

Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

OSCILOGRAFO ĮĖJIMO STIPRINTUVO KŪRIMAS IR TYRIMAS

Andžej BOREL *

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

Gauta 2019 m. spalio 28 d.; priimta 2019 m. lapkričio 7 d.

Santrauka. Skaitmeninis oscilografas turi analoginę dalį, kuri matuojamą signalą priderina prie naudojamo analoginio skaitmeninio keitiklio (ASK) dinamikos. Ši dalis vadinama oscilografo vertikaliuoju traktu arba įėjimo stiprintuvu. Dėl projektavimo įėjimo stiprintuvo, esant GHz dažniams, sudėtingumo šių dažnių skaitmeninių oscilografų kaina yra didelė. Straipsnyje analizuojamas ir projektuojamas stiprintuvas iš diskrečiųjų, rinkoje pasiekiamų komponentų. Suprojektuota atenuatoriaus grandinė, impedanso transformavimo (buferinė) grandinė, valdomo stiprinimo grandinė. Sukurtas stiprintuvo prototipas. Iširti pagrindiniai prototipo parametrai. Sukurto stiprintuvo praleidžiamų dažnių juosta siekia 3 GHz. Stiprintuvo stiprinimo koeficientas užtikrina 10 mV/pad – 1 V/pad vertikaliuosios skalės jautrumo diapazoną. Pereinamosios charakteristikos iškraipymai neviršija 10 %. Darbe palyginti PTH (angl. *plated through hole* – kiaurymės montažo būdo) ir SMD (angl. *surface mount device* – paviršinio montažo būdo) relių atenuatorių modeliai. Straipsnyje apžvelgiama oscilografo įėjimo stiprintuvo paskirtis ir struktūra. Apžvelgiama stiprintuvo projektavimo eiga, pateikiami atliktų matavimų rezultatai ir galutinės išvados.

Reikšminiai žodžiai: atenuatorius, įėjimo stiprintuvas, GHz, oscilografas, aukštadažniai signalai, vertikalusis traktas.

Įvadas

Šiame straipsnyje aprašomas realiojo laiko oscilografo įėjimo stiprintuvo kūrimas ir tyrimas. Darbo tikslas – sukurti 2,5–3 GHz pralaidumo juostos stiprintuvą, naudojant tik diskrečiuosius, rinkoje pasiekiamus elementus.

Šiuolaikinėje sparčiausių aukštadažnių oscilografų gamybos rinkoje yra kelios garsios įmonės, tokios kaip „Tektronix“, „Keysight“, „LeCroy“ ir kt., kurios savo įrenginiuose naudoja specialios paskirties integrinius grandynus. Šių grandynų gamybos sąnaudos labai didelės, todėl mažoms ir mažai žinomoms kompanijoms jų gamyba nėra pasiekama. Dėl palyginti mažos oscilografų paklausos pasaulinėje rinkoje jų kaina siekia dešimtis tūkstančių eurų.

Vykstant daiktų interneto technologijų ir 5G tinklų plėtrai, platesnės pralaidumo juostos matavimo įrenginių paklausa, tikėtina, augs (Technavio, 2017). Mažesnių sąnaudų reikalaujantis gigahercų eilės oscilografas leistų Lietuvos bei Europos pramonėms likti konkurencingoms ateinančiais dešimtmečiais.

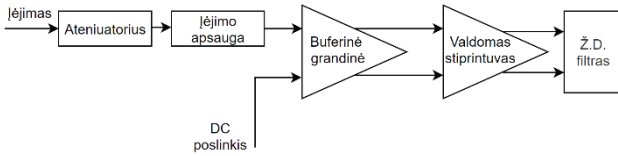
Darbe aprašomas oscilografo įėjimo stiprintuvas naudojamas analoginiam signalui transformuoti iki reikiamo diapazono. Šio sistemos komponento įgyvendinimo iš dis-

krečiųjų elementų sudėtingumas yra vienas pagrindinių veiksnių, lemiančių greitesnių nei 1 GHz oscilografų didelę kainą. Straipsnyje aprašomas stiprintuvo prototipas suprojektuotas naudojant rinkoje laisvai pasiekiamus komponentus. Sukurtas prototipas naudojamas komercinėje kompanijoje. Darbe nėra pateikiama panašių stiprintuvų parametrų analizė. Tai susiję su oscilografus gaminančių įmonių komercine paslaptimi – atskiros stiprintuvų schemos ir jų parametrai nėra viešai pasiekiami.

