



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Erik Mickevič

**DIDELIO EFEKTYVUMO DOHERTY GALIOS STIPRINTUVO
PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS
DESIGN AND INVESTIGATION OF HIGH EFFICIENCY DOHERTY
POWER AMPLIFIER**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050

Pažangiosios elektronikos projektavimo specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

VILNIUS 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Erik Mickevič

**DIDELIO EFEKTYVUMO DOHERTY GALIOS STIPRINTUVO
PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS
DESIGN AND INVESTIGATION OF HIGH EFFICIENCY DOHERTY
POWER AMPLIFIER**

Baigiamasis magistro darbas

Elektronikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX050

Pažangiosios elektronikos projektavimo specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas _____ prof. dr. Vaidotas Barzdėnas

(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

Konsultantas _____

(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

VILNIUS 2024

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
KOMPIUTERIJOS IR RYŠIŲ TECHNOLOGIJŲ KATEDRA

Studijų kryptis: Elektronikos inžinerija
Studijų programa: Elektronikos inžinerija , valstybinis kodas 6211EX050
Specializacija: Pažangiosios elektronikos projektavimas

TVIRTINU
Katedros vedėjas
Vaidotas Barzdėnas
2024-05-23

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Nr. PEPfm-22-1707

Vilnius

Studentas (-ė): Erik Mickevič

Baigiamojo darbo tema: Didelio efektyvumo Doherty galios stiprintuvo projektavimas ir tyrimas

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Baigiamojo darbo tikslas: pasirinktam dažnių ruožui ir išėjimo galiai sumodeliuoti, suprojektuoti ir eksperimentiškai ištirti kuo didesnio efektyvumo Doherty galios stiprintuvą.

Baigiamojo darbo užduotis:

Baigiamojo darbo užduotis:

1. Atlikti didelio efektyvumo galios stiprintuvų architektūrų analitinę apžvalgą;
2. Sumodeliuoti pagrindinius pasirinkto Doherty galios stiprintuvo parametrus, suprojektuoti ir pagaminti pasirinktą architektūrą;
3. Atlikti matavimus ir eksperimentinius tyrimus plačiame Doherty galios stiprintuvo veikimo diapazone.

Aiškinamojo rašto turinys:

Įvadas

Darbo aktualumas ir tikslas

Darbo uždaviniai

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Darbo naujumas ir praktinė nauda

1. Didelio efektyvumo galios stiprintuvų architektūrų analitinė apžvalga
2. Didelio efektyvumo Doherty galios stiprintuvo projektavimas ir kompiuterinis modeliavimas
3. Didelio efektyvumo Doherty galios stiprintuvo testavimas ir eksperimentiniai tyrimai

Išvados

Literatūra

Priedai

Vadovas profesorius Vaidotas Barzdėnas

<table border="1"> <tr> <td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td> </tr> <tr> <td>Elektronikos fakultetas</td> </tr> <tr> <td>Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra</td> </tr> </table>		Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Elektronikos fakultetas	Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Egz. sk.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Data-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data-.....-.....	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas												
Elektronikos fakultetas												
Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedra												
ISBN	ISSN											
Egz. sk.												
Data-.....-.....												
<table border="1"> <tr> <td colspan="2">Antrosios pakopos studijų Elektronikos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas</td> </tr> <tr> <td>Pavadinimas</td> <td>Didelio efektyvumo Doherty galios stiprintuvo projektavimas ir tyrimas</td> </tr> <tr> <td>Autorius</td> <td>Erik Mickevič</td> </tr> <tr> <td>Vadovas</td> <td>Vaidotas Barzdėnas</td> </tr> </table>				Antrosios pakopos studijų Elektronikos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas		Pavadinimas	Didelio efektyvumo Doherty galios stiprintuvo projektavimas ir tyrimas	Autorius	Erik Mickevič	Vadovas	Vaidotas Barzdėnas	
Antrosios pakopos studijų Elektronikos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas												
Pavadinimas	Didelio efektyvumo Doherty galios stiprintuvo projektavimas ir tyrimas											
Autorius	Erik Mickevič											
Vadovas	Vaidotas Barzdėnas											
		<table border="1"> <tr> <td>Kalba: lietuvių</td> </tr> </table>		Kalba: lietuvių								
Kalba: lietuvių												
<table border="1"> <tr> <td> Anotacija Baigiamojo magistro darbo tikslas - pasirinktam dažnių ruožui ir išėjimo galiai sumodeliuoti, suprojektuoti ir eksperimentiškai ištirti kuo didesnio efektyvumo Doherty galios stiprintuvą. Analitinėje dalyje apžvelgtos didelio efektyvumo galios stiprintuvų architektūros. Projektavimo dalyje Keysight ADS programiniu paketu sumodeliuotas ir suprojektuotas pagrindinis stiprintuvas, pagalbinis stiprintuvas ir Doherty galios stiprintuvas. Stiprintuvo efektyvumui padidinti stiprintuvų apkrova suderinama su harmonikomis ir naudojama mažų nuostolių dielektrinė medžiaga. Sumodeliuotam Doherty stiprintuvui suprojektuota spausdintinė plokštė. Pagaminta ir surinkta spausdintinė plokštė buvo eksperimentiškai ištirta. Esant 34,7 dBm išėjimo galiai pasiektas 63,8 % efektyvumas. 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 41,8 %. Nustatytos tolesnės Doherty stiprintuvo tobulinimo kryptys. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados. Darbo apimtis - 50 p. teksto be priedų, 38 iliustr., 6 lent. ir 19 bibliografinių šaltinių. Atskirai pridedami darbo priedai. </td> </tr> </table>				Anotacija Baigiamojo magistro darbo tikslas - pasirinktam dažnių ruožui ir išėjimo galiai sumodeliuoti, suprojektuoti ir eksperimentiškai ištirti kuo didesnio efektyvumo Doherty galios stiprintuvą. Analitinėje dalyje apžvelgtos didelio efektyvumo galios stiprintuvų architektūros. Projektavimo dalyje Keysight ADS programiniu paketu sumodeliuotas ir suprojektuotas pagrindinis stiprintuvas, pagalbinis stiprintuvas ir Doherty galios stiprintuvas. Stiprintuvo efektyvumui padidinti stiprintuvų apkrova suderinama su harmonikomis ir naudojama mažų nuostolių dielektrinė medžiaga. Sumodeliuotam Doherty stiprintuvui suprojektuota spausdintinė plokštė. Pagaminta ir surinkta spausdintinė plokštė buvo eksperimentiškai ištirta. Esant 34,7 dBm išėjimo galiai pasiektas 63,8 % efektyvumas. 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 41,8 %. Nustatytos tolesnės Doherty stiprintuvo tobulinimo kryptys. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados. Darbo apimtis - 50 p. teksto be priedų, 38 iliustr., 6 lent. ir 19 bibliografinių šaltinių. Atskirai pridedami darbo priedai.								
Anotacija Baigiamojo magistro darbo tikslas - pasirinktam dažnių ruožui ir išėjimo galiai sumodeliuoti, suprojektuoti ir eksperimentiškai ištirti kuo didesnio efektyvumo Doherty galios stiprintuvą. Analitinėje dalyje apžvelgtos didelio efektyvumo galios stiprintuvų architektūros. Projektavimo dalyje Keysight ADS programiniu paketu sumodeliuotas ir suprojektuotas pagrindinis stiprintuvas, pagalbinis stiprintuvas ir Doherty galios stiprintuvas. Stiprintuvo efektyvumui padidinti stiprintuvų apkrova suderinama su harmonikomis ir naudojama mažų nuostolių dielektrinė medžiaga. Sumodeliuotam Doherty stiprintuvui suprojektuota spausdintinė plokštė. Pagaminta ir surinkta spausdintinė plokštė buvo eksperimentiškai ištirta. Esant 34,7 dBm išėjimo galiai pasiektas 63,8 % efektyvumas. 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 41,8 %. Nustatytos tolesnės Doherty stiprintuvo tobulinimo kryptys. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados. Darbo apimtis - 50 p. teksto be priedų, 38 iliustr., 6 lent. ir 19 bibliografinių šaltinių. Atskirai pridedami darbo priedai.												
<table border="1"> <tr> <td> Prasminiai žodžiai: aukštadažniai grandynai, didelio efektyvumo galios stiprintuvas, Doherty galios stiprintuvas, impedanso suderinimas, mikrojuosteliniai komponentai. </td> </tr> </table>				Prasminiai žodžiai: aukštadažniai grandynai, didelio efektyvumo galios stiprintuvas, Doherty galios stiprintuvas, impedanso suderinimas, mikrojuosteliniai komponentai.								
Prasminiai žodžiai: aukštadažniai grandynai, didelio efektyvumo galios stiprintuvas, Doherty galios stiprintuvas, impedanso suderinimas, mikrojuosteliniai komponentai.												

Vilnius Gediminas Technical University		ISBN	ISSN
Faculty of Electronics		Copies No.	
Department of Computer Science and Communications Technologies		Date-.....-.....	

Master Degree Studies Electronics Engineering study programme Master Graduation Thesis	
Title	Design and Investigation of High Efficiency Doherty Power Amplifier
Author	Erik Mickevič
Academic supervisor	Vaidotas Barzdėnas

	Thesis language: Lithuanian
--	------------------------------------

Annotation
The aim of the master's thesis is to model, design and experimentally test a Doherty power amplifier with the highest possible efficiency for a selected frequency band and output power. The thesis provides a review of high efficiency power amplifier architectures. In the design part, a main amplifier, an auxiliary amplifier and a Doherty amplifier are modelled and designed using Keysight ADS software package. To increase the efficiency of the amplifier, the load of the amplifiers is matched to harmonics and a low loss dielectric material is used. A printed circuit board was designed for the modelled Doherty amplifier. The fabricated and assembled printed circuit board was experimentally tested. At an output power level of 34,7 dBm an efficiency of 63,8 % was achieved. At 5 dB below this power level, the efficiency is 41,8 %. Further directions for improvement of the Doherty amplifier were identified. Conclusions are made at the end of the thesis. Thesis consists of: 50 p. text without appendixes, 38 pictures, 6 tables, and 19 bibliographical entries. Appendixes are included separately.

Keywords: high frequency circuits, high efficiency power amplifier, Doherty power amplifier, impedance matching, microstrip components.
--

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Erik Mickevič, 20184806

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Elektronikos inžinerija, PEPfm-22

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2024 m. gegužės 29 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Didelio efektyvumo Doherty galios stiprintuvo projektavimas ir tyrimas“ yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas profesorius daktaras Vaidotas Barzdėnas.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).


(Parašas)

Erik Mickevič

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

Žymenys ir santrumpos	6
Paveikslų sąrašas	7
Lentelių sąrašas	9
Išvadas	10
Darbo aktualumas ir tikslas.....	10
Darbo uždaviniai	10
Naudoti tyrimo ir analizės metodai.....	11
Darbo naujumas ir praktinė nauda	11
Darbo struktūra	11
1 Didelio efektyvumo Galios stiprintuvų architektūrų analitinė apžvalga	12
1.1 Gaubtinės panaikinimo ir atstatymo architektūra	12
1.2 Gaubtinės sekimo architektūra.....	13
1.3 Skirtingų fazių architektūra.....	15
1.4 Doherty architektūra	17
1.5 Apžvalgos apibendrinimas.....	20
2 Doherty galios stiprintuvo Projektavimas	23
2.1 Pagrindinio stiprintuvo projektavimas ir dielektrinių medžiagų tyrimas	24
2.2 Pagalbinio stiprintuvo projektavimas ir skirtingų tranzistorių tyrimas.....	30
2.2.1 Pagalbinio stiprintuvo su CMPA0530002S tranzistoriumi projektavimas	30
2.2.2 Pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi projektavimas	32
2.3 Wilkinson galios daliklių projektavimas	34
2.4 Doherty stiprintuvo projektavimas	36
2.4.1 Doherty stiprintuvo su CMPA0530002S pagalbiniu stiprintuvu projektavimas	36
2.4.2 Doherty stiprintuvo su CGH40006S pagalbiniu stiprintuvu projektavimas.....	42
2.5 Rezultatų apibendrinimas.....	44
3 Doherty galios stiprintuvo prototipo išmatuotų parametrų analizė	46
4 Tobulinimo kryptys	54
4.1 Naujo Doherty stiprintuvo su CGH40006S pagalbiniu stiprintuvu projektavimas	54
4.2 Kitos Doherty stiprintuvų tobulinimo kryptys.....	56
5 Išvados	58
Literatūra	60
PRIEDAI	62
A priedas. Paskirstytųjų parametrų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis projektavimo ir tyrimo straipsnio medžiaga.....	63
B priedas. Didelio efektyvumo Doherty galios stiprintuvo projektavimo ir tyrimo straipsnio medžiaga	70
C priedas. Pažyma dėl straipsnių publikavimo	77

ŽYMENYS IR SANTRUMPOS

R_L	apkrovos varža, Ω
P_{out}	stiprintuvo išėjimo galia, W
P_{in}	stiprintuvo įėjimo galia, W
P_{DC}	stiprintuvo suvartojama galia, W
η	santakos efektyvumas, %
λ	signalų bangos ilgis, mm
PAE	galios pridėjimo efektyvumas, %
V_{GS}	įtampa tarp tranzistoriaus užtūros ir ištakos, V
V_{DS}	įtampa tarp tranzistoriaus santakos ir ištakos, V
K^2	galios daliklio dalinimo santykis
Z_{0A}, Z_{0B}	galios daliklio linijų impedansas iki rezistoriaus, Ω
Z_{0C}, Z_{0D}	galios daliklio linijų impedansas po rezistoriaus, Ω
R_w	galios daliklio rezistoriaus varža, Ω
S11	atspindžio koeficientas, dB
S21, S31	perdavimo koeficientas, dB

OFDM (angl. *Orthogonal frequency division multiplexing*) – ortogonalus dažninis multipleksavimas

QAM (angl. *Quadrature amplitude modulation*) – kvadratūrinė amplitudės moduliacija

PAPR (angl. *Peak to average power ratio*) – piko ir vidutinės galios vertės santykis

5G (angl. *Fifth Generation*) – penktoji karta

PTFE (angl. *Polytetrafluoroethylene*) – politetrafluoroetilenas

PAE (angl. *Power-added efficiency*) – galios pridėjimo efektyvumas

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Gaubtinės panaikinimo ir atstatymo architektūros blokinė schema.....	13
1.2 pav. Gaubtinės sekimo architektūros blokinė schema	14
1.3 pav. Skirtingų fazių architektūros blokinė schema	15
1.3 pav. Stiprintuvų išėjimo su kompensavimu ekvivalentinė schema	16
1.5 pav. Efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo įtampos ir kompensavimo dydžio [9]	17
1.6 pav. Doherty architektūros blokinė schema.....	18
1.7 pav. Stiprintuvų išėjimo ekvivalentinė schema Doherty architektūroje	18
1.8 pav. Teorinė Doherty stiprintuvo a) išėjimo srovės b) išėjimo įtampos c) stiprintuvų apkrovos d) Doherty stiprintuvo efektyvumo priklausomybė nuo normuotos įėjimo įtampos [9].....	19
2.1 pav. Projektuojamo Doherty galios stiprintuvo blokinė diagrama	23
2.2 pav. Smito diagrama su pavaizduotais PAE ir išėjimo galios kontūrais, geriausia ir blogiausia harmonikų apkrovos impedanso sritimi, kai fundamentinis dažnis lygus 2,4 GHz.....	25
2.3 pav. Stiprintuvo išėjimo suderinimo grandinės schemos konstrukcija.....	27
2.4 pav. Sumodeliuota pagrindinių stiprintuvų su suprojektuotų išėjimo grandinių schemos modeliais parametų priklausomybė a) nuo įėjimo galios; b) nuo dažnio	28
2.5 pav. Pagrindinio stiprintuvo išėjimo grandinės fizinis išdėstymas su a) PTFE dielektriku ; b) FR4 dielektriku.....	29
2.6 pav. PTFE ir FR4 grandinių atspindžio S parametrai Smito diagramoje	29
2.7 pav. Sumodeliuota pagrindinių stiprintuvų su suprojektuotų išėjimo grandinių elektromagnetiniais modeliais parametų priklausomybė a) nuo įėjimo galios; b) nuo dažnio.....	30
2.8 pav. Pagalbinio stiprintuvo su CMPA0530002S tranzistoriumi išėjimo suderinimo grandinės fizinis išdėstymas	31
2.9 pav. Sumodeliuota pagalbinio stiprintuvo su CMPA0530002S tranzistoriumi parametų priklausomybė a) nuo įėjimo galios; b) nuo dažnio	31
2.10 pav. Pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi a) įėjimo suderinimo grandinė; b) išėjimo suderinimo grandinė	32
2.11 pav. Pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi parametų priklausomybė a) nuo įėjimo galios; b) nuo dažnio	33
2.12 pav. Wilkinson galios daliklio topologija	34
2.13 pav. a) Simetrinio Wilkinson galios daliklio išdėstymas; b) nesimetrinio Wilkinson galios daliklio išdėstymas	35
2.14 pav. Sumodeliuota a) simetrinio Wilkinson galios daliklio perdavimo charakteristika; b) nesimetrinio Wilkinson galios daliklio perdavimo charakteristika.....	36

2.15 pav. Sumodeliuota Doherty stiprintuvo su nesimetriniu galios dalikliu a) stiprinimo priklausomybė nuo įėjimo galios b) santakos efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo galios.	37
2.16 pav. Sumodeliuota Doherty stiprintuvo su simetriniu galios dalikliu a) stiprinimo priklausomybė nuo įėjimo galios b) santakos efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo galios.	39
2.17 pav. Sumodeliuota Doherty stiprintuvo su simetriniu galios dalikliu a) išėjimo srovės b) išėjimo įtampos c) stiprintuvų apkrovos d) Doherty stiprintuvo efektyvumo priklausomybė nuo normuotos įėjimo įtampos, kai dažnis lygus 2,4 GHz	40
2.18 pav. Doherty stiprintuvo su simetriniu galios dalikliu fizinis išdėstymas.....	41
2.19 pav. Doherty stiprintuvo su simetriniu galios dalikliu galutinio modeliavimo a) stiprinimo priklausomybė nuo įėjimo galios b) santakos efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo galios	41
2.20 pav. Doherty stiprintuvo su skirtingais tranzistoriais fizinis išdėstymas	42
2.21 pav. Sumodeliuota Doherty stiprintuvo su skirtingais tranzistoriais sumodeliuota a) stiprinimo priklausomybė nuo įėjimo galios b) santakos efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo galios	43
2.22 pav. Doherty stiprintuvų (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje a) stiprinimo priklausomybės nuo įėjimo galios palyginimas b) santakos efektyvumo priklausomybės nuo išėjimo galios palyginimas.....	45
3.1 pav. Doherty galios stiprintuvo prototipo a) vaizdas Altium Designer programiniame pakete; b) pagamintos ir surinktos spausdintinės plokštės vaizdas iš viršaus; c) vaizdas iš apačios	47
3.2 pav. Doherty galios stiprintuvo prototipo matavimo stendo vaizdas	49
3.3 pav. Išmatuoto Doherty galios stiprintuvo a) įėjimo atspindžio palyginimas su modeliavimo rezultatais; b) perdavimo koeficiento palyginimas su modeliavimo rezultatais.....	50
3.4 pav. Išmatuoto Doherty galios stiprintuvo a) stiprinimo palyginimas su modeliavimo rezultatais; b) efektyvumo palyginimas su modeliavimo rezultatais ir AB klasės stiprintuvu	51
4.1 pav. Patobulinto pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi a) įėjimo suderinimo grandinė; b) išėjimo suderinimo grandinė	54
4.2 pav. Patobulinto pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi parametrų priklausomybė nuo a) įėjimo galios; b) parametrų priklausomybė nuo dažnio	55
4.3 pav. Patobulinto Doherty stiprintuvo su skirtingais tranzistoriais fizinis išdėstymas.....	56
4.4 pav. Patobulinto Doherty stiprintuvo su skirtingais tranzistoriais sumodeliuota a) stiprinimo priklausomybė nuo įėjimo galios; b) santakos efektyvumo priklausomybė nuo dažnio	56

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Didelio efektyvumo galios stiprintuvų architektūrų palyginimas	21
2.1 lentelė. Pagrindinių stiprintuvų modeliavimo rezultatai (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje.....	44
2.2 lentelė. Pagalbinių stiprintuvų modeliavimo rezultatai (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje	44
2.3 lentelė. Doherty galios stiprintuvų modeliavimo rezultatai (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje.....	45
3.1 lentelė. Nustatyti Doherty galios stiprintuvo prototipo parametrai.....	51
3.2 lentelė. Doherty galios stiprintuvo prototipo ir AB klasės galios stiprintuvo efektyvumo palyginimas	52

IVADAS

Darbo aktualumas ir tikslas

Visuotinis belaidžio ryšio sprendimų integravimas į kasdienį gyvenimą reikalauja nuolatinio belaidžio ryšio infrastruktūros tobulinimo. Pastaruoju metu vis labiau didėja perduodamų duomenų srauto poreikis dėl to, kad plečiasi daiktų internetas, populiarėja vaizdo transliacijos ir daugėja belaidžio ryšio naudotojų. Šiuolaikinės sudėtingos moduliacijos, pavyzdžiui OFDM (angl. *orthogonal frequency division multiplexing*) ir QAM (angl. *quadrature amplitude modulation*), išsprendžia spartos problemą, bet sukuria naujas. Signalai, kuriems taikomos amplitudės moduliacijos, turi svarbų parametą, vadinamą PAPR (angl. *peak to average power ratio*) – signalo didžiausios ir vidutinės galios santykiu. Įprastai šiuolaikinių signalų PAPR yra tarp 6 dB ir 12 dB, bet gali būti ir didesnis, o ateityje gali dar didėti [1]. Dėl šio santykio atsiranda belaidžio ryšio sistemų tiesiškumo ir efektyvumo problema. Įprastai didinant vieną iš šių parametrų, kitas prastėja. Vis tik tiesinis veikimas yra labai svarbus, nes dėl signalo iškraipymų gali būti prarasta amplitudėje užkoduota informacija, didėja klaidų skaičius perduodamoje informacijoje, dalis signalo galios nuteka į gretimų dažnių juostas. Visa tai yra nepageidautina ir reguliuojama tam tikrais standartais, todėl įprastai belaidžio ryšio sistemos pasižymi geru tiesiškumu, bet prastu efektyvumu.

