



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir Elektronikos fakultetas

**Modernių lauko tranzistorių taikymo aukštos įtampos
impulsų sekų generavime tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

Jokūbas Arlauskis

Projekto autorius

Prof. Linas Svilainis

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir Elektronikos fakultetas

Modernių lauko tranzistorių taikymo aukštos įtampos impulsų sekų generavime tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektronikos inžinerija (6211EX012)

Jokūbas Arlauskis

Projekto autorius

Prof. Linas Svilainis

vadovas

Prof. Žilvinas Nakutis

refecenzentas



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Jokūbas Arlauskis

Modernių lauko tranzistorių taikymo aukštos įtampos impulsų sekų generavime tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdamas kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasis Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs;
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalintas iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Jokūbas Arlauskis

Patvirtinta elektroniniu būdu

Arlauskis, Jokūbas. Modernių lauko tranzistorių taikymo aukštos įtampos impulsų sekų generavime tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas prof. Linas Svilainis; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Elektronikos inžinerija, inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: impulsų generavimas, lauko tranzistoriai, ultragarsas, impulso parametrai, impulsų sekos

Kaunas, 2026. 106 p.

Santrauka

Šiame darbe tiriamas aukštos įtampos impulsų generatorių topologijų, skirtų ultragarsinių keitiklių žadinimo sistemoms, projektavimas, analizė ir vertinimas. Darbe daugiausia dėmesio skiriama tranzistorių technologijos ir išėjimo pakopos topologijos įtakai ultragarsinių generatorių elektrinėms charakteristikoms, ypač taikymuose, kuriems reikalingi greiti frontų laikai, aukštas impulso tikslumas ir efektyvus energijos perdavimas. Analizuojamas ryšys tarp generatoriaus išėjimo pakopos ir talpinio ultragarsinio keitiklio elgesio, siekiant nustatyti svarbiausius impulso kokybės parametrus, darančius įtaką ultragarsinės sistemos veikimui. Ypatingas dėmesys skiriamas impulso kilimo laikui, kritimo laikui, impulso pločio tikslumui, signalo vėlinimui, įtampos stabilumui, dažninei charakteristikai ir galios efektyvumui. Tiriamos ir lyginamos kelios impulsų generatorių topologijos, įskaitant unipoliarines ir bipoliarines architektūras su skirtingais išėjimo pakopos valdymo metodais. Darbe vertinamas šiuolaikinių tranzistorių technologijų tinkamumas aukštos įtampos ultragarsiniams taikymams. Aptariama tranzistorių parazitinių parametru, tokių kaip užtūros krūvis, išėjimo talpa, tranzistoriaus kanalo varža ir komutavimo greitis, įtaka generuojamo impulso kokybei. Eksperimentiniai matavimai buvo atlikti naudojant sukurtus impulsų generatorių prototipus esant skirtingoms apkrovos sąlygoms ir darbiniam dažniams. Buvo sukurti specializuoti signalų apdorojimo ir automatizuoti matavimo metodai impulso parametrams iš oscilografo duomenų išgauti. Gauti rezultatai apima impulso pločio paklaidos analizę, suminės laiko paklaidos vertinimą, sklidimo vėlinimo matavimus, dažninės charakteristikos tyrimą ir aukštos įtampos lygio stabilumo analizę. Rezultatai parodė, kad tranzistorių pasirinkimas ir išėjimo topologija reikšmingai veikia pasiekiamą impulso kokybę ir ultragarsinių žadinimo sistemų komutavimo charakteristikas. Sukurtos metodikos ir gauti rezultatai pateikia praktines rekomendacijas didelės spartos ultragarsinių impulsų generatorių projektavimui bei prisideda prie šiuolaikinių ultragarsinių matavimo ir vaizdinimo sistemų optimizavimo.

Arlauskis, Jokūbas. Investigation of the Application of Modern Field-Effect Transistors in High-Voltage Pulse Sequence Generation. Master's Final Degree Project / supervisor prof., Linas Svilainis; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Electronics Engineering, Engineering Science.

Keywords: pulse generation, field effect transistors, ultrasound, pulse parameters, pulse sequences

Kaunas, 2026. 106.

Summary

This thesis investigates the design, analysis, and evaluation of high-voltage pulse generator topologies intended for ultrasonic transducer excitation systems. The work focuses on the influence of transistor technology and output stage topology on the electrical performance of ultrasonic pulsers, particularly in applications requiring fast rise times, high pulse fidelity, and efficient energy transfer. The relationship between the pulser output stage and the capacitive behavior of the transducer is analyzed in order to identify the most important pulse quality parameters affecting ultrasonic system performance. Special attention is given to pulse rise time, fall time, pulse width accuracy, propagation delay, voltage stability, frequency response, and output efficiency. Several pulse generator topologies are investigated and compared, including unipolar and bipolar architectures with different output stage driving approaches. The study evaluates the suitability of modern transistor technologies for high-voltage ultrasonic applications. The influence of transistor parasitic parameters such as gate charge, output capacitance, on-resistance, and switching speed on the generated pulse quality is discussed. Experimental measurements were performed using custom-built pulser prototypes under different load conditions and operating frequencies. Dedicated signal processing and automated measurement methods were developed to extract pulse parameters from oscilloscope waveform data. The obtained results include pulse width error analysis, cumulative timing error evaluation, propagation delay measurements, frequency response characterization, and high-voltage level stability analysis. The results demonstrate that transistor selection and output topology significantly influence the achievable pulse quality and switching performance of ultrasonic excitation systems. The developed methodologies and obtained results provide practical guidelines for the design of high-speed ultrasonic pulse generators and contribute to the optimization of modern ultrasonic measurement and imaging systems.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	13
Įvadas.....	14
1. Literatūros analizė.....	15
1.1. Ultragarso keitiklio elektrinis modelis	15
1.2. Dvitakčio valdymo topologija	16
1.3. Tranzistorių technologijų palyginimas	18
1.4. Impulso parametrai	20
2. Eksperimentų metodika	24
2.1. Duomenų surinkimas	24
2.2. Parametrų įvertinimas	27
2.2.1. Signalo aukšto lygio įtampos įvertinimas	27
2.2.2. Impulso pločio įvertinimas	28
2.2.3. Signalo fronto trukmių įvertinimas	29
2.2.4. Dažninės charakteristikos įvertinimas	29
2.2.5. Vėlinimo įvertinimas	31
3. Impulsų generatorių topologijų palyginimas	32
3.1. SE-TX01-01 unipoliarinio impulsų generatoriaus su plaukiojančiu užtūros valdymu topologija	33
3.2. SE-TX01-02M unipoliarinio impulsų generatoriaus su plaukiojančiu užtūros valdymu topologija	34
3.3. SE-TX02-0z bipoliarinio impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu topologija	36
3.4. SE-TX08-03 bipoliarinio impulsų stiprintuvo su transformatoriniu išėjimu topologija	36
4. Eksperimentų rezultatai	38
4.1. Signalo aukšto lygio įtampos matavimo rezultatai.....	38
4.1.1. SE-TX01-01 matavimų rezultatai.....	38
4.1.2. SE-TX-01-02M matavimų rezultatai.....	40
4.1.3. SE-TX-02-03 matavimų rezultatai	41
4.1.4. SE-TX-08-03 matavimų rezultatai	43
4.1.5. Aukšto įtampos lygio paklaidos matavimo rezultatų apibendrinimas.....	44
4.2. Impulso pločio paklaidos matavimo rezultatai	45
4.2.1. SE-TX01-01 matavimų rezultatai.....	45
4.2.2. SE-TX-01-02M matavimų rezultatai.....	48
4.2.3. SE-TX-02-03 matavimų rezultatai	51
4.2.4. SE-TX-08-03 matavimų rezultatai	54
4.2.5. Impulso pločio matavimų rezultatų apibendrinimas	57
4.3. Signalo fronto trukmių matavimo rezultatai.....	57
4.3.1. SE-TX01-01 matavimų rezultatai.....	58
4.3.2. SE-TX-01-02M matavimų rezultatai.....	59
4.3.3. SE-TX-02-03 matavimų rezultatai	61

4.3.4.	SE-TX08-03 matavimų rezultatai.....	62
4.3.5.	Frontų trukmių matavimo rezultatų apibendrinimas	64
4.4.	Dažninės charakteristikos matavimo rezultatai	64
4.4.1.	SE-TX01-01 matavimų rezultatai.....	64
4.4.2.	SE-TX-01-02M matavimų rezultatai.....	65
4.4.3.	SE-TX-02-03 matavimų rezultatai	66
4.4.4.	SE-TX-08-03 matavimų rezultatai	68
4.4.5.	Dažinės charakteristikos matavimo rezultatų apibendrinimas	69
4.5.	Vėlinimo matavimo rezultatai	69
4.5.1.	SE-TX01-01 matavimų rezultatai.....	69
4.5.2.	SE-TX-01-02M matavimų rezultatai.....	71
4.5.3.	SE-TX-02-03 matavimų rezultatai	72
4.5.4.	SE-TX-08-03 matavimų rezultatai	74
4.5.5.	Vėlinimo matavimo rezultatų apibendrinimas	76
	Išvados	77
	Literatūros sąrašas	78
	Priedai.....	80
1	priedas. Unipoliariųjų impulsinių generatorių parametrų išgavimo algoritmas	80
2	priedas. Bipoliariųjų impulsų generatorių parametrų išgavimo algoritmas	88
3	priedas. ADCH apskaičiavimo algoritmas	99
4	priedas. Vėlinimo apskaičiavimo algoritmas	103

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Impulsinių stiprintuvų topologijų palyginimas.....	25
2 lentelė. Aukšto įtampos lygio paklaidos matavimų rezultatų apibendrinimas	44
3 lentelė. Impulso pločio paklaidos rezultatų apibendrinimas	57
4 lentelė. Frontų trukmių matavimo rezultatų apibendrinimas.....	64
5 lentelė. Dažninės charakteristikos matavimų rezultatų apibendrinimas.....	69
6 lentelė. Vėlinimo matavimo rezultatų apibendrinimas.....	76

Paveikslų sąrašas

1 pav. Ultragarinio keitiklio Butterworth – Van Dyke modelis [12].....	15
2 pav. Ultragarinio keitiklio impedansas [13].....	16
3 pav. Dvitaktės topologijos pavyzdys [14]	17
4 pav. Dvitaktė topologija su transformatoriumi [4].....	17
5 pav. „Superjuntion“ ir tradicinio Si tranzistoriaus struktūrų palyginimas [15].....	18
6 pav. GaN tranzistoriaus struktūra [7]	19
7 pav. SiC tranzistoriaus struktūra [16].....	19
8 pav. Impulso parametrai [17].....	20
9 pav. T ir t_r įtaka impulso dažninei charakteristikai.....	21
10 pav. C_{oss} priklausomybė nuo įtampos [18]	22
11 pav. Tyrime naudojamas impulsinis stiprintuvas	24
12 pav. Testavimo stendo diagrama	25
13 pav. Impulso įtampos lygio apskaičiavimas	28
14 pav. Signalų pločio ribas nusakantys taškai	28
15 pav. Impulsų frontų 10/90% taškai.....	29
17 pav. Sveikų periodų skaičiaus signalo svarba dažninės charakteristikos tikslumui[19]	30
18. pav. SWC metodu išskirtos pirmos harmonikos palyginimas su matuotu signalu.....	30
19 pav. Impulsų generatoriaus CPLD grandinės dalis	32
20 pav. Tranzistoriaus valdiklio schema	33
21 pav. Optinio izoliatoriaus schema.	33
22 pav. Unipoliarinio generatoriaus su plaukiojančiu tranzistoriaus valdikliu išėjimo grandinė.	34
23 pav. SE-TX01-02M impulsų generatoriaus su dviem įėjimo signalais išėjimo grandinė	35
24 pav. Išėjimo grandinės su transformatoriumi schema	36
25 pav. Transformatorinio užtūros valdymo topologijos išėjimo grandinė	37
26 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos.....	38
26 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo apkrovos.....	39
27 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo dažnio	39
28 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus su dviem įėjimo signalais įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos	40
29 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus su dviem įėjimo signalais įtampos paklaidos priklausomybė nuo apkrovos	40
30 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus su dviem įėjimo signalais įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo dažnio	41
31 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos.....	41
32 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo apkrovos.....	42
33 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo dažnio	42
34 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos.....	43

35 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu įtampos paklaidos priklausomybė nuo apkrovos.....	43
36 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo dažnio	44
37 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo dažnio.....	45
38 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo dažnio	45
39 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo apkrovos.....	46
40 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo apkrovos	46
41 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos.....	47
42 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos	47
43 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo dažnio.....	48
44 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo dažnio	48
45 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo apkrovos.....	49
46 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo apkrovos	49
47 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos.....	50
48 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos	50
49 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo dažnio.....	51
50 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo dažnio	51
51 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo apkrovos.....	52
52 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo apkrovos	52
53 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo įtampos.....	53
54 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo įtampos	53
55 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo dažnio	54
56 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo dažnio	54
57 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo apkrovos	55

58 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo apkrovos	55
59 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo įtampos	56
60 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo įtampos	56
61 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo dažnio	58
62 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo apkrovos	58
63 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo įtampos	59
64 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo dažnio	59
65 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo apkrovos	60
66 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo įtampos	60
67 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu frontų trukmių priklausomybės nuo dažnio	61
68 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu frontų trukmių priklausomybės nuo apkrovos	61
69 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu frontų trukmių priklausomybės nuo įtampos	62
70 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu frontų trukmių priklausomybės nuo dažnio	62
71 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu frontų trukmių priklausomybės nuo apkrovos	63
72 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu frontų trukmių priklausomybės nuo įtampos	63
73 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus dažninės charakteristikos priklausomybė nuo apkrovos.....	65
74 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus dažninės charakteristikos priklausomybė nuo įtampos.....	65
75 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus dažninės charakteristikos priklausomybė nuo apkrovos.....	66
76 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus dažninės charakteristikos priklausomybė nuo įtampos.....	66
77 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu dažninės charakteristikos priklausomybė nuo apkrovos.....	67
78 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu dažninės charakteristikos priklausomybė nuo įtampos.....	67
79 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu dažninės charakteristikos priklausomybė nuo apkrovos	68
80 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu dažninės charakteristikos priklausomybė nuo įtampos	68

81 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo dažnio	70
82 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo įtampos	70
83 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo apkrovos	71
84 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo dažnio	71
85 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo įtampos	72
86 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo apkrovos..	72
87 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu vėlinimo priklausomybė nuo dažnio	73
88 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu vėlinimo priklausomybė nuo įtampos	73
89 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu vėlinimo priklausomybė nuo apkrovos	74
90 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu vėlinimo priklausomybė nuo dažnio.....	74
91 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu vėlinimo priklausomybė nuo įtampos.....	75
92 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu vėlinimo priklausomybė nuo apkrovos.....	75

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

FFT – Greitoji Furjė transformacija
SWC – Sinusoidinės bangos koreliacija
SNR – Signalo ir triukšmo santykis
MOSFET – Metalo–oksido–puslaidininkio lauko tranzistorius
GaN – Galio nitridas
SiC – Silicio karbidas
Si – Silicis
 $R_{ds(on)}$ – Tranzistoriaus santakos–ištakos varža atviro kanalo režime
 Q_g – Užtūros krūvis
 C_g – Užtūros talpa
 C_{oss} – Tranzistoriaus išėjimo talpa
 V_{HV} – Aukštos įtampos maitinimo šaltinio įtampa
 dV/dt – Įtampos kitimo greitis laike
LC – Induktyvumo ir talpos grandinė
HEMT – Didelio elektronų judrio tranzistorius
PWM – Impulso pločio moduliacija

Terminai:

Fronto trukmė – Laiko tarpas, per kurį signalas pakinta tarp nustatytų amplitudės ribų
Kylantis frontas – Signalų perėjimas iš žemo lygio į aukštą
Krintantis frontas – Signalų perėjimas iš aukšto lygio į žemą
Impulso plotis – Laiko tarpas tarp impulso 50 % amplitudės ribų
Ribinis dažnis – Dažnis, kuriame sistemos amplitudė sumažėja per 3 dB
Pereinamasis procesas – Trumpalaikis sistemos atsakas į staigų signalo pokytį
Talpinė apkrova – Apkrova, kurios charakteristikas daugiausia lemia talpa
Koreliacinė analizė – Signalų panašumo vertinimo metodas
Impulsų seka – Nuosekliai generuojamų impulsų rinkinys
Vėlinimas – Laiko poslinkis tarp įėjimo ir išėjimo signalų
Frontų asimetrija – Skirtumas tarp kylančio ir krintančio frontų trukmių
Parazitiniai parametrai – Nepageidaujami fiziniai grandinės parametrai, atsirandantys dėl realių komponentų savybių

Įvadas

Ultragarsinėse sistemose didžioji dalis matavimų ir tyrimų paremti koreliacine duomenų analize. Siekiant aukšto tikslumo šiuose tyrimuose, svarbu užtikrinti signalo, žadinančio ultragarsinį keitiklį, kokybę. Tyrime ypatingas dėmesys skiriamas impulsų generatoriaus greitaveikai, kadangi impulsų dažnis tiesiogiai nusako ultragarsinių tyrimų skiriamąją gebą. Ultragarsinis keitiklis – tai pagrinde talpinio pobūdžio apkrova, todėl siekiant užtikrinti greitaveiką ypač svarbi impulsų generatoriaus maksimali atiduodama srovė. Tradiciniuose lauko tranzistoriuose kanalo laidumo gerinimas tiesiogiai susijęs su užtūros parazitinio talpumo didėjimu, todėl svarbu tinkamai parinkti išėjimo grandinės tranzistorių, su optimalia pusiausvyra tarp kanalo laidumo ir parazitinių parametru. Taip pat svarbus signalo frontų simetrijos išlaikymas, kylančio ir krintančio frontų laikų vienodumas, nusakomas dinaminių tranzistoriaus parametru. Eksperimentinėje darbo dalyje pagrindinis dėmesys skiriamas skirtingų impulsinių stiprintuvų topologijų dinaminių parametru tyrimui ultragarsinių keitiklių žadinimo taikymuose. Darbo tikslas – ištirti aukštos įtampos impulsinių stiprintuvų dinamines charakteristikas formuojant stačiakampių impulsų sekas bei įvertinti jų parametru priklausomybę nuo apkrovos, žadinimo įtampos ir dažnio.

Numatomi šie tyrimo etapai:

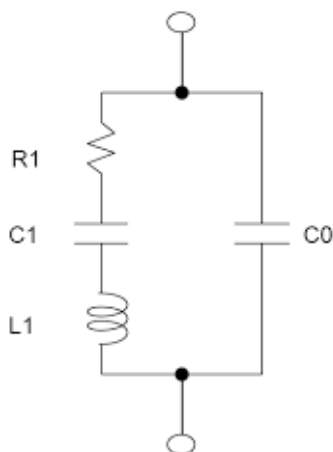
1. Atlikti literatūros analizę, siekiant susipažinti su aukštos įtampos impulsų formavimo ypatumais, keliamais reikalavimais, apkrovos (ultragarsinio keitiklio) parametrais
2. Atrinkti ir išanalizuoti potencialius kandidatus, pagrindinį dėmesį sutelkiant į greitaveiką ribojančius parametrus.
3. Sudaryti matuojamų parametru sąrašą, sudaryti tyrimų metodiką šiems parametrams matuoti.
4. Suprojektuoti impulsų generatoriaus spausdinto montažo plokštę/-es kandidatams.
5. Ištirti generuojamų impulsų parametrus, jų priklausomybes nuo apkrovos, maitinimo įtampos bei generuojamų sekų.
6. Apibendrinti gautus rezultatus, parengti baigiamąjį darbą.

1. Literatūros analizė

Dauguma ultragarsinių tyrimų grindžiami koreliacine duomenų analize. Vertinant skirtumus tarp žadinimo signalo ir atspindėtos ultragarsinės bangos nusakoma tiriamo objekto struktūra, geometrija bei medžiaginės savybės. Siekiant išgauti tikslius rezultatus, būtina žinoti generuojamo signalo parametrus. Generuojamo impulso parametrai neatitinka teorinių impulsų dėl išėjimo grandinės sąveikos su apkrova ir tranzistoriaus parametrų, tokių kaip maksimali praleidžiama srovė I_d , santakos-ištakos varža R_{ds} , užtūros krūvis Q_g ir kiti. Šie parametrai yra tarpusavyje priklausomi ir dinamiški – jų reikšmės kinta priklausomai nuo veikimo sąlygų, todėl tiesioginis parametrų palyginimas pagal techninę dokumentaciją nėra pakankamai informatyvus. Šiame darbe analizuojami aukštos įtampos impulsų generavimo parametrų pokyčiai, naudojant skirtingas tranzistorių technologijas. Tiriama parametrai apima kylančio fronto trukmę - t_r , krintančio fronto trukmę t_f , skirtumą tarp šių parametrų t_{skew} , sistemos vėlinimą t_{delay} , impulso trukmę T , energiniai parametrai kaip galia P ir vieno impulso energija E_{pp} , taip pat įvertinamos generuojamų impulsų dažninės charakteristikos. Norint sistemaiškai vertinti šiuos rodiklius, būtina suprasti, kaip jie priklauso nuo tranzistoriaus parametrų bei sąveikos su keitiklio apkrova.

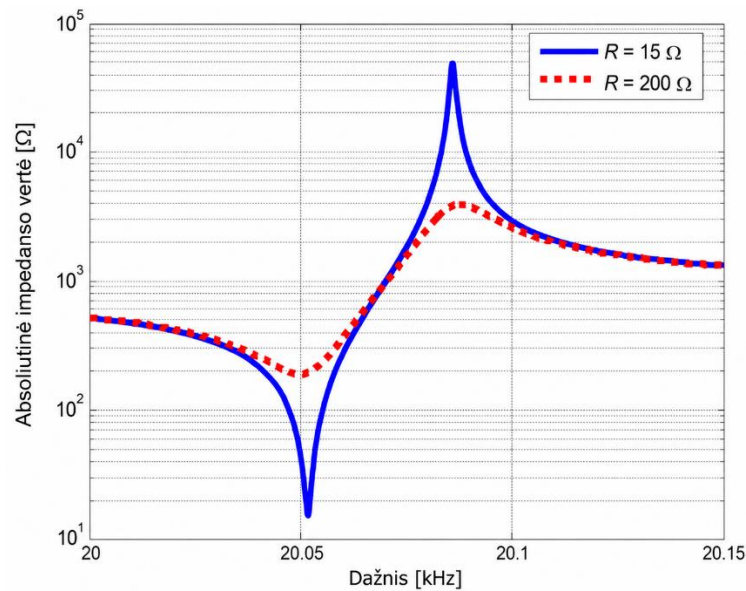
1.1. Ultragarinio keitiklio elektrinis modelis

Šiame darbe apkrova laikomas ultragarinis keitiklis. Svarbu įvertinti apkrovos sąveiką su impulsų generatoriumi siekiant gauti kuo mažesnius signalo iškraipymus. Dėl šios priežasties pasitelkiamas Butterworth – Van Dyke modelis, kuris nusako keitiklio, kaip elektrinės apkrovos, charakteristikas. Ultragarinio keitiklio modelis pateiktas 1 pav.



1 pav. Ultragarinio keitiklio Butterworth – Van Dyke modelis [12]

Šiame modelyje naudingą darbą atlieka varža R_1 , kuri reprezentuoja keitiklio nuostolius virstančius mechaniniais virpesiais. Kondensatorius C_1 ir induktyvumas L_1 sudaro rezonansinį kontūrą, kuris nusako keitiklio dažninį atsaką. C_0 – statinis keitiklio talpumas. Šis talpumas naudingo darbo neatlieka, tačiau turi įtakos perjungimo greičiui ir energijos nuostoliams [10]. Kartu šios dedamosios sudaro bendrą keitiklio impedansą, atvaizduotą 2 pav.



2 pav. Ultragarsinio keitiklio impedansas [13]

Impedanso grafike matomas minimumas ir maksimumas. Minimalus impedanso taškas vadinamas keitiklio rezonansu. Šis taškas nusako dažnį optimaliam keitiklio žadinimui. Jis gaunamas, kai C_1 ir L_1 impedansai kompensuoja vienas kitą. Maksimali impedanso vertė vadinama anti-rezonansu ir yra naudojama, kai keitiklis veikia kaip imtuvas, kadangi aukšto impedanso grandinėje lengviau išlaikyti aukštą signalo lygį. Keitiklio impedansas taip pat gali būti išreikštas matematiškai [10]:

$$Z_T(\omega) = \frac{\omega^2 C_1 L_1 - j\omega L_1 - j\alpha\omega C_1 R_1}{\omega^2 C_0 C_1 R_1 + j(\omega^3 C_0 C_1 L_1 - \omega(C_0 + C_1))} \quad (1)$$

Teoriškai, impulsų generatoriaus išėjimo impedansą būtų galima suderinti su keitiklio impedansu, kas leistų perduoti maksimalią galią į apkrovą, tačiau keitiklio parametrai ypač jautrūs temperatūrai, žadinimo įtampai ir dažniui.

2 pav. matome, jog ultragarsinio keitiklio impedansas aukštas ir iš prigimties talpinio pobūdžio. Dėl šios priežasties žadinant keitikius naudojamos aukštos įtampos. Siekiant išgauti aukšto dažnio impulsus reikalingi statūs frontai, kurie priklauso nuo keitiklio talpos ir į keitiklį tekančios srovės:

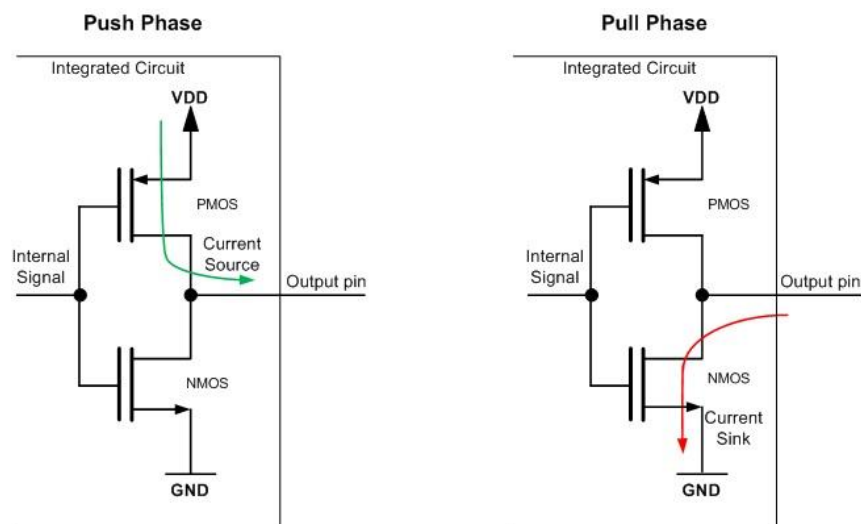
$$\frac{dV}{dt} = \frac{I}{C} \quad (2)$$

Kadangi keitiklio impedansas aukštas, srovė yra ribojama, vienas iš būdų padidinti frontų statumą – didinti srovę, tam reikalingi žemo R_{ds} tranzistoriai. Žadinimo įtampa tiesiogiai padidina perduodamą energiją bei galią. Keitiklis, kaip apkrova, sugeria impulsą, kurio energija priklauso nuo įtampos kvadrato:

$$E = C \cdot V^2 \quad (3)$$

1.2. Dvitakčio valdymo topologija

Dvitakčio topologija plačiai taikoma aukštos įtampos impulsų generavimui, ypač tada, kai reikalingas dviejų poliarumų įtampos svyravimas. Ši schema susideda iš dviejų tranzistorių, kurių santakos sujungtos su apkrova, o santakos prijungtos prie priešingų poliarumų maitinimo šaltinių. Apkrova įprastai yra prijungta tarp šių dviejų tranzistorių sandūros taško. Tranzistoriai perjunginėjami pakaitomis, todėl apkrovai taikoma kintama įtampa nuo $+V$ iki $-V$ [4]. Dvitaktės topologijos pavyzdys pateiktas žemiau.

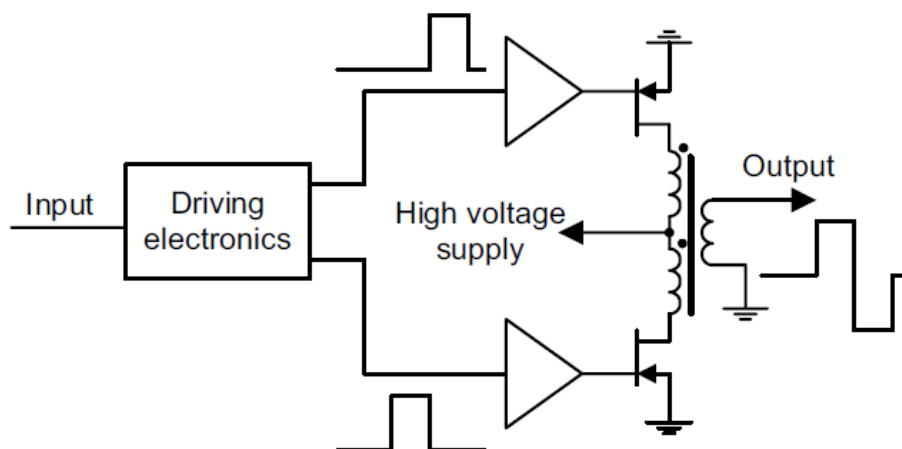


3 pav. Dvitaktės topologijos pavyzdys [14]

Dvitaktė topologija leidžia generuoti dviejų poliarumų impulsus. Tai ypač naudinga tada, kai būtina taikyti simetriškus impulsus, pavyzdžiui, siekiant sumažinti signalo nuolatinės įtampos dedamąją ar užtikrinti vienodą apkrovos įkrovimą bei iškrovimą. Kadangi abiejų tranzistorių valdymas vyksta 0V atžvilgiu, nereikia sudėtingų „bootstrap“ schemų ar izoliuotų valdiklių – užtenka paprasto tranzistorių valdiklio, kas sumažina valdymo schemos sudėtingumą[4].

Nepaisant šių privalumų, būtina užtikrinti perjungimo laikus, siekiant išvengti abiejų tranzistorių atsivėrimo, nes tai gali sukelti trumpinimą tarp +V ir –V šaltinių.

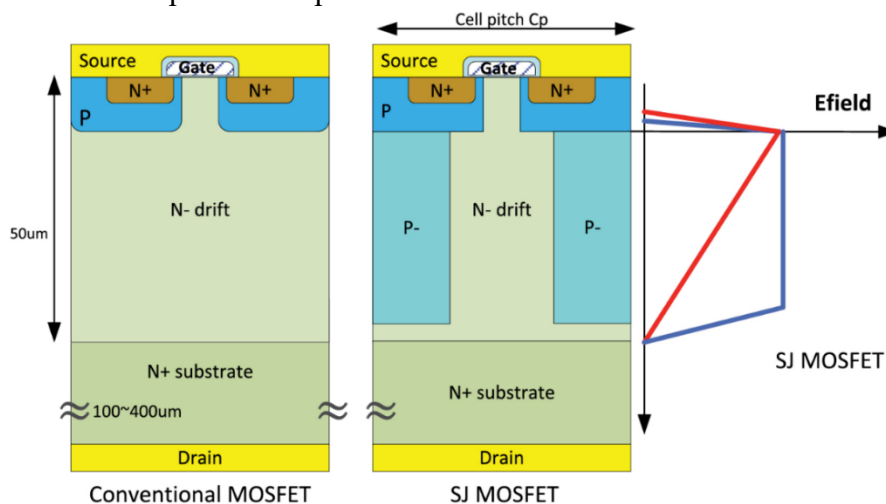
Alternatyvus sprendimas – tai transformatoriniu ryšiu paremta dvitaktė topologija, kurioje abu tranzistoriai valdo srovės kryptį tekančią per transformatoriaus pirminę apviją. Ši schema leidžia generuoti dviejų poliarumų impulsus naudojant tik vieną maitinimo šaltinį bei užtikrina galvaninę izoliaciją tarp valdymo ir išėjimo grandinių. Kadangi naudojami du identiški tranzistoriai, galima pasiekti gerą simetriją tarp teigiamo ir neigiamo impulso frontų. Visgi, tokio sprendimo trūkumai yra transformatoriaus šerdies įsisotinimas, kuris riboja sistemos veikimo dažnį [4]. Schemos pavyzdys pateiktas 5 pav.



4 pav. Dvitaktė topologija su transformatoriumi [4]

1.3. Tranzistorių technologijų palyginimas

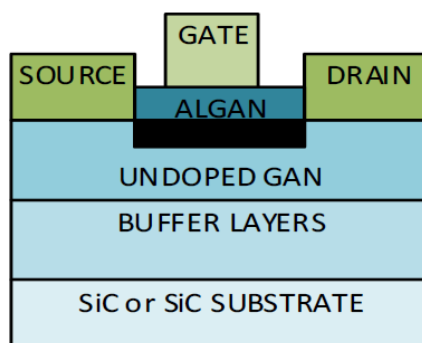
Silicio pagrindu pagaminti galios tranzistoriai ilgą laiką buvo pagrindinė technologija impulsinių ir galios keitiklių grandinėse. Jie plačiai naudojami dėl savo prieinamumo, gerai ištirtų savybių bei brandžios gamybos infrastruktūros. Tačiau ultragarsinių keitiklių žadinimo aplikacijose, kur reikalingos aukštos įtampas, tradiciniai Si technologija paremti tranzistoriai paaukvoja per daug greitaveikos šiai įtampai pasiekti. Todėl aukštos įtampas sistemose, kur reikalinga greitaveika, taikomi „superjunction“ tipo tranzistoriai. „Superjunction“ tranzistorių struktūros palyginimas su tradiciniais Si tranzistoriais pateiktas 5 pav.



5 pav. „Superjunction“ ir tradicinio Si tranzistoriaus struktūrų palyginimas [15]

Iš 5 pav. matome, jog „superjunction“ tranzistoriai išsiskiria didesniu plotu tarp P ir N legiruotų sluoksnių, todėl formuojamas platesnis kanalas. Tai reiškia, jog esant tam pačiam užtūros ilgiui gaunama mažesnė santakos-ištakos varža R_{ds} . Tai sąlygoja didesnę tranzistoriaus praleidžiamą srovę I_D , išlaikant panašius parazitinius parametrus. Dėl šios priežasties „superjunction“ tranzistoriai leidžia generuoti aukštesnio dažnio impulsus ultragarsinių keitiklių žadinimui. Technologijai bręstant, vystomi naujos kartos „superjunction“ tranzistoriai. Naujos kartos Infineon C8 tranzistorių šeima pasižymi žemesne santakos-ištakos varža R_{ds} ir užtūros talpa C_g , lyginant su senesniais C6 šeimos tranzistoriais [11]. Nepaisant šių pranašumų, svarbu įvertinti ir dinaminis tranzistoriaus parametrus, kurie neatsispindi techninėje dokumentacijoje. Parazitiniai parametrai kaip C_{oss} pasižymi netiesiškumu ir smarkiai išauga prie žemų įtampų. Impulsų generavimo aplikacijose tokie parametrai gali tapti impulsų generavimo greitaveiką ribojančiu faktoriumi, todėl svarbu įvertinti jų daromą įtaką.

Galio nitrido (GaN) tranzistoriai priklauso plačios draustinės juostos puslaidininkų klasei ir vis dažniau taikomi impulsinėse aukštos įtampas sistemose dėl savo unikalių fizikinių savybių. Geresnės GaN tranzistorių izoliacinės savybės leidžia gaminti tranzistorius su trumpesniu kanalu ir mažesne užtūros talpa C_g [7]. GaN tranzistoriaus struktūra pateikta 6 pav.