1. Oscilografo įėjimo stiprintuvo paskirtis ir struktūra

Oscilografo įėjimo stiprintuvo paskirtis – pakeisti oscilografo įėjime esantį signalą taip, kad jį diskretizuojant būtų išnaudojama visa analoginio skaitmeninio keitiklio (ASK) dinamika. Šiam tikslui pasiekti naudojama 1 paveiksle pateikiama struktūra. Tai klasikinė realiojo laiko oscilografo stiprintuvo struktūra, naudojama daugelyje 0,1–5 GHz oscilografų. Ši struktūra išsamiai aprašoma daugelyje publikuotų mokslinių darbų, pvz., Jiang ir Liu (2017), Duyu et al. (2011, 2013), Li et al. (2011).

*Autorius susirašinėti. El. paštas andzej.borel@vgtu.lt

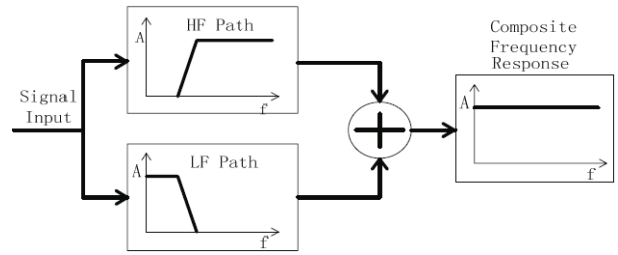


1 paveikslas. Oscilografo įėjimo stiprintuvo struktūrinė schema
Figure 1. The structure of an oscilloscope's front-end amplifier

Iš 1 paveiksle pateiktos struktūros matyti, kad matuojamas signalas patenka į atenuatorių. Atenuatoriaus paskirtis – praplėsti oscilografo įėjimo įtampos diapazoną. Priklausomai nuo konkretaus atenuatoriaus sandaros, jame numatomi vienas arba daugiau signalo slopinimo kelių. Oscilografo sistema parenka atenuatoriaus padėtį priklausomai nuo nustatytos vertikaliosios skalės jautrumo V/pad vertės. Įėjimo apsaugos blokas naudojamas siekiant apsaugoti oscilografą, esant nustatytam dideliame vertikaliosios skalės jautrumui, bei įėjime esant aukštos amplitudės signalui (Li et al., 2011). Buferinės grandinės paskirtis – užtikrinti stabilų 50 Ω impedansą ir pridėti prie signalo nuolatinę dedamąją. Tuo atveju, kai naudojamas diferencinio įėjimo ASK, buferinė grandinė taip pat turi užtikrinti vienpolio signalo transformavimą į diferencinį. Valdomas stiprintuvas skirtas įėjimo signalui stiprinti iki ASK įėjimo dinamikos. Šios grandies stiprinimo koeficientas tiesiogiai nulemia oscilografo vertikaliosios skalės jautrumo diapazoną ir dažniausiai pasižymi 0–40 dB stiprinimo koeficiento diapazonu (Duyu et al., 2013). Toks stiprinimo koeficientas šiuo metu gali būti pasiektas tik naudojant kelių stiprinimo kaskadų nuoseklų jungimą. Sustiprintas signalas patenka į žemųjų dažnių filtrą, kuris iš signalo pašalina harmonikas, kurių dažnis viršija naudojamo ASK diskretizavimo dažnį. Šiuo filtru taip pat atliekamas stiprintuvo pereinamosios ir dažninės charakteristikų netolygumų kompensavimas (Duyu et al., 2011).

Atenuatoriaus, įėjimo apsaugos ir buferinės grandinės kartu vadinamos impedanso pakeitimo grandine (Duyu et al., 2013). Žinoma, kad oscilografo impedanso pakeitimo grandinė turi užtikrinti vienodą perdavimo koeficientą esant tiek DC (angl. *direct current*), tiek RF (angl. *radio frequency*) dažniams (Naboichek ir Ems, 1993). Šiuo metu rinkoje esantys stiprintuvai neatitinka visų reikalavimų, keliamų įėjimo impedanso pakeitimo grandinei. Pakankamos pralaidumo juostos mikroschemos arba neturi DC stiprinimo, arba turi neizoliuotą stiprinimo valdymą, kuris neleidžia įgyvendinti korektiško DC poslinkio. Vienas iš galimų šios problemos sprendimo būdų – matuojamą signalą suskaidyti į žemojo ir aukštojo dažnio komponentus (Duyu et al., 2013). Atskiros signalo dalys stiprinamos skirtingose grandinės dalyse, o vėliau sujungiamos naudojant pasirinktą sumatoriaus konfigūraciją. Struktūrinė metodo schema pateikiama 2 paveiksle. Taisant šį metodą reikia ypač preciziškai suderinti grandinės dalių fazines ir dažnines charakteristikas, o tai ganėtinai sudėtinga pasiekti realioje schemoje.