Dėl prasto efektyvumo suvartojama daug daugiau elektros energijos, o tai yra ypač aktualu vykstant naujų belaidžio ryšio standartų, pvz., 5G (angl. *Fifth Generation*), bazinių stočių plėtrai. Efektyvūs galios stiprintuvai taip pat labai svarbūs mobiliuosiuose įrenginiuose, kuriuose galios stiprintuvai yra vieni iš daugiausiai energijos vartojančių komponentų, nes kuo prastesnis efektyvumas, tuo greičiau iškraunama įrenginio baterija. Taip pat dėl prasto efektyvumo įtaisai šiluminiu būdu išsklaido daugiau galios, kuri gali neigiamai paveikti tiek pačio stiprintuvo, tiek aplinkui esančių komponentų veikimą, todėl stiprintuvuose, kurių išėjimo galia didesnė nei keli vatai, dažnai reikalingas radiatorius. Tokie radiatoriai dažnai sudaro didelę įrenginio tūrio dalį, o tai irgi nepageidaujama.

Darbo tikslas yra pasirinktam dažnių ruožui ir išėjimo galiai sumodeliuoti, suprojektuoti ir eksperimentiškai ištirti kuo didesnio efektyvumo Doherty galios stiprintuvą

Darbo uždaviniai

1. Atlikti didelio efektyvumo galios stiprintuvų architektūrų analitinę apžvalgą;
2. Sumodeliuoti pagrindinius pasirinkto Doherty galios stiprintuvo parametrus, suprojektuoti ir pagaminti pasirinktą architektūrą;
3. Atlikti matavimus ir eksperimentinius tyrimus plačiame Doherty galios stiprintuvo veikimo diapazone.

Naudoti tyrimo ir analizės metodai

Šio stiprintuvo projektavimo ir tyrimo metu buvo taikyti kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Projektavimo metu naudota *Keysight ADS* programinė įranga su *MACOM* įmonės tranzistorių modeliais ir *KYOCERA AVX* įmonės kondensatorių modeliais. Spausdintinės plokštės, skirtos suprojektuoto stiprintuvo testavimui ir tyrimams, projektavimui panaudota *Altium Designer* programinė įranga. Pagaminto stiprintuvo veikimas eksperimentiškai tirtas naudojant *Signal Hound VSG60A* signalo generatorių, *Tektronix RSA5126A* spektro analizatorių, *LA19-13-04B* vektorinį grandynų analizatorių, testavimo pozicionatorius *PS600* ir aukštadažnius testavimo zondus *SP-GR-201505*. Įvertinti stiprintuvo S parametrai, stiprinimo ir efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo galios.

Darbo naujumas ir praktinė nauda

Daugėjant belaidžių ryšių perduodamų duomenų srautui ir vykstant 5G bazinių stočių plėtrai, aukštų dažnių galios stiprintuvų efektyvumas tampa labai svarbus. Suprojektuotas Doherty galios stiprintuvas (2,3–2,5) GHz dažnių juostai. Efektyvumui padidinti, stiprintuvo išėjimas yra suderinamas su apkrova ne tik fundamentiniam dažniui bet ir antrajai ir trečiajai harmonikoms, taip pat stiprintuvas suprojektuotas naudojant mažų nuostolių PTFE dielektrinę medžiagą. Pagamintas ir ištirtas stiprintuvas turi iki 6 % efektyvumo pranašumą palyginus su įprastu AB klasės stiprintuvu. Suprojektuotas stiprintuvas gali būti toliau tiriamas ir tobulinamas, kad galiausiai būtų naudojamas bazinėse stotyse ar įtaisuose, kur svarbus didelis signalų stiprinimo efektyvumas.

Darbo struktūra

Darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Pirmajame skyriuje apžvelgiamos didelio efektyvumo galios stiprintuvų architektūros. Antrajame skyriuje aprašoma Doherty galios stiprintuvo ir jo dalių projektavimo eiga ir modeliavimo rezultatai. Trečiame skyriuje pateikiama pagaminto Doherty galios stiprintuvo eksperimentinis tyrimas ir matavimų rezultatų analizė. Ketvirtajame skyriuje aprašomas patobulintas stiprintuvas ir tobulinimo kryptys.

1 DIDELIO EFEKTYVUMO GALIOS STIPRINTUVŲ ARCHITEKTŪRŲ ANALITINĖ APŽVALGA

Galios stiprintuvo paskirtis yra sustiprinti signalą prieš jį siunčiant į kitą sistemos bloką, pavyzdžiui, anteną. A, AB ir B klasių stiprintuvai iškraipo signalą mažiausiai, tačiau A klasės teorinis didžiausias efektyvumas yra 50 %, B klasės didžiausias efektyvumas siekia 78,5 %, o AB klasės efektyvumas yra tarp šių verčių. C ir kitų klasių stiprintuvai gali pasiekti teorinį efektyvumą iki 100 %, tačiau tokie stiprintuvai nėra tiesiniai. Visų stiprintuvų efektyvumas praktikoje yra mažesnis nei teorinis maksimumas. Taip yra dėl to, kad stiprintuvai dirba efektyviausiai, kai jų išėjimo galia yra artima įsisotinimo galiai, tačiau signalas ties šia galia yra iškraipomas arba net nestiprinamas. Dėl šių priežasčių stiprintuvo projektavimo metu siekiama gero tiesiškumo ir efektyvumo parametrų kompromiso. Vis tik tiesiniam veikimui dažnai teikiama pirmenybė, nes dėl iškraipymų didėja klaidų dažnis perduodamoje informacijoje, dalis signalo galios nuteka į gretimų dažnių juostas. Visa tai yra nepageidaujama ir įvairiais standartais reguliuojama. Taigi iškraipymams išvengti tiesiniai stiprintuvai dirba žemiau įsisotinimo lygio, tačiau iš to seka tai, kad efektyvumas yra daug prastesnis [2]. Kitos kliūtys yra efektyvumo priklausomybė nuo kitų parametrų – dažnių ruožo, paduodamo signalo, maitinimo įtampos, naudojamos puslaidininkio technologijos.

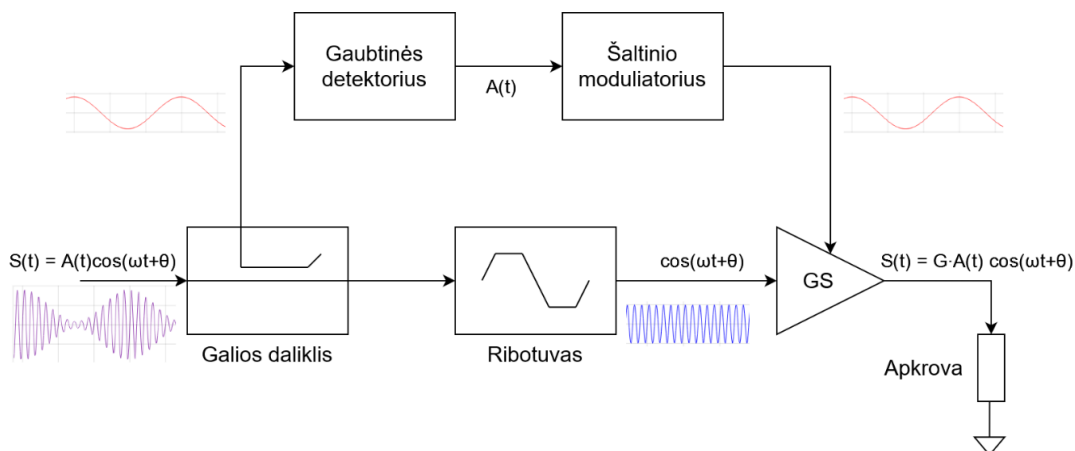
Nepaisant minėtų iššūkių, jau prieš 80 metų inžinieriai buvo sukūrę keletą architektūrų stiprintuvų efektyvumui padidinti esant išėjimo galiomis žemiau įsisotinimo. Remiantis pradinėmis idėjomis šios architektūros buvo patobulintos ir pritaikytos šiuolaikiniams stiprintuvams. Šios architektūros yra nuolat tobulinamos ir skiriasi veikimo principu, įgyvendinimu, tiek ir pasiekiamais rezultatais. Toliau bus aprašomos ir palyginamos pagrindinės efektyvumo didinimo architektūros.

1.1 Gaubtinės panaikinimo ir atstatymo architektūra

Pirmiausia aptariamos dinaminio šaltinio architektūros. Pirmoji yra gaubtinės panaikinimo ir atstatymo architektūra, kuri buvo sukurta Kahno 1952 metais. Jos veikimo principas yra nustatyti stiprintuvo veikimą taip, kad jis visada būtų arti įsotinio, taigi ir arti efektyvumo maksimumo. Tą pasiekti galima keičiant stiprintuvo maitinimo įtampą. Šioje architektūroje atskira grandinė nustato paduodamo signalo gaubtinę ir pagal ją atitinkamai keičia įtampą, kuria maitinamas galios stiprintuvas.

Gaubtinės panaikinimo ir atstatymo architektūros blokinė schema pavaizduota 1.1 paveiksle. Įėjimo signalas yra padalinamas į dvi dalis. Pagrindinė dalis patenka į galios stiprintuvą pro specialų ribotuvą, kuris idealiu atveju neiškraipo fazės ir suvienodina signalo gaubtinę. Dėl to prarandama amplitudės moduliacija, bet išsaugoma dažnio ir fazės informacija. Kadangi toks signalas yra vienodos amplitudės, jam sustiprinti galima naudoti netiesinius didelio efektyvumo stiprintuvus ir tai

yra didelis privalumas. Kita signalo dalis yra paduodama į gaubtinės detektorių, o iš jo į specialų moduliatorių-stiprintuvą, kuris ir nustato pagrindinio stiprintuvo maitinimo įtampą. Tokiu būdu amplitudė yra atstatoma moduliuojant stiprintuvo šaltinio įtampą. Tai reiškia, kad įėjimo signalo amplitudės atstatymas priklauso tik nuo moduliatoriaus.



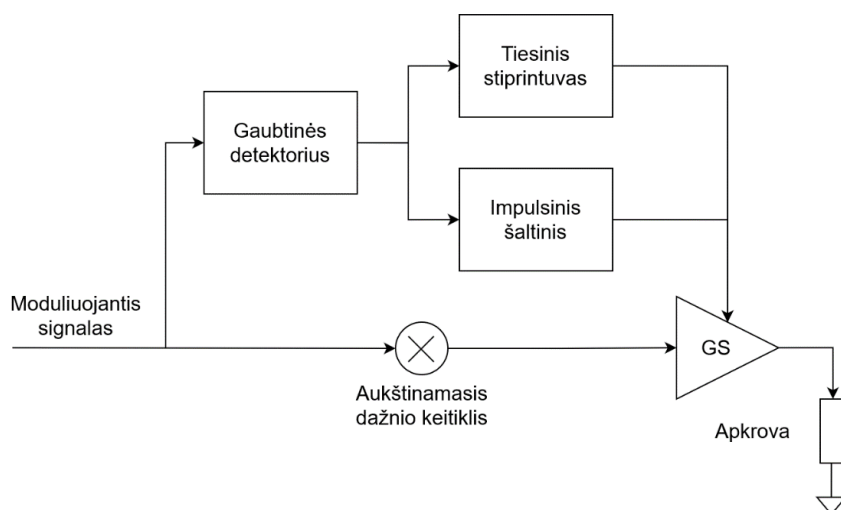
1.1 pav. Gaubtinės panaikinimo ir atstatymo architektūros blokinė schema

Teorinis šios architektūros efektyvumas gali būti pasiektas labai didelis visoms įėjimo galios vėrtėms ir įėjimo signalo gaubtinė yra proporcinga stiprintuvo maitinimo įtampai, tačiau praktikoje tai nėra labai lengvai įgyvendinama. Nors pagrindinis stiprintuvas yra efektyvus, gaubtinės detektorius ir moduliatorius vartoja elektros energiją, o tai smarkiai mažina bendrą efektyvumo lygį. Kadangi įėjimo signalas yra padalinamas ir siunčiamas į atskirus grandynus, yra tikimybė, kad amplitudė bus atstatoma su tam tikru vėlinimu. Tai savo ruožtu sukelia signalų tarpusavio moduliaciją ir prarandamas tiesiškumas, didėja galios nuotėkis už juostos pločio ribų. Reikalinga ne tik griežta fazės kontrolė bet ir labai greitas, tikslus šaltinio moduliavimas pagal gaubtinę. Teoriniame lygmenyje daroma prielaida, kad fazės moduliacija yra išsaugoma, tačiau praktikoje ji iškraipoma dėl kelių priežasčių. Pirmą yra ta, kad ribotuvus yra sudaromas iš netiesinių įtaisų, antra, stiprintuvas irgi įneša fazės iškraipymų dėl stiprintuvo išėjimo talpos ir dinaminio maitinimo. Be to, reikia atsižvelgti į tai, kad svarbu įėjimo signalo nesekti ten, kur jo įtampa yra mažesnė nei stiprintuvo įsijungimo įtampa. Kai signalo gaubtinė yra mažesnė nei minėta įtampa, gali atsirasti dideli iškraipymai [2]. Šių trūkumų šalinimas didina architektūros kainą, sudėtingumą ir todėl šiuo metu kitos architektūros yra daug dažniau sutinkamos.

1.2 Gaubtinės sekimo architektūra

Gaubtinės sekimo architektūra yra kita dinaminio maitinimo architektūra. Ji yra sukurta remiantis jau aptarta architektūra ir joje irgi yra keičiama stiprintuvo maitinimo įtampa. Skirtumas yra tas, kad čia nereikalingas ribotuvus, naudojamas tiesinis stiprintuvas vietoj netiesinio ir dažniausiai impulsinis šaltinis kaip moduliatoriaus, kaip pavaizduota 1.2 paveiksle. Vienas iš

svarbiausių gaubtinės sekimo privalumų yra tai, kad šioje architektūroje nereikia atkurti signalo gaubtinę, o tik ją sustiprinti. Iš to seka paprastesni moduliatoriaus reikalavimai. Galima įjungti maitinimo moduliavimą tik ties tais galios lygiais, kurie yra arti maksimumo. Tai jau stipriai padidintų bendra efektyvumą. Gali būti naudojamas ir toks maitinimo šaltinis, kuris turi tam tikrus nustatytus diskrečius maitinimo įtampos lygius, taip teoriškai pašalinamas reikalavimas turėti itin greitus ir didelio dažnių juostos pločio šaltinius. Kitas privalumas tas, kad galima stiprinti mažus signalo lygius be iškraipymų. Dar vienas privalumas yra tas, kad efektyvumo didinimo ir stiprintuvo įėjimo ir išėjimo suderinimo užduotys yra įgyvendinamos atskirai [3]. Vienas iš svarbiausių trūkumų yra labai ribotas stiprinamų dažnių juostos plotis – [4,5] šaltiniuose iki 5-10 MHz, [2] šaltinyje minima, kad pasiekama iki 100 MHz. Kitas svarbus trūkumas yra mažesnis stiprintuvo efektyvumas dėl to, kad gaubtinė nėra sekama idealiu tikslumu ir kad stiprintuvas yra tiesinės klasės. Vis tik tiesiškumas irgi nėra idealus dėl impulsinio šaltinio triukšmų, tačiau jis gali būti atstatomas skaitmeniniais būdais.



1.2 pav. Gaubtinės sekimo architektūros blokinė schema

Gaubtinės sekimo architektūroje šaltinio moduliavimo dalis yra pati svarbiausia ir jai skiriama didžioji dalis dėmesio. Svarbu tinkamai nustatyti gaubtinę, ją transformuoti į reikalingą šaltinio įtampos lygį ir suprojektuoti kuo efektyvesnį šaltinio moduliatorių [4–6]. Gaubtinės nustatymas, vėlinimo pašalinimas, šaltinio moduliavimo funkcija tiksliausiai yra atliekama su skaitmenine elektronika. Šiuolaikinės gaubtinės sekimo architektūros yra hibridinės ir turi dvigubą moduliavimą. Dalis maitinimo įtampos yra paduodama iš impulsinio šaltinio, o kita dalis iš stiprintuvo. [4–6] šaltiniuose stiprintuvų su gaubtinės sekimu santakos efektyvumas atitinkamai siekia 45,5 %, 38,4 %, 43,5 %. Santakos efektyvumas aprašomas kaip stiprintuvo išėjimo galios P_{out} ir suvartojamos galios P_{DC} santykis:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{DC}} \quad (1.1)$$

Nors gaubtinės panaikinimo ir atstatymo architektūra teoriškai gali pasiekti didesnę efektyvumą dėl naudojamo netiesinio stiprintuvo, gaubtinės sekimo architektūra yra populiareesnė.

Svarbiausia priežastis yra mažesni keliama dinaminio šaltinio reikalavimai, lengvesnis įgyvendinimas naudojant skaitmeninius signalų procesorius, vėlinimas tarp stiprintuvo ir modulatoriaus nesukelia tiek daug problemų [7]. Vis tik tinkamo modulatoriaus įgyvendinimas nėra labai lengva užduotis.