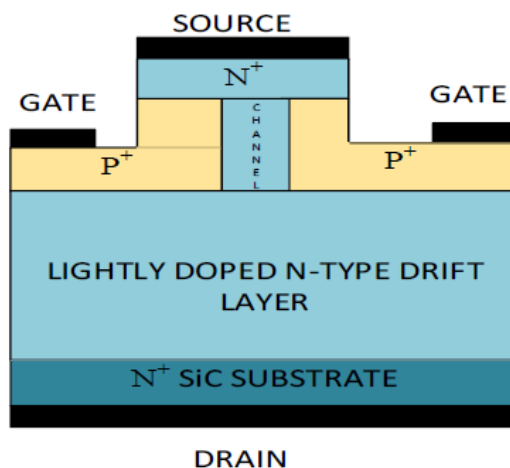


6 pav. GaN tranzistoriaus struktūra [7]

Dėl gerų izoliacinių savybių GaN tranzistorių sluoksniai plonesni nei kitų technologijų. Tai lemia mažesnę užtūros varžą bei plotą. Dėl šių priežasčių tranzistoriaus valdymas tampa efektyvesnis ir leidžia išgauti itin stačius impulso frontus, didelį dV/dt ir aukštą dažnį.

Standartiniai GaN HEMT tranzistoriai yra depletinio tipo t.y. tranzistorius pralaidos režime neprijungus valdymo įtampos. Dėl to dažniausiai naudojami kaskadiniai sprendimai, kurie leidžia naudoti standartinius valdiklius [7]. Taip pat, GaN tranzistorių užtūros pramušimo įtampa žemesnė, lyginant su kitų technologijų tranzistoriais. Uztūra ypač jautri neigiamoms įtampoms, kas riboja tranzistoriaus uždarymo greitį ir gali įnešti asimetriją tarp impulso frontų.

Silicio karbido (SiC) tranzistoriai – puslaidininkų technologija, plačiai taikoma aukštos įtampos sistemose ir išsiskiria savo izoliacinėmis savybėmis. Tai leidžia gaminti tranzistorius su trumpesniais kanalais. SiC technologija paremta tranzistoriaus struktūra pateikta 7 pav.



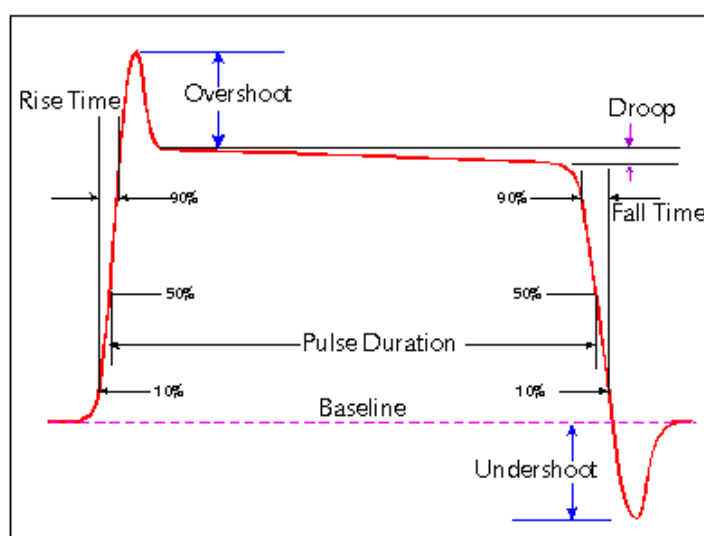
7 pav. SiC tranzistoriaus struktūra [16]

SiC tranzistoriai išsiskiria nuo GaN technologijos užtūros parametrais. SiC technologija paremtų tranzistorių užtūros pramušimo įtampa panaši į Si tranzistorių – sąlyginai didelė ir simetriška. Tai reiškia, jog frontų asimetrija koreguojama taikant dviejų poliarumų MOSFET valdiklius. Tačiau, SiC tranzistorių parazitiniai parametrai didesni, lyginant su GaN tranzistoriais. Didesnis C_g riboja užtūros persijungimo greitaveiką, o kartu ir generuojamo impulso ribinį dažnį.

Praktinio realizavimo metu dalis GaN ir SiC technologijomis paremtų impulsinių stiprintuvų prototipų pasižymėjo nestabiliu veikimu bei ryškiais pereinamųjų procesų iškraipymais, kurie neleido užtikrinti pakankamo generuojamų impulsų atsikartojamumo ir kokybės tolimesniam eksperimentiniam palyginimui. Dėl šios priežasties eksperimentinėje darbo dalyje pagrindinis dėmesys buvo skirtas stabiliai veikiančių impulsinių stiprintuvų topologijų dinaminėms parametrams tyrimui.

1.4. Impulso parametrai

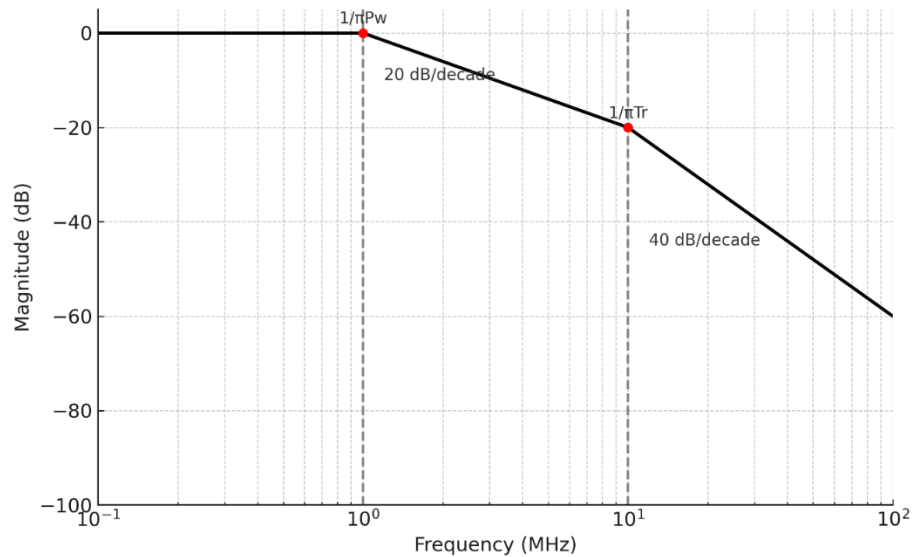
Norint įvertinti tranzistorių tinkamumą impulsų generavimo aplikacijoms, būtina kiekybiškai apibūdinti generuojamus impulsus. Pagrindiniai impulsų kokybę lemiantys parametrai yra jų dažninė charakteristika, kylantis ir krintantis frontas, impulso galia, impulso energija bei iškraipymai. Šie rodikliai leidžia objektyviai palyginti skirtingų tranzistorių technologijų veikimą bei įvertinti jų tinkamumą konkrečioms aplikacijoms.



representative pulse waveform

8 pav. Impulso parametrai [17]

Ultragarsiniuose matavimuose dažninė charakteristika tiesiogiai daro įtaką sistemos gebėjimui išskirti smulkias detales. Platesnė dažninė juosta leidžia geriau atkurti trumpus impulsus ir sumažinti laikinį persidengimą tarp atspindžių. Tai ypač svarbu koreliacinėje analizėje, kuriai atlikti reikalingas tiksliai apibrėžtas atraminis signalas. Generuojamų impulsų dažninę charakteristiką nusako generuojamo impulso plotis bei frontų trukmės. Šių parametų įtaka dažninei charakteristikai pavaizduota 9 pav.



9 pav. T ir t_r įtaka impulso dažninei charakteristikai

Pirmasis taškas, kur prasideda dažninio atsako slopimas priklauso nuo impulso periodo T:

$$f_{\text{width}} = \frac{1}{\pi T} \quad (4)$$

Nuo šio taško dažninė charakteristika slopsta pagal šią lygtį:

$$20 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{f} \right) \quad (5)$$

Šis slopimas tęsiasi iki antrojo taško, kuris priklauso nuo fronto trukmės:

$$f_{\text{rise}} = \frac{1}{\pi t_r} \quad (6)$$

Toliau dažninės charakteristikos slopimas tampa statesnis ir išreiškiamas šia lygtimi:

$$40 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{f} \right) \quad (7)$$

Galima teigti, jog impulsų generatoriaus ribinį dažnį riboja fronto trukmė. Ribinis dažnis aprašomas šia formule [5]:

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{\pi t_r} \quad (8)$$

Frontų trukmes nusako naudojamų tranzistorių parametrai ir keitiklio talpa. Frontai susidaro iš 2 dalių – pastovios įtampos krovimo ir pastovios srovės krovimo. Šių dalių laikai išreiškiami formulėmis [5].

$$t_{CC} = \frac{V_{Th} \cdot C_0}{I_{D\text{peak}}} \quad (9)$$

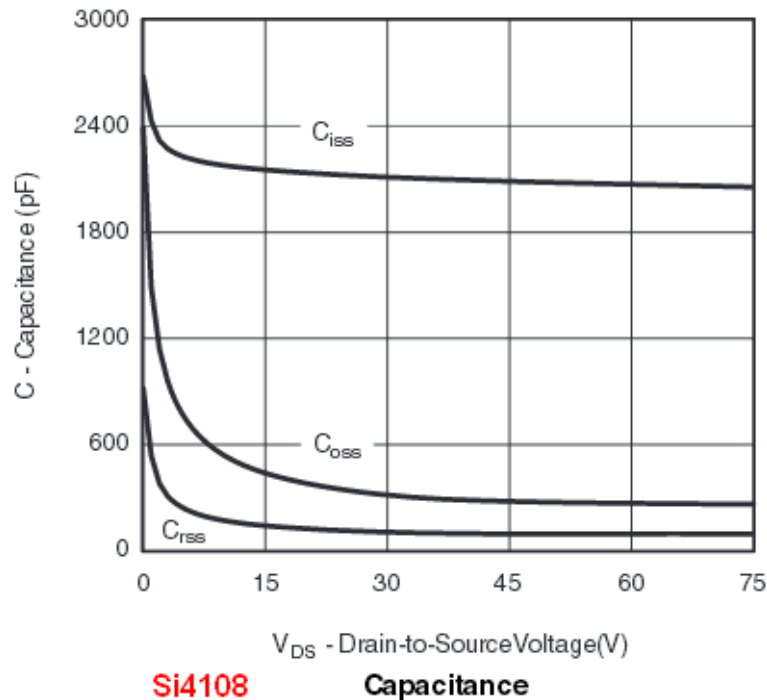
Čia t_{cc} – tai laikas, per kurį vyksta pastovios srovės krovimas, V_{Th} – tranzistoriaus ribinė įtampa, C_0 – ultragarsinio keitiklio talpa, $I_{D\text{peak}}$ – srovė, tekanti per tranzistorių.

Pastovios įtampos krovimo laikui nustatyti naudojama žemiau pateikta formulė:

$$t_{RC} = -R_{DS} \cdot C_0 \cdot \ln \left(\frac{V_{\text{outmax}} - V_{HV}}{V_T - V_{HV}} \right) \quad (10)$$

Šioje formulėje R_{DS} – santakos-ištakos varža, V_{outmax} – maksimali išėjimo įtampa, V_{HV} – aukštos įtampos maitinimo šaltinio įtampa.

Pateiktos formulės leidžia aproksimuoti impulso frontų trukmes, tačiau neįvertina visų tranzistoriaus parametrų, kurie turi įtakos frontų trukmei. Vienas svarbiausių iš jų yra C_{oss} – tranzistoriaus savitoji talpa, kuri stipriai priklauso nuo įtampos, krintančios ant tranzistoriaus. Ši talpa netiesinė ir tranzistoriaus atsivėrimo metu šios talpos įkrovimas sudaro dalį visos fronto trukmės. Tipinė C_{oss} priklausomybė nuo įtampos pateikta 10 pav.



10 pav. C_{oss} priklausomybė nuo įtampos [18]

Šie parametrai įvertina fronto trukmes iš apkrovos pusės, tačiau taip pat svarbu įvertinti užtūros poveikį fronto statumui. Tranzistoriai su mažesniais parazitiniiais užtūros parametrais. Pagrindiniai parametrai ribojantys užtūros atsivėrimą – užtūros krūvis Q_g ir užtūros talpa C_g . Uztūros talpa nusako tranzistoriaus atsivėrimo greitį ir užtūros įtampos kylimo greitį. Pastarasis aprašomas formule:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{I_{gate}}{C_g} \quad (11)$$

Čia I_{gate} – tranzistoriaus valdiklio atiduodama srovė.

Uztūros krūvis nusako Miller'io plokštumos trukmę. Ji išreiškiama formule:

$$t_{Miller} = \frac{Q_g}{I_{gate}} \quad (12)$$

Abi šios formulės – aproksimacijos, kadangi valdiklio atiduodama srovė nėra pastovi. Norint patikimai įvertinti šiuos kriterijus reikalingi praktiniai matavimai.

Tyrime taip pat svarbu įvertinti skirtumą tarp kylančio ir krintančio fronto trukmių. Nevienodos frontų trukmės įneša šoninių lapelių į koreliacinės funkcijos rezultatus. Šie lapeliai turi tikimybę persidengti su realiais išmatuotais signalais, todėl prarandama informacija. Frontų trukmių skirtumas

kyla iš impulsų generavimo grandinės topologijos. Išėjimo grandinė iš esmės veikia kaip srovės šaltinis, ribojamas R_{ds} , todėl impulso frontus galime aprašyti formule:

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U}{L} \quad (13)$$

Kai signalas perjungiamas į aukštą lygį, gaunamas staigus srovės kitimas, todėl kylantys frontai statesni. Perjungiant impulsą iš aukšto lygio į žemą – įtampa krinta į 0 V, todėl krintančio fronto trukmė ilgesnė. Šioje formulėje L – tai parazitinis grandinės induktyvumas arba transformatoriumi paremtos išėjimo grandinės induktyvumas.

Ši frontų asimetrija gali būti ištaisyta naudojant dviejų poliarumų įtampų tranzistoriaus valdymo grandinę. Šis metodas taikomas „superjunction“ tranzistoriams, tačiau kitos tranzistorių technologijos, kaip GaN, pasižymi nesimetriška užtūros pramušimo įtampa, t.y., $+V_{gs}$ turi didesnes ribas nei $-V_{gs}$, todėl frontų asimetrija gali dar labiau išaugti. Taip pat ši asimetrija gali skirtis nuo impulsų skaičiaus – pirmasis impulsas eilėje turės didesnę energijos rezervą V_{HV} kondensatoriuose nei paskutinis, todėl svarbu įvertinti šią asimetriją visoje impulsų eigoje.

Siekiant palyginti skirtingų tranzistorių technologijų efektyvumą naudojami galios ir energijos per impulsą matavimai. Galios nuostoliai išėjimo grandinėje priklauso nuo I_D ir atviro tranzistoriaus kanalo varžos R_{ds} . Kadangi tranzistoriaus srovė taip pat ribojama R_{ds} , galios išsiskyrimą ant tranzistorių galime išreikšti formule:

$$P(t) = \frac{V_{HV}^2}{R_{DS}} \quad (14)$$

Energija išreiškiama kaip galios integralas tam tikrame laiko periode:

$$E = \int_0^T P(t) dt \quad (15)$$

Idealiomis sąlygomis, kai tranzistorius neapkrautas, šie nuostoliai turėtų būti kuo artimesni 0W. Realiomis sąlygomis, kai tranzistorius apkrautas ultragarsinių keitikliu, ant keitiklio taip pat išsiskiria energija, kuri aprašoma formule:

$$E_T(t) = \frac{1}{2} C_0 V^2 \quad (16)$$

Kadangi kiekvienas impulsas turi ir įkrauti, ir iškrauti keitiklio talpumą, bendra grandinės energija gali būti aprašoma taip:

$$E(t) = C_0 V^2 \quad (17)$$

Tiriant impulsų generavimo efektyvumą taip pat svarbu įvertinti įtampos nuostolius ant išėjimo tranzistorių. Šie nuostoliai išreiškiami formule:

$$V_{loss} = I_{max} \cdot R_{DS} \quad (18)$$

Visi aptarti parametrai – frontų trukmės, dažninės charakteristikos, galios nuostoliai, impulso energija bei įtampos kritimai – yra dinamiški ir priklauso nuo realių veikimo sąlygų. Ypač didelę įtaką impulso parametrų turi V_{HV} . Dėl šios priežasties impulsų generavimo efektyvumo vertinimas turi būti atliekamas visame V_{HV} įtampų ruože.

2. Eksperimentų metodika

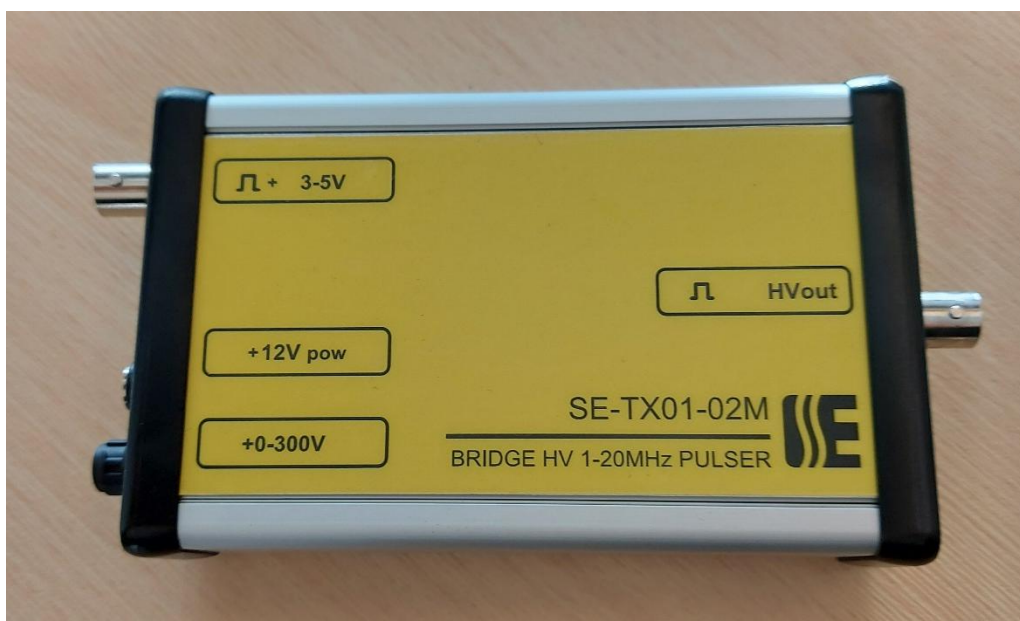
Aukštos įtampos impulsų generavimo tyrimuose, taikomose ultragarsinių keitiklių žadinimui, vien techninių duomenų lapuose pateiktų tranzistorių parametrų nepakanka tiksliai įvertinti realiųjų impulsų formavimo savybių. Kaip aptarta teorinėje dalyje, pagrindinius impulso kokybės rodiklius – kylančio ir krintančio frontų trukmes, jų asimetriją, dažninę charakteristiką, energinius parametrus bei nuostolius – lemia ne tik vardiniai $R_{ds(on)}$, Q_g ar C_{oss} dydžiai, bet ir jų netiesiškumas, priklausomybė nuo įtampos ir srovės, taip pat sąveika su talpine ultragarsinio keitiklio apkrova. Todėl šių parametrų įvertinimas turi būti atliekamas realiomis veikimo sąlygomis, naudojant tikslingai parinktą matavimo metodiką, užtikrinančią rezultatų atkuriamumą ir galimybę lyginti skirtingas tranzistorių technologijas.

Šio skyriaus tikslas – aprašyti eksperimentų eigą, naudojamus matavimo principus, įrangą ir duomenų apdorojimo metodus, leidžiančius objektyviai įvertinti aukštos įtampos impulsinių stiprintuvų dinaminis parametrus ultragarsinių impulsų generavimo taikymuose. Metodikoje apibrėžiama impulsų generatoriaus matavimo aplinka, pagrindinių impulso parametrų nustatymo ir registravimo principai, matavimo sąlygos bei priemonės, skirtos sumažinti išorinių veiksnių – maitinimo šaltinio nestabilumo, apkrovos temperatūrinių pokyčių ar valdymo grandinės dinamikos – įtaką matavimo rezultatams.

Taip sudaryta metodika užtikrina, kad visi tiriami tranzistoriai vertinami identiškomis sąlygomis, naudojant tą pačią bandymo schemą, tą pačią apkrovą ir vienodus signalų apdorojimo algoritmus. Tai leidžia objektyviai palyginti skirtingų technologijų impulsų generavimo efektyvumą ir įvertinti jų tinkamumą ultragarsinių keitiklių žadinimo taikymams.

2.1. Duomenų surinkimas

Bandymams atlikti naudojami aukštos įtampos impulsiniai stiprintuvai. Vienas iš tyrime naudojamų stiprintuvų pavaizduotas žemiau.



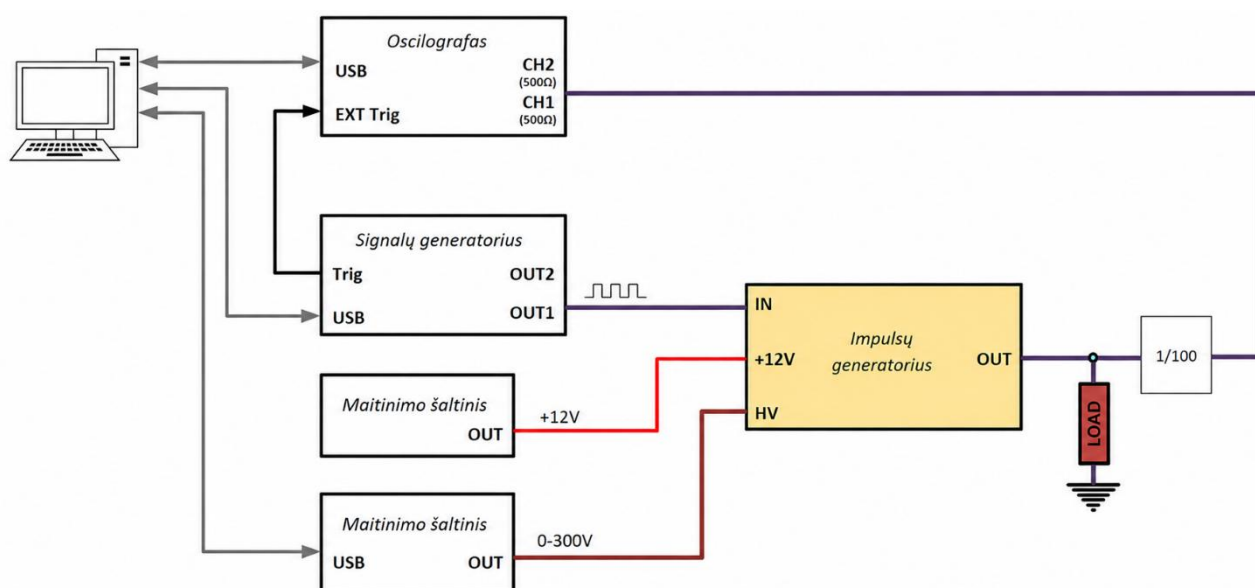
11 pav. Tyrime naudojamas impulsinis stiprintuvas

Tyrimė naudojami impulsiniai stiprintuvai skiriasi savo aukštos įtampos impulsų generavimo topologija. Topologijų palyginimas pateiktas lentelėje.

1 lentelė. Impulsinių stiprintuvų topologijų palyginimas

Impulsų generatorius	Topologija
SE-TX01-01	Vieno poliarumo pusės tiltelio topologija su plaukiojančiu užtūros valdymu, du valdymo signalai aukštam ir žemam lygiui nustatyti.
SE-TX01-02M	Vieno poliarumo pusės tiltelio topologija su plaukiojančiu užtūros valdymu, vienas valdymo signalas.
SE-TX02-03	Dviejų poliarumų dvitaktė topologija su transformatoriumi atskirta išėjimo grandine. Du valdymo signalai.
SE-TX08-03	Dviejų poliarumų pusės tiltelio topologija su transformatoriumi atskirta išėjimo grandine. Du valdymo signalai.

Impulsų generatoriai priima impulsų seką iš signalų generatoriaus. Šie impulsai perduodami į MOSFET valdiklius kurie prijungti prie aukštos įtampos maitinimo šaltinio. Taip stiprintuvo išėjime gaunami aukštos įtampos impulsai. Siekiant tikslingai įvertinti tranzistorių technologijų tinkamumą ultragarsinių tyrimų aplikacijose svarbu tinkamai apkrauti stiprintuvą. Kadangi ultragarsiniai keitikliai talpinio pobūdžio, svarbu ištirti tranzistorių charakteristikas prie talpinių apkrovų. Duomenų nuskaitymas atliekamas oscilografu, siekiant apsaugoti jo įėjimo kanalus išėjimo signalas slopinamas 1:100 dalikliu. Pilno testo stendo sujungimo diagrama pateikta 12 pav.



12 pav. Testavimo stendo diagrama

Kiekvienam iš tyrimė naudojamų prietaisų parašyta Python biblioteka, leidžianti lengvai konfigūruoti įrangos parametrus. Bibliotekos apjungiamos pagrindinėje bandymo programoje.

Siekiant sumažinti paklaidas naudojamas taktinių dažnių sinchronizavimas tarp oscilografo ir signalų generatoriaus. Oscilografas visada veikia maksimaliu 2 GSa/s režimu, todėl gaunamas maksimalus laikinis tikslumas. Siekiant sumažinti surinktų duomenų dydį taikomas langas, kuris išsaugo tik dominančią oscilogramos dalį. Taip sumažintas duomenų dydis saugomas diske. Šis pirminis duomenų apdorojimas taip pat sumažina bandymų trukmę. Duomenys saugomi kaip laiko ir

amplitudės masyvai .txt failuose. Failų pavadinimai nusako bandymo parametrus – generuojamo signalo dažnį, aukštos įtampos maitinimo amplitudę ir apkrovos tipą. Tai supaprastina tolimesnį signalų apdorojimą ir charakteristikų išgavimą.

Signalų generatoriaus valdymas tiesiogiai nusako generuojamų aukštos impulsų seką, todėl tinkamas jo parametrų parinkimas itin svarbus. Kaip minėta anksčiau, signalų generatorius naudoja išorinį taktinio dažnio šaltinį, paimtą iš oscilografo. Impulsiniai stiprintuvai priima signalus 3-5 V ribose, dažnis konfigūruojamas priklausomai nuo bandymo reikalavimų. Generuojant impulsų sekas bipoliariems stiprintuvams išnaudojama generatoriaus kanalų fazių surišimo funkcija. Tai leidžia abiejų kanalų aktyvumą tuo pačiu metu ir užtikrina jog teigiamos ir neigiamos šakos impulsų sekos nepersidengia, kas sukeltų apsauginės stiprintuvo grandinės aktyvumą ir iškraipytų generuojamus impulsus. 1:100 slopintuvo impedansas suderintas su oscilografo įėjimo impedansu – 50 Ω , tai užtikrina minimalius iškraipymus dėl atspindžių.

Tiriant impulsų generatorių, paremtą skirtingų tranzistorių technologijomis, svarbu išmatuoti jų elgseną esant įvairioms apkrovoms. Kadangi tikrojo ultragarsinio keitiklio impedansas yra sudėtingas ir stipriai priklausomas nuo dažnio, buvo parinktas apkrovų rinkinys, leidžiantis sistemingai įvertinti pagrindinius pulso formavimo ribojančius veiksnius. Bandymuose naudotos keturios apkrovų kategorijos: be apkrovos (atviras), 50 Ω varža, 470pF kondensatorius, ir 1nF kondensatorius. Kiekviena jų atspindi skirtingą fizikinę apkrovos tipą ir leidžia atskirti tranzistoriaus, išėjimo topologijos ir apkrovos sąveikos įtaką matuojamiems parametrams.

Atviras režimas reiškia, kad impulsų generatoriaus išėjimas nėra apkrautas jokių aktyviu elementu, o tranzistoriai dirba į tuščią grandinę. Tai leidžia įvertinti vidinius ribojančius veiksnius, atsirandančius dėl tranzistorių parazitinių talpų, užtūros dinaminų procesų, vidinių parazitinių induktyvumų ir išėjimo topologijos simetrijos ar jos trūkumų. Kadangi nėra reikšmingos talpinės ar varžinės apkrovos, frontų statusas atvirame režime yra labiausiai ribojamas tranzistoriaus savybių. Taip galima nustatyti maksimalią pasiekiamą greitaveiką, kuri reprezentuoja teorinę ribą, nepriklausančią nuo apkrovos. Atviras režimas taip pat geriausiai atskleidžia pereinamųjų procesų virpesius. Šis režimas padeda įvertinti impulsų formavimo kokybę ir grandinės stabilumą esant minimaliai apkrovai. 50 Ω apkrova leidžia išmatuoti tranzistoriaus gebėjimą atiduoti srovę ir $R_{ds(on)}$ įtaką. Kadangi ultragarsiniai keitikliai iš prigimties neturi žymios varžinės komponentės, 50 Ω apkrova nėra skirta įvertinti realų sistemos veikimą. Tačiau ji leidžia nustatyti tendencijas, susijusias su didelėmis srovėmis ir nuostoliais išėjimo grandinėje. Su 50 Ω apkrova galima įvertinti, kiek efektyviai tranzistorius atiduoda srovę ir kaip kinta galios bei įtampos nuostoliai didėjant V_{HV} . 470pF ir 1nF talpos atstoja ultragarsinių keitiklių įtaką impulsų stiprintuvui. Šios apkrovos išryškina Miller'io efektą bei $R_{ds(on)}$ įtaką impulsų frontams. Taip pat, talpinės apkrovos iššaukia staigius srovės šuolius, kadangi impulso pradžioje jų impedansas itin mažas. Naudojant šias apkrovas galima išskirti, kuriuos impulsų parametrus riboja tranzistorius, kuriuos – topologija, o kuriuos – apkrovos talpa, taip leidžiant objektyviai įvertinti kiekvienos tranzistorių technologijos privalumus ultragarsinių impulsų generavimui.

2.2. Parametrų įvertinimas

Norint objektyviai įvertinti impulsų generavimo grandinės veikimą, būtina iš pirminių laiko srities duomenų tiksliai išgauti kiekybinius parametrus, nusakančius impulso formą, energiją ir dinaminis reiškinis. Parametrų išgavimas susideda iš kelių etapų. Pirmiausia identifikuojami pagrindiniai impulsų segmentai – kylantysis frontas, plokščioji dalis, krintantysis frontas. Tuomet nustatomos tikslios laiko ribos, naudojant ribinę amplitudę arba signalo normalizaciją. Šis žingsnis leidžia apskaičiuoti pagrindinius laiko parametrus: kylančio fronto trukmę t_r , krintančio fronto trukmę t_f , frontų asimetrijos parametru $tskew$ bei impulso vėlinimą $tdelay$. Kiekvienas iš šių parametrų tiesiogiai atspindi tranzistoriaus parazitinius parametrus.

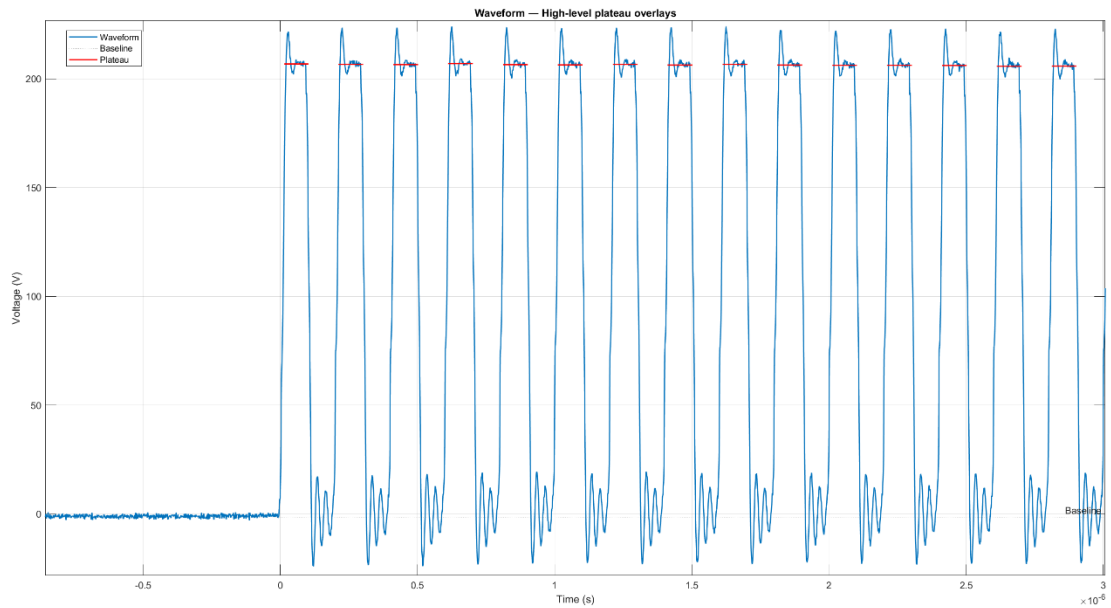
Be laiko parametrų, iš gaunamų duomenų apskaičiuojami ir energiniai impulsų rodikliai. Integruojant signalo galią per impulso trukmę nustatomos energijos per impulsą E_{pp} ir momentinės galios $P(t)$ reikšmės. Šie parametrai leidžia įvertinti tranzistoriaus efektyvumą, nuostolius atviro kanalo režime, energijos perdavimą į apkrovą bei galimus prisotinimo ar srovės ribojimo reiškinis.

Galiausiai, taikant SWC funkciją gaunama impulsų sekos dažninė charakteristika. Impulsai koreliuojami su etaloninėmis sinuso bangomis, o pagal gautą koreliacijos spektrą įvertinama sistemos geba perduoti aukšto dažnio komponentus. Tai ypač svarbu ultragarsiniuose taikymuose, kuriuose frontų statusas tiesiogiai lemia sistemos skiriamąją gebą.

2.2.1. Signalų aukšto lygio įtampos įvertinimas

Aukšto lygio parametras yra vienas svarbiausių matuojant impulsinių išėjimo grandinių veikimą, nes jis tiesiogiai nusako, kokią įtampą tranzistorius sugeba perduoti į apkrovą esant realioms darbo sąlygoms. Kadangi kiekviename bandyme žinoma taikoma maitinimo įtampa V_{HV} , išmatuotas aukštas lygis leidžia tiesiogiai įvertinti įtampos nuostolius tranzistoriuose, susidarancius dėl $R_{ds(on)}$, dinaminės varžos, parazitinių talpumų ir induktyvumų. Aukšto lygio įtampos apskaičiuojamos kiekvienam impulsui, kadangi impulsų eigoje nuostoliai gali kisti dėl kondensatorių išsikrovimo, parazitinių induktyvumų, tranzistoriaus dinaminis savybių ar kondensatorių išsikrovimo.

Visų pirma nustatomos apytikslės impulsų ribos, taikant segmentavimą į aukštą arba žemą lygį pagal ribinę vertę. Ši riba nustatyta kaip 50% V_{HV} . Siekiant pašalinti pereinamųjų procesų poveikį, kraštiniai taškai pašalinami. Likusių taškų vidurkis atspindi aukštą signalo įtampos lygį. Apdorojimo rezultatai atvaizduoti 13 pav. Impulso įtampos lygio įvertinimas taip pat suteikia galimybę tiksliai nustatyti kitiems parametrams reikalingus taškus, tokius kaip 50% ribos impulso pločiui apskaičiuoti arba 10/90% ribos impulsų frontams įvertinti.