Valdomo stiprinimo grandinė dažniausiai įgyvendinama naudojant skaitmeninio valdomo atenuatoriaus ir



2 paveikslas. Signalų skirstymo metodas (Duyu et al., 2013)
Figure 2. Signal split path method diagram (Duyu et al., 2013)

kelių stiprinimo kaskadų nuoseklų jungimą. Kaskadų skaičius pasirenkamas priklausomai nuo tiriamos sistemos ASK įėjimo dinamikos bei reikiamo vertikaliosios skalės jautrumo diapazono. Žemųjų dažnių filtras projektuojamas žinant naudojamo ASK techninius parametrus, tokius kaip įėjimo talpa, diskretizavimo dažnis. Šiame straipsnyje aptariama tik analoginė oscilografo dalis, todėl nebus plačiau apžvelgiama žemųjų dažnių filtro struktūra.

2. Prototipo projektavimas

Rengiant stiprintuvo projektą, buvo bandoma pasiekti du pagrindinius parametrus: praleidžiamų dažnių juosta didesnė nei 2,5 GHz ir stiprinimo koeficiento diapazonas, užtikrinantis vertikaliosios skalės jautrumo diapazoną nuo 10 mV/pad iki 1 V/pad. Šiam tikslui pasiekti 1 paveikslo struktūrinė schema modifikuota ir pateikiama 3 paveiksle.

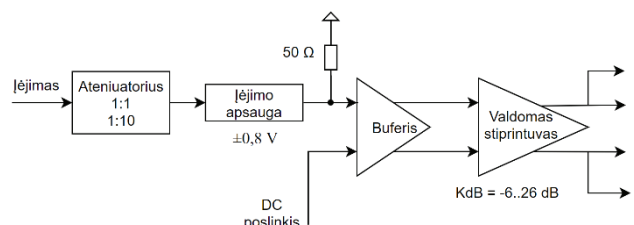
Stiprintuvas buvo projektuojamas planuojant jį naudoti su 1 V įėjimo dinamikos ASK. Tokia dinamika pasirinkta atsižvelgiant į šiuo metu rinkoje pasiekiamų sparčiųjų ASK parametrus. Reikiamas stiprintuvo stiprinimo koeficientas apskaičiuojamas pradžioje jautriausią vertikaliosios skalės vertę padauginus iš oscilografo ekrano padalų skaičiaus:

$$A_{\min} = 10 \frac{\text{mV}}{\text{pad}} \times 8 = 80 \text{ mV}_{\text{pp}}, \quad (1)$$

čia A_{\min} – minimali signalo amplitudė, kurią stiprintuvas „ištempo“ iki ASK dinamikos. Žinant minimalią amplitudę, kurią reikia sustiprinti iki ASK įėjimo dinamikos, galima apskaičiuoti reikalingą stiprinimo koeficientą:

$$K_{\max} = 20 \log \left(\frac{1000 \text{ mV}}{80 \text{ mV}} \right) \cong 22 \text{ dB}, \quad (2)$$

čia K_{\max} – stiprintuvo stiprinimo koeficientas, būtinas 10 mV/pad vertikaliosios skalės raiškai pasiekti. 1 V/pad jautrumo skaičiavimai yra analogiški, todėl čia nepatei-



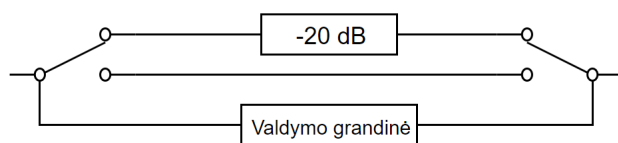
3 paveikslas. Prototipo struktūrinė schema
Figure 3. Prototype's structure diagram

kiami. Stiprinimo koeficiento vertė, būtina pasiekti 1 V/pad jautrumui, yra -18 dB. Šiems stiprinimo koeficientams pasiekti buvo nuspręsta naudoti LMH6401 valdomą stiprintuvą. Jo stiprinimo koeficientas derinamas diapazonu nuo -6 dB iki 26 dB. Stiprintuvo praleidžiamų dažnių juosta siekia 4,5 GHz. Pasirinktas stiprintuvas užtikrina 10 mV/pad jautrumą. Reikiamam slopinimui pasiekti buvo suprojektuotas valdomas atenuatorius.