1.3 Skirtingų fazių architektūra

Skirtingų fazių architektūra buvo išrasta 1935 metais kaip būdas pagerinti amplitudės moduliavimo siųstuvų efektyvumą ir tiesiškumą. Šioje architektūroje naudojama ši trigonometrinė savybė:

$$\cos(A) + \cos(B) = 2 \cdot \cos\left(\frac{A+B}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{A-B}{2}\right). \quad (1.2)$$

Galima amplitudės moduliuotą signalą $S(t)$ aprašyti taip:

$$S(t) = A(t) \cdot \cos(\omega t) \quad (1.3)$$

Jeigu šį signalą paduoti į fazės moduliatorių, galima sukurti du vienodos amplitudės, bet skirtingos fazės signalus, aprašomus tokiomis lygtimis:

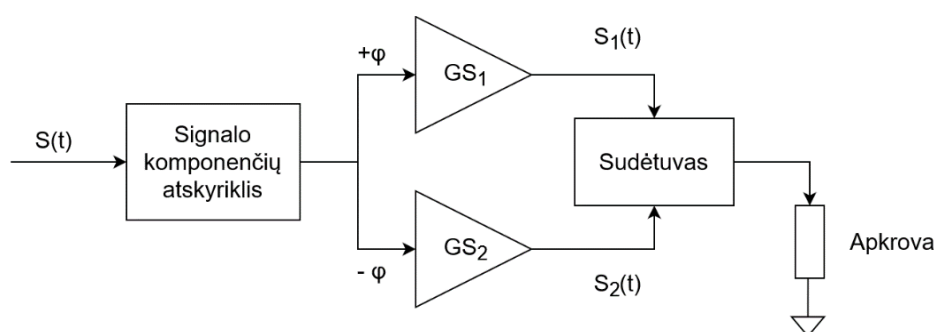
$$S_1(t) = \frac{A_m}{2} \cos\left(\omega t + \cos^{-1}\left(A(t)/A_m\right)\right), \quad (1.4)$$

$$S_2(t) = \frac{A_m}{2} \cos\left(\omega t - \cos^{-1}\left(A(t)/A_m\right)\right). \quad (1.5)$$

Sudėjus šiuos du signalus ir pritaikius aukščiau minėtą trigonometrinę priklausomybę, išėjime gaunamas sustiprintas signalas:

$$S(t) = G \cdot (S_1(t) + S_2(t)) = G \cdot A(t) \cdot \cos(\omega t) = G \cdot S(t), \quad (1.6)$$

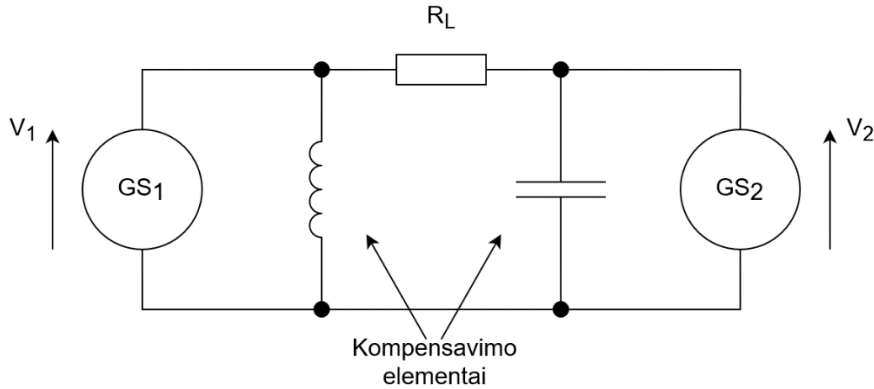
čia G yra stiprintuvo stiprinimo koeficientas.



1.3 pav. Skirtingų fazių architektūros blokinė schema

Kaip matyti iš 1.3 paveikslo, galima išskirti tokias pagrindines architektūros dalis: dviejų vienodos amplitudės signalo komponentų atskyrimas arba jų generavimas, jų stiprinimas ir sudėtis. Pradinio signalo amplitudės informacija yra užkoduojama kaip fazės kampas šiose komponentėse. Kadangi tokie signalai yra vienodos amplitudės, juos galima stiprinti netiesiniais, bet didelio efektyvumo stiprintuvais. Be to, yra išsaugojama ir pradinė fazės moduliacija, o iškraipymai idealiau atveju priklauso tik nuo amplitudės moduliacijos konvertavimo į fazės moduliaciją. Turint du didelio

efektyvumo stiprintuvus ir sudėjus jų signalus, bendras efektyvumas nebūtinai yra didesnis. Efektyvumą nulemia parinktas išėjimo sudėtuvas. Ta architektūra, kurioje naudojamas izoliuojantis (Wilkinson) sudėtuvas buvo sukurta 1974 m. ir yra vadinama tiesinio stiprinimo su netiesiniais komponentais architektūra. Esminis privalumas yra labiau tiesinis veikimas, o trūkumas yra efektyvumo praradimas dėl Wilkinson galios sudėtuvo, kurio rezistoriuje išsklaidomi nuostoliai [8].



1.4 pav. Stiprintuvų išėjimo su kompensavimu ekvivalentinė schema

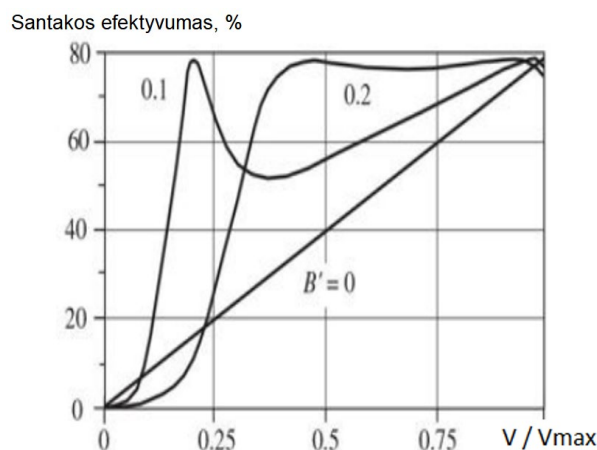
Efektyvumą pagerina specialus Chireix galios sudėtuvas. Jo veikimui aprašyti reikia išvesti apkrovos formulę. Išėjimo srovė I_0 apkrovoje gali būti aprašyta tokia lygtimi [3]:

$$I_0 = \frac{V_1 - V_2}{R_L} = \frac{V \cdot (\cos(\varphi) + j \sin(\varphi)) - V \cdot (\cos(\varphi) - j \sin(\varphi))}{R_L}, \quad (1.7)$$

čia V_1 ir V_2 yra atitinkamos stiprintuvų išėjimo įtamos, R_L yra apkrovos varža, o $\varphi = \sin^{-1}A(t)$. V_1 stiprintuvui apkrova Z_1 yra išreiškiama taip [2]:

$$Z_1 = R_L \frac{V_1}{V_1 + V_2} = R_L \frac{\cos(\varphi) + j \sin(\varphi)}{2j \sin(\varphi)} = \frac{R_L}{2} (1 - j \cot(\varphi)). \quad (1.8)$$

Kaip matoma, fazės skirtumas tarp stiprintuvų apkrovai suteikia reaktyvią dalį. Dėl to, kad apkrovos dydis priklauso nuo įėjimo signalo, ši architektūra priskiriama apkrovos moduliacijos tipui. Šiuo atveju apkrovą galima įsivaizduoti kaip nuosekliai sujungtus rezistorių ir kondensatorių. Kai φ yra lygu 90° , apkrova yra be reaktyvios dalies ir išėjimo signalo gaubtinė yra didžiausia, o jei φ artėja prie 0, reaktyvi dalis išauga, gaubtinės dydis ir efektyvumas mažėja. Apkrovą galima transformuoti į lygiagrečiai sujungtus rezistorių ir kondensatorių. Lygiagrečiai jiems prijungus dar induktyvumo ritę su priešingo reaktyvumo verte nei kondensatorius, galima kompensuoti kondensatoriaus veikimą. Tą patį galima atlikti ir su antruoju stiprintuvu, tik ritė yra kompensuojama kondensatoriumi. To pasekmė yra antras efektyvumo pikas žemiau maksimalios išėjimo galios. Taigi nuo kompensavimo priklauso stiprintuvo efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo galios. Čia kyla optimalaus kompensavimo parinkimo problema. Efektyvumo kreivės kitimas pavaizduotas 1.5 paveiksle. Iš jo matome, kad jei kompensavimas per mažas, efektyvumas tarp pikų bus prastesnis.



1.5 pav. Efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo įtampos ir kompensavimo dydžio [9]

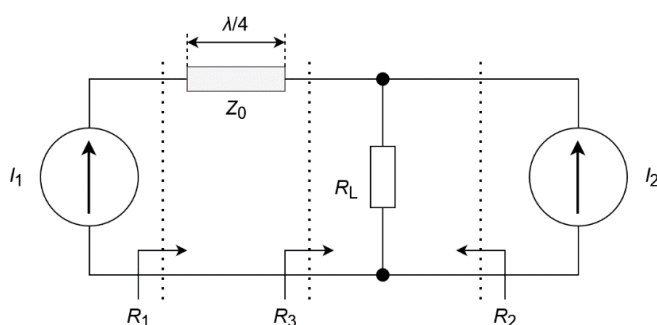
Chireix padarė keletą prielaidų, kurios leidžia teigti, kad tokio stiprintuvo teorinis efektyvumas yra labai didelis. Praktikoje tą pasiekti sudėtinga dėl nuostolių Chireix kompensavimo elementuose (žema induktyvumo ritės ir kondensatoriaus kokybė). Abu naudojami stiprintuvai turi veikti identišškai, bet praktikoje net nedidelis skirtumas gamyboje ar temperatūroje keičia stiprintuvų veikimą. Dėl nedidelio stiprinimo koeficiento skirtumo ir fazės skirtumo tarp stiprintuvų bendras architektūros veikimas prastėja [10]. Istoriskai skirtingų fazių architektūros praktinis įgyvendinimas nebuvo labai paprastas. Signalo komponentių atskyrimas iš pradžių buvo įgyvendinamas analoginiais įtaisais, tačiau tai yra sudėtinga, nes reikalaujama didelio tikslumo. Šiais laikais tai yra atliekama skaitmeniniais būdais su signalų procesoriais. Taigi į stiprintuvą turi būti siunčiamas ir informacijos signalas ir nešlio signalas. Informacijos signalo komponentės yra atskiriamos ir paduodamos į dažnio keitiklius prieš stiprinant. Dėl to tai nėra tik galios stiprintuvo, o labiau siųstuvo architektūra. Nors pasiekiamas geras efektyvumas, šiai architektūrai reikalingi papildomi komponentai, skaitmeninis apdorojimas, o visa tai irgi vartoja elektros energiją. Dar viena įgyvendinimo kliūtis yra ta, kad dauguma galios sudėtuvų yra siaurajuosčiai, o tai apriboja taikymo sritis.

Šiuo metu nemažai dėmesio skiriama naujų, patobulintų sudėtuvų, skirtų šiai architektūrai, projektavimui, kad padidinti dažnių juostos plotį ir efektyvumą [11]. [12] šaltinyje pasiekiamas 67 % santakos efektyvumas ir 57 % efektyvumas 6 dB žemiau maksimalios galios naudojant įprasta Chireix sudėtuvą. [13] šaltinyje sukurta galimybė konfigūruoti kompensavimo elementus skirtingiems dažniams. [14] šaltinyje kaip sudėtuvo modelis pateiktas nuosekliai sujungtos skirtingos mikrojuostelinės perdavimo linijos ir mikrojuosteliniai užtvariniai filtrai, pasiekiamas 72,2 % santakos efektyvumas.

1.4 Doherty architektūra

1936 metais buvo sukurta Doherty architektūra tam, kad pagerinti elektroninių lempų, kurios stiprino amplitudę moduluotus signalus, efektyvumą. Tuo metu ji buvo geresnė, nei skirtingų fazių

Doherty architektūroje pagrindinis stiprintuvas veikia nuolatos, o pagalbinis tik tada, kai įėjimo signalas viršija nustatytą ribą ir stiprina signalo piką. Pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo išėjimus jungia ketvirčio bangos ilgio perdavimo linija, kuri veikia kaip impedanso inverteris. Toks išėjimų sujungimas realizuoja pagrindinę Doherty architektūros savybę – apkrovos moduliacija. Šis veikimas primena skirtingų fazių architektūrą, tačiau skirtumas tas, kad apkrovos dydis, kurį mato pagrindinis stiprintuvas, kinta priklausomai nuo pagalbinio stiprintuvo srovės, o ne nuo fazės kampo. Išėjimo ekvivalentinė schema pavaizduota 1.7 paveiksle.



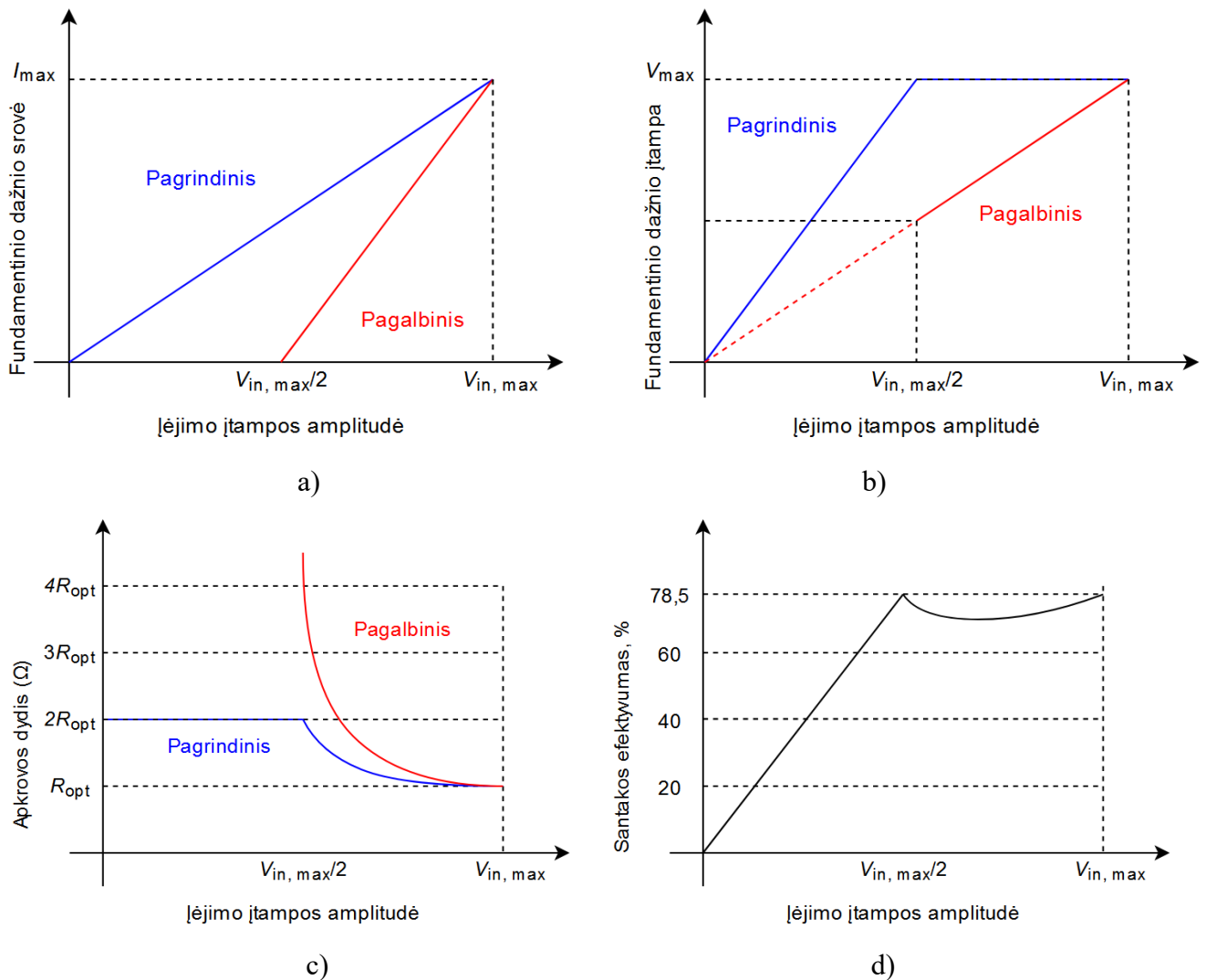
Pirmiausia reikia aprašyti, kokia būtų apkrovą pirmajam stiprintuvui, jei impedanso inverterio nebūtų. Tada pirmajam srovės šaltiniui apkrovos dydis yra toks [3]:

$$R_3 = R_L \left(1 + \frac{I_2}{I_1} \right), \quad (1.9)$$

čia I_1 ir I_2 yra atitinkamai pirmojo ir antrojo stiprintuvo srovė. Srovei I_2 kintant nuo 0 iki I_1 vertės, apkrova kinta nuo R_L iki $2R_L$. Taigi R_1 vertė didėja, kai santykis I_2/I_1 didėja. Tačiau norint palaikyti efektyvumą pastovų, reikia, kad srovei mažėjant apkrova didėtų, todėl aprašytas veikimas netinka. Abu stiprintuvai turi išduoti daugiausiai galios ties didžiausios išėjimo galios veikimu, o kai išėjimo galia mažėja, abiejų stiprintuvų galia irgi turi mažėti. Dėl šių priežasčių pridedama ketvirčio bangos ilgio linija, dar vadinama impedanso inverteriu. Tada apkrovos dydis pagrindiniam stiprintuvui yra lygus [3]:

$$R_1 = \frac{Z_0^2}{R_3}. \quad (1.10)$$

Dabar I_2 srovei didėjant, pirmajam stiprintuvui apkrova mažėja ir tai yra pageidaujamas veikimas. Stiprintuvų įtamos, srovės ir apkrovos priklausomybė nuo įėjimo įtamos pavaizduota 1.8 paveiksle. Kai srovės yra vienodos, apkrova pagrindiniam stiprintuvui yra du kartus mažesnė, nei kai veikia tik vienas stiprintuvas, kaip parodyta kaip parodyta 1.8 pav. c).



1.8 pav. Teorinė Doherty stiprintuvo a) išėjimo srovės b) išėjimo įtamos c) stiprintuvų apkrovos d) Doherty stiprintuvo efektyvumo priklausomybė nuo normuotos įėjimo įtamos [9]

Kadangi pagrindinio stiprintuvo išėjime yra papildoma perdavimo linija (impedanso inverteris), sudedami signalai būtų ne tos pačios fazės. Fazei kompensuoti yra pridama tokio pat ilgio linija pagalbinio stiprintuvo įėjime. Viso to pasekmė yra santakos efektyvumo priklausomybė nuo įėjimo įtampos amplitudės, kuri atrodo taip, kaip pavaizduota 1.8 pav. d). Iš šio paveikslo matyti, kad pirmasis efektyvumo pikas yra ties puse išėjimo įtampos, kas atitinka ketvirtadalį maksimalios galios, arba 6 dB mažiau galios. Šiame pike efektyvumas idealiu atveju yra toks pat didelis, kaip ir ties maksimalia galia. Šis pikas dalina Doherty stiprintuvo veikimą į du režimus. Iki piko pagalbinis stiprintuvas yra išjungtas, o pagrindinis stiprintuvas dėl didesnės apkrovos pasiekia didelį efektyvumą anksčiau nei įprasta. Tai yra mažos galios režimas. Tarp piko ir maksimalios galios veikia abu stiprintuvai ir tai yra vadinama didelės galios režimu. Šiame režime pagalbinis stiprintuvas veikia ne pilnu efektyvumu, iki kol nepasiekiamą maksimali galia. Dėl šios priežasties efektyvumo charakteristikoje tarp pikų yra nedidelė įduba.