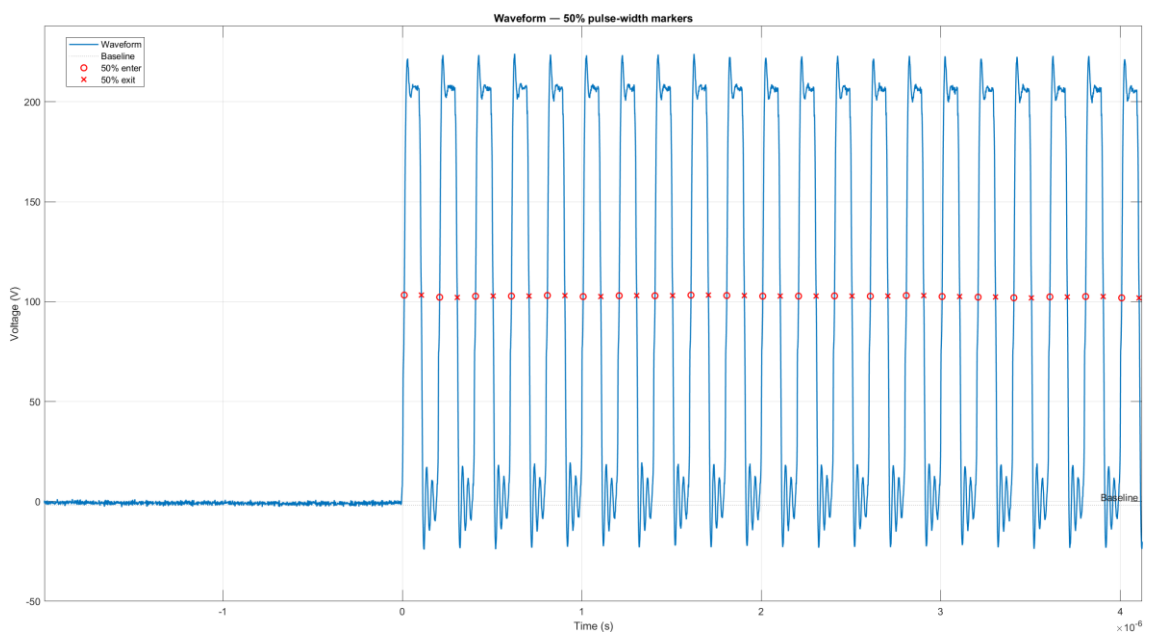


13 pav. Impulso įtampos lygio apskaičiavimas

2.2.2. Impulso pločio įvertinimas

Impulso plotis itin svarbus parametras ultragarsinėse sistemose, kadangi jis tiesiogiai susijęs su signalo dažniiniu spektru ir signalo energija. Impulso pločio atitikimą nusako tranzistoriaus persijungimo sparta, vėlinimas ir apkrovos įtaka, todėl šis parametras yra geras tranzistoriaus greitaveikos rodiklis.

Impulso plotis apibrėžiamas kaip laiko tarpas tarp signalo kylančio ir krintančio fronto 50% ribos. Šiems taškams apskaičiuoti naudojamas 3.2.1 skyriuje aptarta signalo aukšto lygio įtampos vertė kiekvienam impulsui. Šios vertės dalinamos pusiau ir nuo impulso centrinio taško ieškoma minimali paklaida į abi puses. Radus artimiausią tašką atliekama tiesinė interpoliacija su gretimais taškais, siekiant nustatyti tikslią 50% ribą. Kiekvienam impulsui apskaičiuojamas laiko tarpas tarp šių nustatytų taškų. Pulso pločio įvertinimo algoritmo rasti taškai pavaizduoti 14 pav.

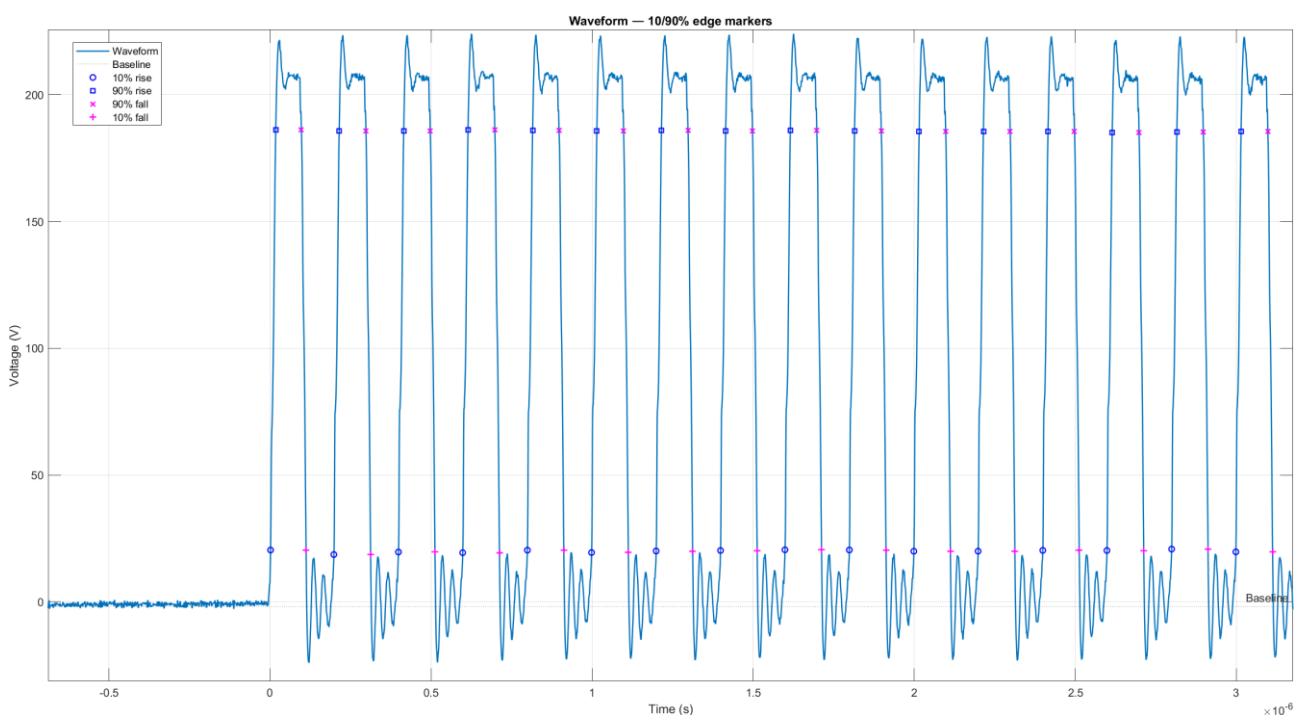


14 pav. Signalų pločio ribas nusakantys taškai

2.2.3. Signalo fronto trukmių įvertinimas

Kylančio ir krįtančio frontų trukmės yra vieni svarbiausių parametrų vertinant impulsų generatoriaus veikimo spartą. Statesni frontai reiškia efektyvesnę energijos perdavimą į ultragarsinius keitiklius. Taip pat frontų trukmės nusako tranzistoriaus parazitinius parametrus, tokius kaip miller'io talpa, užtūros krūvis ir tranzistoriaus savitoji talpa.

Tyrime frontų trukmės apskaičiuojamos pagal 10–90% ribas. Kiekvienam impulsui šios ribos apskaičiuojamos pagal to impulso aukštas ir žemas ribas. Kadangi šie slenksčiai apskaičiuojami kiekvienam impulsui individualiai, galima analizuoti fronto trukmės priklausomybę nuo impulso indekso sekoje. Fronto trukmių apskaičiavimas atliekamas panašiai kaip ir impulso pločio – imamos procentinės vertės nuo impulso įtampos ir randama minimali paklaida šioms vertėms. Atliekama tiesinė interpoliacija ir taip gaunamos frontų taškų vertės. Šie taškai atvaizduoti 15 pav.

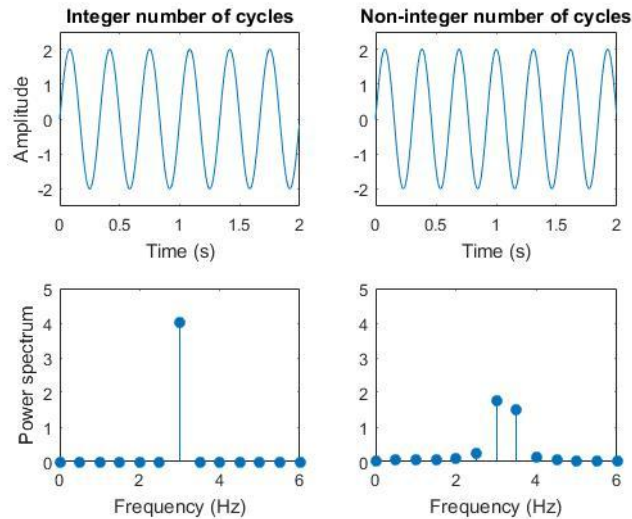


15 pav. Impulsų frontų 10/90% taškai

2.2.4. Dažninės charakteristikos įvertinimas

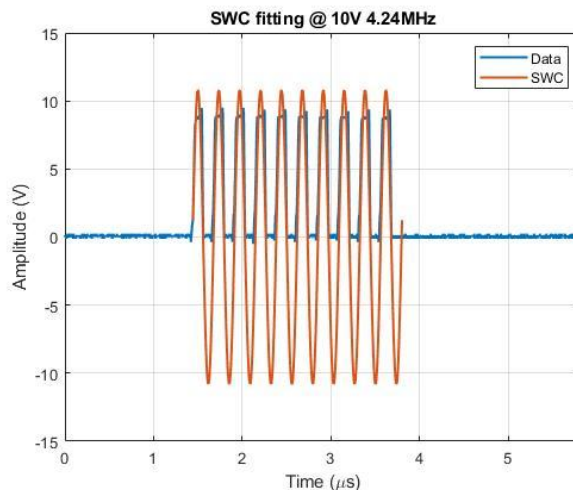
Dažninės charakteristikos įvertinimas svarbus siekiant nustatyti maksimalų ultragarsinės sistemos darbinį dažnį. Ribinis dažnis yra dažniausiai naudojamas įvertis sistemos maksimaliam dažniui nusakyti, tačiau sistema gali veikti ir prie didesnio dažnio.

Siekiant išmatuoti impulsinių stiprintuvų dažnines charakteristikas bus naudojama SWC funkcija. Ši funkcija palygina panašumą tarp dominančio signalo ir tam tikros amplitudės sinusinio signalo. Tai leidžia įvertinti stačiakampių impulsų dažninę charakteristiką taikant harmoninių signalų koreliaciją. Taip pat, SWC funkcija užtikrina sveikų periodų skaičių koreliaciniame signale, taip išvengiama pašalinių dedamųjų dažninėje charakteristikoje. Signalų su tinkamai parinktu periodų skaičiumi palyginimas pateiktas 17 pav.



17 pav. Sveikų periodų skaičiaus signalo svarba dažninės charakteristikos tikslumui[19]

Naudojant šią funkciją užtikrinama spektrinė raiška, tačiau funkcijai reikalingas apibrėžtas impulsų dažnis, todėl renkant duomenis apdorojimui ši informacija turi būti išsaugota. SWC funkcijos veikimas pavaizduotas 18 pav.



18. pav. SWC metodu išskirtos pirmos harmonikos palyginimas su matuotu signalu

Iš paveikslėlio matome stačiakampio signalo pirminei harmonikai atitinkantį signalą. Aiškiai matomas pirmo ir paskutiniojo harmoninio signalo taško atrinkimas. Taip pat galime pastebėti, jog harmoninio signalo amplitudė šiek tiek didesnė nei pats stačiakampis signalas. Taip yra dėl stačiakampio aukštesniųjų harmonikų viršutinės plokštumos formavimo. Pagal Furje eilutę, stačiakampis signalas aprašomas taip:

$$t_x(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right) \quad (19)$$

Iš šios formulės galime gauti pirmosios harmonikos amplitudę stačiakampiame signalo:

$$A_1 = \frac{4A}{\pi} \approx 1.273A \quad (20)$$

Todėl SWC metodu išskirta pirmoji harmonika gali turėti didesnę amplitudę nei tiesiogiai stebima stačiakampio signalo amplitudė. Kadangi SWC metodas buvo vienodai taikomas visoms tirtoms impulsinių generatorių topologijoms, pirmosios harmonikos amplitudės padidėjimas sistemingai pasireiškia visuose matavimuose. Dėl šios priežasties šis efektas neturi reikšmingos įtakos tarpusavio topologijų palyginimui, kadangi išlieka vienodas visų matavimų atveju.

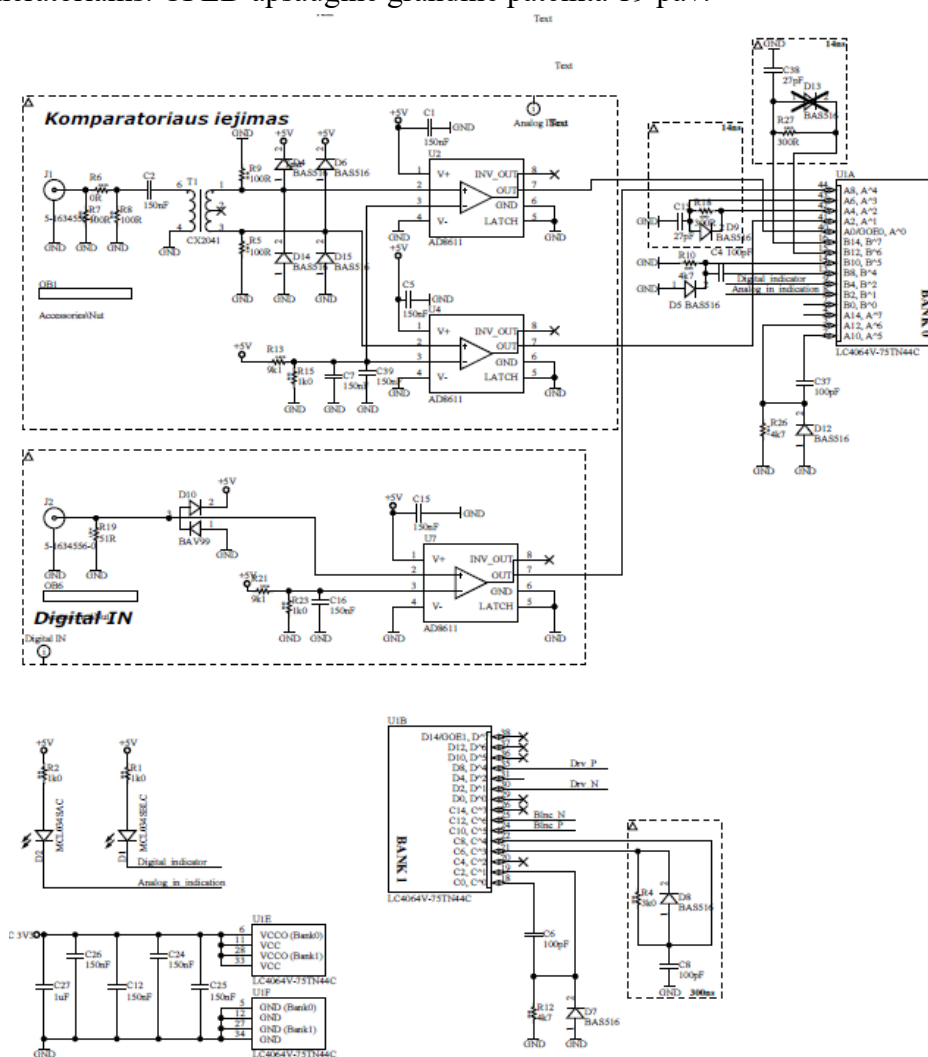
2.2.5. Vėlinimo įvertinimas

Vėlinimo matavimų metu buvo vertinamas laiko skirtumas tarp impulsų generatoriaus įėjimo valdymo signalo ir generuojamo aukštos įtampos impulso išėjime. Vėlinimas apskaičiuotas matuojant laiko poslinkį tarp abiejų signalų 50 % amplitudės lygio taškų. Matavimai atlikti kiekvienam impulsui impulsų sekoje atskirai, siekiant įvertinti galimą vėlinimo kitimą priklausomai nuo impulso vietos sekoje, apkrovos, žadinimo įtampos bei impulsų pasikartojimo dažnio. Toks matavimo metodas leidžia įvertinti impulsų generatoriaus pereinamųjų procesų dinamiką, valdymo grandinės greitaveiką ir jų kitimą impulsų sekoje.

3. Impulsų generatorių topologijų palyginimas

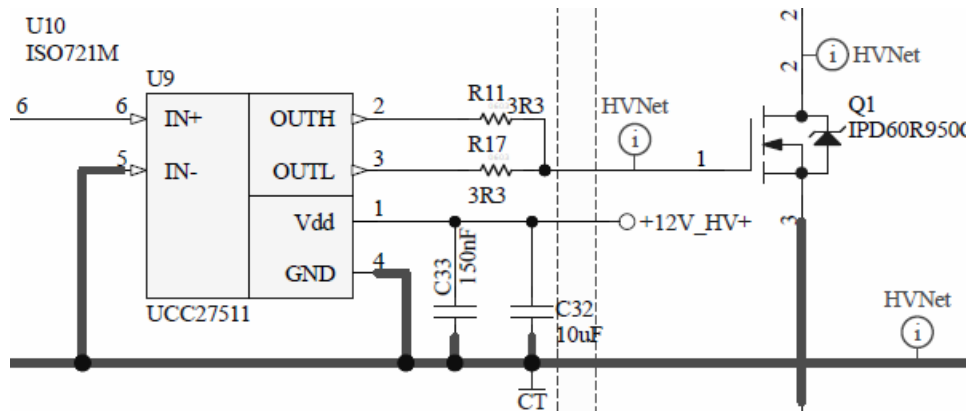
Šiame skyriuje aptariami impulsinių stiprintuvų topologijų skirtumai, jų privalumai ir trūkumai, potencialūs greitaveiką ir impulsų iškraipymą sąlygojantys veiksniai.

Visuose impulsų generatoriuose taikoma ta pati apsaugos grandinė – CPLD LC4064V-75TN44C. Jos paskirtis užtikrinti, jog išėjimo tranzistoriai negali viršyti tam tikro laiko, kai tranzistorius atvertas. Taip apsaugoma nuo tranzistorių perkaitimo kai generuojami impulsai. Ši grandinės dalis riboja minimalų impulsų atsikartojimo dažnį. Todėl atliekant tyrimus mažiausias naudotas dažnis 650 kHz. Taip pat ši grandinės dalis vėlina sistemos veikimą. Šis vėlinimas turėtų išlikti pastovus visiems impulsų generatoriams. CPLD apsauginė grandinė pateikta 19 pav.



19 pav. Impulsų generatoriaus CPLD grandinės dalis

CPLD grandinės išėjimas sujungtas su tranzistorių valdikliais. Jie užtikrina, jog išėjimo grandinėje aukštoji ir žemoji šaka neįsijungia vienu metu. Taip pat naudojamas „bootstrap“ mechanizmas, kuris užtikrina greitą tranzistorių persijungimą, taip mažindamas sistemos nuostolius persijungimo metu. Tranzistorių valdiklių schemos dalis pateikta 20 pav.

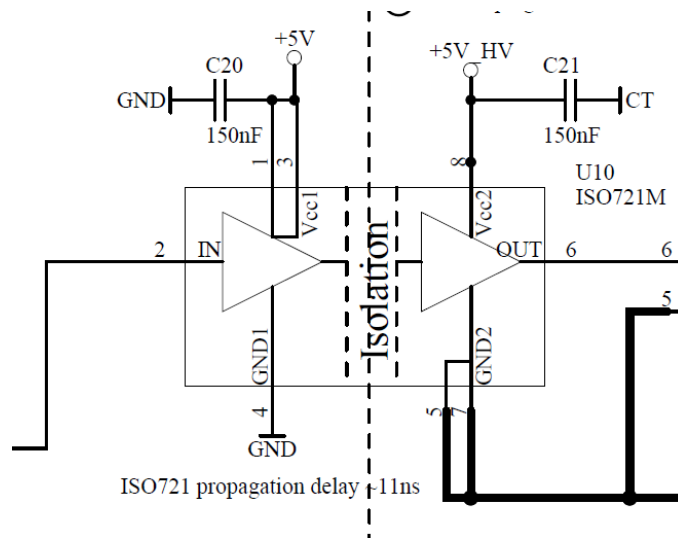


20 pav. Tranzistoriaus valdiklio schema

Ši sistemos dalis taip pat įneša papildoma signalo vėlinimą. Kadangi valdiklis tiesiogiai valdo išėjimo tranzistorių užtūras, jis yra vienas iš pagrindinių kriterijų, apribojančių išėjimo signalo frontų laikus. Sekančios sistemos dalys skiriasi tarp impulsų generatorių ir detaliau aptariamos sekančiuose poskyriuose.

3.1. SE-TX01-01 unipoliarinio impulsų generatoriaus su plaukiojančiu užtūros valdymu topologija

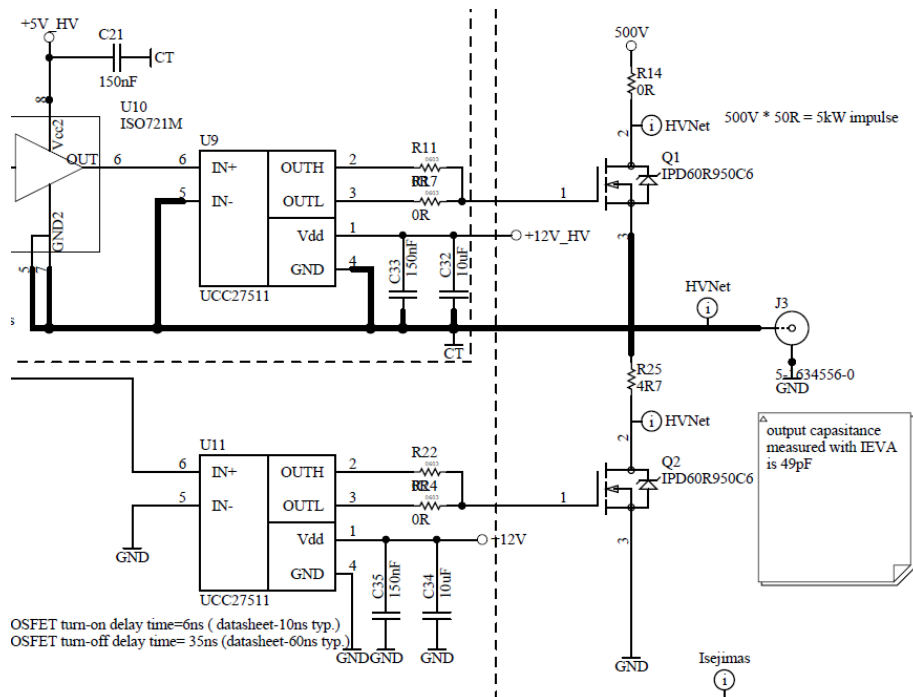
SE-TX01-01 tai unipoliarinis impulsų generatorius su plaukiojančiu užtūros valdymu. Pagrindinis ši impulsų generatorių išskiriantis topologinis sprendimas – tai optinis izoliatorius, atskiriantis CPLD išėjimą ir tranzistoriaus valdiklio įėjimą. Grandinės dalis pavaizduota 21 pav.



21 pav. Optinio izoliatoriaus schema.

Šis izoliavimas įneša papildomą 11ns vėlinimą į sistemą. Frontų trukmės ši grandinės dalis neturėtų paveikti, kadangi tranzistoriaus valdiklio įėjimas skaitmeninis ir jo charakteristikos neatspindi valdiklio išėjime. Plaukiojantis užtūros valdymas leidžia tranzistorių patikimai valdyti išėjimo atžvilgiu, todėl ši topologija turėtų išsiskirti stabilumu.

Pagrindinė impulso generatoriaus signalo charakteristikas paveikianti grandinės dalis – išėjimo grandinė. Jos parazitiniai parametrai tiesiogiai veikia išėjimo signalo parametrus. Išėjimo grandinė pateikta 22 pav.

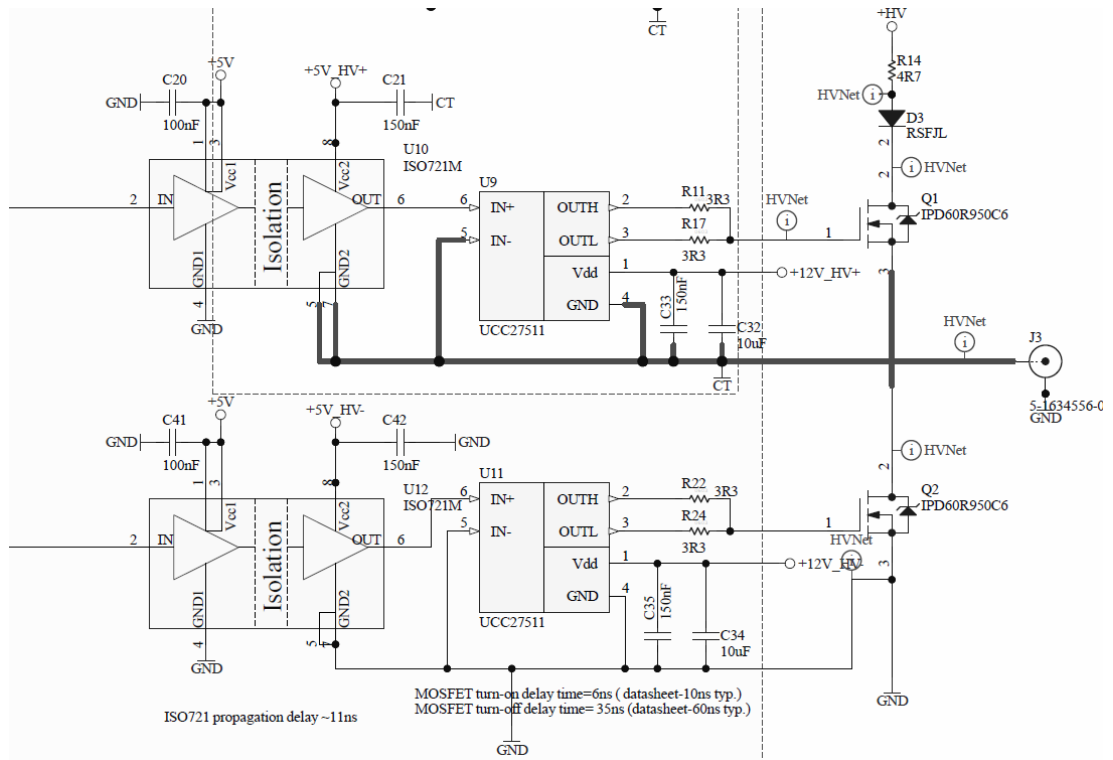


22 pav. Unipoliarinio generatoriaus su plaukiojančiu tranzistoriaus valdikliu išėjimo grandinė.

Kaip matome, tranzistorių valdikliai sujungti tiesiogiai su tranzistorių užtūromis per 0Ω varžas. Tai reiškia jog užtūros valdymo srovė neribojama, kas padidina greitaveiką tačiau gali sukelti nepageidaujamų virpamųjų pereinamųjų procesų sistemos išėjime. Taip pat galime pastebėti, jog aukštojo lygio dalis neapribota varžomis, o žemojo turi 4.7Ω varžą. Ši sistemos dalis gali įvesti asimetriškumo į kylančio ir krintančio frontų trukmes. Pasirinkta 0Ω varža aukštojo lygio valdymo dalyje reiškia, jog įtampos nuostoliai bus gaunami tik dėl tranzistoriaus kanalo varžos ir bus minimalūs.

3.2. SE-TX01-02M unipoliarinio impulsų generatoriaus su plaukiojančiu užtūros valdymu topologija

Šis impulsų generatorius nuo praeitojo skiriasi įėjimu skaičiumi – naudojami du įėjimai aukštam ir žemam signalo lygiui formuoti. Tai reiškia jog naudojamas papildomas optinis izoliatorius. Gamybiniai skirtumai tarp optinių izoliatorių gali turėti neigiamą poveikį sistemos vėlinimui bei impulso pločiui, kadangi vieno optinio izoliatoriaus didesnis vėlinimas taip pat prailgina jo formuojamos signalo dalies trukmę. Impulsų generatoriaus išėjimo schema pateikta 23 pav.

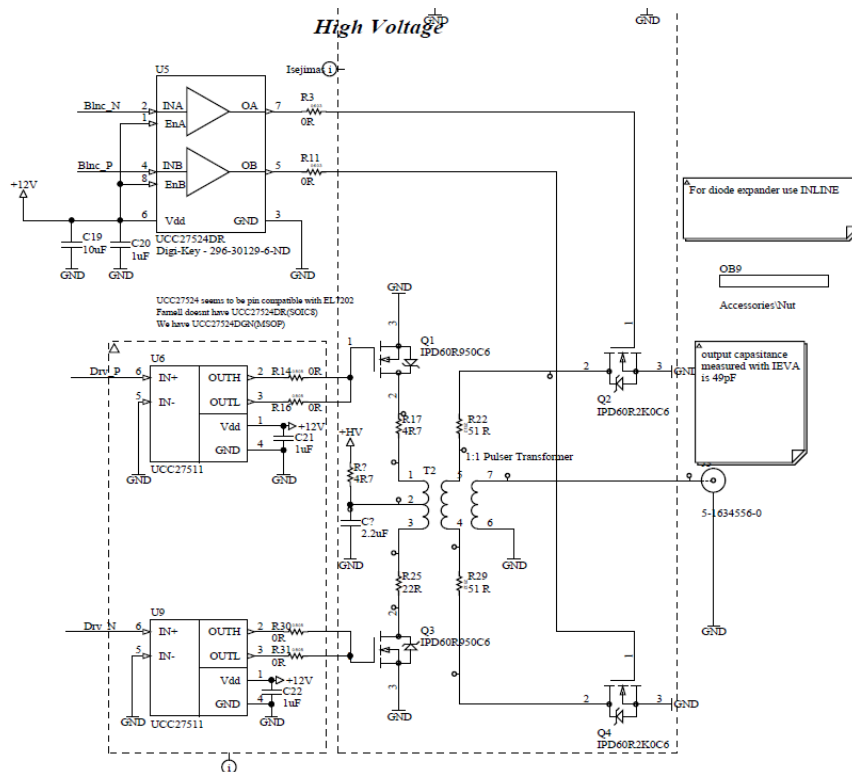


23 pav. SE-TX01-02M impulsų generatoriaus su dviem įėjimo signalais išėjimo grandinė

Šiam impulsiniam stiprintuvui naudojami 3.3 Ω užtūros varžos, kurios riboja srovę. Tai prailgina frontų trukmes, tačiau pereinamieji procesai stabilesni – signalo viršįtampiai mažesnis ir trumpesnis signalo lygio nusistovėjimo laikas. Išėjimo grandinėje taip pat matome papildomą diodą, kuris reikalingas, kai ultragarsinis keitiklis atlieka ir siuntimo, ir priėmimo funkciją. Šis diodas įneša papildomus įtampos nuostolius, tačiau prie didelių įtampų šis poveikis nedidelis, kadangi įtampos kritimas ant diodo beveik nepriklauso nuo per jį tekančios srovės.

3.3. SE-TX02-0z bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu topologija

SE-TX02-03 impulsų generatorius išsiskiria transformatoriniu išėjimu. Ši topologija leidžia lengvai išgauti bipoliarinį išėjimo signalą. Taip gaunama dvigubai didesnė išėjimo amplitudė naudojant tuos pačius išėjimo tranzistorius, tačiau išėjimo transformatoriaus parametrai turi didelį poveikį išėjimo signalo charakteristikoms. Transformatorinio išėjimo schema pateikta 24 pav.

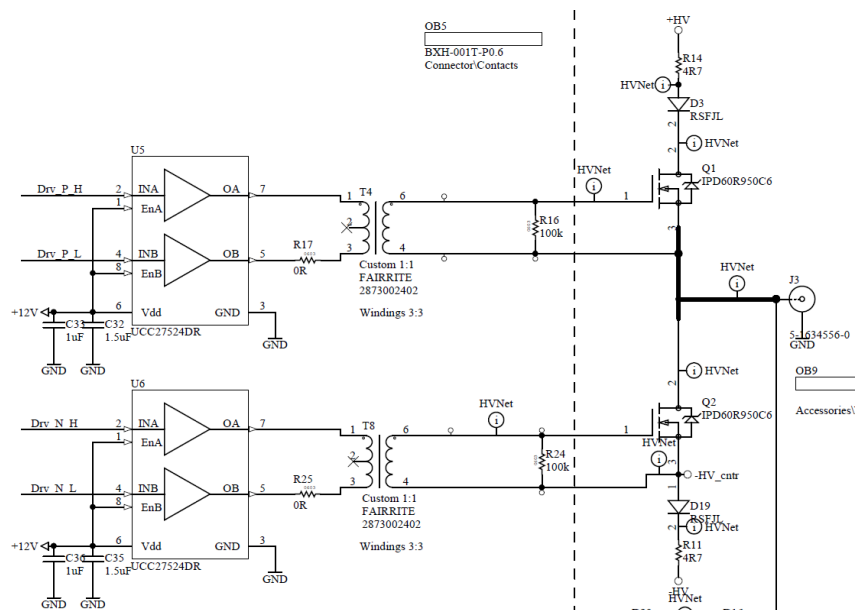


24 pav. Išėjimo grandinės su transformatoriumi schema

Šioje topologijoje tranzistoriai atskirti nuo išėjimo transformatoriumi. Dėl šios priežasties didesnę poveikį išėjimo signalo charakteristikoms turės transformatorius. Jo induktyvumas ir parazitinė talpa turi tiesioginį poveikį signalo frontų trukmėms ir dažninei charakteristikai. Taip pat matome 51 Ω srovę ribojančias varžas. Jos skirtos slopinti induktyvinio pobūdžio viršįtampiams išėjimo signalo, tačiau kartu jos ir prailgina persijungimo laikus – varžos kartu su parazitinėmis išėjimo talpomis bei talpinio pobūdžio apkrovomis formuoja RC grandinę, kurios laiko konstanta nusako frontų laikus.

3.4. SE-TX08-03 bipoliarus impulsų stiprintuvo su transformatoriniu išėjimu topologija

Šio impulsų stiprintuvo topologija paremta transformatoriniu izoliavimu tarp tranzistorių valdiklių ir išėjimo tranzistorių užtūrų. Tai iš esmės alternatyva optiniam izoliavimui, tačiau pastovus optinių izoliavimų vėlinimas iškeičiamas į transformatorių parazitinius parametrus bei induktyvumą. Dėl šios priežasties tikimasi mažesnio vėlinimo, tačiau didesnės impulso parametrų priklausomybės nuo dažnio dėl transformatorių apvijų induktyvumo. Kylant darbiniai dažniui transformatoriaus impedansas taip pat kyla, todėl turėtume matyti lėtesnį tranzistoriaus persijungimą ir ilgesnius frontus. Išėjimo schema pateikta 25 pav.



25 pav. Transformatorinio užtūros valdymo topologijos išėjimo grandinė

Grandinėje taip pat matome 4.7 Ω varžas, ribojančius impulso srovę ir apsauginius diodus. Dėl šios priežasties turėtume pastebėti didesnius išėjimo įtampos nuostolius bei frontų trukmių prailgėjimą dėl ribojamos srovės persijungimo metu.

