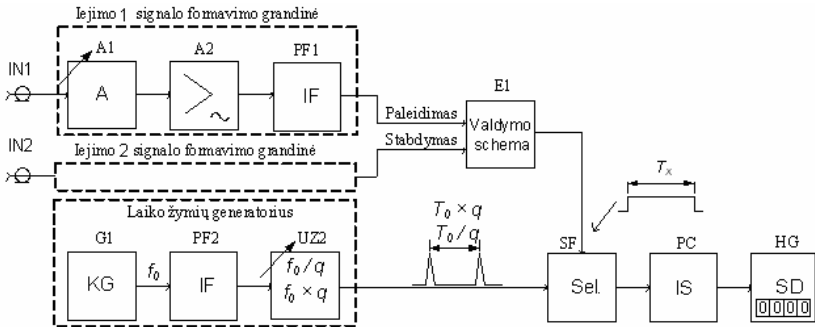
Laiko intervalo trukmės tarp dviejų impulsų, veikiančių skirtingose grandinėse arba veikiančio vienoje grandinėje impulso trukmės skaitmeninio matavimo struktūrinė schema pavaizduota 5.19 paveiksle.

Struktūrinės schemos pagrindiniai elementai yra tokie patys kaip ir periodo matavimo struktūrinėje schemoje (5.12 pav.).

Impulsai, tarp kurių laiko intervalo trukmę reikia išmatuoti, paduodami į schemos įėjimus “IN1” ir “IN2”. Juose signalų lygiai gali būti keičiami atenuatoriais A1 ir įtampos stiprintuvais A2. Impulsų formuotuvais PF1 yra suformuojami trumpi impulsai, atitinkantys į kanalo įėjimą paduodamų impulsų priekinius arba galinius frontus (galima pasirinkti). Suformuotas vieno kanalo impulsas paleidžia valdymo schemą E1, o kito kanalo impulsas – ją stabdo. Valdymo schemoje suformuojamas stačiakampio formos impulsas, kurio trukmė T_x yra lygi laiko intervalui tarp į kanalų įėjimus paduodamų impulsų atitinkamų frontų. Šis valdymo impulsas

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

valdo laiko selektorių SF, per kurį į impulsų skaitiklį PC yra perduodami skaitiniai impulsai, suformuoti laiko žymių generavimo schemeje. Laiko žymių (pavyzdinių laiko intervalų) generatorių sudaro kvarcinis generatorius G, impulsų formuotuvas PF2 ir dažnio dalijimo arba dauginimo schema UZ2. Laiko žymių periodas yra kartotinis kvarcinio generatoriaus periodui T_0 .



5.19 pav. Struktūrinė schema matuojant laiko intervalų trukmę arba impulso trukmę skaitmeniniu būdu

Impulsų skaitiklio PC suskaičiuotas laiko žymių skaičius N parodo matuojamo laiko intervalo trukmę išreikštą laiko žymių periodu:

$$T_x = \frac{NT_0}{q} \text{ arba } T_x = NqT_0.$$

Prenkant kvarcinio generatoriaus dažnį ir dažnio daliklio dalijimo arba dažnio daugiklio dauginimo koeficientus q , suformuojamos laiko žymės, kurių periodas yra dešimtiniu pagrindu kartotinis arba dalinis sekunde. Tuomet impulsų skaitiklio suskaičiuotas ir skaitmenų displėjaus HG rodomas skaičius N yra matuojamo laiko intervalo trukmė sekundėmis arba sekundės dalimis. Taip tiesiogiai gaunamas rezultatas, nors pats matavimo metodas yra netiesioginis.

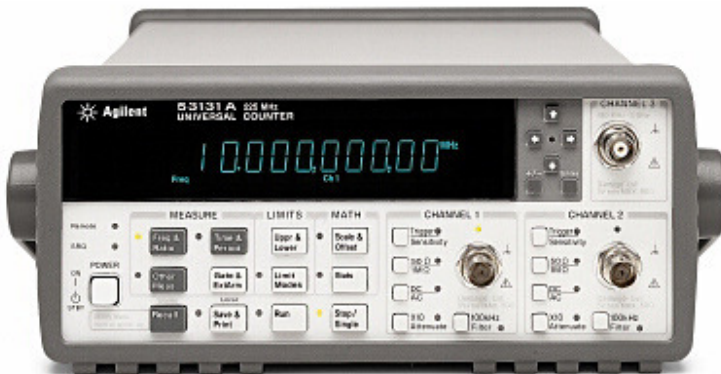
Matuojant veikiančio vienoje grandinėje impulso trukmę, jis paduodamas į įėjimus "IN1" ir "IN2" lygiagrečiai. Tuomet impulso priekinis frontas paleidžia valdymo schemą, o galinis frontas – ją stabdo. Matavimo rezultatas gaunamas analogiškai, kaip ir matuojant

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

laiko intervalą tarp impulsų.