Kaip ir su kitomis architektūromis, jos įgyvendinimo būdų yra įvairių. Panaudojus daugiau pagalbinių stiprintuvų galima praplėsti sritį, kurioje dirba abu stiprintuvai. Taip gaunami labiau nutolę efektyvumo pikai, kas gali būti naudinga stiprinant signalus su didesniu PAPR. Taip pat galima sukurti kelis efektyvumo pikus naudojant daugiau piko stiprintuvų, kurių kiekvienam reikia pridėti po dar vieną fazės kompensavimo ir impedanso inverterio linija [9,15]. Daug tokių pakopų sudaryti nepraktiška dėl vis didesnio / mažesnio impedanso perdavimo linijų gamybos sudėtingumo ir užimamo ploto. Taip pat tokio jungimo trūkumas yra sumažėjęs tiesiškumas.

Šios architektūros privalumas yra jos paprastumas ir didelis efektyvumas. Skirtingai nuo kitų architektūrų, į šį stiprintuvą galima paduoti tik pati signalą, kurį norima sustiprinti. Nereikia paduoti moduliuojančio, nešlio signalų ar apdoroti juos skaitmeniniais būdais. Dėl minėtų privalumų ir galimybės sukurti norimus efektyvumo pikus, skiriama daug dėmesio šiai architektūrai. [16,17] šaltiniuose autorių sukurtų stiprintuvų santakos efektyvumas pasiekia atitinkamai iki 77 % ir 65 %, o 6 dB žemiau maksimalios galios siekia 47 % ir 50 %. Pagrindiniai architektūros trūkumai yra ribotas dažnių juostos plotis dėl naudojamų ketvirčio bangos ilgio linijų, tačiau šį trūkumą galima pašalinti naudojant specialius impedanso inverterius [18], modifikuotas apkrovos moduliacijas [19] ir pasiekti panašų efektyvumo lygį kaip ties maksimalia galia.

1.5 Apžvalgos apibendrinimas

Analitinės apžvalgos skyriuje buvo išsiaiškinta, kad yra dvi efektyvumo didinimo architektūrų kategorijos: šaltinio moduliacijos ir apkrovos moduliacijos. Pirmajai priskiriama gaubtinės panaikinimo ir atstatymo ir gaubtinės sekimo architektūros. Jose keičiama stiprintuvo maitinimo įtampa pagal įėjimo signalo gaubtinės dydį, kad palaikyti kuo aukštesnį efektyvumo lygį. Antrajai kategorijai priskiriama fazių skirtumo ir Doherty architektūros. Jose aukštam efektyvumo

lygiui palaikyti keičiamas stiprintuvams matomas apkrovos dydis. Visos keturios architektūros turi savo privalumų ir trūkumų, kurie buvo aprašyti šiame skyriuje.

Architektūrų palyginimui sukurta 1.1 lentelė. Joje iš šaltinio moduliacijos kategorijos palyginama tik gaubtinės sekimo architektūra, nes ji yra dažniau naudojama ir pranašesnė už gaubtinės panaikinimo ir atstatymo architektūrą. Iš lentelės matyti, kad gaubtinės sekimo ir fazių skirtumo architektūros teoriškai pasiekia didžiausius efektyvumo lygius. Praktikoje šių architektūrų efektyvumas yra prastesnis dėl įvairių nuostolių, teorijoje naudojamų idealių modelių. Palyginus su fazių skirtumų architektūra, Doherty architektūros teorinis efektyvumas yra prastesnis tik tarp dviejų efektyvumo pikų, tačiau skirtumas yra iki 10 %. Praktinis Doherty įgyvendinimas neturi itin daug nuostolių, todėl visos architektūros praktikoje gali pasiekti panašų efektyvumo lygį.

1.1 lentelė. Didelio efektyvumo galios stiprintuvų architektūrų palyginimas

Parametras	Gaubtinės sekimo architektūra	Fazių skirtumo architektūra	Doherty architektūra
Teorinis efektyvumas	Labai didelis	Didelis – labai didelis	Didelis
Praktinį efektyvumą riboja	Moduliatoriaus efektyvumas ir tikslumas	Nuostoliai kompensavimo elementuose, skaitmeninės dalies tikslumas	Fazių skirtumas tarp pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo išėjimo, neideali apkrovos moduliacija
Dažnių juostos plotis (angl. <i>Bandwidth</i>)	Sunku pritaikyti >100 MHz dėl vėlinimo tarp stiprintuvo ir gaubtinės sekimo, moduliatoriaus reikalavimų	Ribotas dėl stiprintuvų parazitinių parametrų ir sudėtuvo išėjime, yra būdų jį pagerinti	Ribotas dėl stiprintuvų parazitinių parametrų ir sudėtuvo išėjime, yra daugiau būdų jį pagerinti
Skaitmeninių signalų generavimas/apdorojimas	Būtinas	Nebūtinas, tačiau didesniai efektyvumui reikalingas	Nebūtinas
Projektavimo sudėtingumas	Didelis	Didelis	Paprastesnis

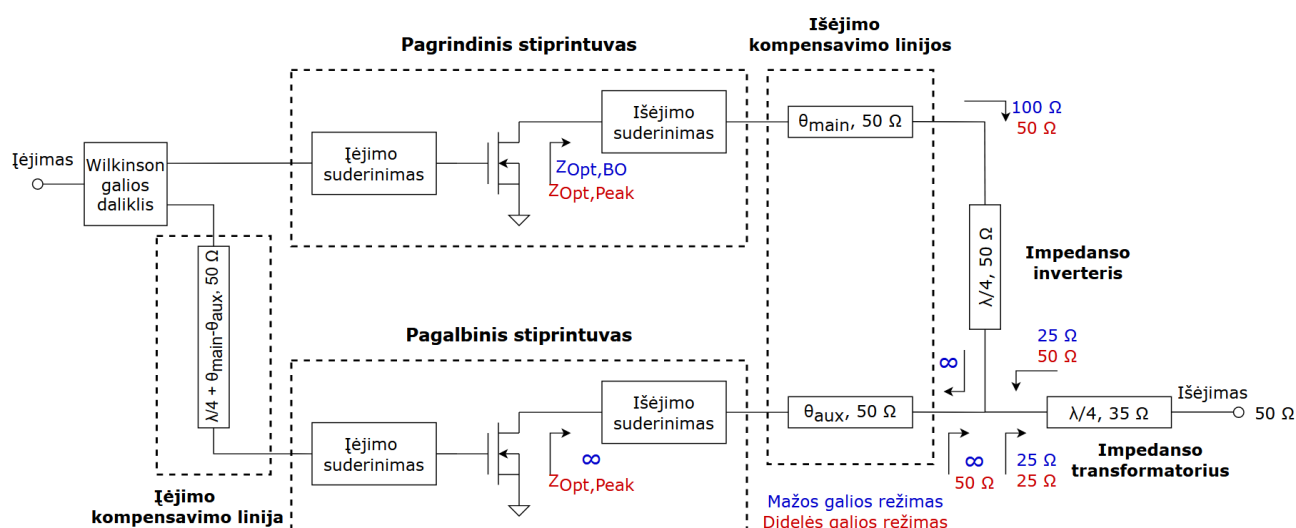
Gaubtinės sekimo architektūroje sudėtinga pasiekti didelį dažnių juostos plotį dėl reikalaujamo tikslumo tarp gaubtinės sekimo grandinės ir stiprintuvo. Fazių skirtumo ir Doherty architektūrose šis plotis ribojamas naudojamų mikrojuostelinių komponentų ir stiprintuvų parazitinių parametrų. Pastarosiose architektūrose dažnių juostos plotį galima praplėsti projektuojant specialius sudėtuvus, Doherty architektūroje galima sukurti išėjimo suderinimo grandinę, kuri kompensuoja stiprintuvo talpą. Taip pat galima pastebėti, kad visoms architektūroms, išskyrus Doherty, reikalinga skaitmeninė dalis. Tai reiškia, kad į įtaisą paduodamas moduliuojantis ir nešlio signalai arba kiti

suformuoti signalai. Tuo tarpu į Doherty architektūrą paduodamas jau suformuotas signalas, kurį reikia sustiprinti. Iš to seka tai, kad Doherty architektūrai nereikia įgyvendinti sudėtingos maitinimo dalies, skaitmeninių signalų apdorojimo ar generavimo, reikalinga mažiau komponentų. Taigi Doherty architektūra yra paprastesnė, lengviau įgyvendinama.

Svarbu pabrėžti, kad nėra vienareikšmiškai geriausios architektūros. Jos pasirinkimas priklauso nuo konkretaus taikymo. Magistro darbo metu projektuojamas stiprintuvas (2,3-2,5) GHz dažniui, dėl to naudoti gaubtinės sekimo architektūrą būtų sudėtinga. Fazių skirtumo architektūrai reikalinga skaitmeninė elektronika, projektavimas irgi yra sudėtingesnis. Dėl šių priežasčių Doherty architektūra yra tinkamiausia magistro darbo užduočiai atlikti. Ji turi mažiau įgyvendinimo kliūčių, trūkumų nei kitos ir gali būti pasiektas pakankamai didelis efektyvumo lygį. Visa tai lemia šios architektūros populiarumą.

2 DOHERTY GALIOS STIPRINTUVO PROJEKTAVIMAS

Doherty galios stiprintuvo projektavimą reikia suskaidyti į kelis etapus. Išsamesnė Doherty stiprintuvo blokinė diagrama pateikta 2.1 paveiksle, iš kurio matyti, kad projektuojamas stiprintuvas susideda iš tokių pagrindinių blokų – pagrindinio stiprintuvo, pagalbinio stiprintuvo, įėjimo galios daliklio, kompensavimo linijų ir išėjimo sudėtuvo. Taigi papildomai pridėtos kompensavimo linijos stiprintuvų išėjime ir įėjime. Pagalbinio stiprintuvo išėjime esanti kompensavimo linija padeda užtikrinti didelį impedansą (kuo arčiau begalybės), kurį mato pagrindinis stiprintuvas mažos galios režime. Tuomet į šio stiprintuvo išėjimą nesklinda signalas iš pagrindinio stiprintuvo išėjimo. Pagrindinio stiprintuvo išėjime esanti kompensavimo linija padeda suderinti veikimą mažos galios režime, kuriame apkrovos impedansas yra didesnis. Šios linijos galima išvengti, jeigu suprojektuojama išėjimo suderinimo grandinė, kuri suderina veikimą tiek mažos tiek didelės galios režime su atitinkamu apkrovos dydžiu. Vis tik tokios grandinės projektavimas yra sudėtingesnis, ypač kai iš anksto nėra žinoma įėjimo galia, ties kuria bus pirmasis efektyvumo pikas. Pagalbinio stiprintuvo įėjime turėtų būti $\lambda/4$ ilgio (20 mm) linija, kuri kompensuoja impedanso inverterio ilgį. Šiuo atveju dar reikia kompensuoti išėjimo kompensavimo linijų ilgio skirtumą, bei gali tekti šios linijos ilgį pakoreguoti papildomai. Tam tikrais atvejais reikia pridėti ir fazės kompensavimą pagrindinio stiprintuvo įėjime. Kompensavimo linijų ir impedanso inverterių impedansas įprastai yra lygus $50\ \Omega$, o impedanso transformatoriaus, esančio tarp stiprintuvų išėjimų sujungimų bendro taško ir apkrovos, impedansas lygus $35\ \Omega$. Diagramoje pateikti impedansai tam tikruose grandinės taškuose mažos ir didelės galios režime atitinkamai mėlyna ir raudona spalva.



2.1 pav. Projektuojamo Doherty galios stiprintuvo blokinė diagrama

Dalį šių blokų modeliavimo metu galima sumodeliuoti atskirai ir taip supaprastinti uždavinį. Tam, kad būtų įmanoma tiksliai suprojektuoti šiuos stiprintuvus, reikia tikslių aukštadažnių tranzistorių modelių ir naudoti kompiuterinio modeliavimo programinę įrangą. Kadangi siekiama

suprojektuoti kuo mažesnei galiai, kad būtų paprasčiau atlikti matavimus, naudojami *MACOM* CMPA0530002S ir CGH40006S GaN didelio elektronų judrio tranzistorių (angl. HEMT – *high electron mobility transistor*) modeliai modeliavimui su *Keysight ADS* programine įranga. Minėtų modelių įsotinimo galios yra artimos atitinkamai 3 W ir 8 W. Projektavimo metu siekiama efektyvumo piko vieta yra 6 dB žemiau maksimalios galios, o tai reiškia, kad pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo išėjimo galia turi būti vienoda.

2.1 Pagrindinio stiprintuvo projektavimas ir dielektrinių medžiagų tyrimas

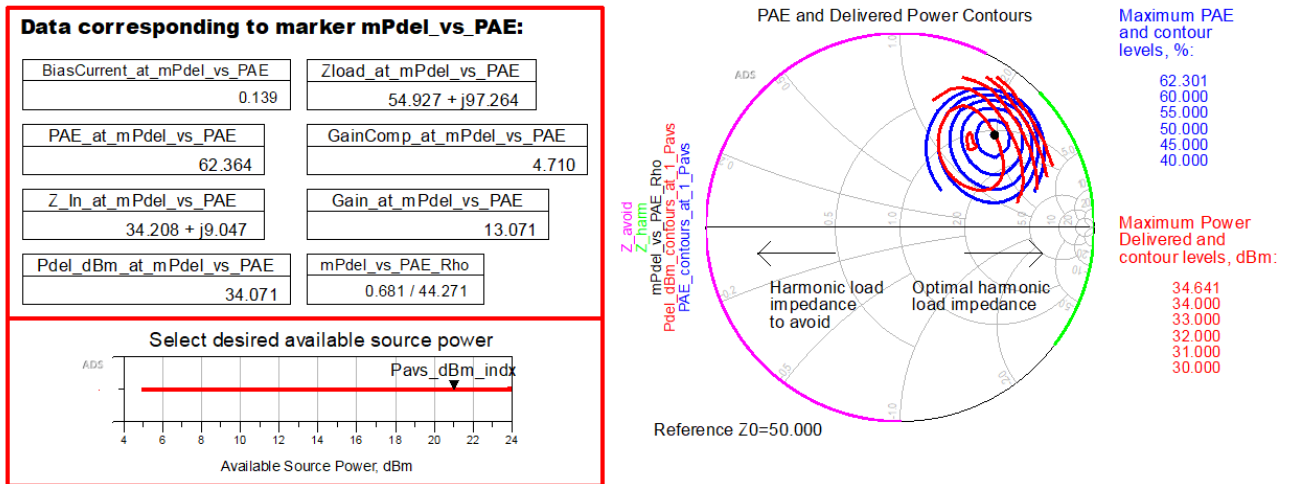
Pagrindiniam stiprintuvui naudojamas CMPA0530002S tranzistorius. Šio tranzistoriaus įėjimas jau yra suderintas, todėl pagrindinė projektavimo dalis yra sukurti tinkamą išėjimo suderinimo grandinę (2,3–2,5) GHz dažnių juostai. Šis stiprintuvas Doherty stiprintuve dažnai projektuojamas AB klasės, arti B klasės, kad galima būtų pasiekti kuo didesnę efektyvumą. Todėl šio stiprintuvo užtūros įtampa V_{GS} nustatoma virš, bet arti slenksčio įtampai (-3 V) ir yra lygi -2,7 V. Įtampa tarp santakos ir ištakos V_{DS} viso projektavimo metu nustatoma lygi 28 V, kaip rekomenduoja gamintojas.

Toliau atliekami apkrovos traukos (angl. *load pull*) modeliavimai. Apkrovos traukos metu tam tikru žingsniu keičiama apkrovos, prijungtos prie tranzistoriaus išėjimo, impedanso reali ir menama dalys. Ties kiekviena impedanso kombinacija išmatuojami arba apskaičiuojami stiprintuvo norimi parametrai. Įprastai tai yra išėjimo galia ir PAE (angl. *power-added efficiency*). PAE apskaičiuojamas taip:

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{DC}} \quad (2.1)$$

Šis parametras tiksliau įvertina stiprintuvo efektyvumą, nes apskaičiuojamas tik galios pridėjimo efektyvumas. Dalis išėjimo signalo yra tiesiog perduodama iš įėjimo, todėl ši galia neįvertinama. PAE yra visada mažesnis nei santakos efektyvumas, bet kai stiprinimas yra gana didelis (virš 13 dB) skirtumas tarp jų yra gana mažas. Kartais apskaičiuojami ir iškraipymo ar kiti parametrai. Rezultatai atvaizduojami Smito diagramoje kontūrais. Vidinė tam tikro parametro kontūro sritis reiškia, kad prijungus apkrovą, kuri patenka į šią sritį, bus gauta, pavyzdžiui, ne mažesnė nei 32 dBm išėjimo galia arba ne mažesnis nei 50 % santakos efektyvumas. Kontūro centras atitinka impedansą, su kuriuo bus gautas parametro maksimumas. Dažniausiai skirtingų parametrų kontūrai identišškai nesutampa, tačiau yra arti vienas kito ir galima siekti tam tikro parametrų kompromiso. Svarbiausia nustatyti apkrovos impedansą fundamentinei dažnio dedamajai, tačiau dažnai reikia papildomai atlikti šiuos modeliavimus su dvigubai ir trigubai didesniu dažniu, nes impedansas antrajai ar trečiajai harmonikoms irgi turi įtaką stiprintuvo efektyvumui ir stiprinimui. Įprastai kuo didesnė harmonikos eilė, tuo sunkiau jas kontroliuoti tačiau ir tuo mažesnė įtaka šiems parametrams, todėl aukštesnės nei 3 eilės harmonikos projektavimo metu nėra kontroliuojamos. Įprastai apkrova harmonikoms yra palei

Smito diagramos kraštą, o jos vertė yra arba labai maža, arba labai didelė (trumpas arba atviras jungimas). Bet kuriuo atveju tai reikštų, kad išėjimo galia nebūtų generuojama, o tai mažina ir iškraipymų lygį. Taip pat svarbu paminėti tai, kad apkrovos traukos modeliavimai atliekami ne tik centrinio dažnio taške, bet ir visame dažnių ruože, kuriame turi veikti stiprintuvas. Projektuojant suderinimo grandinę, reikia atsižvelgti į nustatytų optimalių impedansų priklausomybę nuo dažnio.



2.2 pav. Smito diagrama su pavaizduotais PAE ir išėjimo galios kontūrais, geriausia ir blogiausia harmonikų apkrovos impedanso sritimi, kai fundamentinis dažnis lygus 2,4 GHz

2.2 paveiksle pateikti apkrovos traukos su nustatytu 2,4 GHz dažniu modeliavimo rezultatai. Iš kontūrų matyti, kad galima pasiekti daugiau nei 60 % PAE esant 34 dBm išėjimo galiai ir 13 dB stiprinimui. Šie parametrai gaunami esant 21 dBm galiai stiprintuvo įėjime, kai fundamentinės dedamosios apkrovos impedansas lygus apytiksliai $55 + j97 \Omega$. Šiuo atveju ypatingai svarbu išvengti violetinės spalvos lanku pavaizduotos apkrovos impedanso srities antrajai harmonikai, nes joje efektyvumo maksimumas yra žemiau nei 55 % ir gali siekti vos 30 %. Jeigu suprojektuotos grandinės impedansas harmonikoms bus žaliu lanku pavaizduotoje impedanso srityje, efektyvumas turėtų siekti daugiau nei 60 %. Projektuojamas AB klasės stiprintuvas, artimas B klasei, todėl trečiosios harmonikos įtaka maža (B klasės stiprintuvas negeneruoja trečiosios harmonikos) ir efektyvumo skirtumas tarp žalios ir violetinės srities trečiosios harmonikos apkrovos impedansui yra apie 4 %. Vis tik modeliavimo metu atsižvelgiama ir į ją, siekiant gauti kuo geresnį efektyvumą.