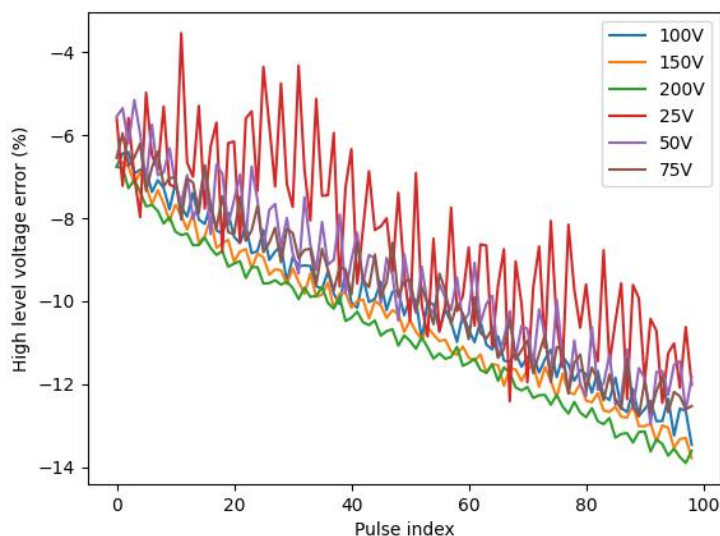
4. Eksperimentų rezultatai

Kaip minėta ankstesniuose skyriuose, vertinant impulsinių stiprintuvų charakteristikas būtina atsižvelgti į jų priklausomybę nuo dažnio, įtampos bei apkrovos. Todėl matavimai atlikti keičiant visus šiuos kintamuosius – įtampą nuo 25 V iki 200 V, dažnį nuo 650 kHz iki 5 MHz ir apkrovą – atvira, 50 Ω , 470 pF, 1nF. Impulso parametrai apskaičiuojami prie visų šių sąlygų kiekvienam impulsui 100 impulsų sekoje. Tokiu būdu galima įvertinti impulsinio stiprintuvo veikimą realistiškais sąlygomis, kadangi atliekant sudėtingus ultragarsinius matavimus naudojamos impulsų sekos, o ne pavieniai impulsai. Gautos charakteristikos kiekvienam impulsų generatoriui pateiktos sekančiuose poskyriuose.

4.1. Signalo aukštojo įtampos lygio matavimo rezultatai

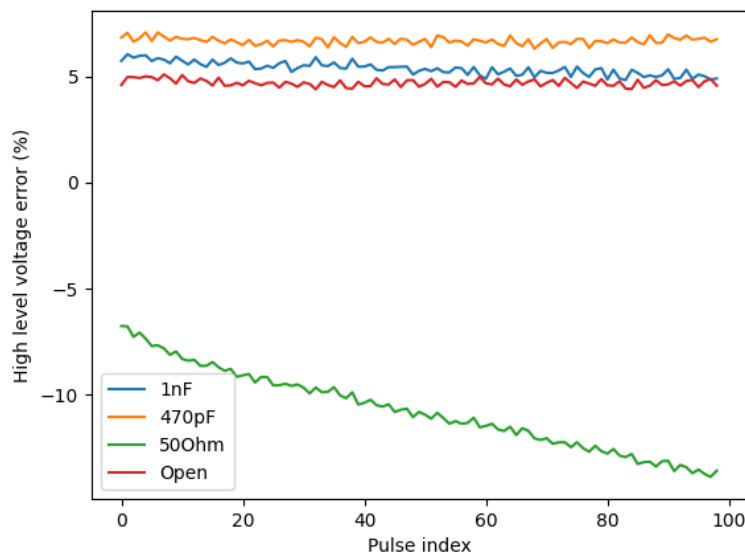
Vertinant aukštąjį įtampos lygį svarbiausias parametras ne absoliuti įtampos lygio paklaida, o jos tiesiškumas impulsų sekoje ir priklausomybė nuo dažnio, kadangi realiame taikyme naudojami skleisto spektro signalai. Atliekant koreliacinius tyrimus svarbu žinoti kiekvieno impulso amplitudę, kadangi nuo jos priklausys tiriamo objekto atsako amplitudė.

4.1.1. SE-TX01-01 matavimų rezultatai



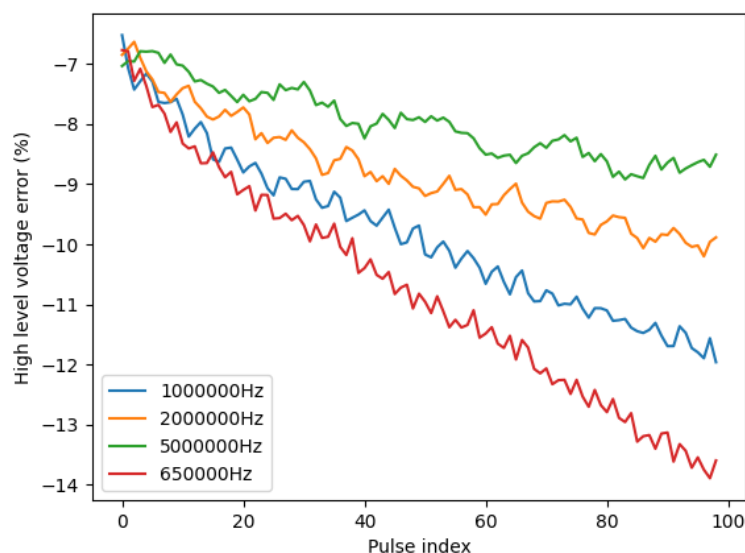
26 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos

Žadinimo įtampa neturi didelės priklausomybės įtampos paklaidai. Tyrime naudota 50 Ω apkrova siekiant išryškinti neženklūs skirtumus tarp įtampos lygių, todėl pastebimas įtampos lygio kritimas priklausantis nuo impulso skaičiaus sekoje. Iš rezultatų galime teigti, jog generatoriaus išėjimo varža išlieka pastovi visame įtampų ruože, todėl jo įtampos nuokrypis nepriklauso nuo žadinimo įtampos.



26 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

Įtampos lygio paklaida didžiausia prie 50 Ω apkrovos. Žemas apkrovos impedansas nulemia didesnę srovę pro išėjimo tranzistorius, todėl ant jų krintanti įtampa išauga. Taip pat matomas įtampos lygio kritimas prie aukštesnių impulso sekos indeksų. Tai reiškia, jog sistemos V_{HV} talpa yra nepakankama, kai impulsų generatorius naudojamas su žemo impedanso apkrova. Esant realistiškesnėms sąlygoms su talpinėmis apkrovomis įtampos paklaida buvo neženkli ir panaši į atviros apkrovos rezultatus.

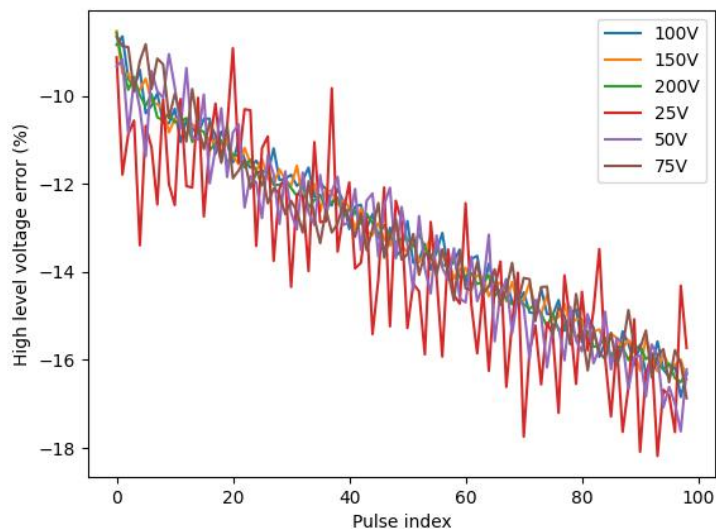


27 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo dažnio

Siekiant išmatuoti įtampos lygio paklaidos priklausomybę nuo dažnio panaudota 50 Ω apkrova, kadangi prie jos matomas ryškiausias skirtumas tarp dažnių. Iš rezultatų matome, jog prie žemų dažnių įtampos lygio paklaida didžiausia. Esant kitoms apkrovoms skirtumai tarp dažnių neženklūs.

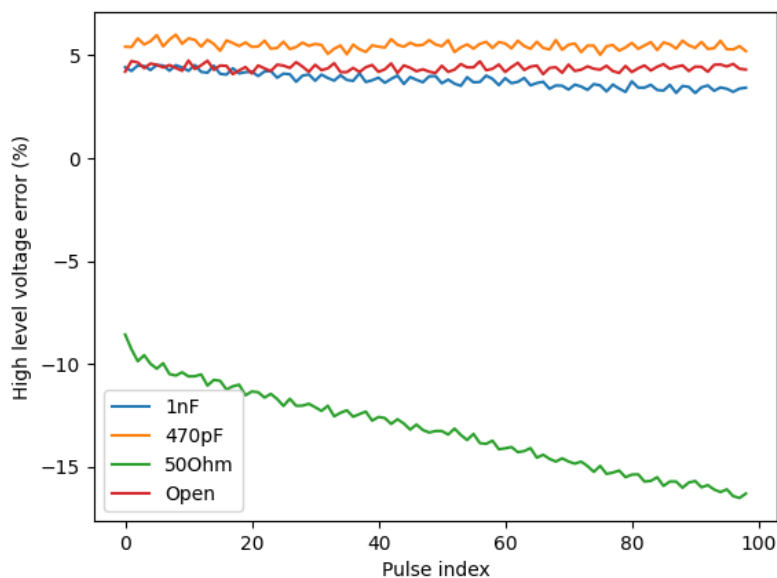
Apibendrinant - impulsinio stiprintuvo signalo įtampos paklaida apie 6% visoje impulsų sekoje, su sąlyga, jog naudojamos aukšto impedanso apkrovos.

4.1.2. SE-TX-01-02M matavimų rezultatai



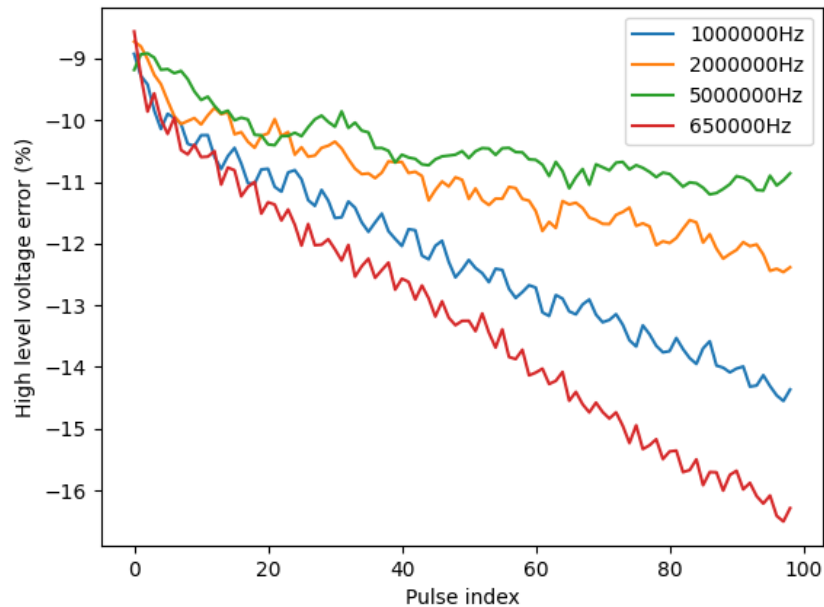
28 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus su dviem įėjimo signalais įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos

Šiam stiprintuvui žadinimo įtampa neturi įtakos aukšto įtampo lygio paklaidai. Šis parametras nėra reikšminis, kadangi žadinimo įtampa nesikeičia impulsų sekoje. Nepaisant to, bendram naudojimui svarbu jog stiprintuvas elgtųsi nuspėjamai visame įtampų ruože.



29 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus su dviem įėjimo signalais įtampos paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

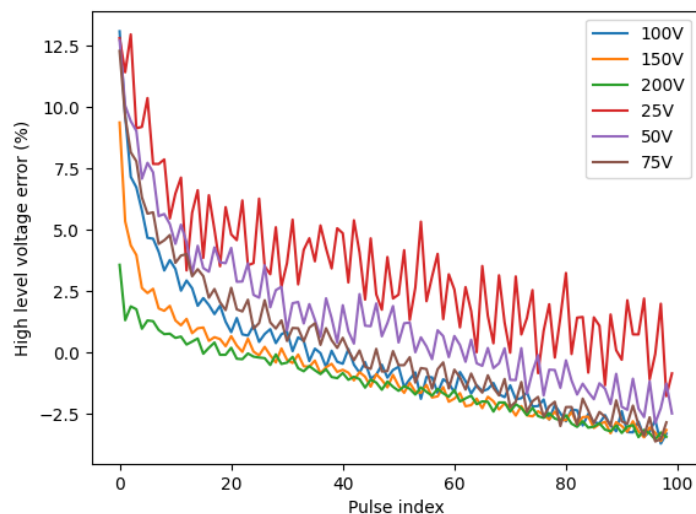
Priklausomybės nuo apkrovos rezultatai rodo, jog stiprintuvas panašiu pobūdžiu kaip ir SE-TX01-01. Su aukšto impedanso apkrovomis impulsų generatorius išlaiko pastovią paklaidą – apie 5.5%.



30 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus su dviem įėjimo signalais įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo dažnio

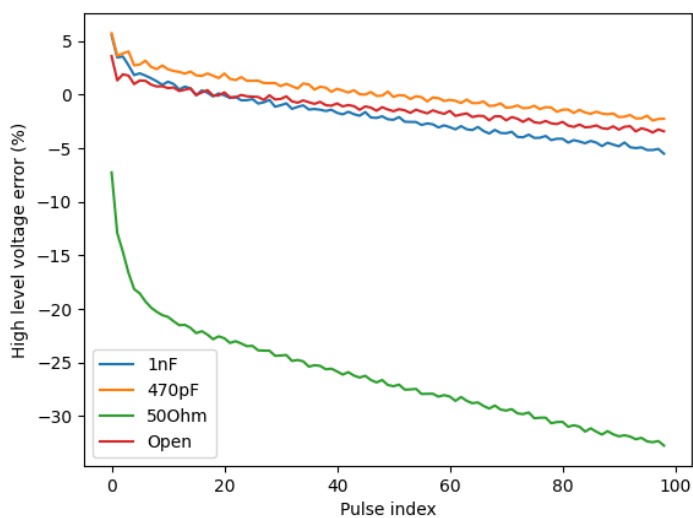
Iš aukšto įtampos lygio priklausomybės nuo dažnio grafiko matome, jog SE-TX01-02M slopsta tokiu pat greičiu impulsų sekoje, kaip ir SE-TX01-01, tačiau pradinė paklaida šiek tiek didesnė – 9%. Paklaida didelė, nes naudota 50 Ω apkrova siekiant išryškinti dažninę priklausomybę.

4.1.3. SE-TX-02-03 matavimų rezultatai



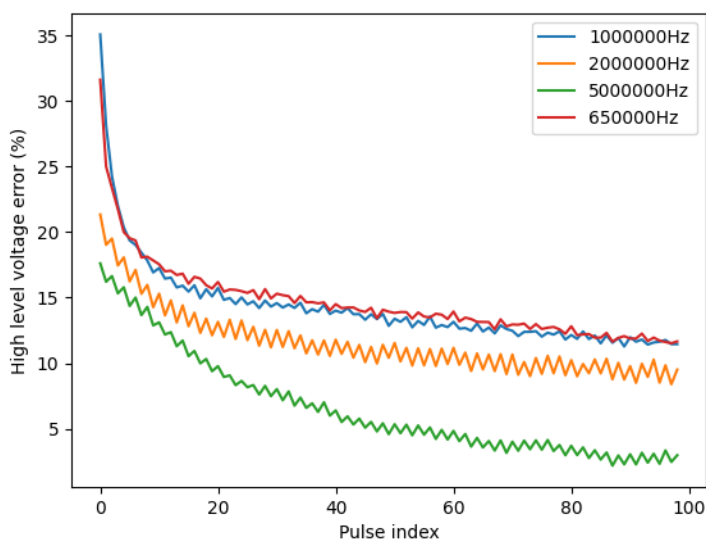
31 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos

Šiam impulsų generatoriui matoma kitokio pobūdžio priklausomybė lyginant su prieš tai buvusiais. Įtampos paklaida kinta eksponentiškai impulsų sekoje. Taip pat matomas didesnis išsibarstymas tarp žadinimo įtampų.



32 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

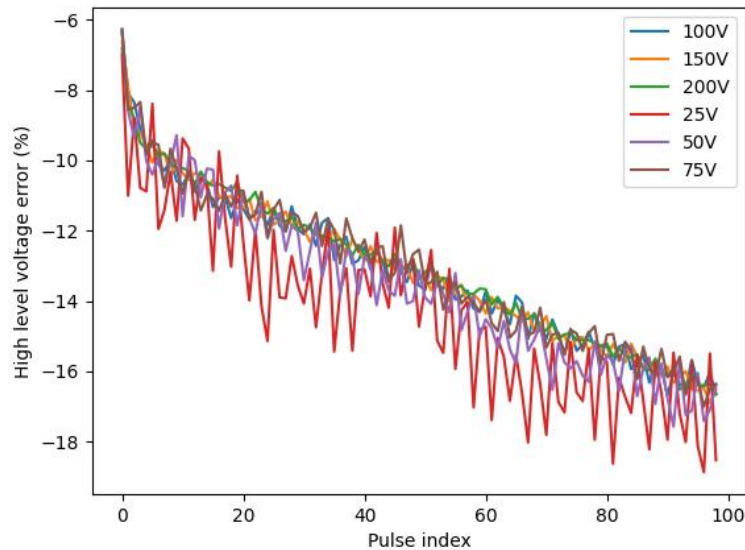
SE-TX02-03 aukšto įtampos lygio priklausomybė nuo apkrovos išlaiko tas pačias tendencijas – matomas didelis paklaidų skirtumas tarp aukšto impedanso apkrovų ir 50 Ω apkrovos. Taip pat aiškiai galime matyti tiesišką amplitudės kritimą impulsų sekoje. Plaukiojančių valdiklių stiprintuvuose šio slopimo nėra. Tai reiškia, jog SE-TX02-03 poveikį signalui sunkiau kompensuoti atliekant duomenų apdorojimą.



33 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu signalo įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo dažnio

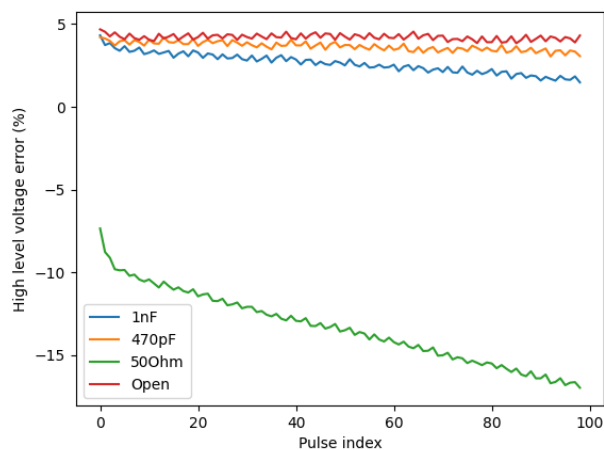
Dažninė priklausomybė rodo, jog prie auktesnių dažnių amplitudės paklaida mažėja. Šie rezultatai priešingi prieš tai minėtiems impulsų generatoriams. Šis skirtumas atsiranda dėl topologijų skirtumų – SE-TX02-03 paremtas transformatorinio ryšio išėjimo grandine. Ši topologija greičiausiai nulemia ir amplitudės paklaidos nepastovumą impulsų sekoje. Apibendrinant, šio stiprintuvo paklaida šiek tiek mažesnė – 4.5%, tačiau impulsų sekoje ji kinta eksponentiškai, todėl stiprintuvo kompensavimas apdorojant tampa sudėtingas.

4.1.4. SE-TX-08-03 matavimų rezultatai



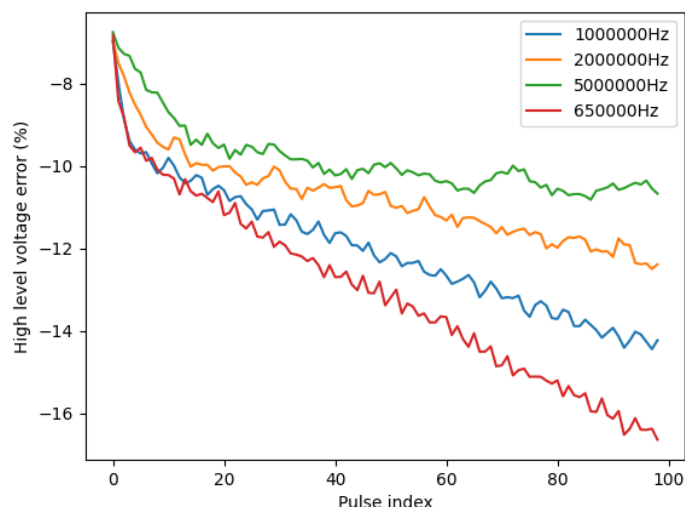
34 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos

Kaip ir kiti impulsų generatoriai, SE-TX08-03 pasižymi itin geru aukšto lygio paklaidos stabilumu keičiant žadinimo įtampos lygį. SE-TX08-03 naudoja transformatoriumi paremtą išėjimo grandinę. Lyginant su kitu tos pačios topologijos stiprintuvu SE-TX02-03, šis impulsų generatorius stabilesnis ir lengviau iškompensuojamas.



35 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu įtampos paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

Apkrovos priklausomybė tai pat stabili. Su aukšto impedanso apkrovomis amplitudės paklaida šiek tiek mažėja impulsų sekoje. Pirmųjų impulsų paklaida sekoje sąlyginai nedidelė.



36 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu įtampos paklaidos priklausomybė nuo žadinimo dažnio

Dažninė paklaidos priklausomybė kinta eksponentiškai impulsų sekoje, tačiau mažiau nei SE-TX02-03. Šis parametras greičiausiai svarbiausias vertinant įtampos paklaidą.

Apibendrinant, šis impulsų generatorius stabilesnis lyginant su kitu transformatoriumi paremtu impulsų generatoriumi. Paklaida apie 4,5%, impulsų sekoje kinta neženkiai.

4.1.5. Aukšto įtampos lygio paklaidos matavimo rezultatų apibendrinimas

2 lentelė. Aukšto įtampos lygio paklaidos matavimų rezultatų apibendrinimas

Impulsų generatorius	Įtampos priklausomybė	Dažnio priklausomybė	Elgsena impulsų sekoje	įtampos paklaida	Pastabos
SE-TX01-01	Stabili, maža sklaida tarp įtampų	Pastebima didesnė sklaida keičiant dažnį	Paklaida didėja beveik tiesiškai impulsų sekoje	~14 %	Stabilus veikimas
SE-TX01-02M	Stabili, panaši į SE-TX01-01	Pastebima dažninė sklaida	Paklaida didėja beveik tiesiškai impulsų sekoje	~16 %	Stebimi šiek tiek didesni energiniai nuostoliai
SE-TX02-03	Šiek tiek didesnė sklaida tarp įtampų	Pastebima dažninė priklausomybė	Paklaida didėja eksponentiškai impulsų sekoje	~30 %	Didžiausia impulsų degradacija tarp tirtų impulsų generatorių
SE-TX08-03	Labai stabili, maža įtampos įtaka	Nedidelė dažninė sklaida	Paklaida didėja eksponentiškai, tačiau žymiai silpniau nei SE-TX02-03	~16 %	Geresnis stabilumas nei SE-TX02-03

Gauti rezultatai parodė aiškius skirtumus tarp plaukiojančio valdiklio ir transformatorinių impulsų generatorių aukšto lygio įtampos stabilumo charakteristikose. Plaukiojančios užtūros impulsų generatoriai pasižymėjo stabilesniu veikimu bei mažesne paklaidų sklaida tarp skirtingų žadinimo įtampų, tačiau buvo stebima ryškesnė dažninė priklausomybė ir palaipsnis paklaidos didėjimas

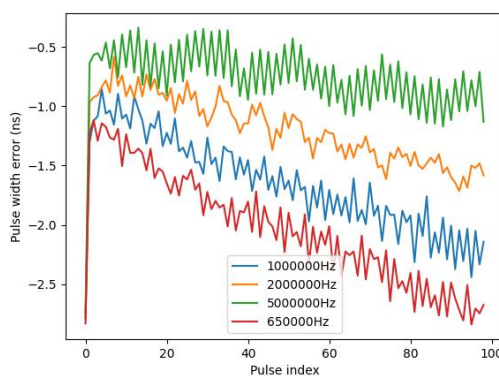
impulsų sekoje. Tuo tarpu transformatoriniai impulsų generatoriai demonstravo stipresnius kaupimosi reiškinius – ypač SE-TX02-03 impulsų generatorius, kuriame stebėtas eksponentinis paklaidos augimas bei didžiausia aukšto lygio įtampos paklaida impulsų sekoje. SE-TX08-03 pasižymėjo žymiai stabilesniu veikimu, kas rodo efektyvesnę išėjimo grandinės atsistatymą tarp impulsų ir mažesnę vidinę impulsų generatoriaus varžą, sukelenčią mažesnę vidinį įtampos kritimą

4.2. Impulso pločio paklaidos matavimo rezultatai

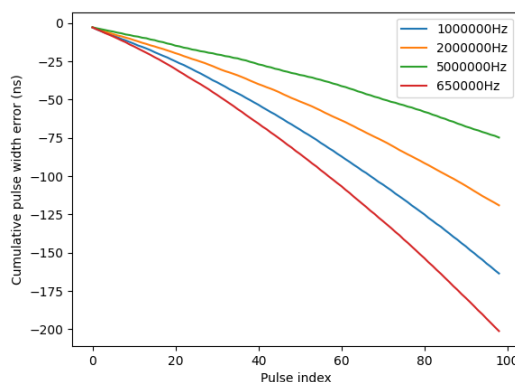
Impulso pločio paklaida tiesiogiai susijusi su koreliacinių matavimų patikimumu, todėl tikslus apibrėžimas ypač vertingas. Kaip ir su visais matavimais, vertinamos impulsų generatorių priklausomybės impulsų sekoje nuo žadinimo įtampos, dažnio ir apkrovos. Įvertinama kiekvieno impulso paklaida nuo teorinio idealaus impulso pločio. Rezultatai pateikiami kiekvienam impulsui ir suminė paklaida. Suminė paklaida leidžia geriau įvertinti kaip kinta paklaida impulsų sekoje, o pavienių impulsų paklaidos nusako absoliutę vertę.

4.2.1. SE-TX01-01 matavimų rezultatai

Šiame skyrelyje pateikti SE-TX-01-01 impulso pločio paklaidos matavimai. Išmatuotos impulso pločio priklausomybės nuo žadinimo dažnio, įtampos ir impulsų generatoriaus apkrovos.

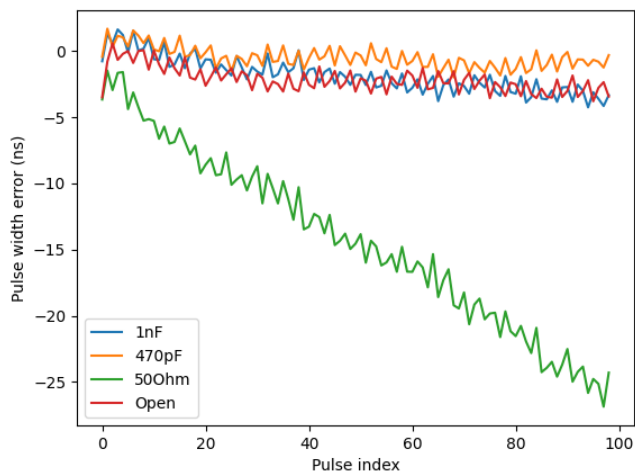


37 pav. Unipoliarus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo dažnio

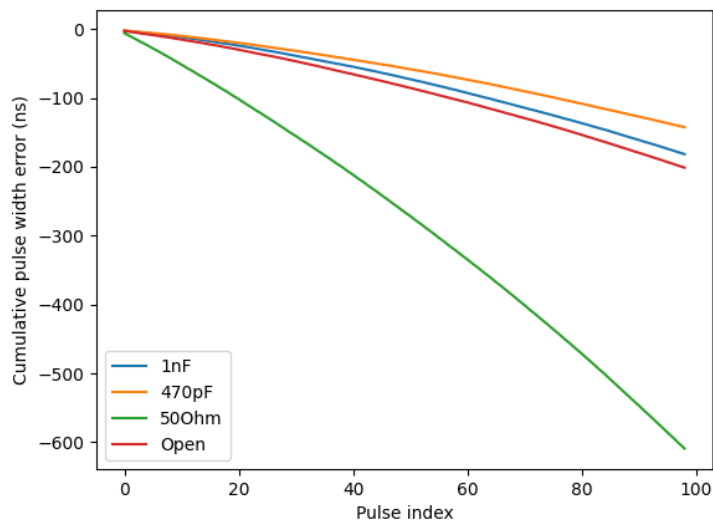


38 pav. Unipoliarus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo dažnio

Iš dažninės priklausomybės matome, jog prie žemesnių dažnių impulso pločio paklaida didesnė. Suminės paklaidos grafike matome, jog priklausomybė kinta eksponentiškai. Kadangi impulso pločio paklaida neigiama, galima teigti, jog paklaidą nulemia frontų statumas. Esant letesniems frontams impulso trukmė sutrumpėja dėl pasislinkusios 50% signalo lygio ribos.

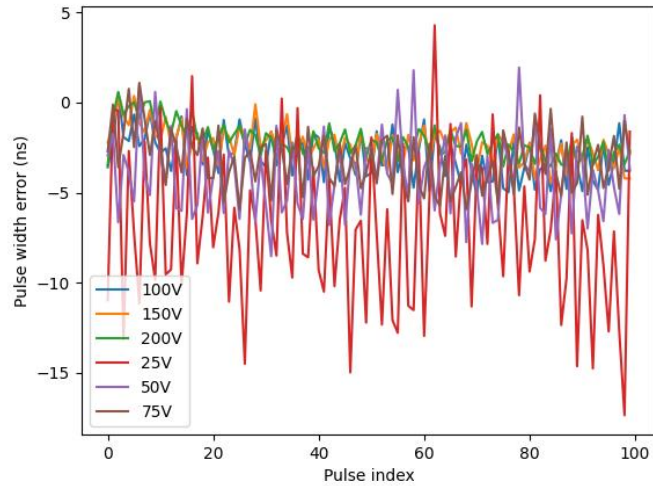


39 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

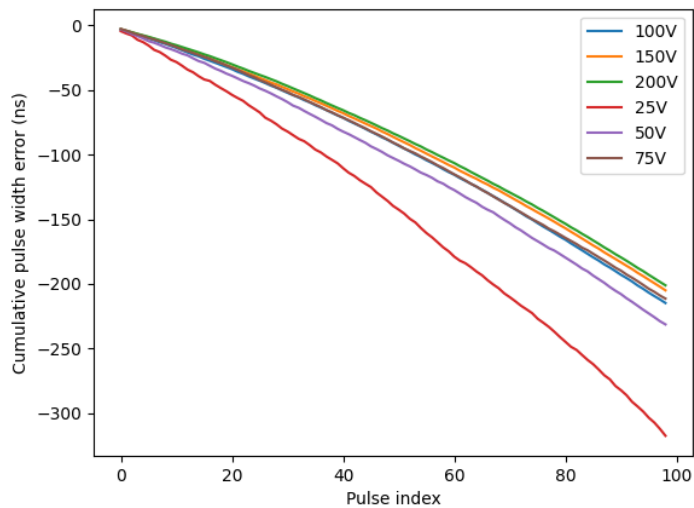


40 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

Priklausomybės nuo apkrovos parodo, jog impulso pločio paklaida pati didžiausia esant 50Ω apkrovai. Tai reiškia, jog apkrova šuntuoja impulsų generatorių ir taip lėtina įtampos kilimą. Suminė paklaida išryškina rezultatus ir parodo, jog tendencija neigiama. Skirtumas tarp talpinių ir atviros apkrovos neženklus, tai reiškia, jog impulso pločio tikslumas išlaikomas naudojant ultragarsinius keitiklius, kurie yra talpinės apkrovos pobūdžio.



41 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos



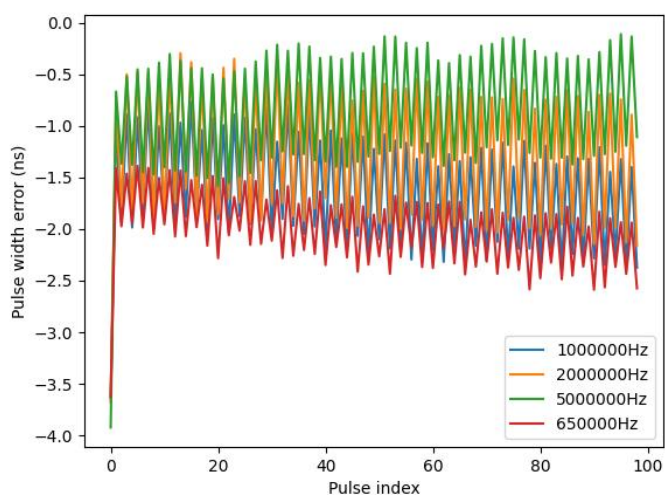
42 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos

Iš grafikų matome, jog impulso pločio paklaida kinta neženkiai esant skirtingoms žadinimo įtampoms. Ženklius nuokrypius matomas tik prie 25V žadinimo įtampos, greičiausiai dėl vidinės tranzistorių varžos R_{ds} sąveika su parazitinėmis išėjimo talpomis, dėl kurių formuojasi frontus lėtinanti RC grandinė. Šie sulėtinti frontai pasireiškia kaip išmatuojamas impulso pločio mažėjimas.

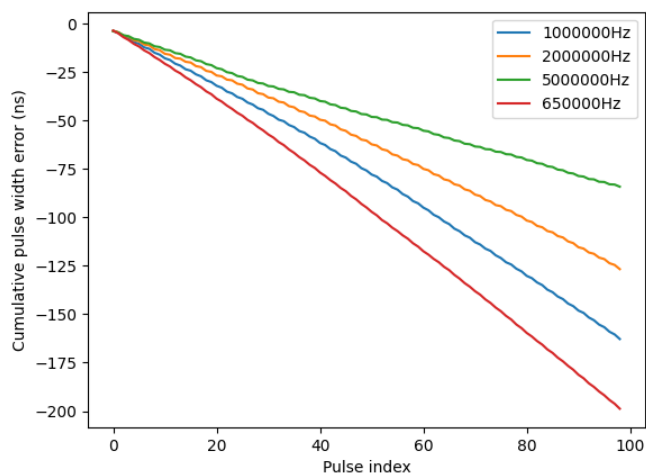
SE-TX01-01 impulso pločio paklaida itin maža – apie 1 ns trumpesnė nei idealus impulso plotis. Impulsų sekoje ši paklaida neženkiai didėja, paskutiniųjų impulsų paklaida apie 1.2 ns.

4.2.2. SE-TX-01-02M matavimų rezultatai

Šiame skyrelyje pateikti SE-TX-01-02M impulso pločio paklaidos matavimai. Išmatuotos impulso pločio priklausomybės nuo žadinimo dažnio, įtampos ir impulsų generatoriaus apkrovos.