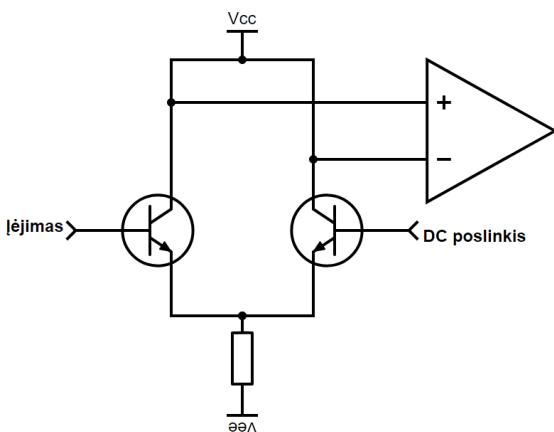
4 paveiksle pateikiama sukurto atenuatoriaus struktūrinė schema. Atenuatorius suprojektuotas naudojant elektromechanines relės ir diskrečius atenuatorius. Priklausomai nuo nustatymo, atenuatorius gali būti perjungiamas į 0 dB arba -20 dB perdavimo koeficiento kelią. Prototipe atenuatoriaus padėtis valdoma keičiant per relės tekančios ritę srovės poliarumą. Srovės poliarumas keičiamas naudojant mechaninius jungiklius.

Projektuojant buferinę grandinę buvo atsižvelgta į kelis įmanomus projektavimo metodus. Taikant 2 paveiksle pateikiamą signalo skirstymo metodą reikia ypač tiksliai suderinti fazinę ir dažninę charakteristikas. Atliekant šio metodo kompiuterinį modeliavimą, nepavyko gauti tinkamų schemos parametrų. Ne vienas iš rinkoje pasiekiamų operacinių stiprintuvų neatitiko buferinei grandinei keliamų reikalavimų. Atsižvelgiant į tai, buvo nuspręsta buferinę grandinę sudaryti iš kelių kaskadų. Supaprastina principinė elektrinė schema pateikiama 5 paveiksle.

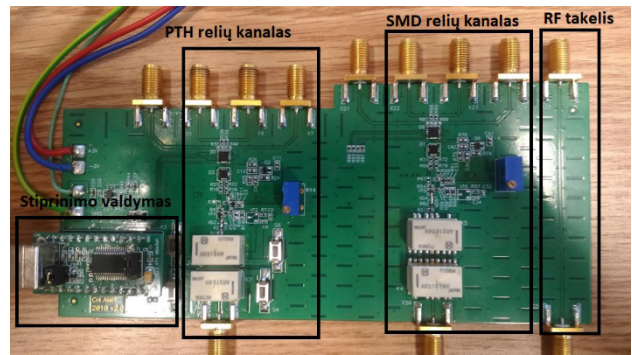
Pirmasis buferinės grandinės kaskadas sudarytas iš dviejų diskrečių tranzistorių diferencinės poros. Tokia tranzistorių konfigūracija užtikrina įėjimo signalo transformavimą į diferencinę ir atskirai prie signalo pridedamą DC komponentę. Antrasis buferinės grandinės kaskadas sudarytas iš vieno diferencinio stiprintuvo. Šis kaskadas



4 paveikslas. Perjungiamo atenuatoriaus struktūrinė schema
Figure 4. Switch attenuator's structural diagram



5 paveikslas. Supaprastina buferinės grandinės schema
Figure 5. Simplified schematic of the buffer circuit



6 paveikslas. Oscilografo įėjimo stiprintuvo prototipas
Figure 6. Oscilloscope's front-end amplifier's prototype

naudojamas signalų frontų simetriškumui užtikrinti. Signalų frontų nesimetriškumas tranzistorių kaskade atsiranda dėl baigtinio signalo sklaidimo greičio laidininkuose ir sklaidos tranzistorių techniniuose parametruose. Frontų simetriškumas būtinas norint gauti minimalius signalo iškraipymus valdomo stiprinimo grandyje. Buvo pastebėta, kad naudojamo LMH6401 išėjimo frontų trukmė ilgėja, didėjant įėjimo frontų nesimetriškumui. Kartu su ilgėjančia frontų trukme atsiranda papildomi signalo formos iškraipimai. Aptartos schemos dalys įgyvendintos spausdintinėje plokštėje. Plokštės nuotrauka pateikiama 6 paveiksle.