Kitas etapas yra suprojektuoti stiprintuvo išėjimo suderinimo grandinę, kad pasiekti minėtus efektyvumo ir galios parametrus. Suderinimo grandinę galima projektuoti iš sutelktųjų komponentų (induktyvumo ričių ir kondensatorių) arba iš paskirstytųjų elementų (perdavimo linijos). Sutelktieji komponentai turi didesnius parazitinius parametrus, projektavimo metu prisirišama prie konkrečių komponentų verčių ir reikia atsižvelgti į komponentų maksimalią leistiną srovę bei jų paklaidą. Taip pat kuo didesnis dažnis, tuo sudėtingiau suprojektuoti grandinę naudojant tokius komponentus, nes parazitinių reiškinių įtaka smarkiai išauga. Be to, pačių jungiamųjų takelių tarp komponentų įtaka

aukštuose dažniuose irgi tampa labai reikšminga. Naudojant paskirstytų elementų grandinės išvengiama minėtų trūkumų ir galima suprojektuoti tikslesnę grandinę. Taip yra todėl, kad modeliavimo metu įvertinamos visa grandinės konstrukcija, parazitiniai reiškiniai, taip pat yra parametrų paderinimo galimybė, todėl suderinimo grandinė projektuojama iš paskirstytų elementų. Kita vertus, projektavimo su paskirstytais elementais tikslumas priklauso nuo naudojamo dielektriko parametrų – dielektrinės skvarbos ir nuostolių. Tai yra vienas iš pagrindinių trūkumų, nes geresnių, stabilesnių parametrų medžiagos yra daug brangesnės už įprastai naudojamą FR4 dielektriką. Kitas trūkumas yra tas, kad tokios grandinės dažniausiai užima didesnę plotą. Dar vienas trūkumas – projektuoti tokias grandines reikia arba labai gerų matematinių formulių ir skaičiuotuvų, arba naudoti modeliavimo programinę įrangą su tiksliais paskirstytų elementų modeliais.

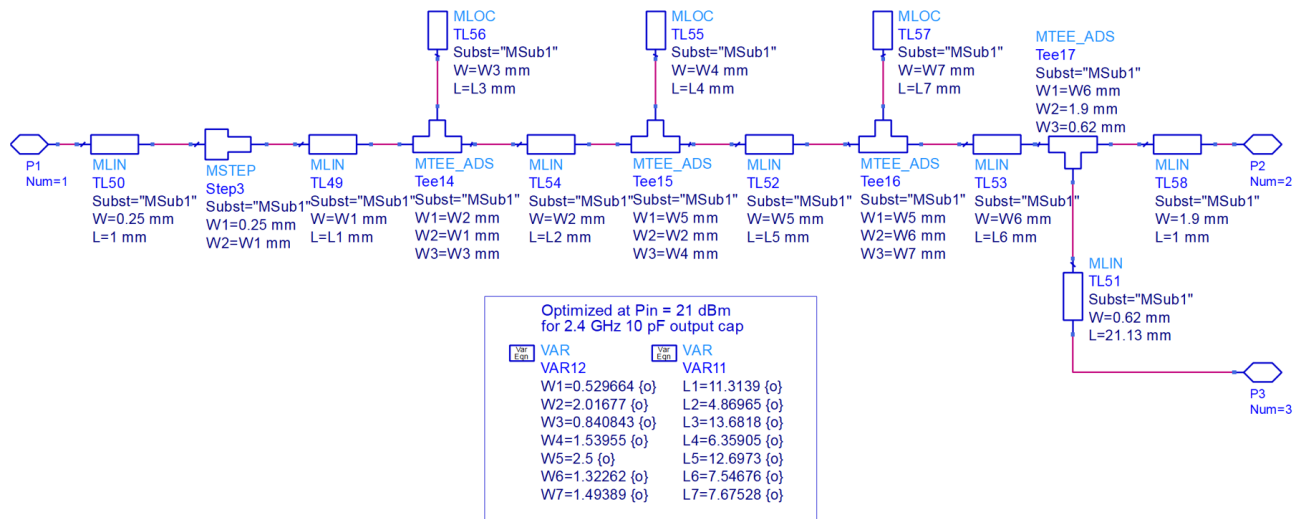
Pagrindinio stiprintuvo suderinimo grandinės modeliavimo metu palyginamos dvi dielektrinės medžiagos ir siekiama nustatyti skirtumą tarp jų ir kuri yra geresnė stiprintuvų projektavimui. Pirmoji yra FR4 medžiaga, kuri naudojama įprastoms spausdintinėms plokštėms. Ji yra nebrangi, tačiau ją naudoti aukštadažniams grandynams virš 2 GHz nepatartina. Svarbiausi trūkumai yra gana dideli nuostoliai (nuostolių koeficientas $\geq 0,015$) ir dielektrinė skvarba, kuri įprastai specifikacijose nurodoma lygi apie 4,6, tačiau priklauso nuo medžiagos pagaminimo kokybės ir signalo dažnio. Antroji yra brangesnė, aukštiems dažniams skirta PTFE medžiaga, kuria siūlo Kinijos *JLPCB* gamintojas. Tai yra ZYF300CA-C dielektrikas, kuris palyginus su FR4 turi apie 10 kartų mažesnius nuostolius (nuostolių koeficientas lygus 0,0016) ir stabilesnę dielektrinę skvarbą, lygią 2,94 esant 10 GHz dažniui. Šiuos dielektrikus palyginti galima suprojektavus panašios struktūros suderinimo grandines, kurios suderina 50 Ω apkrovą su apkrovos traukos modeliavimo metu nustatytais optimaliais impedansais.

Suderinimo grandinių projektavimas pradedamas nuo grandinės konstrukcijos parinkimo. Iš programinėje įrangoje turimų perdavimo linijų komponentų sudaroma trijų kilpų grandinė, kuri pavaizduota 2.3 paveiksle. Ši konstrukcija paremta tuo, kad įprastai iš pradžių suderinami impedansai harmonikoms panaudojus kelias kilpas, o galutinė grandinės dalis suderina impedansą fundamentiniam dažniui. Šis projektavimo būdas labiau tinka tik pradiniais parametrams surasti, galutinė grandinės struktūra turi būti optimizuota. Kad paspartinti projektavimą, iš karto pereinama prie optimizavimo parinkus atsitiktinius pradinius ilgius ir pločius.

Šioje grandinėje prie P1 jungties prijungiamas tranzistoriaus išėjimas, o prie P2 prijungiamas aukštų dažnių grandinėms skirtas *KYOCERA AVX* gamintojo 600S100JT250 10 pF kondensatoriaus modelis, kuris toliau sujungiamas su 50 Ω apkrova. Tokio modelio naudojimas projektavimo metu yra labai svarbus, nes jis įvertina kondensatoriaus vidinius elementus, kurie turi induktyvumo ir realios varžos dalis, o taip pat ir talpos priklausomybę nuo dažnio. Šis kondensatorius bus naudojamas šio darbo projektavimo dalyje tiek išėjimo grandinėse, tiek ir stiprintuvo įėjimo dalyje tam, kad

praleisti aukštų dažnių signalą, bet blokuoti nuolatinę srovę. Prie P3 panaudojus $\lambda/4$ (20 mm) ilgio mikrojuostelinę liniją prijungiamas įtampos šaltinis su V_{DS} įtampa. Nuolatinei srovei toks sujungimas yra kaip trumpas jungimas, taigi srovė iš įtampos šaltinio teką į stiprintuvą. Linijos gale, kur prijungiamas įtampos šaltinis, taip pat prijungiami kondensatoriai tarp signalo linijos ir įžeminimo. Aukštų dažnių signalams tai būtų trumpas jungimas į įžeminimą, tačiau dėl $\lambda/4$ linijos šis trumpas jungimas yra transformuojamas į atvirą jungimą. Taigi šios linijos paskirtis yra panaši į induktyvumo ritės – praleisti nuolatinę srovę, bet blokuoti aukštų dažnių signalus.

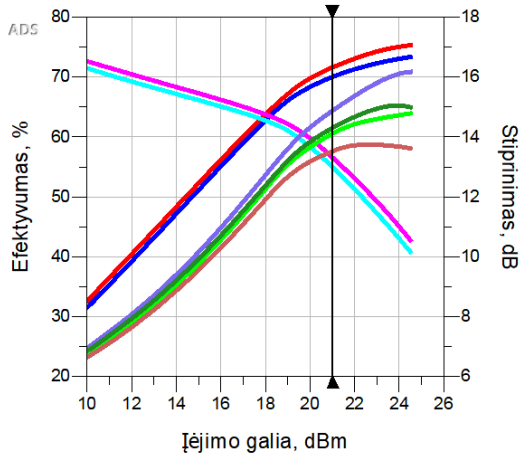
Projektavimo metu sukuriamas optimizavimo valdiklis, kuris atlieka harmonikų balanso (angl. *harmonic balance*) modeliavimus, automatiškai varijuoja takelių ilgius, pločius ir nustato geriausia jų kombinaciją, kuriai esant patenkinami nustatyti reikalavimai. Šie reikalavimai yra nemažesnė nei 34 dBm išėjimo galia ir didesnis nei 60 % efektyvumas. Grandinės su PTFE dielektriku rezultatas pavaizduotas 2.3 paveiksle. tokia pat eiga sukurama ir grandinė su FR4 dielektriku.



2.3 pav. Stiprintuvo išėjimo suderinimo grandinės konstrukcijos schema

Galiausiai modeliavimų rezultatai palyginami 2.4 paveiksle. Iš parametrų priklausomybės nuo įėjimo galios matyti, kad esant 21 dBm įėjimo galiai PTFE varianto stiprinimas yra apie 0,3 dB didesnis ir pasiekiamas 3,8 % didesnis efektyvumas. Šis skirtumas iš viso padidėja iki 7 % esant dar didesnei įėjimo galiai. Priklausomybės nuo dažnio grafike matyti, kad (2,3–2,5) GHz dažnių ruože PTFE grandinė turi stabilesnį ir iki 4 % didesnę efektyvumą.

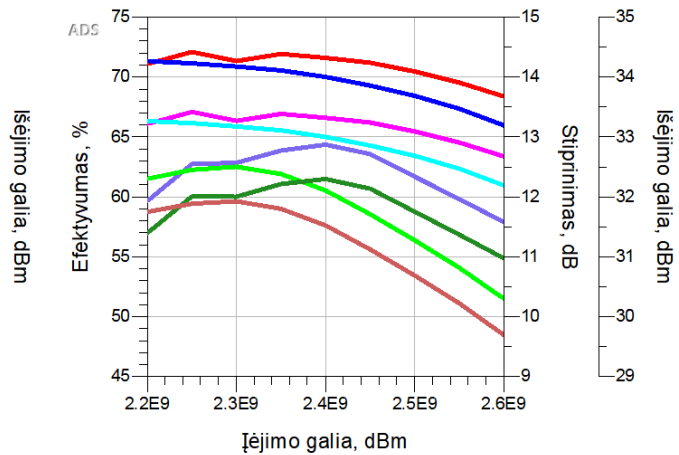
Priklausomybė nuo įėjimo galios, kai dažnis lygus 2,4 GHz



Pavs_dBm=21.000
Isejimo_galia_PTFE=34.317
Isejimo_galia_FR4=33.999
Stiprinimas_PTFE=13.317
Stiprinimas_FR4=12.999
Santakos_efekt_PTFE=64.354
Santakos_efekt_FR4=60.522
PAE_PTFE=61.478
PAE_FR4=57.601

a)

Priklausomybė nuo dažnio, kai įėjimo galia lygi 21 dBm

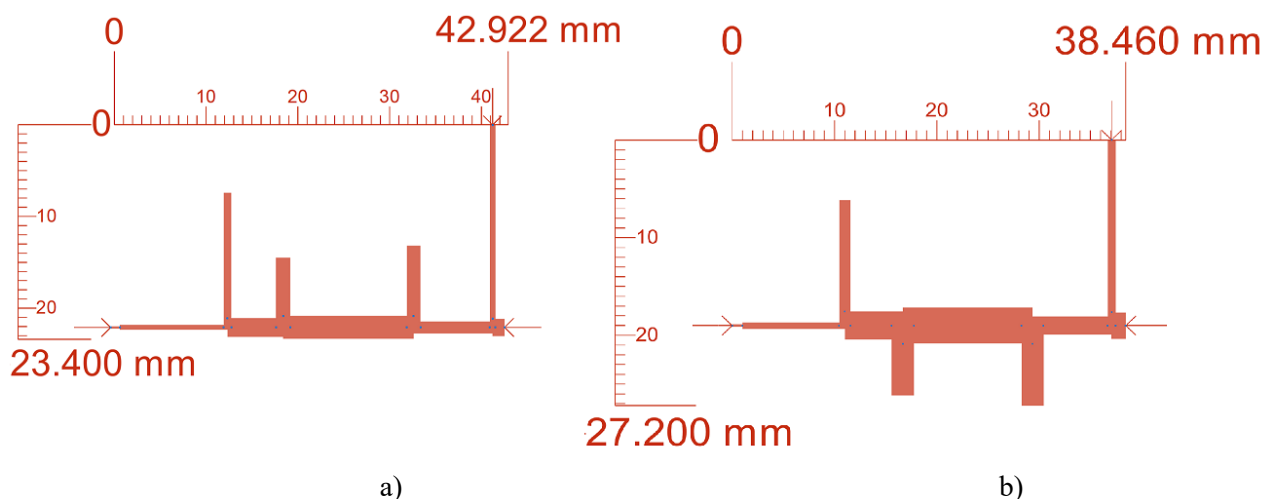


Isejimo_galia_FR4	—	Isejimo_galia_PTFE	—
Stiprinimas_FR4	—	Stiprinimas_PTFE	—
Santakos_efekt_FR4	—	Santakos_efekt_PTFE	—
PAE_FR4	—	PAE_PTFE	—

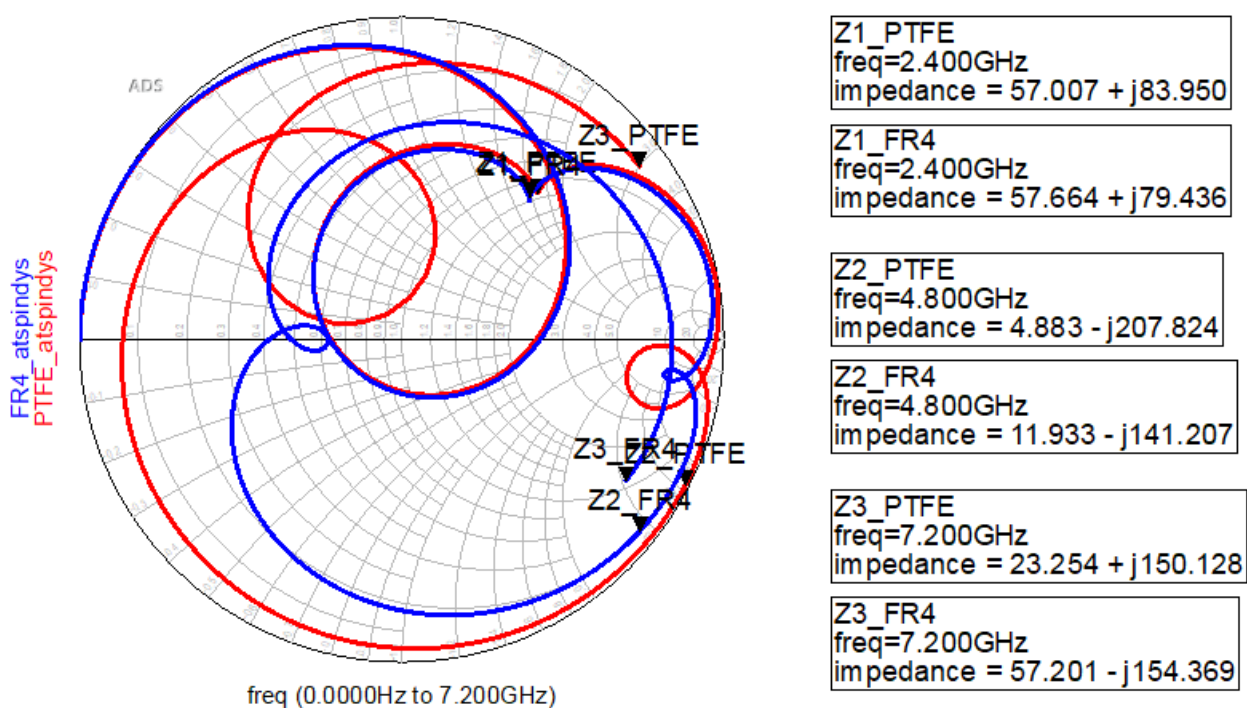
b)

2.4 pav. Sumodeliuota pagrindinių stiprintuvų su suprojektuotų išėjimo grandinių schemas modeliais parametrų priklausomybė a) nuo įėjimo galios; b) nuo dažnio

Nors iš atliktų modeliavimų matyti, kad PTFE grandinė yra pranašesnė, galutinį sprendimą, kurį dielektriką geriau naudoti stiprintuvo gaminimo metu, reikia priimti atlikus išsamiausią modeliavimą. Tai reiškia, kad šios grandinės turi būti konvertuojamos į fizinio išdėstymo iš mikrojuostelių pavidalą ir sukurtas konstrukcijos elektromagnetinis modelis. Šio modelio sukūrimas ir atnaujinimas užtrunka daug ilgiau negu schematinio, tačiau šis modelis daug tiksliau įvertina pačią grandinę, jos išdėstymą, parazitines talpas, ir simuliacijos rezultatai su šiuo modeliu turėtų būti arčiau tikrovės. Dėl šių priežasčių šis projektavimo etapas yra paskutinis. Toliau šis modelis naudojamas harmonikų balanso simuliacijose kaip ir anksčiau. Suprojektuotų grandinių fizinis išdėstymas pavaizduotas 2.5 paveiksle. Kadangi FR4 medžiagos dielektrinės skvarbos vertė palyginus su PTFE yra didesnė ir dielektriko storis dvigubai didesnis, tą patį impedansą ir elektrinį ilgį atitinkantys mikrojuosteliniai takeliai yra platesni ir trumpesni. Taip pat iš Smito diagramos pateiktos 2.6 paveiksle matyti, kad abiejų grandinių impedansas tiek fundamentinei dedamajai (Z_1) tiek harmonikoms (Z_2 ir Z_3) yra artimas tiems impedansams, kurie buvo nustatyti apkrovos traukos metu.