Laiko intervalų ir impulsų trukmės matavimo paklaidų priežastys ir jų vertės yra tokios pačios kaip ir periodo matavimo paklaidų.

Daugelio šalių matavimo prietaisų gamybos įmonės dabar gamina skaitmeninius dažniamačius. Tokie prietaisai labai plačiai naudojami matavimo laboratorijose. Jų parametrai ir galimybės yra labai įvairios. Dažniausiai be dažnio tokie matuokliai dar matuoja dažnių santykį, periodą, laiko intervalus tarp skirtingų grandinių impulsų ir vienos grandinės impulsų trukmės. Tiesiogiai matuojamo dažnio riba siekia iki kelių šimtų megahercų. Yra vienas ar du tiesioginio dažnio matavimo įėjimai, kurie naudojami ir dažnių santykio bei laiko intervalų matavimams. Laiko žymių mažiausias periodas yra šimtų pikosekundžių trukmės. Papildomi dažnio sumažinimo blokai įgalina matuoti dažnius iki šimtų gigahercų. 5.20 paveiksle yra parodytas firmos Agilent Technologies skaitmeninis dažnio ir laiko intervalų matuoklio 53131A bendras vaizdas.



5.20 pav. Agilent Technologies firmos skaitmeninio dažnio ir laiko intervalų matuoklio 53131A bendras vaizdas

Matuoklis turi du įėjimus, įgalinančius tiesiogiai matuoti virpesių dažnį iki 225 MHz. Jo trumpiausias laiko žymių periodas yra 500 ps. Matuoklis turi 10 skaitmenų displejų. Panaudojant dažnių išplėtimo bloką, galima matuoti virpesių dažnius iki 12,4 GHz. Skaitmeninis matuoklis turi GPIB ir RS-232 interfeisus.

5.7. Kontroliniai klausimai ir užduotys savarankiškam darbui

1. Kokius žinote dažnio matavimo būdus? Kokie būdai naudojami techniniuose ir kokie – laboratoriniuose matavimuose?

2. Koks kondensatorinio dažniamačio veikimo principas, panaudojimo sritys ir paklaidų šaltiniai?

3. Kokius žinote oscilografinius dažnio matavimo būdus?

4. Kaip nustatomas signalo dažnis oscilografu, naudojant kalibruotos skleistinės trukmės būdą? Kokie šiuo atveju paklaidų šaltiniai?

5. Raskite sinusinio signalo periodą ir dažnį, jeigu oscilografo ekrane jo vaizdo ilgis, atitinkantis periodą užima 5 padalas, o oscilografo skleistinės koeficientas yra $20 \mu\text{s}/\text{pad.}$

6. Kaip dažnis matuojamas oscilografu pagal Lisažu figūras? Kokie šio metodo paklaidų šaltiniai?

7. Kaip dažnis matuojamas oscilografu apskritiminės skleistinės būdu? Kuo šis būdas pranašesnis už Lisažu figūrų būdą?

8. Kaip sudarytas ir kaip veikia skaitmeninis periodo matuoklis?

9. Kokios skaitmeninio periodo matavimo paklaidų priežastys?

10. Nubraižykite laiko diagramas signalų, charakterizuojančių skaitmeninio periodo matuoklio veikimą.

11. Kokia skaitmeninio dažniamačio struktūrinė schema ir koks jo veikimo principas?

12. Kokie skaitmeninio dažniamačio matavimo paklaidų šaltiniai?

13. Nubraižykite laiko diagramas signalų, charakterizuojančių skaitmeninio dažniamačio veikimą.

14. Kada skaitmeniniu būdu matuojamas signalo dažnis ir kada – periodas? Kodėl?

15. Kaip sudarytas ir veikia skaitmeninis dažniamatis su pastovia diskretiškumo paklaida?

16. Kaip sudarytas ir veikia heterodininis dažniamatis? Kas lemia jo matavimo paklaidas?

17. Kaip sudarytas ir veikia rezonansinis dažniamatis? Nuo ko priklauso jo matavimo paklaidos?

5. Dažnio ir laiko intervalų matavimas

18. Kaip sudaryti ir veikia skaitmeninių dažniamačių dažnio sumažinimo blokai? Nuo ko priklauso jų dažnio keitimo paklaidos?

19. Kaip skaitmeniniu būdu matuojama laiko intervalo trukmė tarp dviejų impulsų, veikiančių skirtingose grandinėse?

20. Kaip skaitmeniniu būdu matuojama veikiančio vienoje grandinėje impulso trukmė?