Pateikiamoje spausdintinėje plokštėje padaryti du stiprinimo kanalai. Kanalai identiški, išskyrus tai, kad viename naudojamos SMD, o kitame – PTH relės. Tuo siekta nustatyti abiejų montavimo būdų įtaką parametrams aukštuosiuose dažniuose. Taip pat plokštėje įgyvendintas LMH6401 stiprinimo valdymas, naudojant USB-SPI valdiklį, ir paliktas RF takelis impedanso tikslumui įvertinti. Prototipo spausdintinėje plokštėje yra 8 laidininkų sluoksniai. Stiprinimas valdomas asmeniniu kompiuteriu per USB-B jungtį.

3. Testavimo ir tyrimo rezultatai

SMD ir PTH atenuatorių grandinės įvertintos tiriant jų atspindžio koeficiento S_{11} priklausomybę nuo dažnio. Priklausomybė išmatuota naudojant 6 GHz vektorinį grandynų analizatorių. PTH ir SMD priklausomybės atitinkamai pateikiamos 7 ir 8 paveiksluose.

Pateiktuose paveiksluose linijomis pažymėta riba, kurioje S_{11} viršija -10 dB. Ši riba taip pat atitinka stovinčiųjų bangų koeficiento (VSWR) vertę, lygią 2. Matyti, kad SMD relių atenuatoriaus atvejų riba pasiekama esant 2 GHz, o PTH – 2,4 GHz. Tai reiškia, kad naudojamų relių modeliai tiek PTH, tiek SMD korpusė nėra tinkami 2,5 GHz stiprinimo traktui. Atliekant tolesnius matavimus pateikiami tik PTH relių rezultatai.

Prototipo praleidžiamų dažnių juosta buvo matuojama HMC-T2240 signalo generatoriumi ir N1913A galios matuokliu. Atenuatoriaus atspindžių įtaka buvo sumažinta tarp galios matuoklio ir prototipo įterpus suderintą

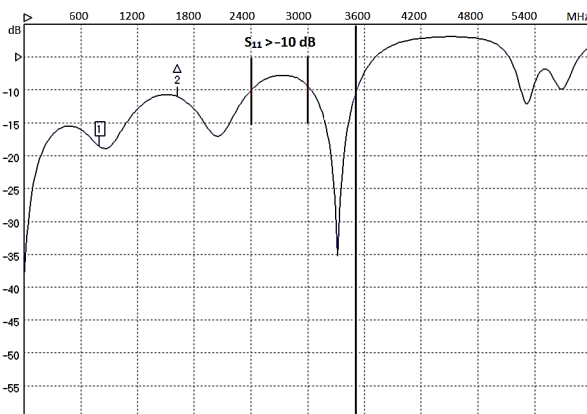
aukštadažnį atenuatorių. Buvo matuota naudojant skirtingas stiprinimo koeficiento vertes. Matavimo rezultatai pateikiami 9 paveiksle. Matyti, kad, eliminavus atenuatoriaus atspindžius, signalo trakto kiekviena stiprinimo vertė pasiekia ne mažesnę nei 3 GHz praleidžiamų dažnių juostos plotį. Charakteristikos pasižymi netolygumu iki 2 dB.

Stiprintuvo pereinamoji charakteristika įvertinta naudojant du stiprinimo koeficientus. Charakteristikai matuoti buvo naudojamas „Leo Bodnar“ 35 ps fronto kilimo trukmės generatorius ir „PicoScope 9300“ stroboskopinis oscilografas. Išmatuotos charakteristikos pateikiamos 10 ir 11 paveiksluose.