2.5 pav. Pagrindinio stiprintuvo išėjimo grandinės fizinis išdėstymas su a) PTFE dielektriku; b) FR4 dielektriku

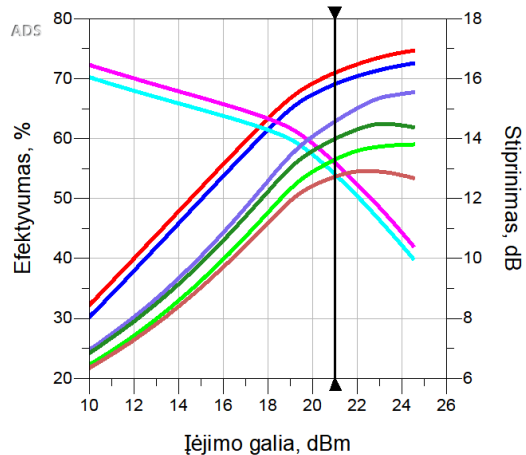


2.6 pav. PTFE ir FR4 grandinių atspindžio S parametrai Smito diagramoje

Paskutinis skirtingų dielektrikų tyrimo etapas yra palyginti šių stiprintuvų veikimą prijungus suprojektuotų grandinių elektromagnetinius modelius tarp stiprintuvo išėjimo ir apkrovos. Stiprinimo ir efektyvumo rezultatai pateikti 2.7 paveiksle, iš kurio matyti, kad PTFE grandinė turi iki 0,5 dB didesnę stiprinimą, o santakos efektyvumo pranašumas siekia 5,2 % esant 21 dBm įėjimo galiai. Šis pranašumas akivaizdus ir žemesnėje galioje. (2,3–2,5) GHz dažnių ruože PTFE grandinės efektyvumo pranašumas yra tarp 5,2 % ir 7 %. Taip pat galima pastebėti tai, kad efektyvumo skirtumas tarp PTFE grandinės schematinio ir elektromagnetinio modelio yra mažesnis nei FR4 grandinės. PTFE grandinės efektyvumas sumažėjo 1,5 %, o FR4 grandinės efektyvumas sumažėjo apie 4 %. Taigi iš šių rezultatų galima daryti išvadą, kad PTFE dielektrinė medžiaga turi mažesnius

nuostolius nei FR4 medžiaga ir dėl to labiau tinka efektyvių stiprintuvų projektavimui. Dėl šios priežasties ir dėl to, kad yra rizika gauti spausdintinę plokštę, kurios gaminimo metu nebūtinai bus naudojama tokių parametrų FR4 medžiaga, nuspręsta likusių Doherty stiprintuvo dalių projektavimui naudoti brangesnę, tačiau mažiau nuostolingą PTFE medžiagą.

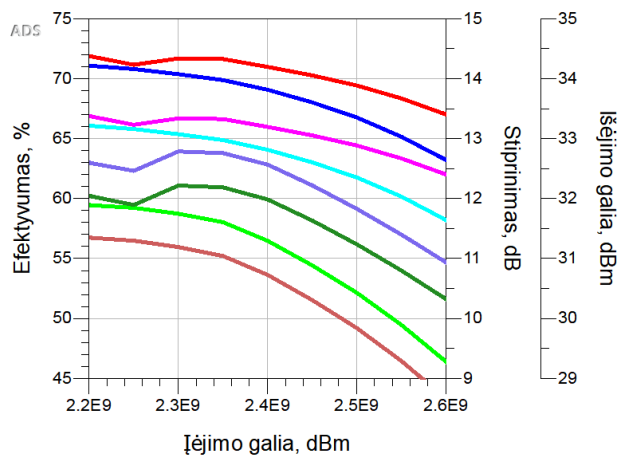
Priklausomybė nuo įėjimo galios, kai dažnis lygus 2,4 GHz



Pavs_dBm=21.000
Isejimo_galia_PTFE=34.193
Isejimo_galia_FR4=33.812
Stiprinimas_PTFE=13.193
Stiprinimas_FR4=12.812
Santakos_efekt_PTFE=62.827
Santakos_efekt_FR4=56.473
PAE_PTFE=59.923
PAE_FR4=53.624

a)

Priklausomybė nuo dažnio, kai įėjimo galia lygi 21 dBm



Isejimo_galia_FR4		Isejimo_galia_PTFE	
Stiprinimas_FR4		Stiprinimas_PTFE	
Santakos_efekt_FR4		Santakos_efekt_PTFE	
PAE_FR4		PAE_PTFE	

b)

2.7 pav. Sumodeliuota pagrindinių stiprintuvų su suprojektuotų išėjimo grandinių elektromagnetiniais modeliais parametrų priklausomybė a) nuo įėjimo galios; b) nuo dažnio

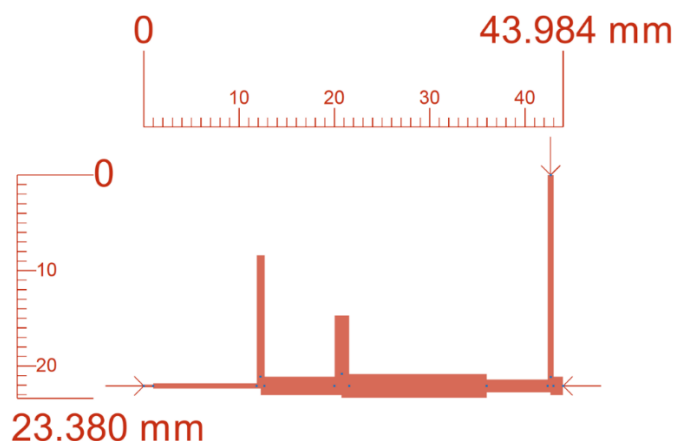
2.2 Pagalbinio stiprintuvo projektavimas ir skirtingų tranzistorių tyrimas

Pagalbinį stiprintuvą reikia suprojektuoti tokiai pat išėjimo galiai kaip ir pagrindinio, jeigu norima gauti pirmąjį efektyvumo piką 6 dB žemiau maksimalios galios. Be to, reikia projektuoti stiprintuvą C klasės, kad jis įsijungtų tik virš tam tikros įėjimo signalo ribos. Tokį stiprintuvą galima projektuoti naudojant tą patį tranzistorių kaip ir pagrindinį, tačiau gali reikėti į jį paduoti daugiau galios naudojant specialų galios daliklį, nes C klasės stiprinimas yra mažesnis. Kitas būdas yra šį stiprintuvą suprojektuoti tai pačiai įėjimo galiai panaudojus kitą tranzistorių, kurio stiprinimas didesnis. Tai galimai padėtų pasiekti ir geresnę efektyvumo charakteristiką. Šio darbo metu suprojektuojami abu variantai ir palyginami tiek tarpusavyje, tiek ir sujungus į Doherty stiprintuvą.

2.2.1 Pagalbinio stiprintuvo su CMPA0530002S tranzistoriumi projektavimas

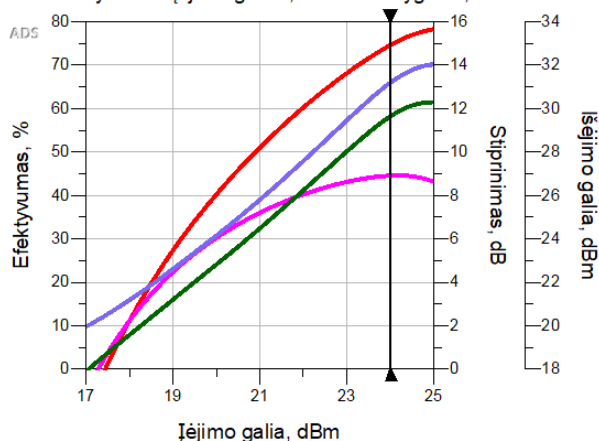
Pirmiausia suprojektuojamas stiprintuvas su tokiu pačiu tranzistoriumi kaip ir pagrindiniame stiprintuve tai pačiai dažnių juostai. Šio stiprintuvo projektavimo eiga panaši į pagrindinio. Modeliavimo metu tenka padidinti įėjimo galią, kad gauti išėjimo galią artimą pagrindinio

stiprintuvo. Apkrovos traukos metu nustatyta, kad su 24 dBm įėjimo galia ir V_{GS} įtampa lygia -4,5 V, gaunama 33 dBm išėjimo galia, o optimalaus apkrovos impedanso sritis yra labai artima AB klasės sričiai. Dėl šios priežasties galima naudoti panašią arba net identišką suderinimo grandinę, kaip ir pagrindinio stiprintuvo. Vis tik modeliavimo metu nustatyta, kad turima suderinimo grandinė nėra tinkamiausia pagalbiniam stiprintuvui, todėl ji buvo iš naujo optimizuota sukūrus specialų optimizavimo valdiklį. Optimizavimo metu siunčiamas 24 dBm galios signalas į įėjimą ir siekiama gauti kuo geresnes charakteristikas su modifikuota suderinimo grandine. Gautos suderinimo grandinės fizinis išdėstymas pavaizduotas 2.8 paveiksle.



2.8 pav. Pagalbinio stiprintuvo su CMPA0530002S tranzistoriumi išėjimo suderinimo grandinės fizinis išdėstymas

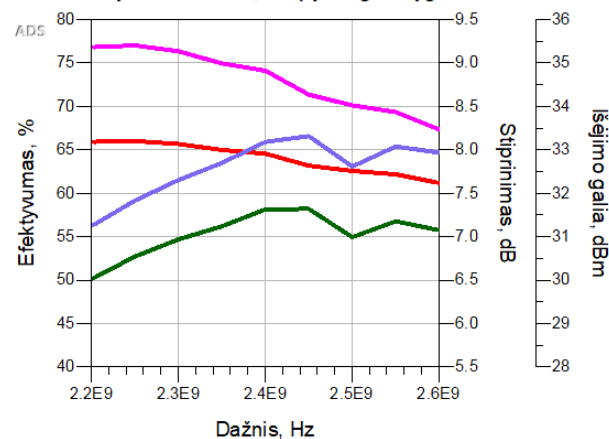
Priklausomybė nuo įėjimo galios, kai dažnis lygus 2,4 GHz



Pavs_dBm=24.000
Isejimo_galia_2W_b=32.908
Stiprinimas_2W_b=8.908
Santakos_efekt_2W_b=65.881
PAE_2W_b=58.140

a)

Priklausomybė nuo dažnio, kai įėjimo galia lygi 24 dBm



Isejimo_galia_2W — red
Stiprinimas_2W — magenta
Santakos_efekt_2W — blue
PAE_2W — green

b)

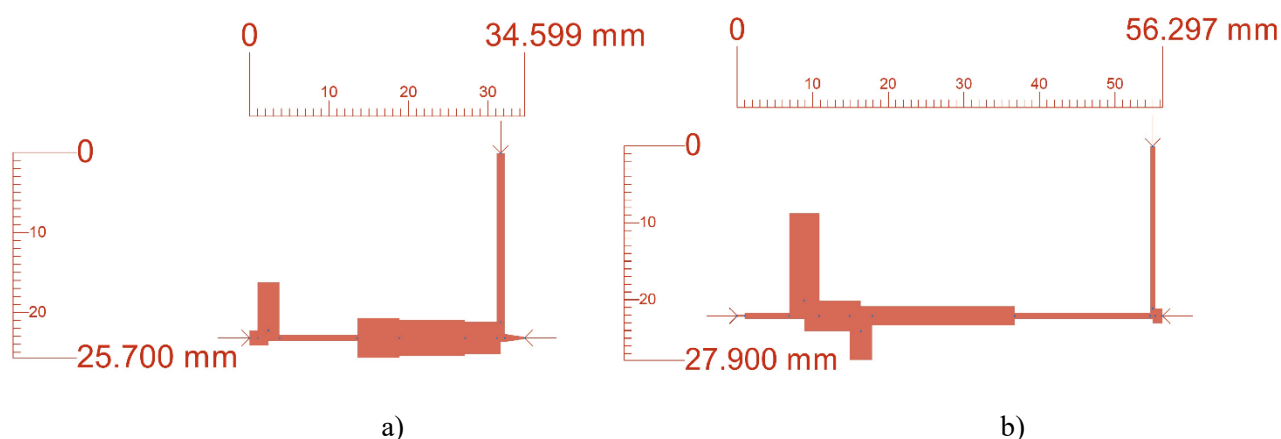
2.9 pav. Sumodeliuota pagalbinio stiprintuvo su CMPA0530002S tranzistoriumi parametų priklausomybė
a) nuo įėjimo galios; b) nuo dažnio

Modeliavimo su fizinio išdėstymo elektromagnetinių laukų modeliu charakteristikos pavaizduotos 2.9 paveiksle. Iš šio paveikslo matyti, kad esant 24 dBm įėjimo galiai, išėjimo galia lygi 32,9 dBm, stiprinimas lygus 8,9 dB o santakos efektyvumas siekia 65,8 %. Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad PAE yra pastebimai mažesnis, lygus 58,1 %, nes šio stiprintuvo stiprinimas yra mažesnis. (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje stiprinimas kinta tarp 8,5 dB ir 9,1 dB, bet visame ruože efektyvumas yra virš 61 % ir siekia iki 66 %, o PAE yra tarp 55 % ir 58,1 %.

Šis pagalbinio stiprintuvo variantas turi svarbų trūkumą. Išėjimo galia prie 24 dBm įėjimo galios yra 1 dBm žemesnė už pagrindinio stiprintuvo išėjimo galią. Šį skirtumą galima sumažinti padavus į šį stiprintuvą dar daugiau galios naudojant specialų galios daliklį, arba pakoreguoti pagrindinio stiprintuvo veikimą taip, kad jo išėjimo galia būtų mažesnė, tačiau pastarasis variantas nėra pageidautinas.

2.2.2 Pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi projektavimas

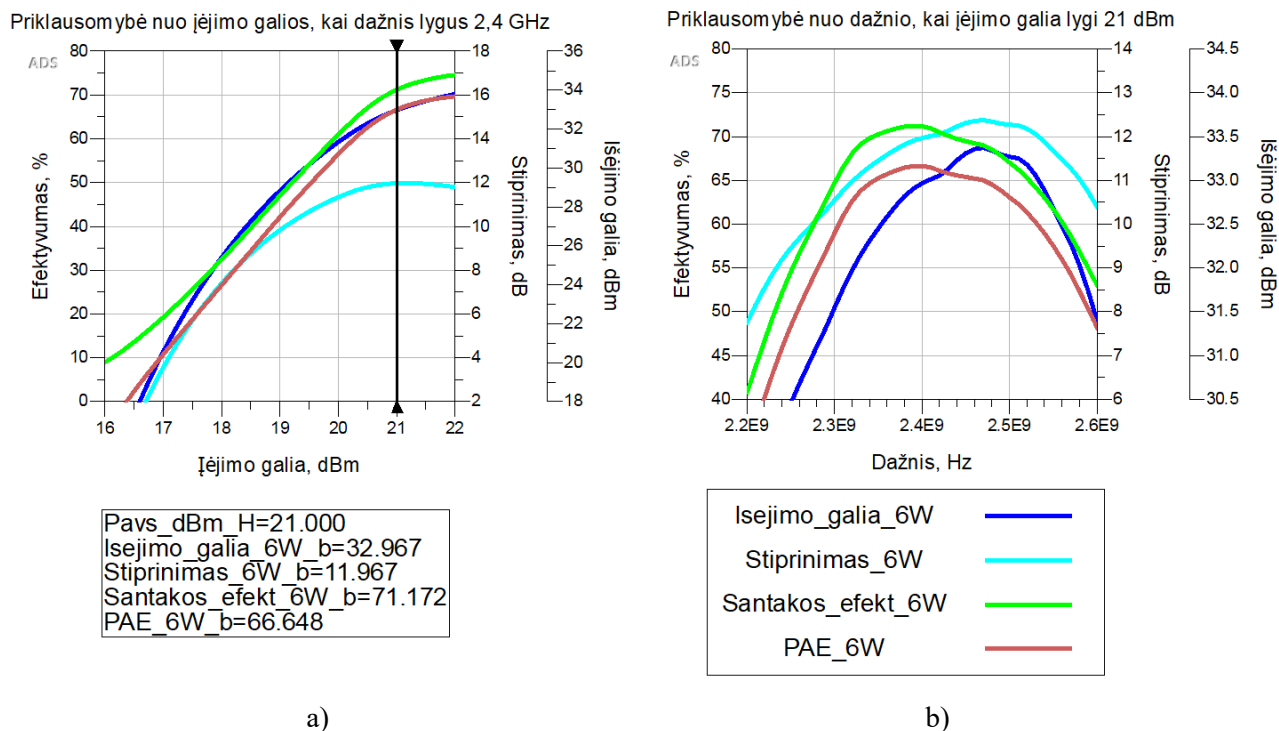
Antrasis pagalbinis stiprintuvo variantas projektuojamas su CGH40006S tranzistoriumi. Palyginus su CMPA0530002S variantu, šiam stiprintuvui suprojektuoti reikia tiek įėjimo, tiek ir išėjimo suderinimo, todėl projektavimas yra sudėtingesnis. Kita vertus, tai praplečia projektavimo galimybes. Apkrovos traukos metu nustatyta, kad esant 21 dBm įėjimo galiai ir V_{GS} įtampa lygia -5,7 V pasiekiamas 13 dB stiprinimas ir 66 % PAE, kai impedansas fundamentinei dedamajai yra apie $12 + j40 \Omega$, o antrajai ir trečiajai harmonikai impedansai artimi atviram jungimui. Taip pat nustatyta, kad įėjimo impedansas turi būti apie 10Ω . Išėjimo suderinimo grandinės tipas gali būti panašus į praeitų stiprintuvų grandines.



2.10 pav. Pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi a) įėjimo suderinimo grandinė; b) išėjimo suderinimo grandinė

Šiam stiprintuvui suprojektuojama įėjimo ir išėjimo suderinimo grandinės, kurių galutinis išdėstymas pavaizduotos atitinkamai 2.10 a) ir 2.10 b) paveiksle. Jos suprojektuotos sukūrus naują optimizavimo valdiklį, kuriuo siekta gauti kuo geresnes charakteristikas (2,3–2,5) GHz dažnių ruože

esant 21 dBm įėjimo galiai. Projektavimo metu ieškoma geriausios įėjimo ir išėjimo suderinimo grandinės takelių ilgių ir pločių kombinacijos, tačiau pasitaikė įvairių kliūčių. Pirmiausia, šio tranzistoriaus modelis skiriasi nuo CMPA0530002S ir ties tam tikrais dažniais programinė negalėjo apskaičiuoti harmonikų balanso sprendinių ir nutraukdavo optimizavimo procesą. Tuomet reikia pakoreguoti pradinius grandinių ilgius ar struktūrą ir bandyti iš naujo. Toks projektavimas užtruko ir galiausiai nebuvo pasiektas toks geras rezultatas, kokio buvo tikimasi.



2.11 pav. Pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi parametų priklausomybė a) nuo įėjimo galios; b) nuo dažnio

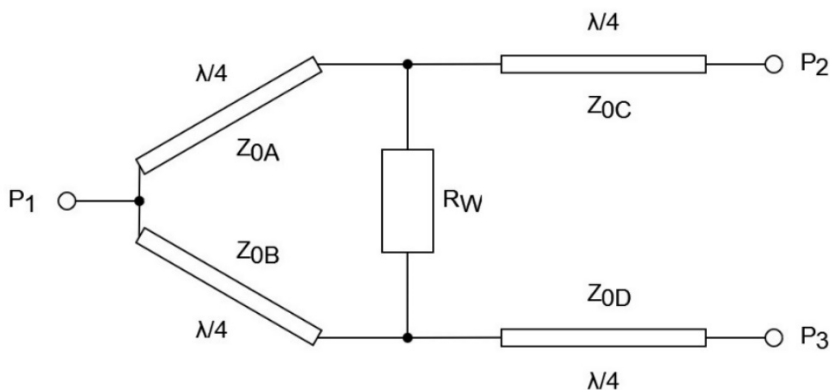
Ties centriniu 2,4 GHz dažniu parametų priklausomybė nuo įėjimo galios pateikta 2.11 pav. a), iš kurio matyti, kad stiprintuvas įsijungia esant apytiksliai (16,5–17) dBm įėjimo galiai, o ją padidinus iki 21 dBm pasiekiamas 12 dB stiprinimas su 71 % santakos efektyvumu. Taip pat galutinis rezultatas nėra pakankamai plačiajuostis, kaip matyti iš charakteristikų pateiktų 2.11 pav. b). (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje gautas didelis santakos efektyvumas, viršijantis 64 %, tačiau stiprinimo charakteristika yra netolygi, todėl išėjimo galia yra tarp 31,5 dBm ir 33,3 dBm. Šis netolygumas gali pasireikšti ir Doherty stiprintuve.