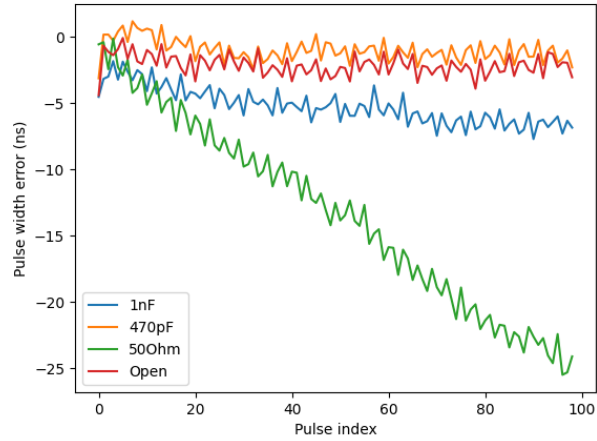


43 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo dažnio

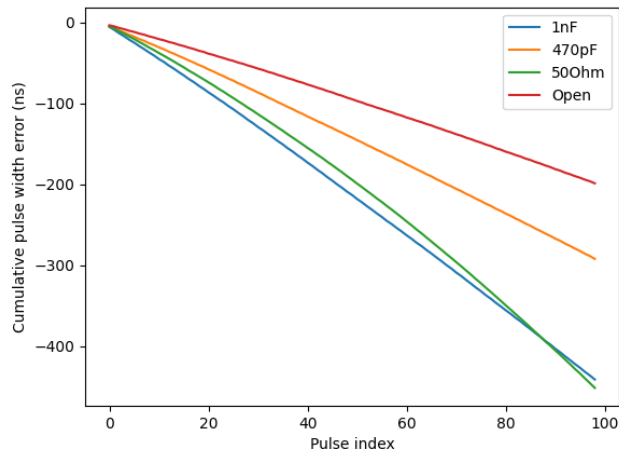


44 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo dažnio

SE-TX01-02M stiprintuvo impulso pločio paklaida šiek tiek didesnė - 1,5 ns. Nepaisant to, iš suminio paklaidos grafiko matome, jog jis tiesiškas, tai reiškia, jog paklaida išlieka pastovi impulsų sekoje. Tai reiškia, jog šio impulsų generatoriaus kompensavimas daug paprastesnis – užtenka pridėti pastovią vertę prie impulso pločio norint jį iškompensuoti, vietoj funkcijos priklausančios nuo impulso vietos sekoje.

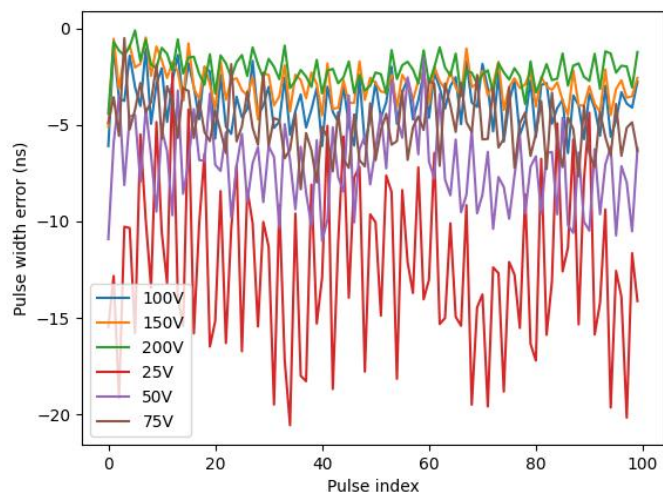


45 pav. Unipoliarus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

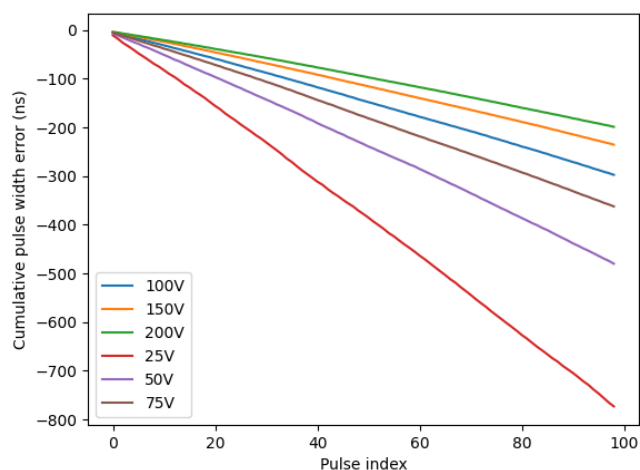


46 pav. Unipoliarus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

Iš priklausomybės nuo apkrovos grafikų matome, jog 470 pF apkrovos rezultatai itin artimi atvirai apkrovai. 470 pF artimiausiai atitinka ultragarsinio keitiklio impedansą, todėl galime teigti jog šis impulsų generatorius itin gerai išlaiko savo parametrus realiuose taikymo srityse.



47 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos

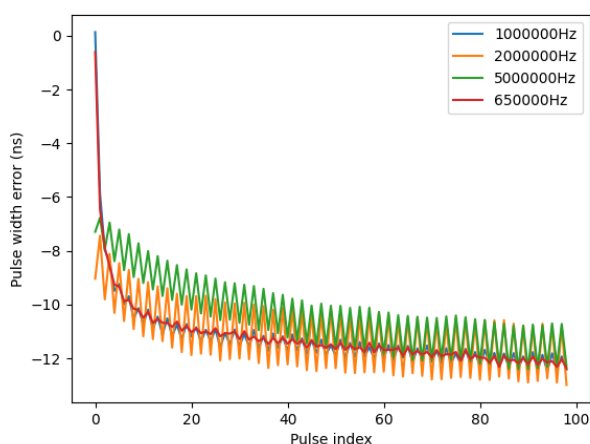


48 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo žadinimo įtampos

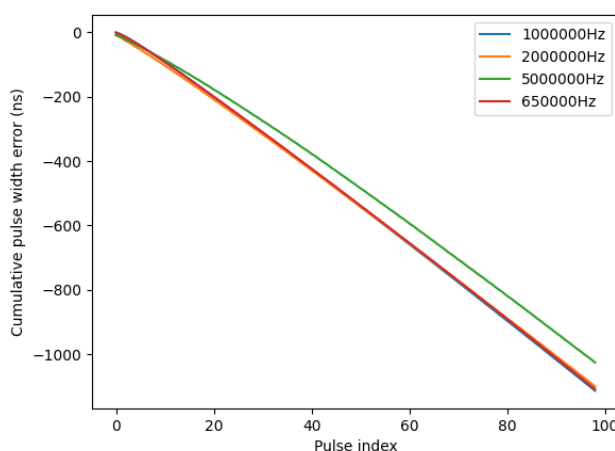
Iš įtampos priklausomybės matome, jog šio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaidos išsibarstymas didesnis, lyginant su kitais. Tačiau žadinimo įtampa neturi įtakos kai atliekami tie patys tyrimai, kadangi žadinimo įtampa nesikeičia impulsų sekoje. Šis parametras turi didesnę reikšmę kai lyginami skirtingų matavimų rezultatai, kur gali būti naudojamos skirtingos žadinimo įtampos priklausomai nuo tiriamo objekto. Suminės paklaidos grafikas tiesiškas – tai reiškia, jog tam tikrai įtampai šio impulsų generatoriaus impulso pločio paklaida yra pastovi impulsų sekoje, todėl nesunku šią paklaidą iškompensuoti, net kai ir atliekami bandymai su skirtingomis žadinimo įtampomis.

4.2.3. SE-TX-02-03 matavimų rezultatai

Šiame skyrelyje pateikti SE-TX-02-03 impulso pločio paklaidos matavimai. Išmatuotos impulso pločio priklausomybės nuo žadinimo dažnio, įtampos ir impulsų generatoriaus apkrovos.

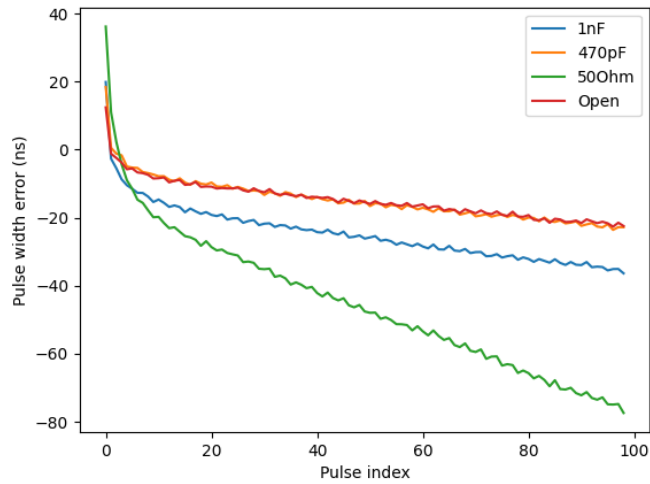


49 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo dažnio

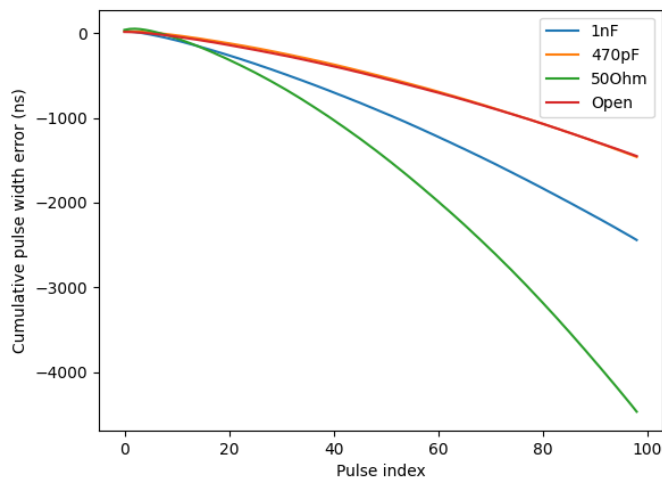


50 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo dažnio

SE-TX02-03 impulsų generatoriaus impulso pločio paklaida beveik nepriklauso nuo žadinimo dažnio. Tai ypač svarbu taikant skleistinio spektro signalus atliekant ultragarsinius matavimus. Nepriklausomai nuo signalo dažnio galime tikėtis pastovios impulso pločio paklaidos. Apdorojant signalus tai supaprastina impulsų generatoriaus modelį, skirta signalo iškraipymų kompensavimui. Problema iškyla su pirmaisiais impulsais sekoje – matomas eksponentinis paklaidos augimas ir nusistovėjimas ties ~20 impulsu. Tai šiek tiek apsunkina kompensavimą, tačiau dažninis stabilumas atsveria šias neigiamas savybes.

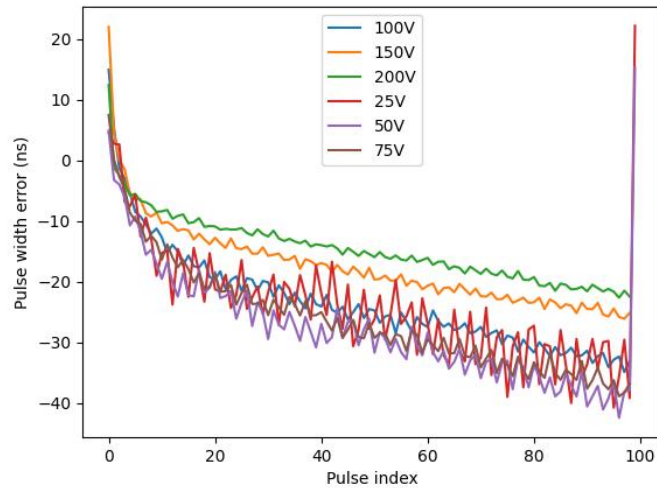


51 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

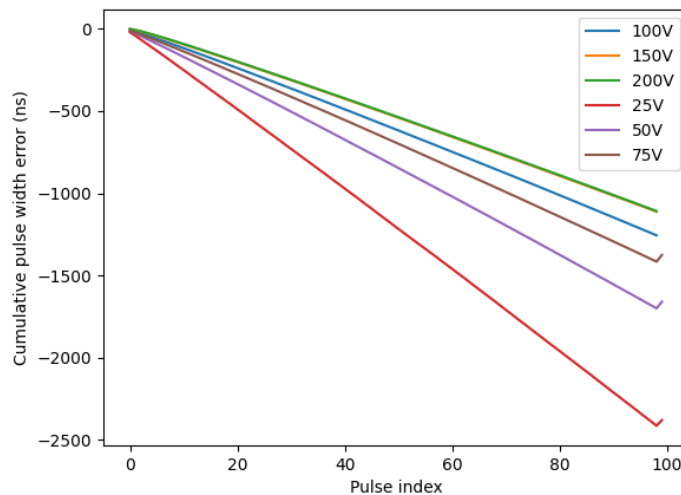


52 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

Iš apkrovos priklausomybės grafikų matome, jog su aukšto impedanso apkrovomis impulsų generatorius itin stabilus – 470 pF ir atviros apkrovos rezultatai sutampa. Tarp daugumos ultragarsinių keitiklių, jų poveikis impulso pločiui bus nepastebimas. Tai reiškia, jog tyrimuose impulsų generatorius gali būti naudojamas su plačiu ruožu skirtingų keitiklių be papildomo signalų apdorojimo – pakanka rezultatų su atviru išėjimu norint kompensuoti impulso pločio paklaidą. Esant didesnės talpos ar mažo impedanso apkrovoms impulsų generatoriaus paklaida staigiai išauga.



53 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo įtampos

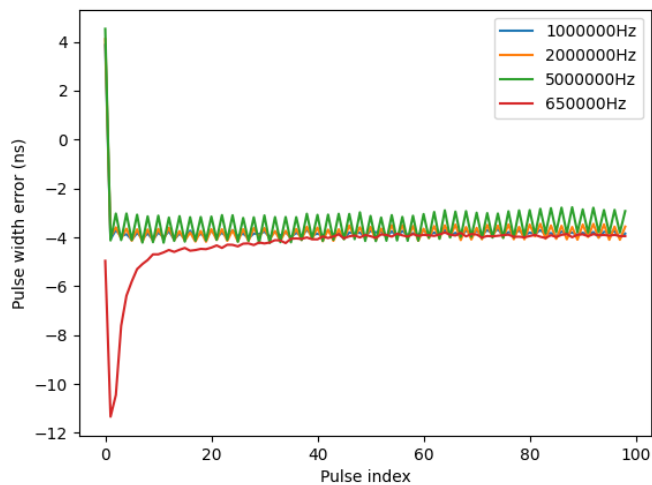


54 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo įtampos

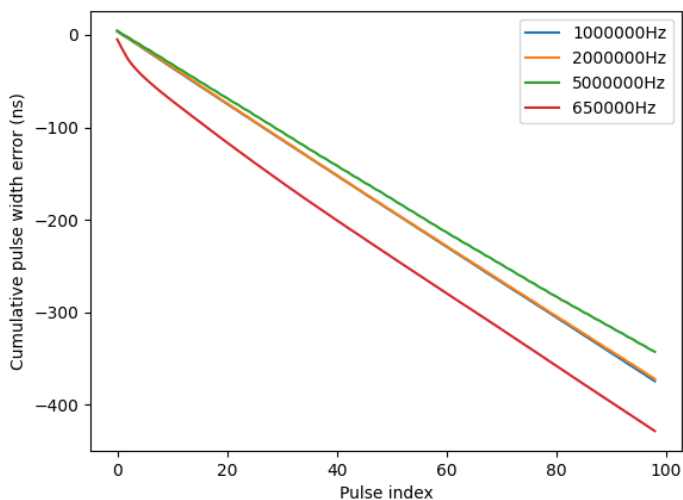
SE-TX02-03 impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo įtampos sąlyginai netiesiška lyginant su kitais stiprintuvais. Impulsų sekos pradžioje paklaida apie 10 ns, o pabaigoje apie 30 ns. Matomas eksponentinis paklaidos augimas impulsų sekos pradžioje. Iš suminės paklaidos matome, jog impulso pločio paklaidos skirtumas tarp skirtingų žadinimo panašus kaip ir su kitais stiprintuvais.

Bendrai, SE-TX02-03 pasižymi geru impulso pločio tikslumu. Realiam taikymui svarbiausia dažninė priklausomybė rodo, jog kintant dažniui impulso pločio paklaida nekinta. Vienintelis trūkumas – impulso pločio paklaidos kitimas impulsų eigoje – pirmieji impulsai daug platesni lyginant su likusia impulsų sekos dalimi.

4.2.4. SE-TX-08-03 matavimų rezultatai

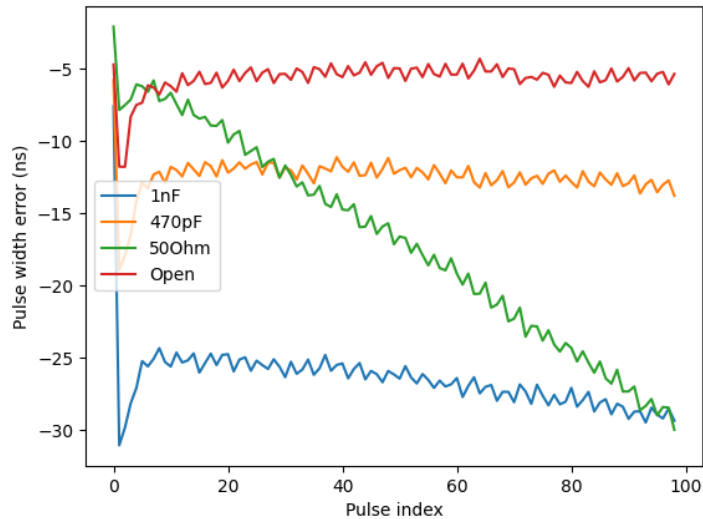


55 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo dažnio

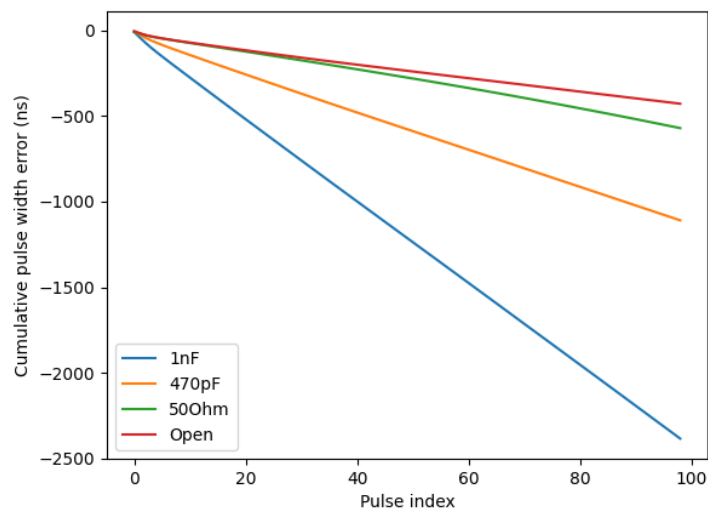


56 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo dažnio

SE-TX08-03 pasižymi itin maža absoliutine paklaida ir geru tiesiškumu. Dažniuose virš 1 MHz paklaidos skirtumas prie skirtingų signalo dažnių labai nedidelis. Žemuose dažniuose matoma didesnė paklaida impulsų sekos pradžioje. Tai reiškia, jog impulsų generatorius labiau tinka naudoti aukštesniuose dažniuose. Tai nulemia stiprintuvo išėjimo topologija – transformatoriumi paremta pusės tiltelio topologija.

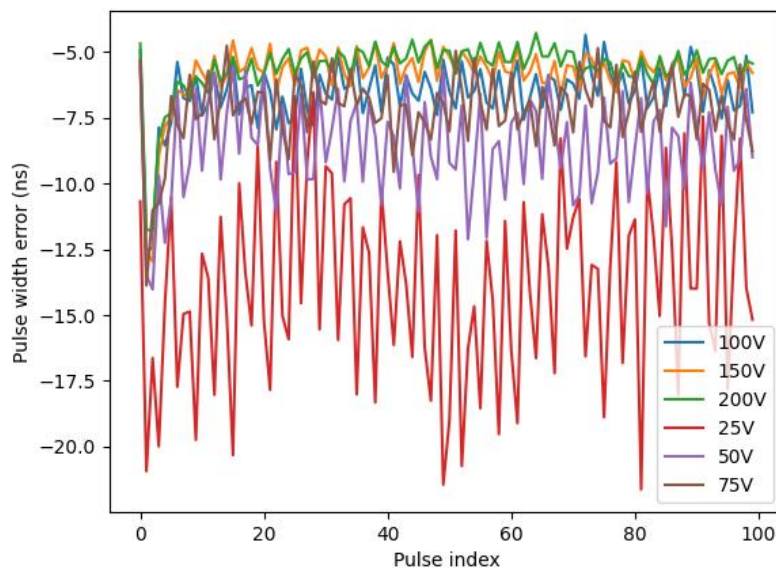


57 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

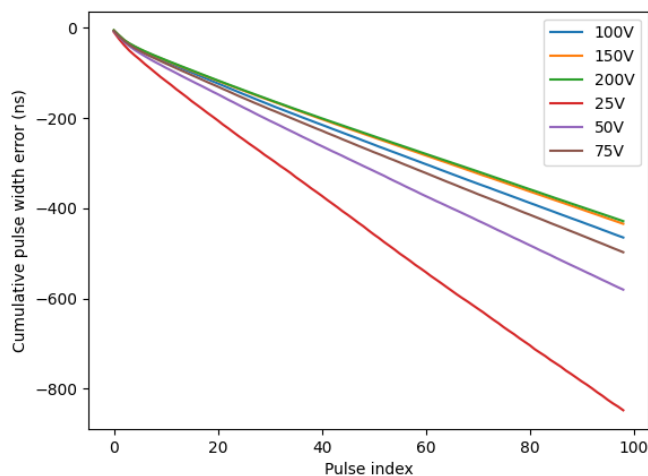


58 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo apkrovos

Iš impulso pločio paklaidos priklausomybės nuo apkrovos grafikų matome, jog SE-TX08-03 itin jautrus talpinėms apkrovoms. Skirtumas tarp 470 pF ir 1 nF apkrovos rezultatų apie 13 ns. Tai reiškia, jog taikant impulsų generatorių ultragarsiniuose matavimuose, reikia atsižvelgti į naudojamą keitiklį, nes jo parametrai gali stipriai iškreipti žadinimo signalą, o tuo pačiu ir gaunamus koreliacinių matavimų rezultatus. Tai nulemia transformatorinė išėjimo grandinė impulsų generatoriuje – ji, kartu su išėjimo apkrova sudaro LC grandinę. Tai iš esmės žemų dažnių filtras ribojantis frontų statumą. Esant aukšto impedanso apkrovoms impulsų generatoriaus impulso pločio paklaida sąlyginai pastovi visoje impulsų sekoje.



59 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio paklaidos priklausomybė nuo įtampos



60 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu impulso pločio suminės paklaidos priklausomybė nuo įtampos

Impulso pločio paklaidos priklausomybė išlieka pastovi impulsų sekoje, kaip ir su kitais impulsų generatoriais. Paklaidų skirtumas prie skirtingų žadinimo įtampų taip pat panašus į kitų stiprintuvų rezultatus.

SE-TX08-03 impulso pločio paklaidos charakteristikos sąlyginai blogos – didelę įtaką daro apkrovos talpa, žemėjant dažniui impulso pločio paklaida staigiai išauga. Nepaisant šių trūkumų, impulso pločio paklaidos išlieka stabilios impulsų sekoje, todėl joms iškompensuoti pakanka paslinkti koreliacinius matavimus per tarp tikrą konstantą priklausomai nuo matavime naudotos žadinimo įtampos, dažnio ir ultragarsinio keitiklio.

4.2.5. Impulso pločio matavimų rezultatų apibendrinimas

3 lentelė. Impulso pločio paklaidos rezultatų apibendrinimas

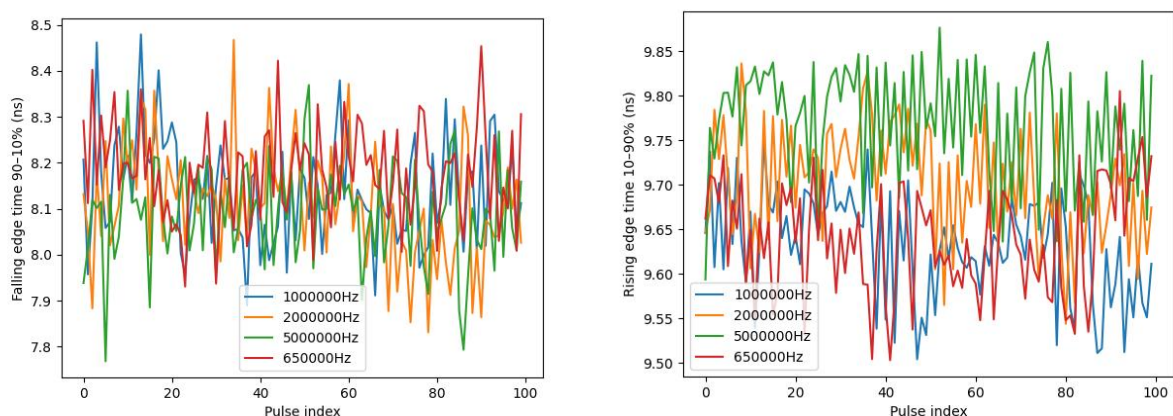
Impulsų generatorius	Dažninė priklausomybė	Impulsų seka	Apkrovos priklausomybė	Įtampos priklausomybė	Vid. paklaida	Pastabos
SE-TX01-01	Maža sklaida	Linijinis paklaidos augimas	Stabili, išskyrus 50 Ω	Atvirkštinė priklausomybė	~1.5 ns	Sąlyginai maža absoliutinė paklaida
SE-TX01-02M	Maža sklaida	Linijinis paklaidos augimas	Stabili, išskyrus 50 Ω	Atvirkštinė priklausomybė	~1 ns	Sąlyginai maža absoliutinė paklaida
SE-TX02-03	Maža sklaida	Pastovi	Stabili, išskyrus 50 Ω	Stabili	~10 ns	Pirmi ~10 impulsų sekoje turi didesnę paklaidą
SE-TX08-03	Nėra	Pastovi	Didelė talpinių apkrovų įtaka	Atvirkštinė priklausomybė	~ 4 ns	Geriausias paklaidos stabilumas

Impulso pločio paklaidų analizė parodė, kad plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriai pasižymėjo mažomis absoliutinėmis paklaidomis, tačiau buvo stebimas palaipsnis paklaidos augimas impulsų sekoje. Tuo tarpu transformatoriniai impulsų generatoriai demonstravo stabilesnę elgesį impulsų sekos metu, nors bendras paklaidų lygis buvo didesnis. Visuose impulsų generatoriuose didžiausia impulso pločio paklaida dažniausiai buvo stebima prie 50 Ω apkrovos arba didelių talpinių apkrovų, kas rodo stiprią apkrovos įtaką pereinamųjų procesų dinamikai. Geriausiu bendru stabilumu tarp transformatorinių topologijų pasižymėjo SE-TX08-03, o mažiausia absoliutinė paklaida buvo nustatyta SE-TX01-02M impulsų generatoriuje.

4.3. Signalų frontų trukmių matavimo rezultatai

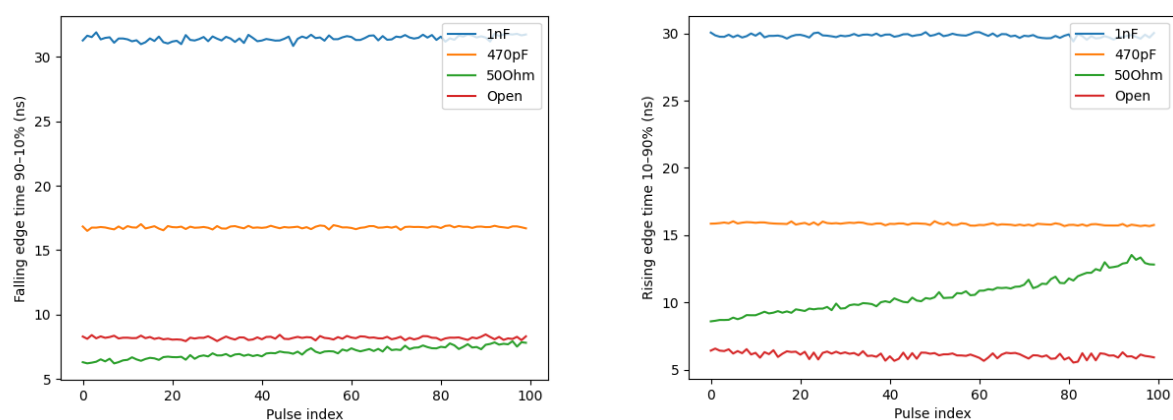
Signalų frontų trukmių įvertinimas leidžia nusakyti kaip efektyviai impulsų generatorius perduoda energiją į ultragarsinį ketiklį. Taip pat, frontai tiesiogiai riboja sistemos greitaveiką. Ilgi frontų laikai taip pat gali iškreipti perdavimo charakteristikos rezultatus ultragarsiniuose tyrimuose, slopinti tam tikras dažnines dedamasias, kas nulemia duomenų praradimą ir komplikuoja duomenų apdorojimą. Šioje skiltyje pateikti visų impulsų generatorių frontų trukmių matavimai prie skirtingų žadinimo įtampų, dažnių bei apkrovų.

4.3.1. SE-TX01-01 matavimų rezultatai



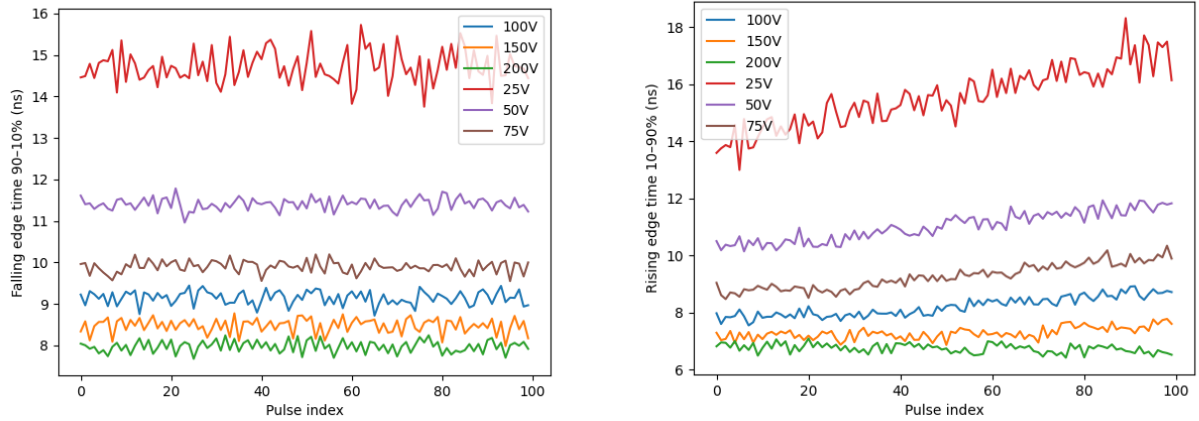
61 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo dažnio

Iš grafikų matome, kad nei krintantis nei kylantys frontai nepriklauso nuo signalo dažnio. Tai logiška, kadangi fronto trukmė yra vienas iš darbinį dažnį ribojančių kriterijų, todėl pokyčiai būtų pastebimi tik priartėjus prie sistemos ribinio dažnio.



62 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo apkrovos

Iš frontų trukmių priklausomybės nuo apkrovos grafikų matome, jog su atvira apkrova fronto trukmė yra trumpiausia ir pastovi. Prie 50Ω matome pastovų frontų trukmių ilgėjimą impulsų sekoje. Tokią tendenciją matome dėl išėjimo grandinės talpos neužtektinumo – išsikrovus kondensatoriams impulsų generatorius nebegali suteikti pakankamai srovės frontų užtikrinimui. Su 470 nF ir 1 nF matome ženklių frontų prailgėjimą. Šiuo atveju frontų trukmės prailgsta dėl susidarantios RC grandinės tarp apkrovos talpos ir impulsų generatoriaus išėjimo impedanso realiosios dalies.

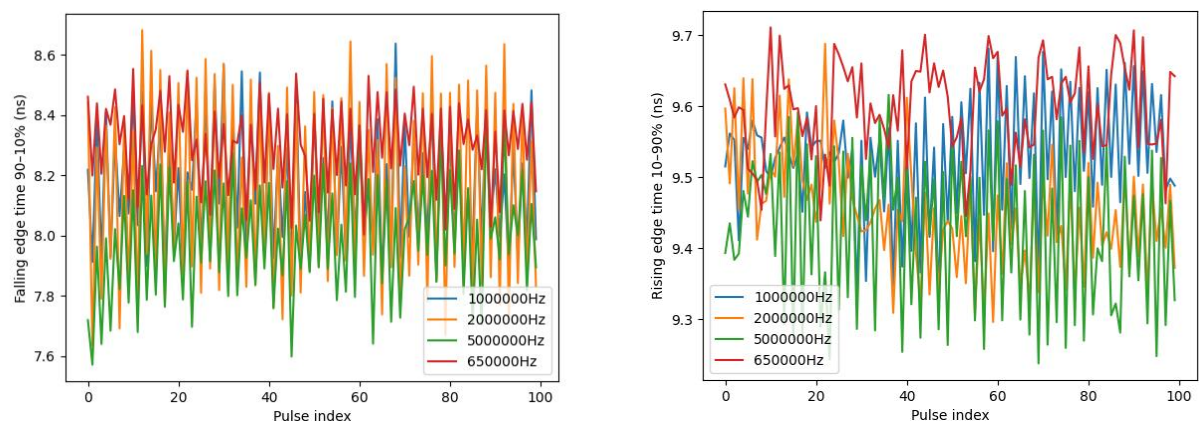


63 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo įtampos

Iš frontų triukmių nuo žadinimo įtampos priklausomybės grafikų matome, jog didėjant žadinimo įtampai frontų trukmės mažėja. Šis reiškinys paaiškinamas sunkiau – frontai turi pasiekti aukštesnę įtampą per trumpesnę laiko tarpą. Pagal formulę (11) matome, jog didėjant įtampai, srovė kuri nulemia dV/dT persijungimo laiką taip pat didėja proporcingai. Tačiau ši formulė neivertina netiesiškai kintačios parazitinės įtampos C_{oss} , kurios priklausomybė nuo įtampos atvaizduota 10 pav. Kadangi prie žemų įtampų ši talpa eksponentiškai didesnė. Tai reiškia, jog prie žemesnių įtampų su mažesne kanalo srove turi būti įveikiama didesnė kanalo talpa. Matavimai aiškiai parodo šią tendenciją, todėl impulsų generatorių išėjimo grandinės tranzistorių parazitinės talpos turėtų būti kuo mažesnės siekiant geresnių rezultatų.

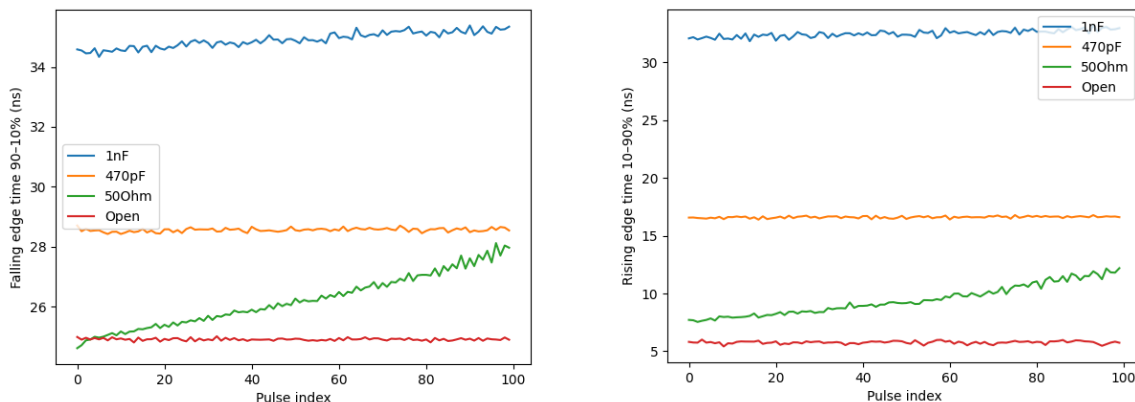
4.3.2. SE-TX-01-02M matavimų rezultatai

Šioje skiltyje pateikiami frontų trukmių matavimo rezultatai SE-TX01-02M impulsų generatoriui.