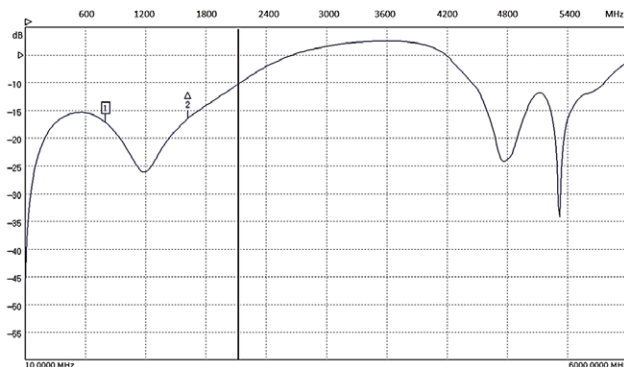
10 ir 11 pateiktuose paveiksluose pažymėta pereinamosios charakteristikos trukmė ir teigiamo bei neigiamo perviršių vertės procentais. 1 dB stiprinimo atveju charakteristikos trukmė yra 132 ps, perskaičius į praleidžiamų dažnių juostą gaunama:

$$\Delta F = \frac{0,45}{132 \text{ ps}} \cong 3,4 \text{ GHz}. \quad (3)$$

Panašiai kaip 3 išraiškoje, apskaičiavę 26 dB atvejį gauname 3 GHz praleidžiamų dažnių juostos plotį pagal pereinamąją charakteristiką. 10 paveiksle pateikiama charakteristika pasižymi 8 % teigiamu ir 16 % neigiamu

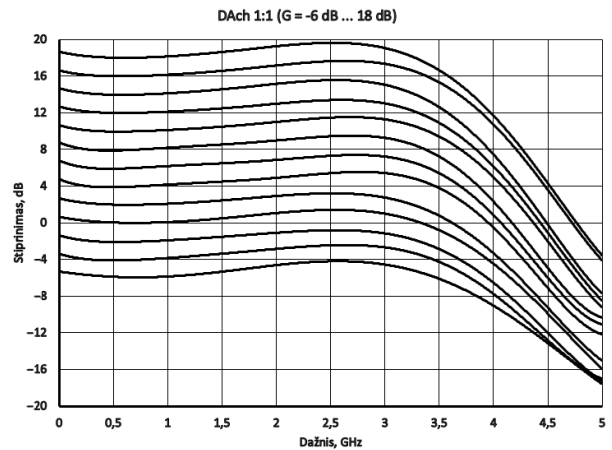


7 paveikslas. PTH kanalo S_{11} priklausomybė nuo dažnio
Figure 7. PTH channel's S_{11} frequency response

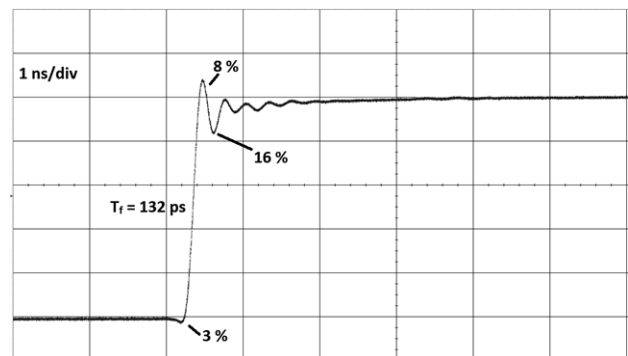


8 paveikslas. SMD kanalo S_{11} priklausomybė nuo dažnio
Figure 8. SMD channel's S_{11} frequency response

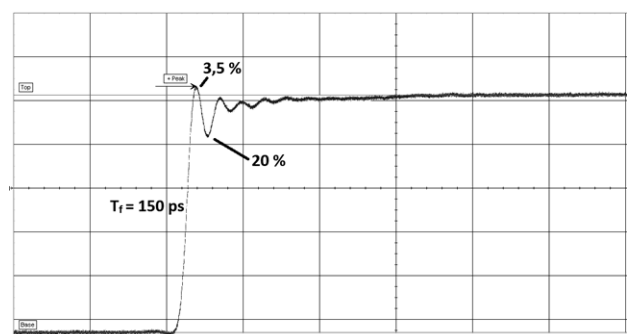
perviršiais. 11 paveiksle pateikiama charakteristikai būdingas 3,5 % teigiamas ir 20 % neigiamas perviršiai. 10 % neigiamo perviršio vertės atsiranda dėl naudojamo generatoriaus signalo iškrypimo. Įvertinus tai, galima teigti, kad stiprintuvo pereinamosios charakteristikos iškrypimai neviršija 10 %.