Tiek stiprintuvo su CMPA0530002S, tiek su CGH40006S tranzistoriumi efektyvumas (2,3–2,5) GHz dažnių ruože yra didelis ir viršija 60 %, tačiau variantas su CGH40006S tranzistoriumi pasiekia iki 5 % didesnę santakos efektyvumą. Taip pat šis variantas pasiekia išėjimo galią artimą pagrindinio stiprintuvo (~33 dBm) esant vienodai įėjimo galiai (21 dBm). CMPA0530002S tranzistoriaus variantui reikia 24 dBm įėjimo galios, kad būtų pasiekta 33 dBm išėjimo galia. Taigi pastarojo stiprintuvo efektyvumas ir stiprinimas yra mažesni, tačiau jo parametrai reikiamame dažnių

ruože yra labiau tolygūs. Vis tik spręsti kurį stiprintuvą naudoti Doherty stiprintuvui dar anksti. Galima suprojektuoti Doherty stiprintuvą tiek su pirmuoju, tiek su antruoju pagalbiniu stiprintuvu ir juos palyginti.

2.3 Wilkinson galios daliklių projektavimas

Suprojektavus pagrindinį ir pagalbinį stiprintuvą, lieka suprojektuoti likusias Doherty stiprintuvo dalis. Tai yra įėjimo galios daliklis, išėjimo grandinė ir kompensavimo linijos. Iš šių dalių galima atskirai suprojektuoti tik įėjimo galios daliklį, o toliau visos stiprintuvo dalys sujungiamos bendrai ir ieškoma tinkamo kompensavimo linijų ilgio. Pradedama nuo Wilkinson galios daliklio projektavimo. Jo topologija pavaizduota 2.12 paveiksle. Iš 2.1 ir 2.2 poskyrių yra žinoma, kad pagrindiniam stiprintuvui reikia 21 dBm įėjimo galios, o CMPA0530002S pagalbiniam stiprintuvui 24 dBm. Prie šių galių jų išėjimo galia yra panaši, ir tuomet Doherty stiprintuvo pirmasis efektyvumo pikas turėtų būti apie 6 dB žemiau maksimalios galios. Skirtingą įėjimo galią stiprintuvų įėjimuose galima pasiekti naudojant nesimetrinį (nevienodo dalinimo koeficiento) daliklį. Doherty stiprintuvo variantui su CGH40006S tranzistoriumi reikalinga vienoda įėjimo galia tiek pagrindiniame tiek pagalbiniame stiprintuve, todėl dar reikia suprojektuoti simetrinį (vienodo dalinimo koeficiento) galios daliklį.



2.12 pav. Wilkinson galios daliklio topologija

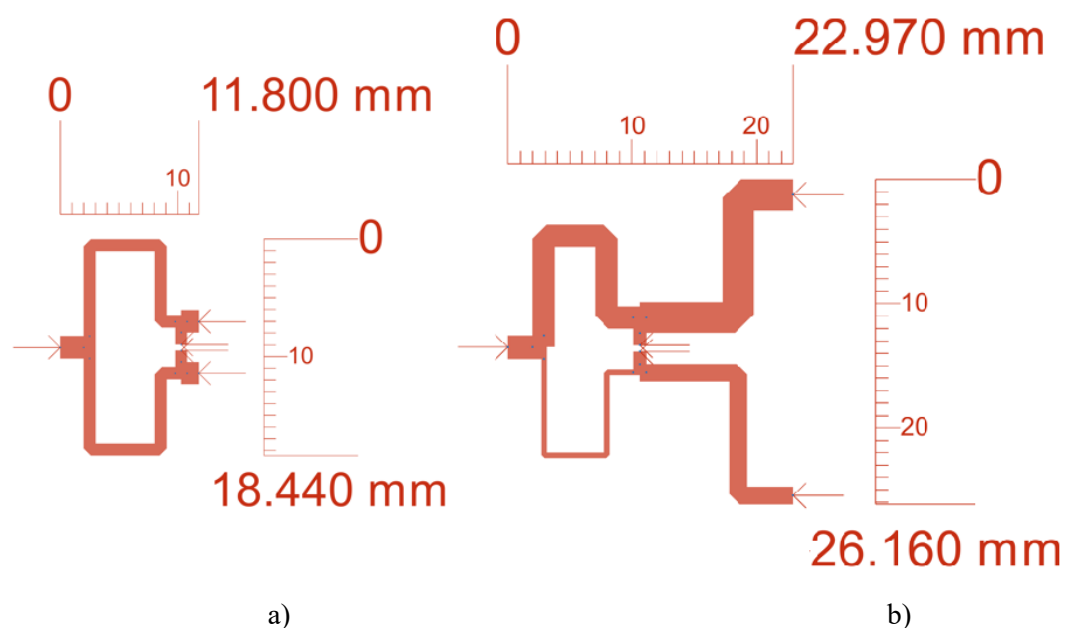
Jei projektuojama nevienodo dalinimo koeficiento daliklis, tuomet visos ketvirčio bangos ilgio linijos turės skirtingą impedansą. Iš pradžių parenkamas galios dalinimo santykis $K^2 = P3/P2$. Tuomet apskaičiuojami linijų impedansai:

$$Z_{0B} = Z_0 \sqrt{\frac{1 + K^2}{K^3}}, \quad (2.2)$$

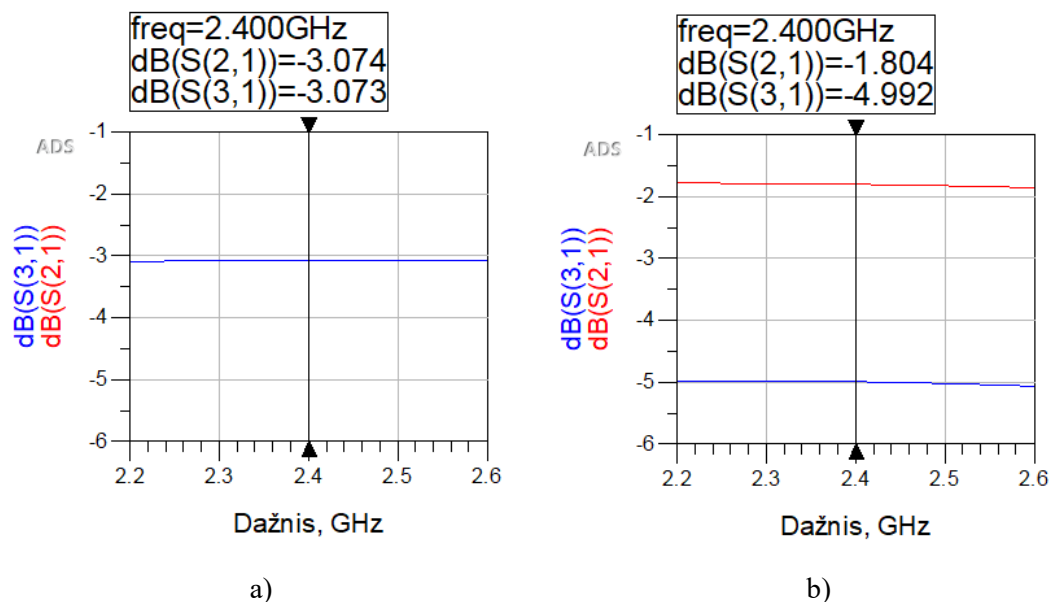
$$Z_{0A} = K^2 Z_{0B} = Z_0 \sqrt{K(1 + K^2)}, \quad (2.3)$$

$$R_W = Z_0 \left(K + \frac{1}{K} \right). \quad (2.4)$$

Įprastai $Z_0 = 50 \, \Omega$, o P2 ir P3 išėjimai atitinkamai suderinami su $Z_0 K$ ir Z_0/K impedansu, taigi reikia dar pridėti papildomas ketvirčio bangos ilgio linijas (impedanso transformatorius), kad suderinti išėjimus su $50 \, \Omega$. Čia labai svarbu paminėti tai, kad jeigu galių santykis yra gana didelis, tuomet viena šaka turės didelio impedanso liniją o kita mažo impedanso liniją. Didelio impedanso (virš $100 \, \Omega$) gamyba sudėtinga, nes tai atitinka siaurą takelį. Labai mažo impedanso (mažiau už $30 \, \Omega$) linijos irgi retai naudojamos, nes jos gali būti labai plačios. Dėl šių priežasčių Wilkinson galios daliklyje galių santykis negali būti labai didelis, tokiems atvejams naudojami specialūs dalikliai. Kai projektuojamas vienodo dalinimo koeficiento daliklis, Z_{0A} ir Z_{0B} linijos turi vienodą impedansą, lygų $\sqrt{2}Z_0$ ir tada Z_{0A} ir Z_{0B} impedansas lygus $70,7 \, \Omega$. Taip pat šiuo atveju Z_{0C} ir Z_{0D} linijos yra nereikalingos, nes išėjimai jau yra suderinti su $50 \, \Omega$. Taigi vienodo dalinimo koeficiento Wilkinson galios daliklis užima mažiau ploto.



2.13 pav. a) Simetrinio Wilkinson galios daliklio išdėstymas; b) nesimetrinio Wilkinson galios daliklio išdėstymas



2.14 pav. Sumodeliuota a) simetrinio Wilkinson galios daliklio perdavimo charakteristika; b) nesimetrinio Wilkinson galios daliklio perdavimo charakteristika

Suprojektuoti du Wilkinson galios dalikliai pavaizduoti 2.13 paveiksle. Iš šio paveikslo akivaizdu, kad vienodo dalinimo koeficiento daliklis užima mažiau ploto. Taip pat 2.14 paveiksle pateiktos jų perdavimo dažninės charakteristikos, iš kurių matyti, kad jie veikia taip, kaip ir buvo numatyta – 2.14 pav. a) yra vienodi perdavimo koeficientai (S_{21} ir S_{31}), o 2.14 pav. b) gautas apie 3,2 dB skirtumas tarp jų.

2.4 Doherty stiprintuvo projektavimas

Visos Doherty stiprintuvo dalys, kurias galima buvo suprojektuoti atskirai, jau yra suprojektuotos. Kitas projektavimo etapas yra šių dalių elektromagnetinių modelių sujungimas pagal 2.1 paveiksle pateiktą blokinę diagramą. Lieka nustatyti tinkamus kompensavimo linijų ilgius, taigi tai yra pagrindinė Doherty stiprintuvo projektavimo užduotis. Šiame etape yra sudėtinga sukurti specialius optimizavimo valdiklius, todėl geriausio veikimo ieškoma tiesiog tam tikru žingsniu keičiant kompensavimo linijų ilgius ir stebint efektyvumo ir stiprinimo charakteristikų pokytį.

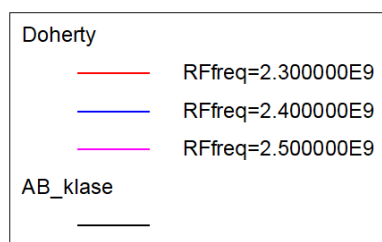
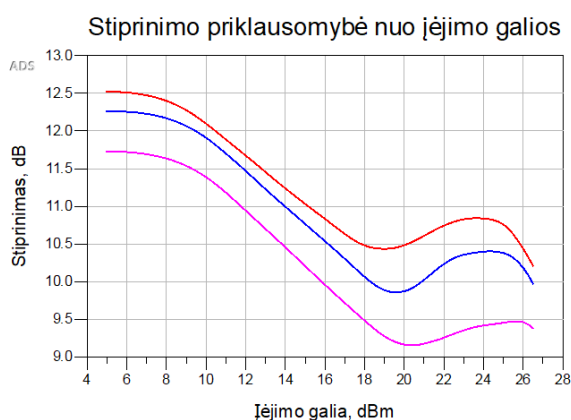
2.4.1 Doherty stiprintuvo su CMPA0530002S pagalbinio stiprintuvo projektavimas

Doherty stiprintuvas su nesimetriniu Wilkinson galios dalikliu

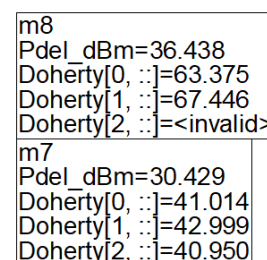
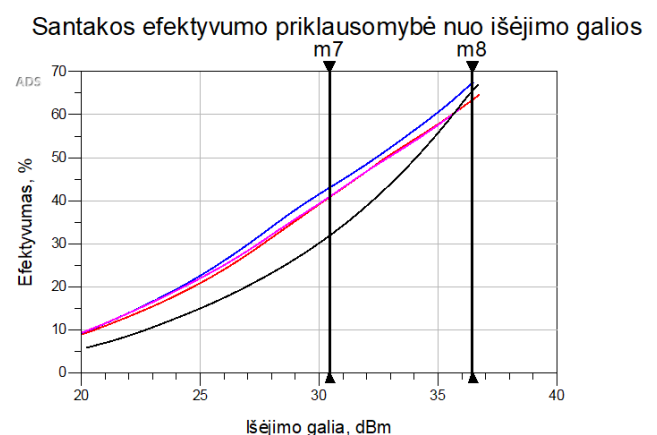
Pirmiausia projektuojamas Doherty galios stiprintuvas su tais stiprintuvais, kuriems projektuoti buvo naudotas CMPA0530002S tranzistorius. Nustatyta, kad pagrindinio stiprintuvo išėjimo kompensavimo linijos ilgis turi būti 17,5 mm, o pagalbinio stiprintuvo 23 mm. Idealiu atveju pagalbinio stiprintuvo įėjime kompensavimo linijos ilgis būtų apie $20 \text{ mm} + 17,5 \text{ mm} - 23 \text{ mm} = 14,5 \text{ mm}$. Vis tik modeliavimų metu nustatyta, kad šią liniją reikia patrumpinti. Tai galėtų būti

skirtingų tranzistorių klasių veikimo ir kitų skirtumų kompensavimas, kad reikiamuose dažniuose veikimas būtų kuo panašesnis. Tai pasiekama, kai pagalbinio stiprintuvo įėjime pridama iš viso 7,5 mm ilgio kompensavimo linija, o pagrindinio stiprintuvo įėjime apie 2 mm linija.

Nustatyta, kad Doherty stiprintuvo įėjime turi būti 26,5 dBm galios signalas, kad pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvų įėjimuose dėl suprojektuoto nesimetrinio įėjimo daliklio būtų pasiekta atitinkamai 21 dBm ir 24 dBm galia. Taip pat pagalbinio stiprintuvo užtūros įtampa pakeista iš -4,5 V į -4,7 V, nes tada gaunamas apie 2 % geresnis efektyvumas praktiškai neprarandant stiprinimo (pokytis mažesnis už 0,2 dB). Modeliavimo metu gautų parametrų charakteristikos pateiktos 2.15 paveiksle. Stiprinimo priklausomybės nuo įėjimo galios grafike matyti, kad Doherty stiprintuvo stiprinimas slopsta iki apytiksliai 19 dBm įėjimo galios, kuriai esant pagalbinio stiprintuvo stiprinimas tampa reikšmingas. Toliau stiprinimas lėtai didėja iki 24 dBm, ir ties šia galia stiprinimas iš viso padidėja papildomais 0,5 dB, o didesnėje galioje stiprinimas vėl mažėja. Stiprinimas kinta 12,5 dB – 9dB ribose ir yra mažiausias ties maksimalia galia. Taip pat kuo didesnis dažnis, tuo stiprinimas yra mažesnis. Santakos efektyvumo charakteristikoje matyti, kad ties maksimalia išėjimo galia (36,5 dBm) efektyvumas (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje yra (61,1–67,4) %. 6 dB žemiau maksimalios galios efektyvumas šiame dažnių ruože yra (41–44) %.



a)



b)

2.15 pav. Sumodeliuota Doherty stiprintuvo su nesimetriniu galios dalikliu a) stiprinimo priklausomybė nuo įėjimo galios b) santakos efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo galios.

Kad geriau suprasti suprojektuoto Doherty stiprintuvo veikimą ir efektyvumo charakteristiką, verta panagrinėti pirmojo efektyvumo piko vietą. Iš 2.2.1 skirsnio yra žinoma, kad pagalbinis stiprintuvas pradeda stiprinti signalą, kai jo įėjimo galia viršija 17,5 dBm. Pagrindinio

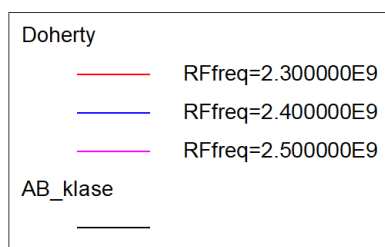
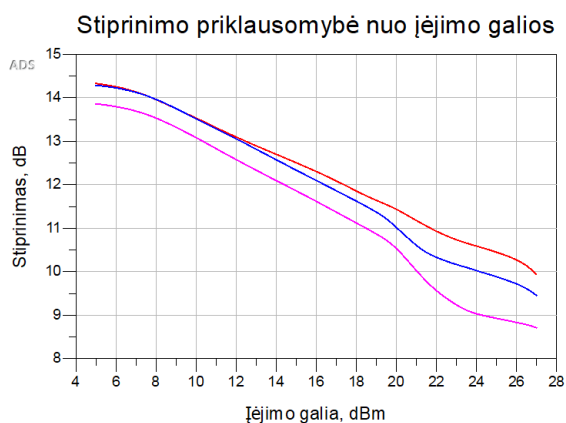
stiprintuvo įėjime dėl suprojektuoto nesimetrinio įėjimo daliklio yra 3 dB mažiau galios, t.y. apie 14,5 dBm. Projektavimo metu nustatyta, kad minėtoms įėjimo galioms pasiekti reikia į Doherty stiprintuvą pasiųsti apie 20 dBm galios signalą, taip pat esant šiai galiai Doherty stiprintuvo stiprinimas 2,4 GHz dažnyje siekia 9,9 dB, išėjimo galia lygi 29,9 dBm, o santakos efektyvumas lygus (39–42) %.

Pagal Doherty galios stiprintuvo veikimo teoriją, mažos galios režime pagrindiniam stiprintuvui apkrova turėtų būti dvigubai didesnė, apie 100 Ω . Tarp stiprintuvo išėjimo suderinimo grandinės ir apkrovos prijungus 17,5 mm ilgio kompensavimo liniją galima patikrinti, koks galimas maksimalus efektyvumas ties pirmuoju efektyvumo piku, t.y. esant 14,5 dBm pagrindinio stiprintuvo įėjimo galiai. Atlikus harmonikų balanso modeliavimą tik su pagrindiniu stiprintuvu esant aprašytoms sąlygoms nustatyta, kad efektyvumas (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje yra (38,3–42,7) %. Ši vertė yra labai artima pirmojo efektyvumo piko vertei. 2.15 pav. b) grafike veikimui palyginti taip pat pateikta pagrindinio AB klasės stiprintuvo efektyvumo charakteristika, tik paslinkta iki vienodos išėjimo galios. Čia sudėtinga išvelgti ryškų Doherty stiprintuvo efektyvumo piką, nes efektyvumo priklausomybė yra beveik tiesinė, tačiau ji skiriasi nuo parabolės formos įprasto stiprintuvo efektyvumo charakteristikos. Ties 30 dBm išėjimo galia matomas didžiausias skirtumas tarp AB klasės stiprintuvo ir Doherty stiprintuvo ir efektyvumo pranašumas siekia (9–12) %. Tai patvirtina, kad apytiksliai 30 dBm išėjimo galia ir yra pirmojo efektyvumo piko vieta.