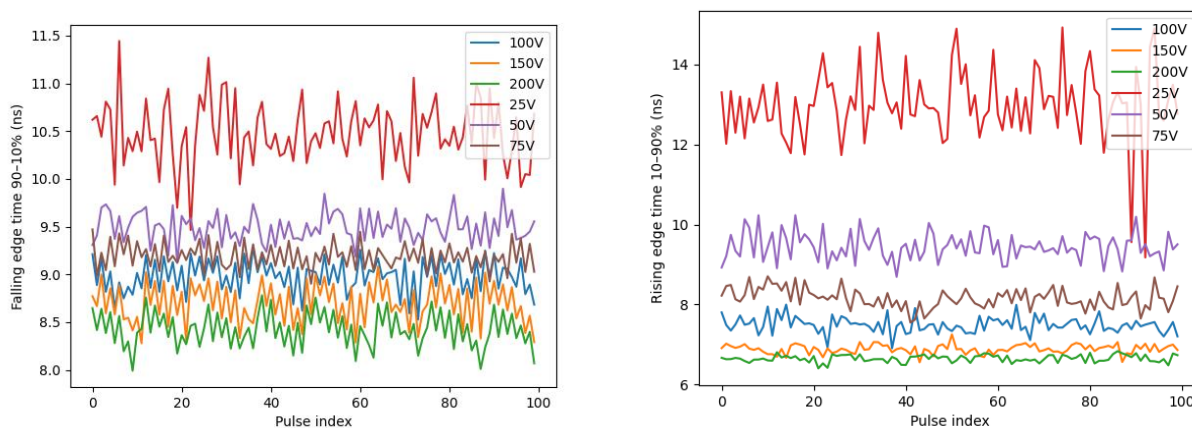
64 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo dažnio

Kaip matome, SE-TX01-02M impulsų generatorius taip pat neturi aiškaus ryšio tarp signalo dažnio ir frontų trukmių. Priežastis taip pat išlieka ta pati – frontai yra dažnį ribojantys parametrai, todėl darbiname ruože poveikio ir neturėtų būti.



65 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo apkrovos

Frontų priklausomybės nuo apkrovos taip pat išliko panašios kaip ir prieš tai nagrinėto impulsų generatoriaus – talpinių apkrovų frontai smarkiai ilgesni nei su kitomis apkrovomis dėl susidarancios RC grandinės.

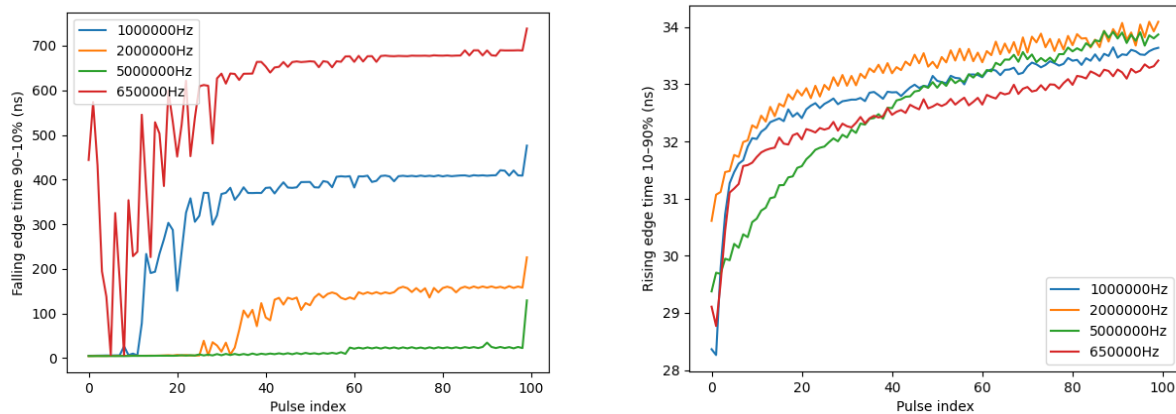


66 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus frontų trukmių priklausomybės nuo įtampos

Frontų priklausomybės nuo įtampos rodo atvirkštinę priklausomybę, kaip minėta anksčiau šis poveikis stebimas dėl parazitinės tranzistoriaus kanalo talpos. Bendrai SE-TX01-02 savo frontų charakteristikomis itin artimas SE-TX01-01 impulsų generatoriui, dėl panašios išėjimo topologijos parazitiniai parametrai charakteristikose pasireiškia vienodai.

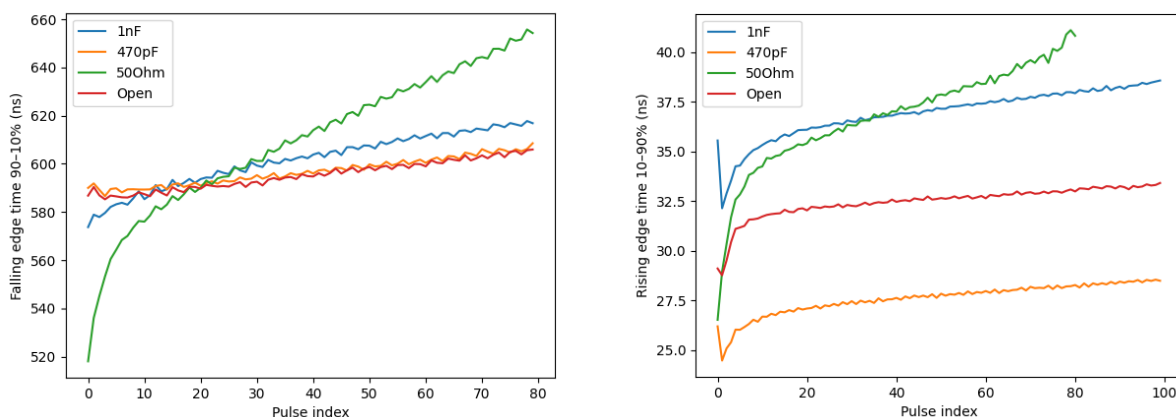
4.3.3. SE-TX-02-03 matavimų rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami SE-TX02-03 frontų matavimų rezultatai.



67 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu frontų trukmių priklausomybės nuo dažnio

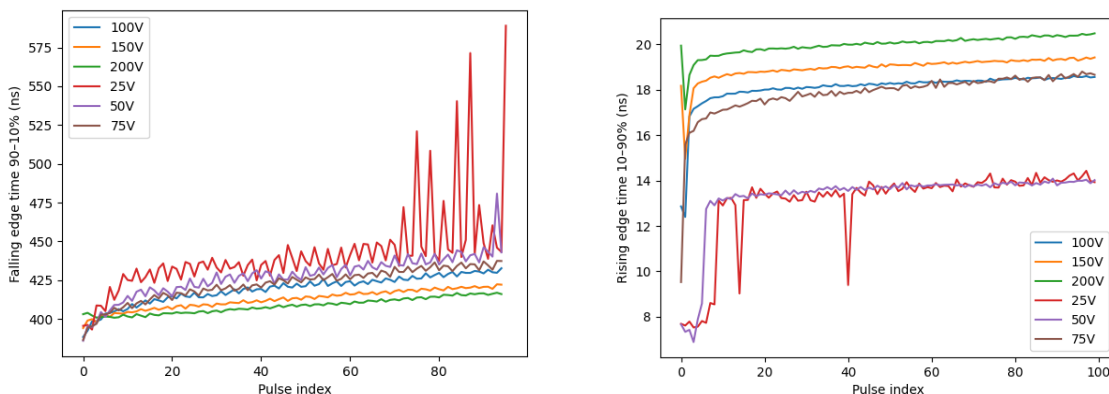
Iš dažninės frontų trukmių priklausomybės matome, jog frontų trukmės itin didelės lyginant su prieš tai buvusiais impulsų generatoriais. Krintantis frontas rodo asimetriją tarp aukšto ir žemo lygio valdymo dalių. Taip pat matome dažninį išsibarstymą – prie aukštesnių dažnių frontų trukmės trumpėja. Taip pat matome, jog impulsų sekoje frontų trukmės palaipsniui auga – tai rodo išėjimo grandinės talpos nepakankamumą – nepakankamas krūvis dėl palaiptinio talpų išsikrovimo riboja maksimalią persijungimo srovę.



68 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu frontų trukmių priklausomybės nuo apkrovos

kaip matome iš grafikų SE-TX02-03 impulsų generatoriaus frontų laikai greitesni su talpinėmis apkrovomis. Tai prieštarauja pirminiams išpūdžiui, kai papildoma talpa prailgina pereinamojo

proceso trukmę. Trupesni frontų laikai greičiausiai išmatuoti dėl sąveikos tarp transformatoriaus antrinės apvijos induktyvumo ir išėjimo talpos. Išėjimo apvijos induktyvinio pobūdžio viršįtampiai kompensuojami apkrovos talpumu. Nors iš pažiūros viršįtampiai neturėtų prailginti frontų, tačiau osciliavimas aplink 10-90% gali neigiamai įtakoti matavimus. Šie rezultatai turėtų būti interpretuojami atsargiai, nes mažesni virpesiai ne visuomet sąlygoja greitesnį dV/dt persijungimą.

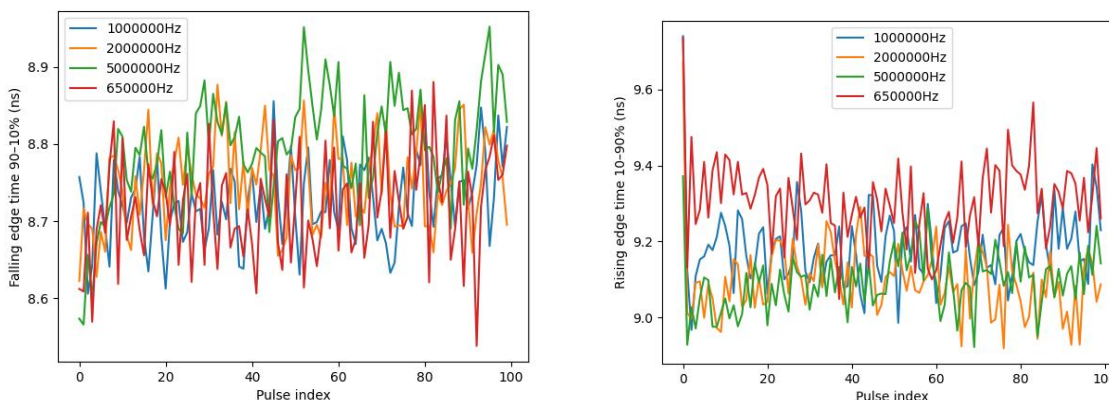


69 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu frontų trukmių priklausomybės nuo įtampos

Tiriant priklausomybę nuo įtampos pastebima asimetrija tarp kylančio ir krintančio fronto. Didėjant įtampai kylančio fronto trukmė didėja, o krintančio mažėja. Taip gali būti dėl kelių priežasčių, susijusių su išėjimo transformatoriaus charakteristikomis. Kylančiam frontui aukštesnė įtampa greičiausiai sukelia didesnius virpesius aplink 90% ribą, šie virpesiai užtrunka ilgiau kol nusistovi, todėl kylančio fronto laikai didėja. Krintantis frontas gali išnaudoti apvijose sukauptą energiją ir žemą induktyvinės dalies impedansą, todėl srovė gali tekėti nevaržomai ir gaunamas greitesnis persijungimas.

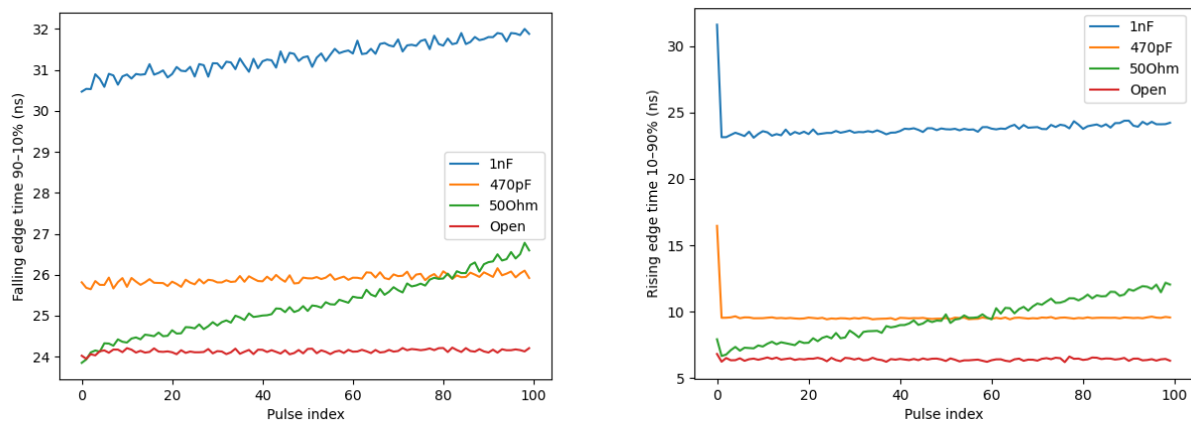
4.3.4. SE-TX08-03 matavimų rezultatai

Šioje dalyje aptariami SE-TX08-03 frontų matavimų rezultatai



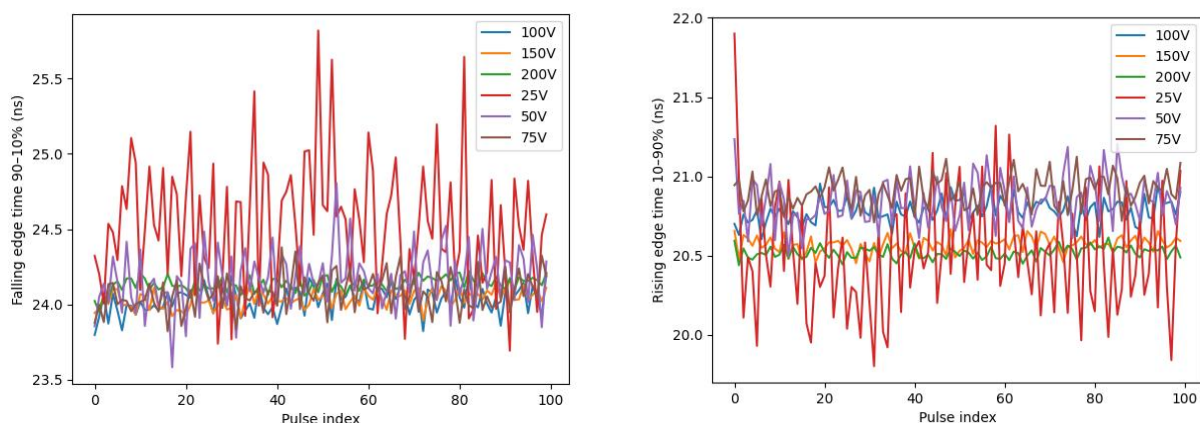
70 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu frontų trukmių priklausomybės nuo dažnio

SE-TX08-03 impulsų generatoriaus frontų trukmės, priešingai nei kito transformatoriumi paremtu impulsų generatoriaus, neturėjo jokio sąryšio su žadinimo signalo dažniu. Tai rodo, jog šio impulsų generatoriaus išėjimo transformatorius geriau suderintas dirbti šiame dažnių diapazone ir neriboja srovės dV/dt persijungimo metu.



71 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu frontų trukmių priklausomybės nuo apkrovos

Frontų trukmių priklausomybės labiau intuityvios nei SE-TX02-03 impulsų generatoriaus atveju. Tai rodo, jog šio impulsų generatoriaus pereinamieji procesai stabilesni. Todėl gaunami ilgesni frontai didinant išėjimo apkrovos talpą.



72 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu frontų trukmių priklausomybės nuo įtampos

Įtampos priklausomybės rezultatai neparodė jokios koreliacijos tarp frontų trukmių ir žadinimo įtampos. Tai rodo, jog anksčiau minėtas C_{oss} nėra ribojantis faktorius šio impulsų generatoriaus frontų trukmei. Tai reiškia, jog transformatorius veikia kaip dinaminio impedanso slopintuvas arba šio transformatoriaus parazitiniai parametrai užgožia C_{oss} talpos įtaką. Atsižvelgiant į tai, jog frontų trukmės transformatoriniams impulsų generatoriams ~ 4 kartus didesnės nei plaukiojančio valdiklio impulsų generatorių, pastarasis variantas labiau tikėtinas.

4.3.5. Frontų trukmių matavimo rezultatų apibendrinimas

4 lentelė. Frontų trukmių matavimo rezultatų apibendrinimas

Impulsų generatorius	Dažninė priklausomybė	Impulsų seka	Apkrovos priklausomybė	Įtampos priklausomybė	Vid. frontai	Pastabos
SE-TX01-01	Nepastebėta	Pastovi trukmė	Talpinės apkrovos ženkliai prailgina frontus	Mažesnė įtampa ilgina frontus	Krintantis ~8.1 ns, kylantis ~9.7 ns	Stabilus veikimas visos sekos metu
SE-TX01-02M	Nepastebėta	Pastovi trukmė	Talpinės apkrovos ženkliai prailgina frontus	Mažesnė įtampa ilgina frontus	Krintantis ~8.2 ns, kylantis ~9.5 ns	Stabilus veikimas visos sekos metu
SE-TX02-03	Didelė	EkspONENTINIS ilgėjimas	470 pF apkrova geriausia frontų trukmių atžvilgiu	Didesnė įtampa ilgina frontus	Krintantis ~100 ns, kylantis ~32 ns	Ryški transformatoriaus įtaka frontų trukmėms
SE-TX08-03	Nepastebėta	Pastovi trukmė	470 pF mažiau ilgina frontus nei plaukiojančio valdymo	Įtampos įtaka minimali	Kritimas ~8.7 ns, kilimas ~9.2 ns	Geriausias stabilumas

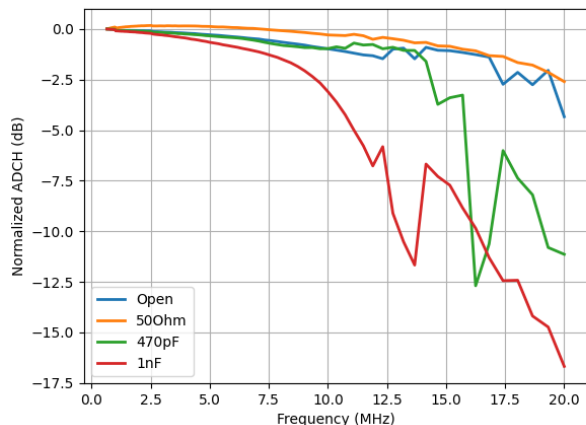
Frontų trukmių analizė parodė ryškius skirtumus tarp transformatorinių ir plaukiojančio valdiklio impulsų generatorių. Plaukiojančio valdiklio impulsų impulsų generatoriai pasižymėjo trumpais ir stabiliais frontais, tačiau buvo jautrūs talpinėms apkrovoms bei mažoms žadinimo įtampoms. Tuo tarpu SE-TX02-03 demonstravo ženkliai lėtesnius frontus bei stiprią priklausomybę nuo dažnio ir impulsų sekos, kas rodo reikšmingą pereinamųjų procesų lėtinimą transformatoriaus išėjimo grandinėje. SE-TX08-03 pasižymėjo žymiai stabilesniu veikimu ir frontų charakteristikomis, artimomis plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriams.

4.4. Dažninės charakteristikos matavimo rezultatai

Dažninės perdavimo charakteristikos įvertinimas leidžia nusakyti kaip efektyviai impulsų generatorius perduoda skirtingas signalo dažnines dedamąsias į ultragarsinį keitiklį. Perdavimo charakteristika tiesiogiai lemia sistemos pralaidumo juostą, impulsų formos iškrypimus bei atkuriamo signalo spektrą. Nepakankamas aukštų dažnių perdavimas gali slopinti staigius signalo pokyčius, bloginti erdvinę ir laikinę skyrą bei mažinti matavimo tikslumą. Taip pat netolygus dažninis atsakas gali komplikuoti signalų apdorojimą ir koreliacinius matavimo metodus. Šioje skiltyje pateikti visų impulsų generatorių dažninės perdavimo charakteristikos matavimai prie skirtingų žadinimo įtampų bei apkrovų.

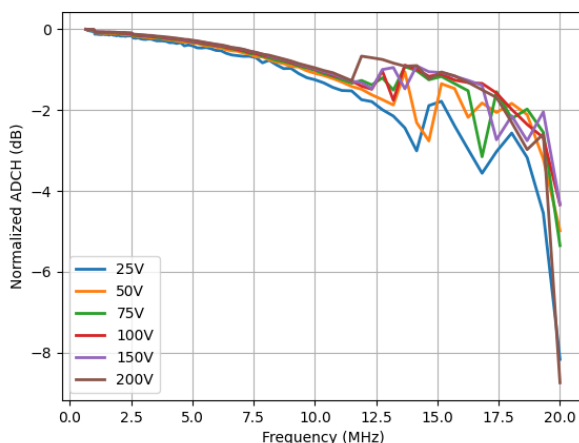
4.4.1. SE-TX01-01 matavimų rezultatai

Šioje skiltyje aptariamos išmatuotos SE-TX01-01 dažninės charakteristikos.



73 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus dažninės charakteristikos priklausomybė nuo apkrovos

Iš dažninio atsako priklausomybės nuo apkrovos grafiko matome, jog esant talpinėms apkrovoms ribinis dažnis mažėja, tai reiškia jog apkrova yra pagrindinis ribojantis faktorius sistemoje. Esant atvirai apkrovai ribinis dažnis siekia 19 MHz. Toks diapazonas sąlyginai didelis atsižvelgiant į tai, jog išėjimo grandinė turi atlaikyti įtampas iki 300V.

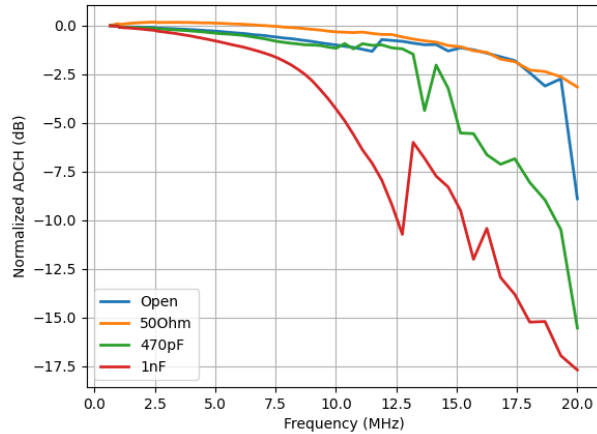


74 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus dažninės charakteristikos priklausomybė nuo įtampos

Iš dažninio atsako priklausomybės nuo įtampos grafiko matome, jog žadinimo įtampos poveikis ribiniam dažniui nedidelis – skirtumas nuo 25 V ir 200 V įtampų apie 2 MHz. Siauriausias darbinų dažnių diapazonas gaunamas prie žemiausių įtampų, greičiausiai dėl C_{oss} poveikio sistemos greitaveikai.

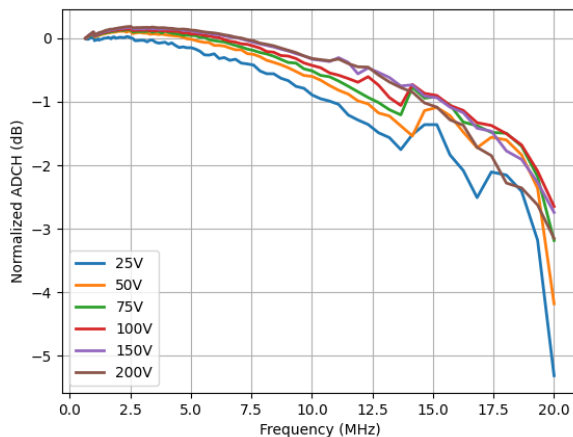
4.4.2. SE-TX-01-02M matavimų rezultatai

Šioje skiltyje aptariamos išmatuotos SE-TX01-02M dažninės charakteristikos.



75 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus dažninės charakteristikos priklausomybė nuo apkrovos

Dažninės charakteristikos priklausomybė nuo apkrovos panaši kaip ir kito optiškai izoliuoto impulsų generatoriaus. Talpinės apkrovos tiesiogiai paveikia sistemos maksimalų dažnį. Su atvira apkrova gautas ribinis dažnis apie 19 MHz.

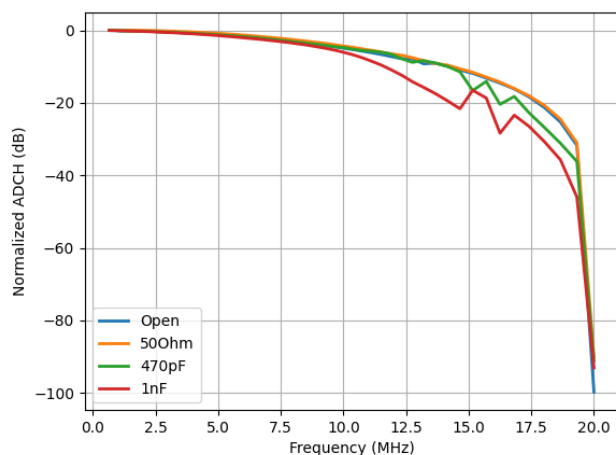


76 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus dažninės charakteristikos priklausomybė nuo įtampos

Rezultatuose matome, jog prie žemų žadinimo įtampų siaurėja sistemos dažninis diapazonas. Kadangi išėjimo pakopa yra tiesiogiai susieta su apkrova, įtampos pokytis keičia ne tik impulso amplitudę, bet ir aktyviųjų elementų darbo režimą bei parazitinių talpų įtaką. Ypač svarbi gali būti tranzistorių išėjimo talpa, kuri yra netiesinė ir priklauso nuo įtampos. Dėl to keičiantis žadinimo įtampai keičiasi išėjimo grandinės perdavimo funkcija, todėl atsiranda didesnė charakteristikų sklaida.

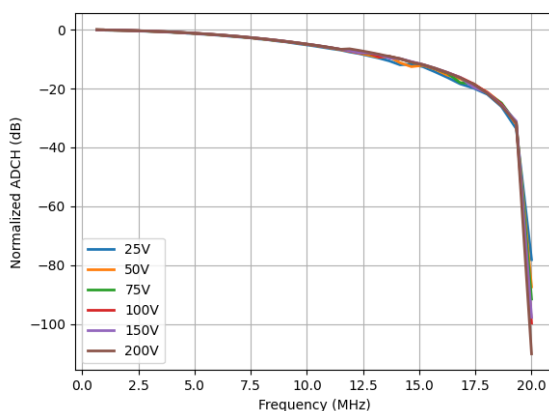
4.4.3. SE-TX-02-03 matavimų rezultatai

Šioje skiltyje aptariamos išmatuotos SE-TX02-03 dažninės charakteristikos.



77 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu dažninės charakteristikos priklausomybė nuo apkrovos

Iš dažninės charakteristikos priklausomybės nuo apkrovos grafiko matome, jog išsibarstymas tarp apkrovų sąlyginai nedidelis. Tai reiškia, jog dažninį atsaką labiau riboja impulsų generatoriaus vidiniai parametrai. Didžiausią įtaką dažninėms savybėms greičiausiai turi transformatoriaus parazitinė talpa tarp apvijų, todėl gautas ribinis dažnis vos 8 MHz. Lyginant su plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriais, transformatoriais paremtos topologijos pralaidumo juosta itin siaura.

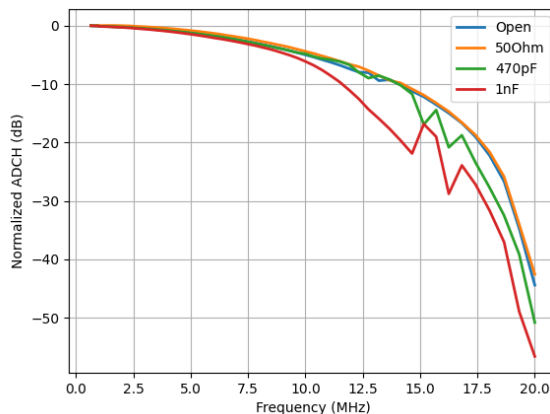


78 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu dažninės charakteristikos priklausomybė nuo įtampos

Priklausomybė nuo amplitudės rodo itin mažą išsibarstymą. Gauti rezultatai rodo, kad žadinimo įtampa neturėjo reikšmingos įtakos dažninei perdavimo charakteristikai, nors frontų trukmės kito pastebimai. Toks rezultatas leidžia teigti, kad dažninį atsaką daugiausia formuoja pasyvūs impulsų generatoriaus ir apkrovos grandinės parametrai: išėjimo varža, parazitinės talpos ir induktyvumai. Tuo tarpu žadinimo įtampa labiau veikia momentinius pereinamuosius procesus ir slenkstinių fronto taškų pasiekimo laiką, bet nepakankamai pakeičia pačią sistemos perdavimo funkciją.

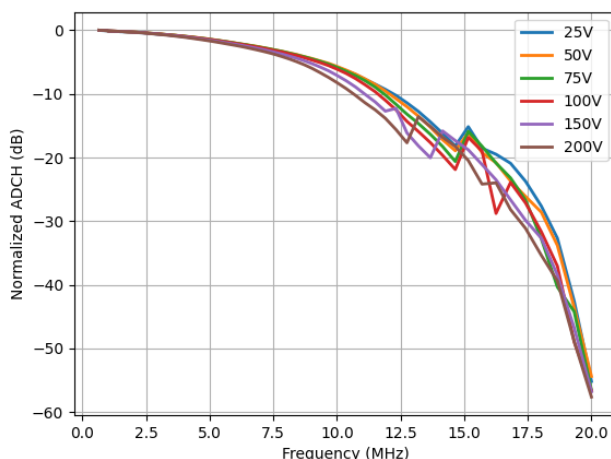
4.4.4. SE-TX-08-03 matavimų rezultatai

Šioje skiltyje aptariamos išmatuotos SE-TX08-03 dažninės charakteristikos.



79 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu dažninės charakteristikos priklausomybė nuo apkrovos

Kaip ir kito transformatorinio impulsų generatoriaus, SE-TX08-03 ribinis dažnis mažesnis, tačiau jis išslyka stabilesnis su talpinėmis apkrovomis. Tai sąlygoja vidinių parametrų dominavimas nusakant ribinį dažnį ir indukuoja didesnius parazitinius parametrus lyginant su plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriais.



80 pav. Bipoliaraus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu dažninės charakteristikos priklausomybė nuo įtampos

Perdavimo charakteristikos priklausomybė nuo įtampos rodo didesnę išsibarstymą nei SE-TX02-03 impulsų generatoriaus rezultatuose. Tai reiškia, jog tranzistoriaus kanalo parazitinis talpumas labiau pasireiškia sistemos perdavimo charakteristikoje. Tai reiškia, jog išėjimo transformatoriaus parazitiniai parametrai mažesni ir ne taip stipriai paveikia sistemos darbinį dažnį. Tai atsispindi ir impulsų generatoriaus ribiniam dažniui – jis šiek tiek didesnis ir siekia 11 MHz.

4.4.5. Dažninės charakteristikos matavimo rezultatų apibendrinimas

5 lentelė. Dažninės charakteristikos matavimų rezultatų apibendrinimas

Impulsų generatorius	Ribinis dažnis	Apkrovos priklausomybė	Įtampos priklausomybė	Pastabos
SE-TX01-01	~19 MHz	Talpinės apkrovos blogina charakteristiką	Nedidelė	Atvira ir 50 Ω apkrovos panašios
SE-TX01-02M	~19 MHz	Talpinės apkrovos blogina charakteristiką	Šiek tiek didesnė	Atvira ir 50 Ω apkrovos panašios
SE-TX02-03	~8 MHz	Priklausomybė nepastebėta	Priklausomybė nepastebėta	Stabilus visų apkrovų atveju
SE-TX08-03	~11 MHz	Talpinės apkrovos blogina charakteristiką	Labai maža	Nedidelė apkrovos sklaida

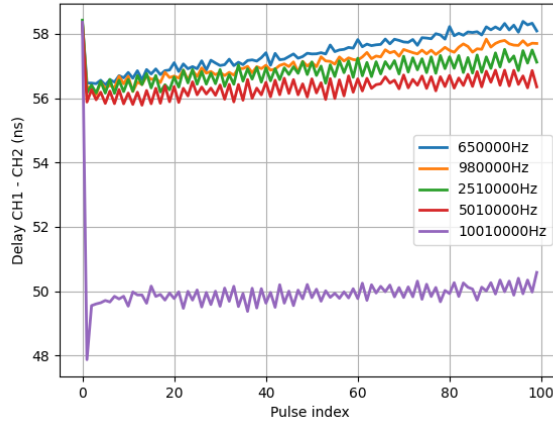
Dažninės charakteristikos analizė parodė, kad plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriai pasižymėjo didžiausiu ribiniu dažniu bei plačiausia pralaidumo juosta. Abiem atvejais talpinės apkrovos blogino aukštų dažnių perdavimą, tačiau atviros ir 50 Ω apkrovos demonstravo panašų veikimą. Transformatoriniai impulsų generatoriai pasižymėjo mažesniu ribiniu dažniu, tačiau SE-TX02-03 atveju dažninė charakteristika išliko praktiškai nepriklausoma nuo apkrovos ir žadinimo įtampos. SE-TX08-03 demonstravo geresnę pralaidumo juostą nei SE-TX02-03 bei mažesnę apkrovos įtaką nei plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriai.

4.5. Vėlinimo matavimo rezultatai

Vėlinimo matavimai leidžia įvertinti impulsų generatoriaus impulsų laikinį stabilumą bei impulsų generavimo pakartojamumą. Stabilus vėlinimas yra svarbus ultragarsinėse sistemose, kuriose naudojami koreliaciniai, faziniai arba laiko matavimo metodai, nes net ir nedideli impulsų padėties pokyčiai gali sukelti matavimo paklaidas, mažinti sistemos skyrą bei komplikuoti signalų apdorojimą. Vėlinimo pokyčius gali lemti pereinamųjų procesų nestabilumas, parazitiniai grandinės elementai, maitinimo svyravimai bei nepakankamas išėjimo pakopos atsistatymas tarp impulsų. Šioje skiltyje pateikti visų impulsų generatorių vėlinimo matavimai prie skirtingų žadinimo įtampų, dažnių bei apkrovų.

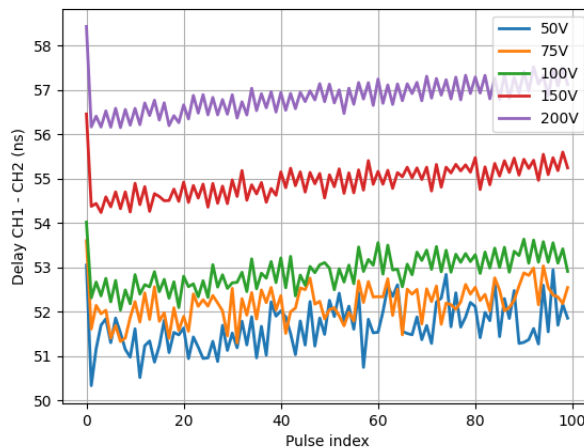
4.5.1. SE-TX01-01 matavimų rezultatai

Šioje skiltyje aptariami išmatuoti SE-TX01-01 vėlinimo rezultatai.