9 paveikslas. PTH kanalo DAch
Figure 9. PTH channel's frequency response



10 paveikslas. PTH kanalo pereinamoji charakteristika
($G = 1 \text{ dB}$)
Figure 10. PTH channel's step response ($G = 1 \text{ dB}$)



11 paveikslas. PTH kanalo pereinamoji charakteristika
($G = 26 \text{ dB}$)
Figure 11. PTH channel's step response ($G = 26 \text{ dB}$)

Išvados

Apibendrinant atliktus inžinerinio projektavimo darbus ir sukurto oscilografo įėjimo stiprintuvo prototipo eksperimentinius tyrimus galima daryti tokias išvadas:

1. Gautas praleidžiamų dažnių juostos plotis viršija užduotyje nurodytą (2,5 GHz) vertę. Užtikrinamas dinaminis diapazonas lygus užduotyje nustatytam 10 mV/pad – 1 V/pad.
2. PTH montažo relės yra tinkamesnės naudoti aukštadažniuose atenuatoriuose, lyginant su SMD montažo relėmis.
3. Toliau tobulinant stiprintuvą turi būti suprojektuotas naujas atenuatorius, užtikrinantis $S_{11} < -10$ dB sąlygą visame praleidžiamų dažnių juostos plotyje. Turi būti sukurtas tinkamas žemųjų dažnių filtras, užtikrinantis pereinamosios charakteristikos iškraipymų kompensavimą iki 5 %.
4. Blogiausiu atveju stiprintuvo pereinamosios charakteristikos trukmė siekia 150 ps, geriausiu – 130 ps. Pereinamosios charakteristikos iškraipymai neviršija 10 % ir atitinka šiuolaikinės pramonės keliamus reikalavimus.

Literatūra

- Duyu, Q., Shulin, T., Hao, Z., & Huiqing, P. (2013). Study on signal conditioning technology in 2GHz broadband digital oscilloscope. In *2013 IEEE 11th International Conference on Electronic Measurement & Instruments* (pp. 342–346), Harbin, China. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2013.6743069>
- Duyu, Q., Shulin, T., & Huiqing, P. (2011). Design and realization of compensation for one type of broadband acquisition channel. In *IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments* (pp. 212–216), Chengdu, China. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2011.6037890>
- Jiang, Z., & Liu, W. (2017). *Design of a front-end analog channel with 80MHz bandwidth in digital oscilloscope*. Paper presented at the 2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS), Harbin, China. <https://doi.org/10.1109/EIIS.2017.8298678>
- Li, X., Linbo, R., & Hongguang, Q. (2011). Oscilloscope Vertical input path protector based-on integrated operational amplifier. In *IEEE 2011 10th International Conference on Electronic Measurement & Instruments* (pp. 267–271), Chengdu, China. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2011.6037903>
- Naboichek, S., & Ems, S. (1993). 5 GHz sampling oscilloscope front-end based on heterojunction bipolar transistor (HBT). In *15th Annual GaAs IC Symposium* (pp. 155–158), San Jose, CA, USA. <https://doi.org/10.1109/GAAS.1993.394480>
- Technavio. (2017). *Global oscilloscope market 2017–2021*. https://www.technavio.com/report/global-semiconductor-equipment-global-oscilloscope-market-20172021?utm_source=T4&utm_campaign=Media&utm_medium=BW

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF INPUT AMPLIFIER FOR THE OSCILLOSCOPE

A. Borel

Abstract

Digital oscilloscope's structure has analog signal acquisition circuit, which transforms signal's amplitude to fit ADC dynamic range. This circuit is commonly called oscilloscope's vertical or front-end amplifier. Difficulty in designing front-end amplifiers in GHz range largely affects higher frequency range oscilloscope's price. This work is focused on designing a front-end amplifier using discrete and openly sold components. We propose a design for attenuator, buffer, variable gain circuits. Amplifier's prototype is designed. Main characteristics of the amplifier were measured. Measured bandwidth is 3 GHz. Amplifier's gain and attenuation can support vertical scale sensitivity range from 10 mV/div to 1 V/div. Step response distortion is under 10 %. SMD and PTH relay model attenuators were evaluated. In this paper we review oscilloscope's front-end purpose and structure. We review amplifiers design and provide the results of experimental measurements.

Keywords: attenuator, amplifier, front-end, GHz, oscilloscope, radio frequency.