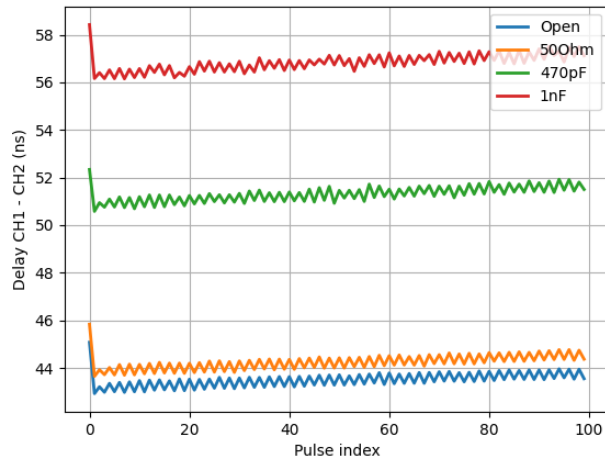
81 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo dažnio

Iš vėlinimo priklausomybės nuo dažnio matome, jog sistemos vėlinimas nesiekia žemiau 49 ns, tai greičiausiai bendras sistemos vėlinimas, kuris ateina iš apsauginės grandinės, CPLD ir MOSFET valdiklių. Toliau matome, jog prie aukštų dažnių sistemos vėlinimas sumažėja apie 6 ns. Staigus vėlinimo pokytis ties 10 MHz gali būti siejamas su plaukiojančios valdymo grandinės arba išėjimo pakopos ribotu atsistatymo laiku. Didėjant impulsų pasikartojimo dažniui, mažėja laikas tarp impulsų, todėl ankstesnio impulso liekamieji pereinamieji procesai gali paveikti sekančio impulso įjungimo momentą. Dėl to vėlinimas sumažėja ne palaipsniui, o šuoliniu būdu, kai sistema pasiekia tam tikrą ribinį dažnį.



82 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo įtampos

Palaipsnis vėlinimo didėjimas didėjant žadinimo įtampai rodo, kad impulso formavimo procesas priklauso nuo pereinamųjų procesų energijos ir parazitinių elementų įkrovimo dinamikos. Esant didesnei įtampai, išėjimo grandinėje sukaupiama daugiau energijos, todėl impulso susiformavimo momentas pasislenka vėliau.

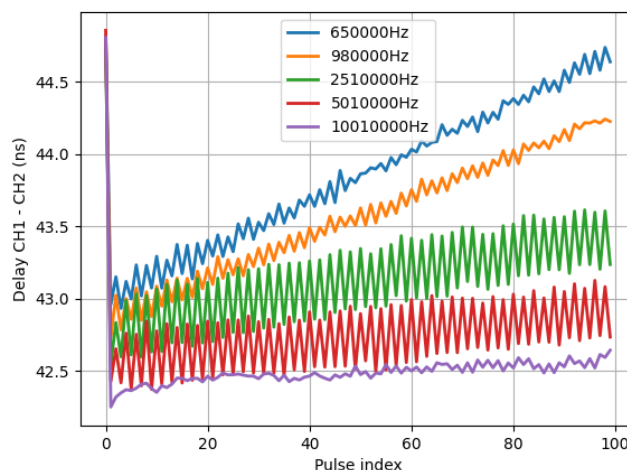


83 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo apkrovos

Vėlinimo priklausomybė nuo apkrovos rodo stiprią talpinių elementų įtaką impulso formavimo procesui. Didėjant apkrovos talpai, ilgėja pereinamieji procesai bei slenkstinių impulso taškų pasiekimo laikas, todėl bendras vėlinimas didėja. Mažiausi vėlinimai prie atviros ir 50 Ω apkrovos.

4.5.2. SE-TX-01-02M matavimų rezultatai

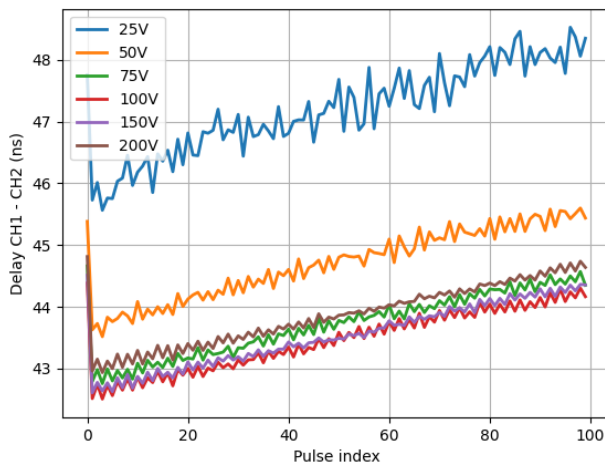
Šioje skiltyje aptariami išmatuoti SE-TX01-02M vėlinimo rezultatai.



84 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo dažnio

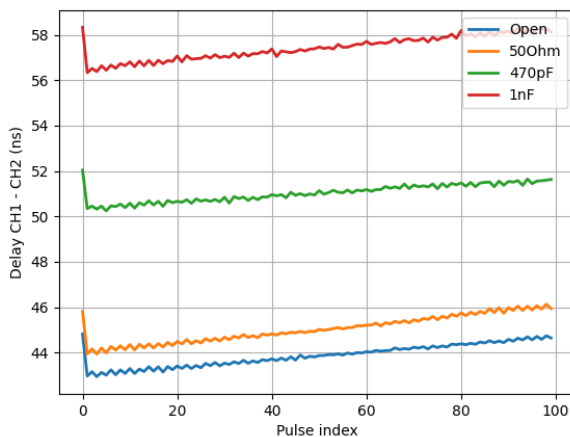
Šiame plaukiojančio valdymo impulsų generatoriuje didžiausi vėlinimai buvo stebimi ties mažiausiais impulsų pasikartojimo dažniais, o mažiausi – ties didžiausiais dažniais. Tačiau, skirtingai nuo kito plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus, ties 10 MHz nebuvo stebėtas staigus šuolinis vėlinimo pokytis – priklausomybė išliko tolygesnė. Tai rodo stabilesnę pereinamųjų procesų elgesį bei tolygesnę išėjimo pakopos darbą didėjant dažniui. Taip pat buvo pastebėta, kad vėlinimas palaipsniui didėja kiekvienam sekančiam impulsui impulsų sekoje. Toks efektas gali būti siejamas su

nevisišku grandinės atsistatymu tarp impulsų, greičiausiai dėl V_{HV} talpų išsekimo. Svarbu paminėti jog vėlinimų išsibarstymas mažesnis – 4 ns, tai sąlygoja anksčiau minėtas procesų nusistovėjimas ir stabilus impulsų generatoriaus veikimas



85 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo įtampos

Mažiausios žadinimo įtampos atveju buvo stebėtas didžiausias vėlinimas. Didėjant įtampai pereinamieji procesai spartėjo, todėl impulso formavimosi momentas pasislinko anksčiau ir vėlinimas sumažėjo.

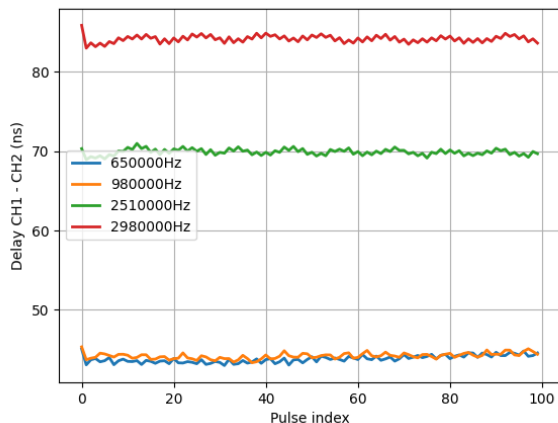


86 pav. Unipoliaraus plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriaus vėlinimo priklausomybė nuo apkrovos

Vėlinimo priklausomybė nuo apkrovos patvirtina stiprią talpinių elementų įtaką pereinamiesiems procesams. Esant didesnei talpinei apkrovai išėjimo pakopa turi perduoti didesnę krūvį, todėl impulso frontai formuojasi lėčiau ir stebimas didesnis vėlinimas. Mažesnės talpos arba aktyvios apkrovos atveju pereinamieji procesai vyksta greičiau, todėl vėlinimas sumažėja.

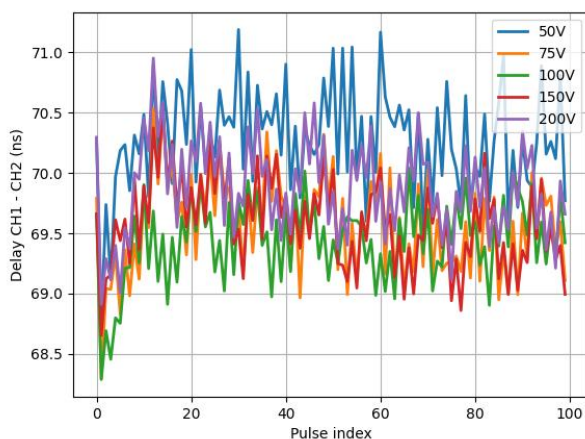
4.5.3. SE-TX-02-03 matavimų rezultatai

Šioje skiltyje aptariami išmatuoti SE-TX02-03 vėlinimo rezultatai.



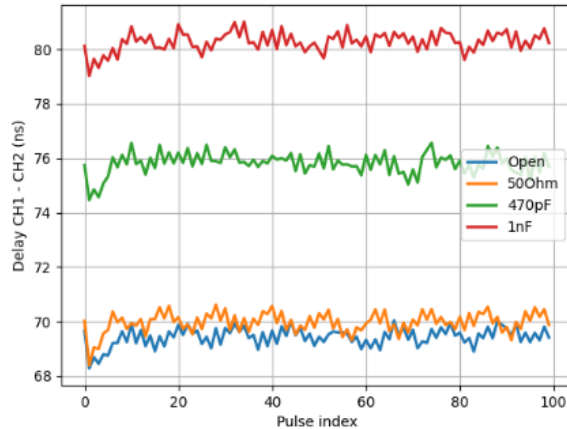
87 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu vėlinimo priklausomybė nuo dažnio

Skirtingai nuo plaukiojančio valdymo impulsų generatorių, transformatoriniame impulsų generatoriuje vėlinimas didėjo kartu su dažniu, o bendras vėlinimo lygis buvo ženkliai didesnis. Tai rodo, kad impulso formavimo procesą reikšmingai riboja transformatoriaus pereinamieji procesai ir nevisiškas išėjimo grandinės atsistatymas tarp impulsų esant dideliems pasikartojimo dažniams.



88 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu vėlinimo priklausomybė nuo įtampos

Žadinimo įtampa neturėjo reikšmingos įtakos vėlinimui. Tai leidžia teigti, kad vėlinimą šiame impulsų generatoriuje daugiausia formuoja transformatoriaus pereinamieji procesai, o ne tranzistorių kanalų parazitinė talpa.

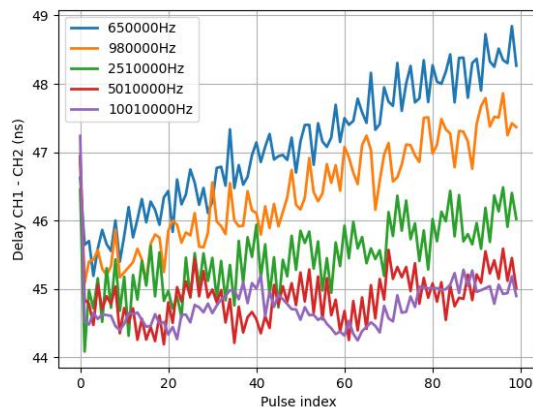


89 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu išėjimu vėlinimo priklausomybė nuo apkrovos

Didžiausi vėlinimai buvo stebimi esant talpinėms apkrovoms, o mažiausi – prie atviros bei 50 Ω apkrovos. Toks rezultatas rodo, kad net ir transformatoriniame impulsų generatoriuje apkrovos talpa reikšmingai veikia pereinamųjų procesų dinamiką. Didėjant talpai ilgėja energijos perdavimo bei apkrovos įkrovimo procesai, todėl impulso slenkstiniai taškai pasiekiami vėliau ir bendras vėlinimas padidėja.

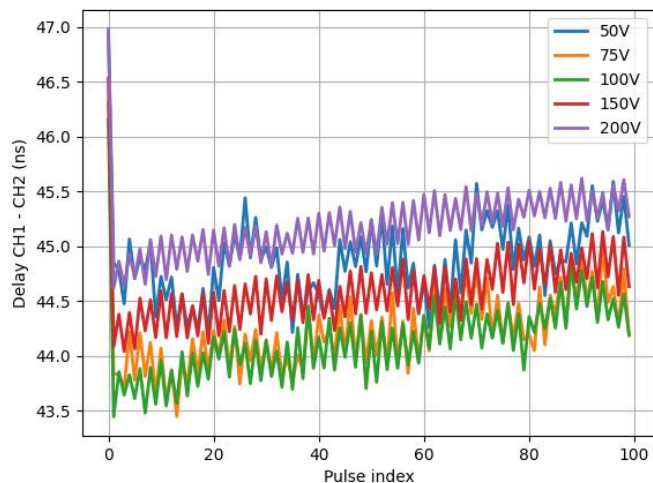
4.5.4. SE-TX-08-03 matavimų rezultatai

Šioje skiltyje aptariami išmatuoti SE-TX08-03 vėlinimo rezultatai.



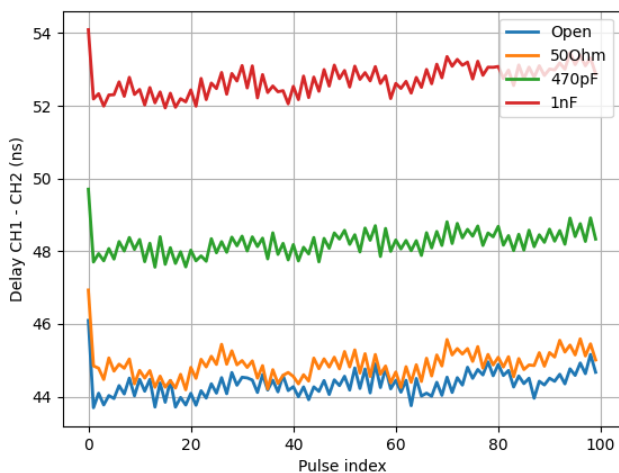
90 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu vėlinimo priklausomybė nuo dažnio

Šiame impulsų generatoriuje didėjant dažniui vėlinimas mažėjo. Be to, bendras vėlinimo lygis buvo ženkliai mažesnis, lyginant su kitu transformatoriniu impulsų generatoriaus. Tai rodo greitesnį išėjimo grandinės atsistatymą bei mažesnę transformatoriaus pereinamųjų procesų įtaką impulso formavimui. Galima teigti, jog šio impulsų generatoriaus išėjimo transformatorius turi mažesnius parazitinius parametrus lyginant su SE-TX02-03.



91 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu vėlinimo priklausomybė nuo įtampos

Didžiausias vėlinimas buvo stebimas prie didžiausios žadinimo įtampos, tačiau bendras skirtumas tarp įtampų išliko nedidelis. Tai rodo, kad žadinimo įtampa tik nežymiai veikia šio transformatorinio impulsų generatoriaus pereinamųjų procesų dinamiką. Didesnis vėlinimas prie didesnių įtampų rodo, jog ribojantis kriterijus tai ne kanalo talpa, o ribojama srovė persijungimo metu, greičiausiai dėl transformatoriaus parazitinių parametų.



92 pav. Bipoliarus impulsų generatoriaus su transformatoriniu užtūros valdymu vėlinimo priklausomybė nuo apkrovos

Kaip ir kituose tirtuose impulsų generatoriuose, didžiausi vėlinimai buvo stebimi esant talpinėms apkrovoms, o mažiausi – prie atviros bei 50 Ω apkrovos. Toks rezultatas patvirtina, kad apkrovos talpa yra vienas pagrindinių pereinamųjų procesų trukmę ir impulso formavimosi laiką lemiančių veiksnių. Didėjant talpinei apkrovai ilgėja įkrovimo ir iškrovimo procesai, todėl impulso slenkstiniai taškai pasiekiami vėliau ir bendras vėlinimas padidėja.

4.5.5. Vėlinimo matavimo rezultatų apibendrinimas

6 lentelė. Vėlinimo matavimo rezultatų apibendrinimas

Impulsų generatorius	Vid. vėlinimas	Dažninė priklausomybė	Impulsų seka	Apkrovos priklausomybė	Įtampos priklausomybė	Pastabos
SE-TX01-01	~52 ns	Stabili žemuose dažniuose	Pastovi paklaida	Talpinės apkrovos didina vėlinimą	Didesnė įtampa didina vėlinimą	Staigus vėlinimo sumažėjimas ties 10 MHz
SE-TX01-02M	~43 ns	Žemi dažniai didina vėlinimą	Linijinis didėjimas	Talpinės apkrovos didina vėlinimą	Mažesnė įtampa didina vėlinimą	Stabiliausias veikimas ir mažiausias vid. vėlinimas
SE-TX02-03	~70 ns	Aukšti dažniai didina vėlinimą	Pastovi paklaida	Talpinės apkrovos didina vėlinimą	Priklausomybė nepastebėta	Didžiausias bendras vėlinimas
SE-TX08-03	~45 ns	Žemi dažniai didina vėlinimą	Linijinis didėjimas	Talpinės apkrovos didina vėlinimą	Didesnė įtampa didina vėlinimą	Mažesnis vėlinimas

Vėlinimo analizė parodė, kad transformatoriniai impulsų generatoriai pasižymėjo didesniais absoliutiniais vėlinimais nei plaukiojančio valdymo, ypač SE-TX02-03 atveju. Talpinės apkrovos visais atvejais reikšmingai didino vėlinimą, kas rodo stiprią pereinamųjų procesų ir apkrovos talpos įtaką impulso formavimosi laikui. Plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriai demonstravo mažesnius vėlinimus, tačiau kai kuriais atvejais buvo stebimi impulsų sekos kaupimosi efektai arba netolygus elgesys aukštuose dažniuose. SE-TX08-03 pasižymėjo mažesniu vėlinimu ir stabilesniu veikimu nei kitas transformatorinis impulsų generatorius.

Išvados

1. Darbo metu buvo atlikta keturių skirtingų ultragarso impulsų generatorių topologijų eksperimentinė analizė, vertinant jų impulso pločio paklaidą, frontų trukmes, dažninę perdavimo charakteristiką bei vėlinimo parametrus prie skirtingų žadinimo įtampų, dažnių ir apkrovų.
2. Nustatyta, kad plaukiojančio valdiklio impulsų generatoriai pasižymėjo mažiausiomis impulso pločio paklaidomis bei plačiausia dažnine juosta (~19 MHz). Šie impulsų generatoriai demonstravo trumpus frontus (~8–10 ns) bei mažus bendrus vėlinimus, tačiau buvo jautresni talpinėms apkrovoms ir mažoms žadinimo įtampoms.
3. Transformatoriniai impulsų generatoriai pasižymėjo ryškiai skirtingu pereinamųjų procesų elgesiu. Transformatorinio išėjimo generatorius demonstravo didžiausias impulso pločio paklaidas (~10 ns), lėčiausius frontus bei didžiausius vėlinimus (~70 ns), taip pat stiprią priklausomybę nuo dažnio ir impulsų sekos. Tai rodo reikšmingą transformatoriaus pereinamųjų procesų bei kaupimosi efektų įtaką impulso formavimui.
4. Transformatorinės užtūros topologija pasižymėjo geresniu stabilumu nei transformatorinio išėjimo ir demonstravo trumpus frontus (~9 ns), mažesnius vėlinimus (~45 ns) bei mažesnę pereinamųjų procesų priklausomybę nuo dažnio ir žadinimo įtampos. Dažninė charakteristika (~11 MHz) buvo siauresnė nei plaukiojančio valdiklio impulsų generatorių, tačiau stabilesnė apkrovų atžvilgiu.
5. Visuose impulsų generatoriuose talpinės apkrovos didino impulso pločio paklaidą, frontų trukmes bei vėlinimą. Tai patvirtina stiprią apkrovos talpos įtaką pereinamiesiems procesams ir išėjimo grandinės atsistatymo dinamikai.
6. Tyrimo metu nustatyta, kad kai kuriuose impulsų generatoriuose impulso parametrai kito impulsų sekos metu. Optiniuose impulsų generatoriuose dažniausiai buvo stebimas linijinis paklaidų augimas, o transformatoriniuose impulsų generatoriuose – ryškesni kaupimosi efektai bei eksponentinis parametru blogėjimas. Tai rodo nevisišką išėjimo grandinės atsistatymą tarp impulsų esant dideliems impulsų pasikartojimo dažniams.
7. Gauti rezultatai parodė, kad impulsų generatoriaus topologija turi didelę įtaką ultragarso sistemos dinaminiam parametrui. Plaukiojančio užtūros valdymo topologijos pasižymėjo geresnėmis aukštadažnėmis charakteristikomis ir mažesnėmis absoliutinėmis paklaidomis, tuo tarpu transformatorinės topologijos demonstravo didesnę jautrumą pereinamiesiems procesams, tačiau kai kuriais atvejais užtikrino stabilesnį darbą prie talpinių apkrovų.

Literatūros sąrašas

1. Philling, David. "Ringing in Ultrasonic Transducers | David Pilling." *Davidpillling.com*, 2021, www.davidpillling.com/wiki/index.php/Ringing. Accessed 13 May 2026.
2. Zaman, Haider, et al. "Suppression of Switching Crosstalk and Voltage Oscillations in a SiC MOSFET Based Half-Bridge Converter." *Energies*, vol. 11, no. 11, 10 Nov. 2018, p. 3111, <https://doi.org/10.3390/en11113111>. Accessed 15 Mar. 2026.
3. EETimes. "Half-Bridge Topology Finds Applications in High Density Power Converters." *EE Times*, 8 May 2006, www.eetimes.com/half-bridge-topology-finds-applications-in-high-density-power-converters/. Accessed 13 May 2026.
4. Linas Svilainis, et al. "Investigation of the Half Bridge and Transformer Push–Pull Pulser Topologies for Ultrasonic Transducer Excitation." *Journal of Circuits Systems and Computers*, vol. 24, no. 05, 13 Feb. 2015, pp. 1550062–1550062, <https://doi.org/10.1142/s0218126615500620>. Accessed 13 May 2026.
5. Svilainis, Linas, et al. "Efficient High Voltage Pulser for Piezoelectric Air Coupled Transducer." *Ultrasonics*, vol. 53, no. 1, Jan. 2013, pp. 225–231, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2012.06.004>. Accessed 13 May 2026.
6. Pullabhatla, Sai Kiran, et al. "Comparison of GAN, SiC, Si Technology for High Frequency and High Efficiency Inverters." *E3S Web of Conferences*, vol. 184, 2020, p. 01012, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018401012>.
7. Huang, Xiucheng, et al. "Characterization and Enhancement of High-Voltage Cascode GaN Devices." *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 62, no. 2, 1 Feb. 2015, pp. 270–277, <https://doi.org/10.1109/ted.2014.2358534>. Accessed 4 Sept. 2023.
8. Ahmed, Osama, et al. "Performance Comparison of Silicon- and Gallium-Nitride-Based MOSFETs for a Power-Efficient, DC-To-DC Flyback Converter." *Electronics*, vol. 11, no. 8, 12 Apr. 2022, p. 1222, <https://doi.org/10.3390/electronics11081222>. Accessed 21 Feb. 2023.
9. Liu, Sheng, et al. "Miller Plateau Corrected with Displacement Currents and Its Use in Analyzing the Switching Process and Switching Loss." *Electronics*, vol. 10, no. 16, 20 Aug. 2021, p. 2013, <https://doi.org/10.3390/electronics10162013>.
10. Svilainis, L., and V. Dumbrava. "Evaluation of the Ultrasonic Transducer Electrical Matching Performance." *Ultrasound*, vol. 62, no. 4, 30 Nov. 2007, pp. 16–21, www.ndt.net/article/ultragarsas/62-2007-no.4_02-svilainis.pdf, <https://doi.org/10.5755/j01.u.62.4.17038>. Accessed 13 May 2026.
11. CoolMOS™ SJ MOSFETs Selection Guide. https://my.avnet.com/wcm/connect/05d268b7-69f5-4a2e-a72a-5605e63d5a8a/ebv_P-324-E-12-2018-v1%2BCoolMOS%E2%84%A2%2BSJ%2BMOSFETs%2Bselection%2Bguide_LowRes.pdf?MOD=AJPERES&CVID=oRq2Ew6
12. Yuan, Tao, et al. "Driving an Inductive Piezoelectric Transducer with Class E Inverter." *Sensors and Actuators a Physical*, vol. 261, 1 July 2017, pp. 219–227, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.05.021>. Accessed 28 Aug. 2024.
13. Milewski, Andrzej, et al. "Modelling and Designing of Ultrasonic Welding Systems." *Archives of Acoustics*, vol. 40, no. 1, 1 Mar. 2015, pp. 93–99, <https://doi.org/10.1515/aoa-2015-0011>. Accessed 2 Dec. 2020.

14. Adrian. "Push-Pull vs Open-Drain Output Modes." *Allpcb.com*, ALLPCB, 15 Sept. 2025, www.allpcb.com/allelectrohub/pushpull-vs-opendrain-output-modes. Accessed 13 May 2026.
15. Daryanani, Sonu, and Sonu Daryanani. "Superjunction (SJ) MOSFETs: Performance, Applications, and Comparisons to SiC and GaN - Power Electronics News." *Power Electronics News*, 3 Apr. 2023, www.powerelectronicsnews.com/superjunction-sj-mosfets-performance-applications-and-comparisons-to-sic-and-gan/.
16. "Practical Considerations When Comparing SiC and GaN in Power Applications - Elettronica Plus." *Elettronica Plus*, 17 July 2018, elettronica-plus.it/practical-considerations-when-comparing-sic-and-gan-in-power-applications_96479/?lang=it.
17. "QSIM > Accelerogram Generation." *Geostru.eu*, 2026, help.geostru.eu/qsim/en/accelerogram.html. Accessed 13 May 2026.
18. Vishay Siliconix *Si4108DY New Product*. <https://www.vishay.com/docs/68635/si4108dy.pdf>
19. "CIMEC Wiki | Frequency-Domain Analysis." *CIMEC Wiki*, 2020, wiki.cimec.unitn.it/tiki-index.php?page=Frequency-domain+analysis.

Priedai

1 priedas. Unipoliariųjų impulsinių generatorių parametrų išgavimo algoritmas

```
%%% ===== BATCH LOOP =====
root = 'C:\Users\jokub\Desktop\studijos\Magistrinis\zipped\zipped\RAW_DATA\SE-TX01-01';
outdirRoot = "proc_results";
doPlots = true;

% Collect all files like <root>/<Load>/<Vset>/FREQ*_CH1.txt
D = dir(fullfile(root, '**', 'FREQ*_CH1.txt'));
allFiles = fullfile({D.folder}, {D.name});
fprintf('Found %d files.\n', numel(allFiles));

ok=0; fail=0; t0=tic;
for ii = 1:numel(allFiles)
    try
        analyze_one_file(allFiles{ii}, outdirRoot, doPlots);
        ok = ok + 1;
    catch ME
        fail = fail + 1;
        warning('FAILED: %s\n -> %s', allFiles{ii}, ME.message);
    end
    if doPlots, close all; end
end
fprintf('Done. OK=%d, Fail=%d, Elapsed=%0.1fs\n', ok, fail, toc(t0));

%%%
=====
%%% ===== PER-FILE ANALYZER =====
function analyze_one_file(fname, outdirRoot, doPlots)

TT = load_data(fname);
v = TT.Voltage_V(:);
t = TT.Time;
t_s = seconds(t);
N = numel(v);

% ----- GLOBAL STATS -----
v_med = median(v);
v_p05 = prctile(v,5);
v_p95 = prctile(v,95);
v_span = v_p95 - v_p05;
noise_sigma = 1.4826*mad(v - v_med, 1);
A_min_abs = 6*noise_sigma;
```

```

A_min_rel = 0.04*v_span;
A_min     = max(A_min_abs, A_min_rel);

% ----- SEGMENTATION -----
flip_for_detect = (v_p95 - v_med) < (v_med - v_p05);
v_detect = flip_for_detect * (-v) + (~flip_for_detect) * v;

md = median(v_detect);
p95d = prctile(v_detect,95);
th_hi = md + 0.50*(p95d - md);
th_lo = md + 0.48*(p95d - md);

is_high = false(N,1);
state = false;
for i = 1:N
    x = v_detect(i);
    if ~state && x >= th_hi, state = true;
    elseif state && x <= th_lo, state = false;
    end
    is_high(i) = state;
end

[starts, stops] = segment_edges(is_high, t_s, fname);
nPulses = numel(starts);

% ----- PER-PULSE METRICS -----
HighLevel   = nan(nPulses,1);
LocalLow    = nan(nPulses,1);
LocalHigh   = nan(nPulses,1);
t_start_s   = nan(nPulses,1);
t_end_s     = nan(nPulses,1);
t50_enter_s = nan(nPulses,1);
t50_exit_s  = nan(nPulses,1);
PW50_s      = nan(nPulses,1);
t10_rise_s  = nan(nPulses,1); t90_rise_s = nan(nPulses,1);
t90_fall_s  = nan(nPulses,1); t10_fall_s = nan(nPulses,1);
RiseTime_s  = nan(nPulses,1);
FallTime_s  = nan(nPulses,1);
QualityOK   = false(nPulses,1);

for k = 1:nPulses
    i1 = starts(k); i2 = stops(k);
    seg_len = i2 - i1 + 1;

    [v_low_loc, v_high_loc] = local_levels(v, i1, i2);
    LocalLow(k) = v_low_loc;

```

```

LocalHigh(k) = v_high_loc;

amp_k = abs(v_high_loc - v_low_loc);
if amp_k < A_min
    t_start_s(k) = t_s(i1); t_end_s(k) = t_s(i2);
    QualityOK(k) = false; continue
end

edgeTrim = max(3, min(50, round(0.10*seg_len)));
j1 = min(i2, i1 + edgeTrim);
j2 = max(i1, i2 - edgeTrim);
if j1 > j2, j1 = i1; j2 = i2; end
HighLevel(k) = median(v(j1:j2));

y10 = v_low_loc + 0.10*(v_high_loc - v_low_loc);
y50 = v_low_loc + 0.50*(v_high_loc - v_low_loc);
y90 = v_low_loc + 0.90*(v_high_loc - v_low_loc);
dirSign = sign(v_high_loc - v_low_loc); if dirSign==0, dirSign = +1; end

riseWin = max(32, round(0.25*seg_len));
fallWin = max(32, round(0.25*seg_len));

t50_enter_s(k) = find_cross_rise(t_s, v, i1, y50, dirSign, riseWin);
t50_exit_s(k) = find_cross_fall(t_s, v, i2, y50, dirSign, fallWin);
[t50_enter_s(k), t50_exit_s(k)] = dedupe_crossings(t50_enter_s(k), t50_exit_s(k));
PW50_s(k) = t50_exit_s(k) - t50_enter_s(k);

t10_rise_s(k) = find_cross_rise(t_s, v, i1, y10, dirSign, riseWin);
t90_rise_s(k) = find_cross_rise(t_s, v, i1, y90, dirSign, riseWin);
t90_fall_s(k) = find_cross_fall(t_s, v, i2, y90, dirSign, fallWin);
t10_fall_s(k) = find_cross_fall(t_s, v, i2, y10, dirSign, fallWin);

RiseTime_s(k) = t90_rise_s(k) - t10_rise_s(k);
FallTime_s(k) = t10_fall_s(k) - t90_fall_s(k);

QualityOK(k) = all(isfinite([t50_enter_s(k) t50_exit_s(k) t10_rise_s(k) ...
    t90_rise_s(k) t90_fall_s(k) t10_fall_s(k)]));
t_start_s(k) = t_s(i1);
t_end_s(k) = t_s(i2);
end

PulseTable = table((1:nPulses).!, t_start_s, t_end_s, PW50_s, HighLevel, ...
    t50_enter_s, t50_exit_s, ...
    t10_rise_s, t90_rise_s, t90_fall_s, t10_fall_s, ...
    RiseTime_s, FallTime_s, QualityOK, LocalLow, LocalHigh, ...
    'VariableNames', {'Pulse','t_start_s','t_end_s','PW50_s','HighLevel_V', ...

```

```

        't50_enter_s','t50_exit_s', ...
        't10_rise_s','t90_rise_s','t90_fall_s','t10_fall_s', ...
        'RiseTime_s','FallTime_s','QualityOK','LocalLow_V','LocalHigh_V'});

% ----- METADATA -----
tok = regexp(fname, 'FREQ(\d+)', 'tokens', 'once');
if isempty(tok), error('Could not find "FREQxxxxx" in file path: %s', fname); end
f0 = str2double(tok{1}); T0 = 1/f0;

[pth,~,~] = fileparts(fname);
[pth2,Vfolder] = fileparts(pth);
[~,LoadType] = fileparts(pth2);
Vset = str2double(Vfolder);

dutyFraction = 0.5; idealHigh_s = dutyFraction * T0;
w_err_ns = 1e9 * (PW50_s - idealHigh_s);
cum_err_ns = cumsum(w_err_ns);

% ----- OPTIONAL PLOTS -----
if doPlots
    figure; plot(t_s, v, 'LineWidth',1.2); grid on; hold on
    xlabel('Time (s)'); ylabel('Voltage (V)');
    title('Waveform — 50% pulse-width markers'); yline(v_p05,','Baseline');
    for k = 1:nPulses
        if ~QualityOK(k), continue; end
        y50 = LocalLow(k) + 0.50*(LocalHigh(k) - LocalLow(k));
        plot(t50_enter_s(k), y50, 'o', 'MarkerSize',6, 'LineWidth',1.2, 'Color','r');
        plot(t50_exit_s(k), y50, 'x', 'MarkerSize',7, 'LineWidth',1.2, 'Color','r');
    end
    legend('Waveform','Baseline','50% enter','50% exit','Location','best');
end

% ----- SAVE PROCESSED RESULTS -----
if ~exist(outDirRoot,'dir'), mkdir(outDirRoot); end
Condition = struct();
Condition.load = string(LoadType);
Condition.vhv_V = Vset;
Condition.freq_Hz = f0;
Condition.label = sprintf('%s | %g V | %.3f kHz', LoadType, Vset, f0/1e3);
Condition.source = string(fname);

Results = struct();
Results.index = (1:nPulses).';
Results.highLevel_V = HighLevel(:);
Results.riseTime_ns = 1e9 * RiseTime_s(:);
Results.fallTime_ns = 1e9 * FallTime_s(:);

```

```

Results.width50_ns    = 1e9 * PW50_s(:);
Results.widthErr_ns  = w_err_ns(:);
Results.cumWidthErr_ns = cum_err_ns(:);
Results.t50_enter_s  = t50_enter_s(:);
Results.t50_exit_s   = t50_exit_s(:);
Results.t10_rise_s   = t10_rise_s(:);
Results.t90_rise_s   = t90_rise_s(:);
Results.t90_fall_s   = t90_fall_s(:);
Results.t10_fall_s   = t10_fall_s(:);
Results.localLow_V   = LocalLow(:);
Results.localHigh_V  = LocalHigh(:);
Results.qualityOK    = QualityOK(:);

stamp = datestr(now,'yyyymmdd_HHMMSS');
base = sprintf('%s_%dV_%dkHz_%s', LoadType, round(Vset), round(f0/1e3), stamp);
savePath = fullfile(outDirRoot, base + ".mat");
save(savePath, 'Results', 'Condition', '-v7');
fprintf('Saved: %s\n', savePath);

end

%% ===== LOCAL HELPERS =====
function [starts, stops] = segment_edges(mask, t_s, fname)
    minWidth = 120;
    minGap = 10;
    refractory = 8;
    try
        tok = regexp(fname, 'FREQ(\d+)', 'tokens', 'once');
        if ~isempty(tok)
            f0 = str2double(tok{1});
            T0 = 1/f0; idealHigh = 0.5*T0;
            dt = median(diff(t_s));
            if isfinite(dt) && dt>0
                minWidth = max(minWidth, round(0.06*idealHigh/dt));
                minGap = max(minGap, round(0.04*idealHigh/dt));
                refractory = max(refractory, round(0.03*idealHigh/dt));
            end
        end
    catch, end

    d = diff([false; mask(:); false]);
    s = find(d==1); e = find(d==-1) - 1;
    keep = (e - s + 1) >= minWidth;
    s = s(keep); e = e(keep);
    if isempty(s), starts = s; stops = e; return; end

```

```

S = s(1); E = e(1); ss = []; ee = [];
for k = 2:numel(s)
    if s(k) - E - 1 < minGap
        E = e(k);
    else
        ss(end+1,1) = S; ee(end+1,1) = E;
        S = s(k); E = e(k);
    end
end
ss(end+1,1) = S; ee(end+1,1) = E;
ee = ee + refractory;

S2 = ss(1); E2 = ee(1); starts = []; stops = [];
for k = 2:numel(ss)
    if ss(k) <= E2 + 1
        E2 = max(E2, ee(k));
    else
        starts(end+1,1) = S2; stops(end+1,1) = E2; %#ok<AGROW>
        S2 = ss(k); E2 = ee(k);
    end
end
starts(end+1,1) = S2; stops(end+1,1) = E2;
end

function [v_low_loc, v_high_loc] = local_levels(v, i1, i2)
    N = numel(v);
    segLen = max(1, i2 - i1 + 1);
    edgeTrim = max(3, min(50, round(0.10*segLen)));
    j1 = min(i2, i1 + edgeTrim);
    j2 = max(i1, i2 - edgeTrim);
    if j1 > j2, j1 = i1; j2 = i2; end
    v_high_loc = median(v(j1:j2));

    guard = max(5, round(0.05*segLen));
    preL = max(1, i1 - 5*guard); preR = max(1, i1 - guard);
    postL = min(N, i2 + guard); postR = min(N, i2 + 5*guard);
    idx = [preL:preR, postL:postR];
    idx = idx(idx>=1 & idx<=N);
    if isempty(idx), v_low_loc = prctile(v,5);
    else, v_low_loc = median(v(idx)); end
end

function tc = find_cross_rise(t_s, v, i_edge, target, dirSign, winFwd)
    if nargin<6, winFwd = 96; end
    N = numel(v);
    a = max(1, i_edge - round(0.15*winFwd));

```

```

b = min(N, i_edge + winFwd);
seg = v(a:b);
seg_f = med3(seg);
dv = diff(seg_f);
if dirSign > 0, [~, idxs] = sort(dv, 'descend');
else,      [~, idxs] = sort(dv, 'ascend'); end
tc = NaN;
for pick = 1:min(5, numel(idxs))
    kSeed = idxs(pick);
    idxSeed = a + kSeed - 1;
    segL = v(max(1, idxSeed-winFwd):idxSeed);
    segR = v(idxSeed:min(N, idxSeed+winFwd));
    if dirSign > 0, segL_env = cummax(segL); segR_env = cummax(segR);
    else,      segL_env = cummin(segL); segR_env = cummin(segR); end
    if dirSign > 0
        iL = find(segL_env <= target, 1, 'last');
        iR = find(segR_env >= target, 1, 'first');
    else
        iL = find(segL_env >= target, 1, 'last');
        iR = find(segR_env <= target, 1, 'first');
    end
    end
    if isempty(iL) || isempty(iR), continue, end
    iL = max(1, idxSeed-winFwd) + iL - 1;
    iR = idxSeed + iR - 1;
    iL = max(1, min(iL, N-1));
    iR = max(iL+1, min(iR, N));
    tc = interp_time(t_s, v, iL, iR, target);
    if isfinite(tc), break, end
end
if ~isfinite(tc)
    iL = max(1, idxSeed-1); iR = min(N, idxSeed+1);
    if dirSign > 0 && v(iL) > v(iR), [iL, iR] = deal(iR, iL); end
    if dirSign < 0 && v(iL) < v(iR), [iL, iR] = deal(iR, iL); end
    tc = interp_time(t_s, v, iL, iR, target);
end
end
end

function tc = find_cross_fall(t_s, v, i_edge, target, dirSign, winBack)
    if nargin < 6, winBack = 96; end
    N = numel(v);
    a = max(1, i_edge - winBack);
    b = min(N, i_edge + round(0.15*winBack));
    seg = v(a:b); seg_f = med3(seg); dv = diff(seg_f);
    if dirSign > 0, [~, kSeed] = min(dv);
    else,      [~, kSeed] = max(dv); end
    idxSeed = a + kSeed - 1;

```

```

iL = find(v(max(1,idxSeed-winBack):idxSeed) >= target, 1, 'last');
iR = find(v(idxSeed:min(N,idxSeed+winBack)) <= target, 1, 'first');
if isempty(iL), iL = 1; else, iL = max(1,idxSeed-winBack) + iL - 1; end
if isempty(iR), iR = 2; else, iR = idxSeed + iR - 1; end
iL = max(1, min(iL, N-1)); iR = max(iL+1, min(iR, N));
tc = interp_time(t_s, v, iL, iR, target);
end

```

```

function [t_in, t_out] = dedupe_crossings(t_in, t_out)
if ~isnan(t_in) && ~isnan(t_out)
    if abs(t_out - t_in) <= eps(max(t_in,t_out))*10
        t_out = t_out + eps(t_out)*100;
    end
end
end

```

```

function y = med3(x)
y = x; n = numel(x);
if n >= 3, y(2:n-1) = median([x(1:n-2), x(2:n-1), x(3:n)], 2); end
end

```

```

function tc = interp_time(t_s, v, a, b, target)
a = max(1, min(a, numel(v)-1));
b = max(a+1, min(b, numel(v)));
dv = v(b) - v(a);
if dv == 0, tc = t_s(a);
else, tc = t_s(a) + (target - v(a))/dv * (t_s(b) - t_s(a));
end
end

```

2 priedas. Bipoliariųjų impulsų generatorių parametrų išgavimo algoritmas

```
clear; clc

%% ===== BATCH LOOP =====
root    = 'C:\Users\jokub\Desktop\studijos\Magistrinis\zipped\zipped\RAW_DATA\SE-TX02-03';
outdirRoot = "proc_results";
doPlots  = true;

D = dir(fullfile(root, '**', 'FREQ*_CH1.txt'));    % <Load>/<Vset>/FREQ*_CH1.txt
allFiles = fullfile({D.folder}, {D.name});
fprintf('Found %d files.\n', numel(allFiles));

ok=0; fail=0; t0=tic;
for ii = 1:numel(allFiles)
    try
        analyze_one_file_bipolar(allFiles{ii}, outDirRoot, doPlots);
        ok = ok + 1;
    catch ME
        fail = fail + 1;
        warning('FAILED: %s\n -> %s', allFiles{ii}, ME.message);
    end
    if doPlots, close all; end
end
fprintf('Done. OK=%d, Fail=%d, Elapsed=%0.1fs\n', ok, fail, toc(t0));

%%
=====
%%          PER-FILE          ANALYZER          (BIPOLAR)
=====
function analyze_one_file_bipolar(fname, outDirRoot, doPlots)

TT = load_data(fname);
v  = TT.Voltage_V(:);
t  = TT.Time;
t_s = seconds(t);
N  = numel(v);

%% ----- GLOBAL STATS -----
v_med = median(v);
v_p05 = prctile(v,5);
v_p95 = prctile(v,95);
v_span = v_p95 - v_p05;
```

```

noise_sigma = 1.4826*mad(v - v_med, 1);
A_min_abs = 6*noise_sigma;
A_min_rel = 0.04*v_span;
A_min = max(A_min_abs, A_min_rel);

%% ----- 3-STATE + DEBOUNCED SEGMENTATION -----
pos_span = max(eps, v_p95 - v_med);
neg_span = max(eps, v_med - v_p05);
pos_enter = v_med + 0.50*pos_span; pos_exit = v_med + 0.48*pos_span;
neg_enter = v_med - 0.50*neg_span; neg_exit = v_med - 0.48*neg_span;

state=0; is_pos=false(N,1); is_neg=false(N,1);
for i=1:N
    vi=v(i);
    if state==0
        if vi>=pos_enter, state=+1; elseif vi<=neg_enter, state=-1; end
        elseif state==+1
            if vi<=pos_exit, state=0; end
        else
            if vi>=neg_exit, state=0; end
        end
        is_pos(i)=(state==+1); is_neg(i)=(state==-1);
    end
[p_starts,p_stops]=segment_edges(is_pos,t_s,fname);
[n_starts,n_stops]=segment_edges(is_neg,t_s,fname);

%% ----- METADATA -----
tok = regexp(fname,'FREQ(\d+)', 'tokens', 'once');
if isempty(tok), error('Could not find "FREQxxxxx" in file path: %s', fname); end
f0 = str2double(tok{1}); T0=1/f0;
idealHalf_s = 0.5*T0;

[pth,~,~]=fileparts(fname);
[pth2,Vfolder]=fileparts(pth);
[~,LoadType]=fileparts(pth2);
Vset=str2double(Vfolder);

%% ----- PER-SEGMENT PLATEAUS -----
trim_edges = @(len) max(3, min(50, round(0.10*len)));

nP = numel(p_starts);
PosPlateau = nan(nP,1); Pos_tstart = nan(nP,1); Pos_tend = nan(nP,1);
for k=1:nP
    i1=p_starts(k); i2=p_stops(k); len=i2-i1+1; eg=trim_edges(len);
    j1=min(i2,i1+eg); j2=max(i1,i2-eg); if j1>j2, j1=i1; j2=i2; end
    PosPlateau(k) = median(v(j1:j2));
end

```

```

    Pos_tstart(k) = t_s(i1); Pos_tend(k)=t_s(i2);
end

nN = numel(n_starts);
NegPlateau = nan(nN,1); Neg_tstart = nan(nN,1); Neg_tend = nan(nN,1);
for k=1:nN
    i1=n_starts(k); i2=n_stops(k); len=i2-i1+1; eg=trim_edges(len);
    j1=min(i2,i1+eg); j2=max(i1,i2-eg); if j1>j2, j1=i1; j2=i2; end
    NegPlateau(k) = median(v(j1:j2));
    Neg_tstart(k) = t_s(i1); Neg_tend(k)=t_s(i2);
end

%% ----- ORDERED SEGMENT LIST -----
Seg = struct('pol',{},'i1',{},'i2',{},'t1',{},'t2',{},'plateau',{});
for k=1:nP
    Seg(end+1)=struct('pol',+1,'i1',p_starts(k),'i2',p_stops(k), ...
        't1',t_s(p_starts(k)), 't2',t_s(p_stops(k)), ...
        'plateau',PosPlateau(k)); %#ok<AGROW>
end
for k=1:nN
    Seg(end+1)=struct('pol',-1,'i1',n_starts(k),'i2',n_stops(k), ...
        't1',t_s(n_starts(k)), 't2',t_s(n_stops(k)), ...
        'plateau',NegPlateau(k)); %#ok<AGROW>
end
if isempty(Seg), warning('No segments detected.');
```

```

return; end
[~,ord]=sort([Seg.t1]); Seg=Seg(ord);

keep = true(1,numel(Seg));
for k=2:numel(Seg)
    if Seg(k).pol==Seg(k-1).pol
        len_prev = Seg(k-1).i2 - Seg(k-1).i1;
        len_curr = Seg(k).i2 - Seg(k).i1;
        if len_curr>=len_prev, keep(k-1)=false; else, keep(k)=false; end
    end
end
Seg = Seg(keep);
if numel(Seg)<2, warning('Not enough alternating segments for transitions.');
```

```

end

%% ----- TRANSITIONS -----
M = max(0, numel(Seg)-1);
Trans = struct('pol_from',[],'pol_to',[],'t10_s',[],'t50_s',[],'t90_s',[], ...
    'RiseFall_s',[],'span_V',[],'V_from',[],'V_to',[],'QualityOK',[]);
Trans = repmat(Trans, M, 1);

row=0;
for k=1:(numel(Seg)-1)

```

```

if Seg(k).pol==Seg(k+1).pol, continue; end
row=row+1; A=Seg(k); B=Seg(k+1);
V_from=A.plateau; V_to=B.plateau; spanV = V_to - V_from; amp=abs(spanV);

Trans(row).pol_from = A.pol; Trans(row).pol_to = B.pol;
Trans(row).span_V = spanV; Trans(row).V_from = V_from; Trans(row).V_to = V_to;

if amp < A_min
    Trans(row).t10_s = NaN; Trans(row).t50_s = NaN; Trans(row).t90_s = NaN;
    Trans(row).RiseFall_s = NaN; Trans(row).QualityOK = false;
    continue
end

y10 = V_from + 0.10*spanV;
y50 = V_from + 0.50*spanV;
y90 = V_from + 0.90*spanV;
dir = sign(spanV); if dir==0, dir=+1; end

seg_len = (A.i2 - A.i1 + 1) + (B.i2 - B.i1 + 1);
W = max(48, round(0.3*seg_len));
iL = max(1, A.i2 - round(W/2));
iR = min(N, B.i1 + round(W/2));

t10 = cross_between(t_s, v, iL, iR, y10, dir);
t50 = cross_between(t_s, v, iL, iR, y50, dir);
t90 = cross_between(t_s, v, iL, iR, y90, dir);

ok = all(isfinite([t10,t50,t90])) && t10<=t50 && t50<=t90 && t50>=t_s(1) && t50<=t_s(end);
Trans(row).t10_s = t10; Trans(row).t50_s = t50; Trans(row).t90_s = t90;
Trans(row).RiseFall_s = abs(t90 - t10);
Trans(row).QualityOK = ok;
end
Trans = Trans(1:row);

%% ----- HALF-WIDTHS (mid->mid) -----
okMask = [Trans.QualityOK];
mid_all = [Trans.t50_s]; mid_all = mid_all(okMask);
dir_all = [Trans.span_V]; dir_all = sign(dir_all(okMask)); % +1 rise (neg->pos), -1 fall

seq = []; idx = 1;
while idx <= numel(dir_all)
    if dir_all(idx)==+1
        j = find(dir_all(idx+1:end)==-1,1,'first');
        if isempty(j), break; end
        j = idx + j;
        seq = [seq; idx, j]; %#ok<AGROW>
    end
end

```

```

        idx = j + 1;
    else
        idx = idx + 1;
    end
end
nPairs = size(seq,1);
PosHalf_w_s = nan(nPairs,1);
for k=1:nPairs
    iR = seq(k,1); iF = seq(k,2);
    PosHalf_w_s(k) = mid_all(iF) - mid_all(iR);
end

seqN = [];
for k=1:(nPairs-1)
    seqN = [seqN; seq(k,2), seq(k+1,1)]; %#ok<AGROW>
end
nNeg = size(seqN,1);
NegHalf_w_s = nan(nNeg,1);
for k=1:nNeg
    iF = seqN(k,1); iR = seqN(k,2);
    NegHalf_w_s(k) = mid_all(iR) - mid_all(iF);
end

ideal_ns = 1e9*idealHalf_s;
p_err_ns = 1e9*(PosHalf_w_s - idealHalf_s);
p_cum_err_ns = cumsum(p_err_ns);
n_err_ns = 1e9*(NegHalf_w_s - idealHalf_s);
n_cum_err_ns = cumsum(n_err_ns);

%% ----- OPTIONAL PLOTS -----
if doPlots
    figure; plot(t_s, v, 'LineWidth',1.2); grid on; hold on
    xlabel('Time (s)'); ylabel('Voltage (V)');
    title('Bipolar — transition 50% (mid) markers'); yline(0,':','Zero');
    for r=1:numel(Trans)
        if ~Trans(r).QualityOK, continue; end
        c = [0 0.6 0]; mk='o';
        if Trans(r).pol_from==+1 && Trans(r).pol_to==-1, c=[0.8 0 0]; mk='x'; end
        plot(Trans(r).t50_s, V_at_time(t_s,v,Trans(r).t50_s), mk, 'MarkerSize',6, 'LineWidth',1.2,
'Color', c);
    end
    legend('Waveform','Zero','Location','best');

    if ~isempty(PosHalf_w_s)
        figure; plot(1:nPairs, p_err_ns, 'o-', 'LineWidth',1.3, 'MarkerSize',5);
        grid on; yline(0,'--'); xlabel('Positive half index'); ylabel('Width error (ns)');
    end
end

```

```

title(sprintf('Positive half-width error — %.3f kHz, %s, %.0f V', f0/1e3, LoadType, Vset));

figure; plot(1:nPairs, p_cum_err_ns, 's-', 'LineWidth', 1.3, 'MarkerSize', 5);
grid on; yline(0, '--'); xlabel('Positive half index'); ylabel('Cumulative width error (ns)');
title(sprintf('Positive cumulative width error — %.3f kHz, %s, %.0f V', f0/1e3, LoadType,
Vset));
end

if ~isempty(NegHalf_w_s)
figure; plot(1:nNeg, n_err_ns, 'o-', 'LineWidth', 1.3, 'MarkerSize', 5);
grid on; yline(0, '--'); xlabel('Negative half index'); ylabel('Width error (ns)');
title(sprintf('Negative half-width error — %.3f kHz, %s, %.0f V', f0/1e3, LoadType, Vset));

figure; plot(1:nNeg, n_cum_err_ns, 's-', 'LineWidth', 1.3, 'MarkerSize', 5);
grid on; yline(0, '--'); xlabel('Negative half index'); ylabel('Cumulative width error (ns)');
title(sprintf('Negative cumulative width error — %.3f kHz, %s, %.0f V', f0/1e3, LoadType,
Vset));
end
end

%% ----- SAVE PROCESSED RESULTS (schema aligned with plotting scripts) -----
if ~exist(outDirRoot, 'dir'), mkdir(outDirRoot); end

Condition = struct();
Condition.load = string(LoadType);
Condition.vhv_V = Vset;
Condition.freq_Hz = f0;
Condition.label = sprintf('%s | %g V | %.3f kHz', LoadType, Vset, f0/1e3);
Condition.source = string(fname);

Results = struct();

% helper to force column vector safely
col = @(x) reshape(x, [], 1);

% Build numeric indices of valid transitions
idxOK = find(arrayfun(@(x) isfield(x, 'QualityOK') && x.QualityOK, Trans));
idxRise = []; idxFall = [];
for ii = idxOK(:)
if Trans(ii).pol_from == -1 && Trans(ii).pol_to == +1
idxRise(end+1) = ii; %#ok<AGROW>
elseif Trans(ii).pol_from == +1 && Trans(ii).pol_to == -1
idxFall(end+1) = ii; %#ok<AGROW>
end
end
end
idxRise = col(idxRise); idxFall = col(idxFall);

```

```

% Rise transitions (empty-safe)
Results.rise.index    = idxRise;
if isempty(idxRise)
    Results.rise.riseTime_ns = zeros(0,1);
    Results.rise.t10_s      = zeros(0,1);
    Results.rise.t50_s      = zeros(0,1);
    Results.rise.t90_s      = zeros(0,1);
else
    Results.rise.riseTime_ns = 1e9 * col([Trans(idxRise).RiseFall_s]);
    Results.rise.t10_s      = col([Trans(idxRise).t10_s]);
    Results.rise.t50_s      = col([Trans(idxRise).t50_s]);
    Results.rise.t90_s      = col([Trans(idxRise).t90_s]);
end

% Fall transitions (empty-safe)
Results.fall.index    = idxFall;
if isempty(idxFall)
    Results.fall.fallTime_ns = zeros(0,1);
    Results.fall.t10_s      = zeros(0,1);
    Results.fall.t50_s      = zeros(0,1);
    Results.fall.t90_s      = zeros(0,1);
else
    Results.fall.fallTime_ns = 1e9 * col([Trans(idxFall).RiseFall_s]);
    Results.fall.t10_s      = col([Trans(idxFall).t10_s]);
    Results.fall.t50_s      = col([Trans(idxFall).t50_s]);
    Results.fall.t90_s      = col([Trans(idxFall).t90_s]);
end

% Segment plateaus
Results.posSegments.index    = (1:numel(PosPlateau)).';
Results.posSegments.highLevel_V = col(PosPlateau);
Results.negSegments.index    = (1:numel(NegPlateau)).';
Results.negSegments.lowLevel_V = col(NegPlateau);

% Half-widths & errors
Results.posHalf.index    = (1:numel(PosHalf_w_s)).';
Results.posHalf.width_ns = 1e9 * col(PosHalf_w_s);
Results.posHalf.err_ns   = col(p_err_ns);
Results.posHalf.cumErr_ns = col(p_cum_err_ns);

Results.negHalf.index    = (1:numel(NegHalf_w_s)).';
Results.negHalf.width_ns = 1e9 * col(NegHalf_w_s);
Results.negHalf.err_ns   = col(n_err_ns);
Results.negHalf.cumErr_ns = col(n_cum_err_ns);

```

```

% --- Rise/Fall edges (10-90 / 90-10) ---
% Rising edge (neg->pos)
if isfield(Results,'rise') && isfield(Results.rise,'index') && isfield(Results.rise,'riseTime_ns')
    Results.index    = Results.rise.index(:);    % flat alias used by plots
    Results.riseTime_ns = Results.rise.riseTime_ns(:); % flat alias used by plots
else
    % keep as empty column to avoid size errors in plot loops
    Results.index    = zeros(0,1);
    Results.riseTime_ns = zeros(0,1);
end

% Falling edge (pos->neg)
if isfield(Results,'fall') && isfield(Results.fall,'index') && isfield(Results.fall,'fallTime_ns')
    Results.index_fall = Results.fall.index(:);    % some plots use separate fall index
    Results.fallTime_ns = Results.fall.fallTime_ns(:); % flat alias used by plots
else
    Results.index_fall = zeros(0,1);
    Results.fallTime_ns = zeros(0,1);
end

% --- Pulse/half width error & cumulative ---
if isfield(Results,'posHalf')
    if isfield(Results.posHalf,'err_ns')
        Results.widthErr_ns = Results.posHalf.err_ns(:);
    else
        Results.widthErr_ns = zeros(0,1);
    end
    if isfield(Results.posHalf,'cumErr_ns')
        Results.cumWidthErr_ns = Results.posHalf.cumErr_ns(:);
    else
        Results.cumWidthErr_ns = zeros(0,1);
    end
    if isfield(Results.posHalf,'width_ns')
        % Some plots show width @ 50%. For bipolar, we expose the positive half width.
        % (If you ever want full-pulse width, use 2*posHalf.width_ns instead.)
        Results.width50_ns = Results.posHalf.width_ns(:);
    else
        Results.width50_ns = zeros(0,1);
    end
else
    Results.widthErr_ns = zeros(0,1);
    Results.cumWidthErr_ns = zeros(0,1);
    Results.width50_ns = zeros(0,1);
end

% If you ever want the negative-half error plottable as well, these are handy:

```

```

if isfield(Results,'negHalf')
    if ~isfield(Results,'widthErr_ns_neg') && isfield(Results.negHalf,'err_ns')
        Results.widthErr_ns_neg = Results.negHalf.err_ns(:);
    end
    if ~isfield(Results,'cumWidthErr_ns_neg') && isfield(Results.negHalf,'cumErr_ns')
        Results.cumWidthErr_ns_neg = Results.negHalf.cumErr_ns(:);
    end
end

% --- High/Low plateaus (so the "high level per index" plot works) ---
if isfield(Results,'posSegments') && isfield(Results.posSegments,'highLevel_V')
    % Most of your scripts read R.highLevel_V straight
    Results.highLevel_V = Results.posSegments.highLevel_V(:);
else
    Results.highLevel_V = zeros(0,1);
end
if isfield(Results,'negSegments') && isfield(Results.negSegments,'lowLevel_V')
    Results.lowLevel_V = Results.negSegments.lowLevel_V(:);
else
    Results.lowLevel_V = zeros(0,1);
end

% Ensure an index that matches widthErr_ns for width plots:
if ~isempty(Results.widthErr_ns)
    Results.index_width = (1:numel(Results.widthErr_ns)).';
end

% =====

stamp = datestr(now,'yyyymmdd_HHMMSS');
base = sprintf('%s %dV %dkHz_BIPOLAR_%s', LoadType, round(Vset), round(f0/1e3), stamp);
savePath = fullfile(outDirRoot, base + ".mat");
save(savePath, 'Results', 'Condition', '-v7');
fprintf('Saved bipolar results: %s\n', savePath);

end

%% ===== HELPERS
=====
function [starts, stops] = segment_edges(mask, t_s, fname)
    minWidth=120; minGap=10; refractory=8;
    try
        tok = regexp(fname,'FREQ(\d+)','tokens','once');
        if ~isempty(tok)

```

```

    f0=str2double(tok{1}); H=0.5*(1/f0);
    dt = median(diff(t_s));
    if isfinite(dt)&&dt>0
        minWidth = max(minWidth, round(0.06*H/dt));
        minGap = max(minGap, round(0.04*H/dt));
        refractory = max(refractory, round(0.03*H/dt));
    end
end
catch, end
d = diff([false; mask(:); false]);
s = find(d==1); e = find(d==-1)-1;
keep = (e - s + 1) >= minWidth; s=s(keep); e=e(keep);
if isempty(s), starts=s; stops=e; return; end
S=s(1); E=e(1); ss=[]; ee=[];
for k=2:numel(s)
    if s(k)-E-1 < minGap, E=e(k);
    else, ss(end+1,1)=S; ee(end+1,1)=E; S=s(k); E=e(k); end %#ok<AGROW>
end
ss(end+1,1)=S; ee(end+1,1)=E;
ee = ee + refractory;
S2=ss(1); E2=ee(1); starts=[]; stops=[];
for k=2:numel(ss)
    if ss(k) <= E2 + 1, E2=max(E2,ee(k));
    else, starts(end+1,1)=S2; stops(end+1,1)=E2; S2=ss(k); E2=ee(k); end %#ok<AGROW>
end
starts(end+1,1)=S2; stops(end+1,1)=E2;
end

function t = cross_between(t_s, v, iL, iR, y, dir)
    iL = max(1,iL); iR = min(numel(v), iR);
    if iR <= iL, t = NaN; return; end
    vv = v(iL:iR);
    vv_f = med3(vv);
    s = sign(vv_f - y); s(s==0)=1;
    ds = diff(s);
    if dir>0, ix=find(ds>1,1,'first'); else, ix=find(ds<-1,1,'first'); end
    if isempty(ix), t=NaN; return; end
    a=iL+ix-1; b=a+1;
    t = interp_time(t_s, v, a, b, y);
end

function y = med3(x)
    y=x; n=numel(x);
    if n>=3, y(2:n-1) = median([x(1:n-2), x(2:n-1), x(3:n)], 2); end
end

```

```
function tc = interp_time(t_s, v, a, b, target)
    a=max(1,min(a,numel(v)-1)); b=max(a+1,min(b,numel(v)));
    dv=v(b)-v(a);
    if dv==0, tc=t_s(a);
    else, tc=t_s(a) + (target - v(a))/dv * (t_s(b) - t_s(a));
    end
end
```

```
function val = V_at_time(t_s,v,tq)
    [~,ix]=min(abs(t_s - tq)); val=v(ix);
end
```

3 priedas. ADCH apskaičiavimo algoritmas

```
from pathlib import Path
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def moving_average(v, window):
    if window is None or window <= 1:
        return v

    kernel = np.ones(window) / window
    return np.convolve(v, kernel, mode="same")

def find_adch_files(root, pulser, load, voltage):
    folder = Path(root) / pulser / load / str(voltage)

    if not folder.exists():
        print(f'Folder not found, skipping: {folder}')
        return []

    pairs = []

    for ch1_file in folder.glob("FREQ*_CH1.txt"):

        freq = ch1_file.stem.split("_")[0].replace("FREQ", "")
        ch2_file = folder / f"FREQ{freq}_CH2.txt"

        if not ch2_file.exists():
            print(f'Skipping {freq} Hz, missing CH2')
            continue

        pairs.append({
            "freq": int(freq),
            "output_path": ch1_file, # CH1 = output
            "input_path": ch2_file # CH2 = input
        })

    return sorted(pairs, key=lambda x: x["freq"])

def corr_amp(t, v, f):
    v = v - np.mean(v)

    sin_ref = np.sin(2 * np.pi * f * t)
```

```
cos_ref = np.cos(2 * np.pi * f * t)
```

```
i = 2 / len(v) * np.sum(v * cos_ref)
```

```
q = 2 / len(v) * np.sum(v * sin_ref)
```

```
return np.sqrt(i**2 + q**2)
```

```
def calculate_adch_response(root, pulser, load, voltage):
```

```
    pairs = find_adch_files(root, pulser, load, voltage)
```

```
    freqs = []
```

```
    adch_db_values = []
```

```
    for pair in pairs:
```

```
        f = pair["freq"]
```

```
        data_out = np.loadtxt(pair["output_path"]) # CH1 = output
```

```
        data_in = np.loadtxt(pair["input_path"]) # CH2 = input
```

```
        t_out = data_out[:, 0]
```

```
        v_out = data_out[:, 1]
```

```
        t_in = data_in[:, 0]
```

```
        v_in = data_in[:, 1]
```

```
        if USE_FILTER_IN:
```

```
            v_in = moving_average(v_in, FILTER_WINDOW)
```

```
        if USE_FILTER_OUT:
```

```
            v_out = moving_average(v_out, FILTER_WINDOW)
```

```
        amp_out = corr_amp(t_out, v_out, f)
```

```
        amp_in = corr_amp(t_in, v_in, f)
```

```
        if amp_in == 0:
```

```
            print(f'Skipping {load}, {voltage}V, {f} Hz: input amplitude is zero')
```

```
            continue
```

```
        adch = amp_out / amp_in
```

```
        adch_db = 20 * np.log10(adch)
```

```
        freqs.append(f)
```

```
        adch_db_values.append(adch_db)
```

```

freqs = np.array(freqs)
adch_db_values = np.array(adch_db_values)

if NORMALIZE_TO_FIRST_POINT and len(adch_db_values) > 0:
    adch_db_values = adch_db_values - adch_db_values[0]

return freqs, adch_db_values

# ===== USER SETTINGS =====

root = "ADCH"
pulser = "SE-TX01-02M"

# Choose plot mode:
# "loads" -> plot all selected loads at one voltage
# "voltages" -> plot all selected voltages at one load
PLOT_MODE = "loads"

loads = ["Open", "50Ohm", "470pF", "1nF"]
voltages = ["25", "50", "75", "100", "150", "200"]

LOAD_TARGET = "Open"
VOLTAGE_TARGET = "200"

USE_FILTER_IN = False
USE_FILTER_OUT = False
FILTER_WINDOW = 101

NORMALIZE_TO_FIRST_POINT = True

# =====

plt.figure()

if PLOT_MODE == "loads":

    for load in loads:

        freqs, adch_db_values = calculate_adch_response(
            root=root,
            pulser=pulser,
            load=load,
            voltage=VOLTAGE_TARGET
        )

```

```

    if len(freqs) == 0:
        continue

    freqs_mhz = freqs / 1e6
    label = load

    plt.plot(freqs_mhz, adch_db_values, linewidth=2, label=label)

    plot_title = f"{pulser}, {VOLTAGE_TARGET} V"

elif PLOT_MODE == "voltages":

    for voltage in voltages:

        freqs, adch_db_values = calculate_adch_response(
            root=root,
            pulser=pulser,
            load=LOAD_TARGET,
            voltage=voltage
        )

        if len(freqs) == 0:
            continue

        freqs_mhz = freqs / 1e6
        label = voltage + "V"

        plt.plot(freqs_mhz, adch_db_values, linewidth=2, label=label)

        plot_title = f"{pulser}, {LOAD_TARGET}"

else:
    raise ValueError("PLOT_MODE must be either 'loads' or 'voltages'")

plt.xlabel("Frequency (MHz)")
plt.ylabel("Normalized ADCH (dB)" if NORMALIZE_TO_FIRST_POINT else "ADCH (dB)")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

```

4 priedas. Vėlinimo apskaičiavimo algoritmas

```
from pathlib import Path
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def moving_average(v, window):
    if window is None or window <= 1:
        return v

    kernel = np.ones(window) / window
    return np.convolve(v, kernel, mode="same")

def find_delay_pair(root, pulser, load, voltage, freq):
    folder = Path(root) / pulser / load / str(voltage)

    ch1 = folder / f"FREQ{freq}_CH1.txt" # output
    ch2 = folder / f"FREQ{freq}_CH2.txt" # input

    if not ch1.exists():
        raise FileNotFoundError(f"Missing CH1 file: {ch1}")

    if not ch2.exists():
        raise FileNotFoundError(f"Missing CH2 file: {ch2}")

    return ch1, ch2

def crossing_time(t, v, i, thr):
    t0, t1 = t[i], t[i + 1]
    v0, v1 = v[i], v[i + 1]

    if v1 == v0:
        return t0

    return t0 + (thr - v0) * (t1 - t0) / (v1 - v0)

def rising_edges_50(t, v):
    v = np.maximum(v, 0)

    v_low = np.percentile(v, 1)
```

```

v_high = np.percentile(v, 99)

thr_50 = v_low + 0.50 * (v_high - v_low)

above = v >= thr_50
d = np.diff(above.astype(int))

rise_idx = np.where(d == 1)[0]

rise_t = []

for i in rise_idx:
    rise_t.append(crossing_time(t, v, i, thr_50))

return np.array(rise_t)

# ===== USER SETTINGS =====

root = "ADCH"
pulser = "SE-TX01-02M"

#loads = ["Open", "50Ohm", "470pF", "1nF"]
loads = ["50Ohm"]
#voltages = ["50"]
voltages = ["50", "75", "100", "150", "200"]
freqs = ["5010000"]
#freqs = ["650000", "980000", "2510000", "5010000", "10010000"]

USE_FILTER_CH1 = False
USE_FILTER_CH2 = False
FILTER_WINDOW = 70

NORMALIZE_TO_FIRST = True

# choose label mode:
# "load"
# "voltage"
# "freq"
LABEL_MODE = "voltage"

# =====

plt.figure()

```

```

for load in loads:
    for voltage in voltages:
        for freq in freqs:

            try:

                ch1_file, ch2_file = find_delay_pair(
                    root=root,
                    pulser=pulser,
                    load=load,
                    voltage=voltage,
                    freq=freq
                )

            except FileNotFoundError as e:
                print(e)
                continue

            data_ch1 = np.loadtxt(ch1_file) # output
            data_ch2 = np.loadtxt(ch2_file) # input

            t_ch1 = data_ch1[:, 0]
            v_ch1 = data_ch1[:, 1]

            t_ch2 = data_ch2[:, 0]
            v_ch2 = data_ch2[:, 1]

            if USE_FILTER_CH1:
                v_ch1 = moving_average(v_ch1, FILTER_WINDOW)

            if USE_FILTER_CH2:
                v_ch2 = moving_average(v_ch2, FILTER_WINDOW)

            rise_ch1 = rising_edges_50(t_ch1, v_ch1)
            rise_ch2 = rising_edges_50(t_ch2, v_ch2)

            N = min(len(rise_ch1), len(rise_ch2))

            rise_ch1 = rise_ch1[:N]
            rise_ch2 = rise_ch2[:N]

            delay = rise_ch1 - rise_ch2
            delay_ns = delay * 1e9

            if NORMALIZE_TO_FIRST and len(delay_ns) > 0:
                delay_ns = delay_ns - delay_ns[0]

```

```

idx = np.arange(len(delay_ns))

# ===== LABEL =====

if LABEL_MODE == "load":
    label = load

elif LABEL_MODE == "voltage":
    label = voltage + "V"

elif LABEL_MODE == "freq":
    label = freq + "Hz"

else:
    label = f" {load} {voltage}V {freq}Hz"

# =====

plt.plot(idx, delay_ns, linewidth=2, label=label)

plt.xlabel("Pulse index")

if NORMALIZE_TO_FIRST:
    plt.ylabel("Normalized delay CH1 - CH2 (ns)")
else:
    plt.ylabel("Delay CH1 - CH2 (ns)")

plt.grid(True)
plt.legend()
plt.show()

```