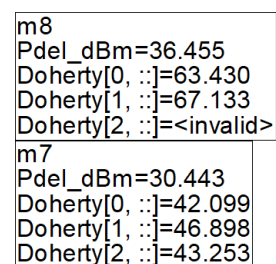
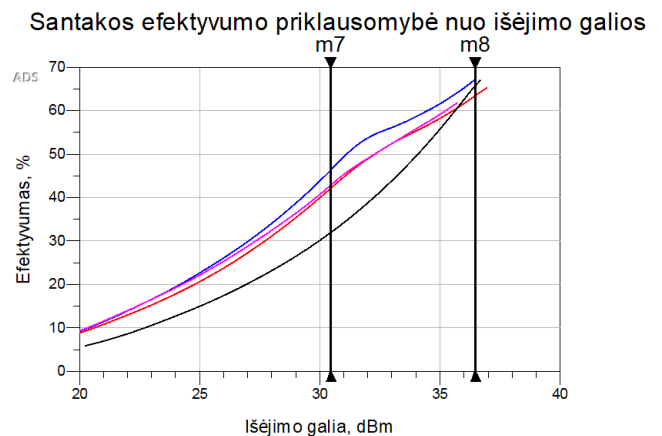
Taip pat čia matyti skirtumas tarp realaus ir idealaus Doherty galios stiprintuvo. Realųjų Doherty galios stiprintuvų efektyvumas pirmajame pike įprastai yra mažesnis nei maksimalioje galioje ir siekia apie (45–55) %. Suprojektuotame stiprintuve to pagrindinė priežastis yra ta, kad pagrindinis stiprintuvas dar nepasiekia pakankamai didelio efektyvumo, kad pikas būtų ryškiai matomas. Kitaip tariant, pagalbinis stiprintuvas įsijungia per anksti. Tai nebūtų problema, jei naudojamo tranzistoriaus stiprinimo charakteristika nebūtų nuolat mažėjanti. Dėl jos pagrindiniame stiprintuve yra reikšmingas skirtumas tarp įėjimo galios ties pirmuoju piku ir maksimalia galia. Apkrovos traukos metu nustatyta, kad esant 14,5 dBm įėjimo galiai pagrindinis stiprintuvas gali pasiekti iki 44 % santakos efektyvumą, o esant maksimaliai galiai (21 dBm) pasiekia 62 %. Tai yra įprasta, nes stiprintuvai veikia tuo efektyviau, kuo jie yra arčiau maksimalios galios. Sumažinus pagalbinio stiprintuvo užtūros įtampą, jis įsijungtų vėliau ir efektyvumas pike padidėtų. Tačiau tuomet pati piko vieta pasislenka arčiau maksimalios galios, nes pagalbinio stiprintuvo išėjimo galia sumažėja. Jeigu paduoti dar daugiau galios į pagalbinį stiprintuvą, kad atstatyti pirmojo piko vietą, efektyvumas jame sumažėtų dėl mažesnės galios pagrindiniame stiprintuve. Taigi toks sprendimas čia netinka.

Doherty stiprintuvas su simetriniu Wilkinson galios dalikliu

Dar verta patikrinti kas būtų jeigu pasiūsti vienodos galios signalą į abu stiprintuvus. Tokiu atveju ties piko vieta tiek pagrindinio, tiek pagalbinio stiprintuvo įėjimuose būtų 17,5 dBm galia. Esant šiai galiai pagrindinio stiprintuvo efektyvumas siekia apie 52 %, o tai yra apie 10 % daugiau nei su 14,5 dBm įėjimo galia. Grandinėje pakeičiamas įėjimo daliklis į simetrinį variantą ir pakoreguojami kompensavimo linijų ilgiai. Geriausi rezultatai gauti kai pagrindinio stiprintuvo kompensavimo linija pašalinama, o pagalbinio stiprintuvo išėjimo kompensavimo linija prailginama 1 mm. Tam, kad būtų pasiekta 17,5 dBm galia pagalbinio stiprintuvo įėjime, bendra Doherty stiprintuvo įėjimo galia turi būti 21 dBm. Iš 2.16 pav. a) matyti, kad ties šia įėjimo galia stiprinimas siekia (10–11) dB ir pasiekama apie 31,6 dBm išėjimo galia. Taigi piko vieta yra 1 dBm arčiau maksimalios galios, nei nesimetrinio daliklio variante. Taip yra dėl to, kad dėl didesnės įėjimo galios pagrindinis stiprintuvas pasiekia apie 1 dBm didesnę galia. Taip pat esant šiai įėjimo galiai iš 2.16 pav. b) matyti pirmasis efektyvumo pikas, kuriame efektyvumas yra (47,4–52,3) % ir tai yra (10,7–15,6) % efektyvumo pranašumas palyginus su AB klasės stiprintuvu.



a)



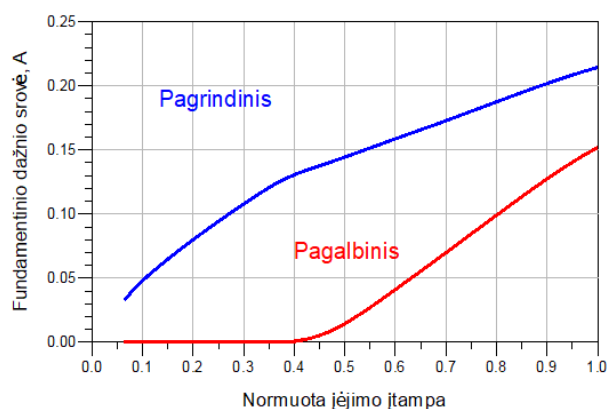
b)

2.16 pav. Sumodeliuota Doherty stiprintuvo su simetriniu galios dalikliu a) stiprinimo priklausomybė nuo įėjimo galios b) santakos efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo galios.

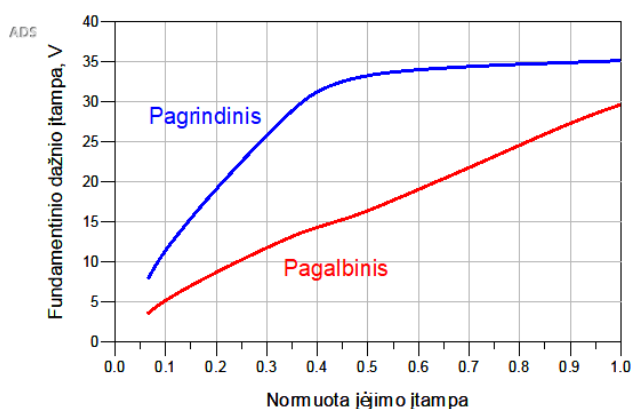
Nepaisant to, kad pikas gautas arčiau maksimalios galios, efektyvumas 6 dB žemiau maksimalios galios yra didelis ir siekia (43–46,9) %, o pranašumas palyginus su AB klase yra (10,9–14,9) %. Tai yra net geriau, nei gauta nevienodo dalinimo koeficiento galios daliklio atveju. Efektyvumas ties maksimalia galia praktiškai nepakito. Stiprinimo charakteristika yra tolygiai

mažėjanti ir kinta nuo 14 dB ir ties didžiausia įėjimo galia pasiekia 9 dB. Kad pasiekti 36,5 dBm išėjimo galią Doherty stiprintuvo išėjime, reikia paduoti 27,5 dBm įėjimo galią. Tai yra 1 dBm daugiau galios, nei anksčiau aptarto Doherty stiprintuvo. Šis stiprintuvas turi efektyvumo pranašumą, o stiprinimas yra tolygesnis. Dėl šių priežasčių variantas su simetriniu galios dalikliu yra toliau tiriamas ir lyginimas su skirtingų tranzistorių Doherty stiprintuvu.

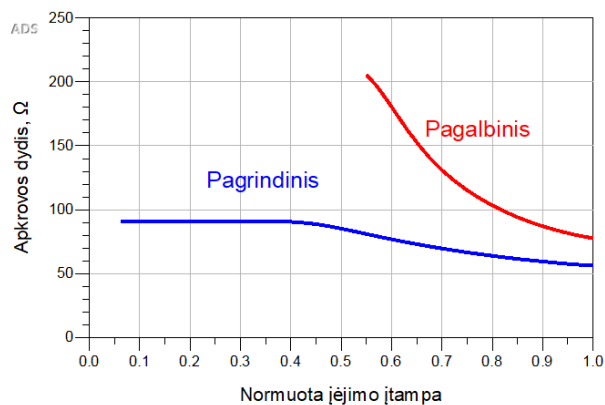
Tyrimo tikslams dar atliktas modeliavimas siekiant nustatyti fundamentinio dažnio išėjimo srovės, įtampos, apkrovos dydžio ir santakos efektyvumo priklausomybes nuo įėjimo įtampos amplitudės. Rezultatai pateikti 2.17 paveiksle. Iš jų matyti, kad šios priklausomybės yra panašios į teorines, pateiktas 1.8 paveiksle, tačiau yra ir skirtumų. Šiose charakteristikose matyti, kad lūžio taškas yra esant 0,4-0,45 normuotai įėjimo įtampai. Pagalbinio stiprintuvo maksimali išėjimo galia yra mažesne, nes jis nepasiekia tokių pat srovės ir įtampos dydžių kaip pagrindinis stiprintuvas. Apkrovos dydis pagrindiniam stiprintuvui kinta nuo 90 Ω iki 55 Ω , o pagalbiniam stiprintuvui kinta nuo palyginti didelės vertės iki 75 Ω ties įėjimo įtampos maksimumu. Efektyvumas ties lūžio vieta pasiekia didelę vertę, apie 50 %, po lūžio didėja tiesiškai iki 67 %.



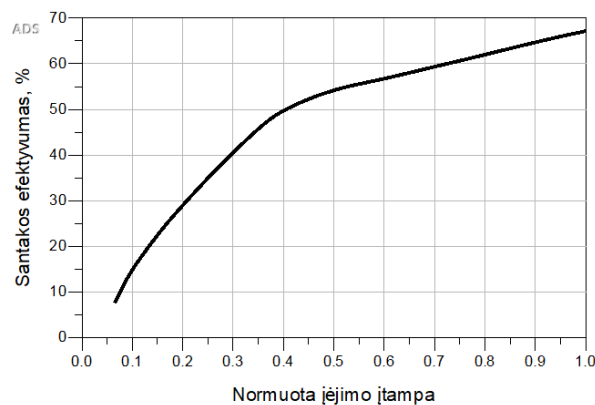
a)



b)



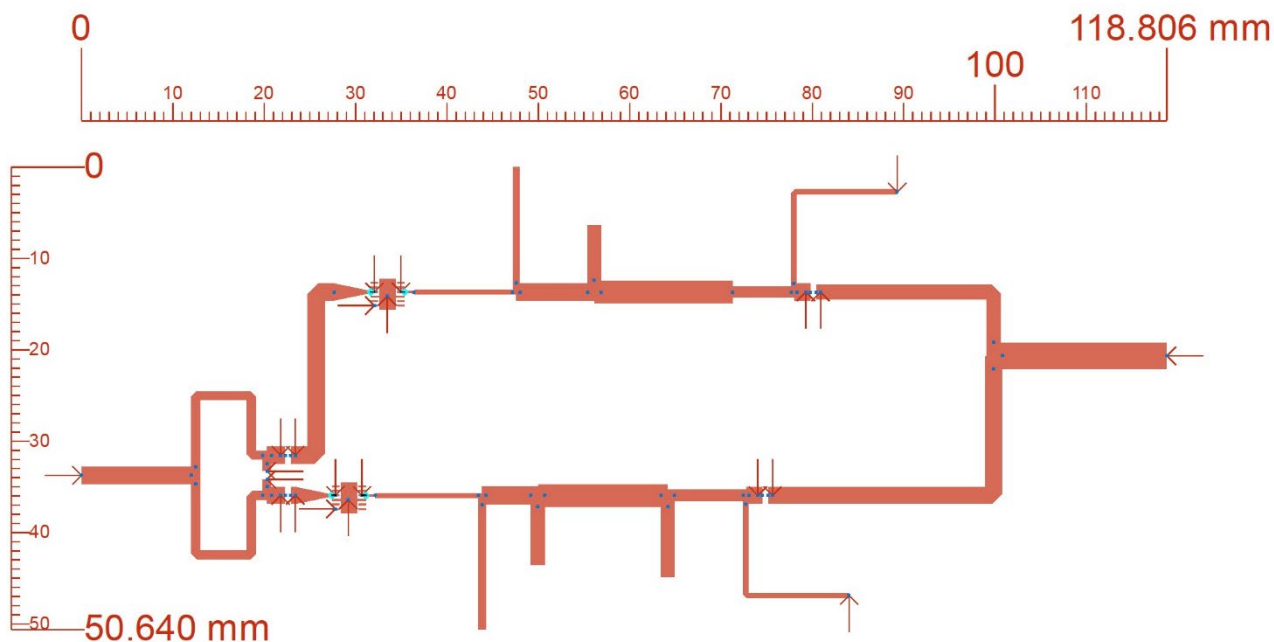
c)



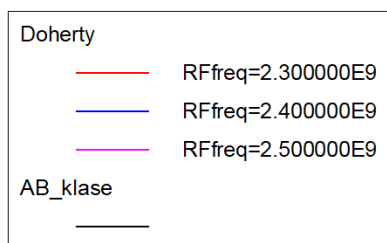
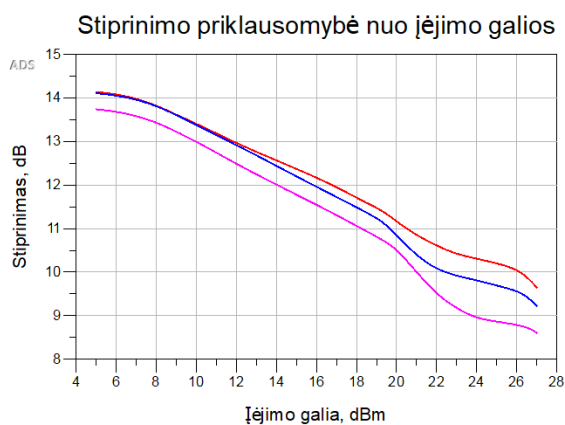
d)

2.17 pav. Sumodeliuota Doherty stiprintuvo su simetriniu galios dalikliu a) išėjimo srovės b) išėjimo įtampos c) stiprintuvų apkrovos d) Doherty stiprintuvo efektyvumo priklausomybė nuo normuotos įėjimo įtampos, kai dažnis lygus 2,4 GHz

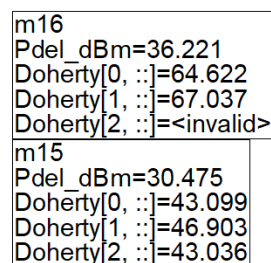
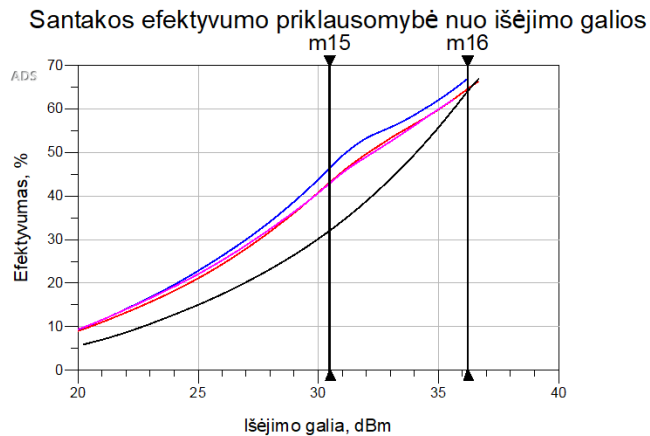
Galutinis šio stiprintuvo modeliavimo etapas yra stiprintuvo fizinio išdėstymo, elektromagnetinio modelio sukūrimas ir pagrindinių charakteristikų nustatymas. Fizinio išdėstymo vaizdas pateiktas 2.18 paveiksle. Stiprintuvo ilgis yra apie 12 cm, o plotis apie 5,1 cm. Viršutinėje dalyje prijungiamas pagalbinis stiprintuvas, o apatinėje pagrindinis stiprintuvas.



2.18 pav. Doherty stiprintuvo su simetriniu galios dalikliu fizinis išdėstymas



a)



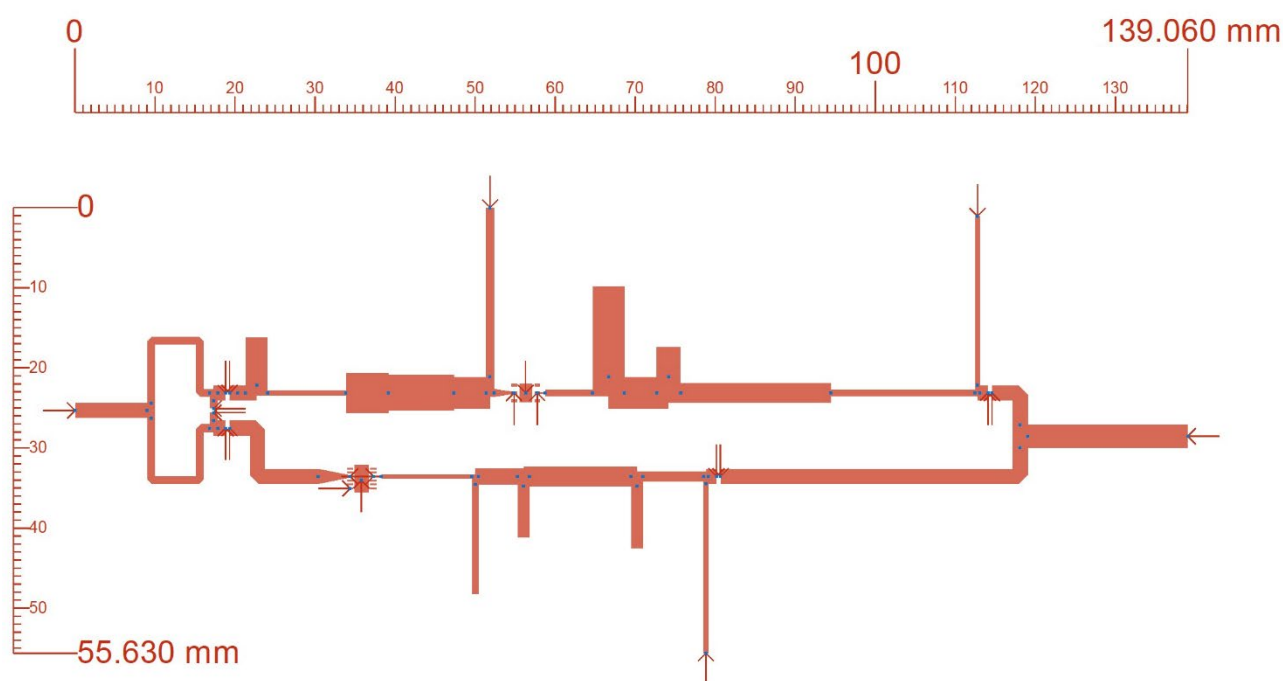
b)

2.19 pav. Doherty stiprintuvo su simetriniu galios dalikliu galutinio modeliavimo a) stiprinimo priklausomybė nuo įėjimo galios b) santakos efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo galios

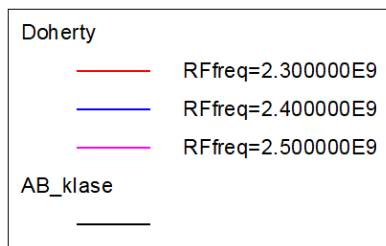
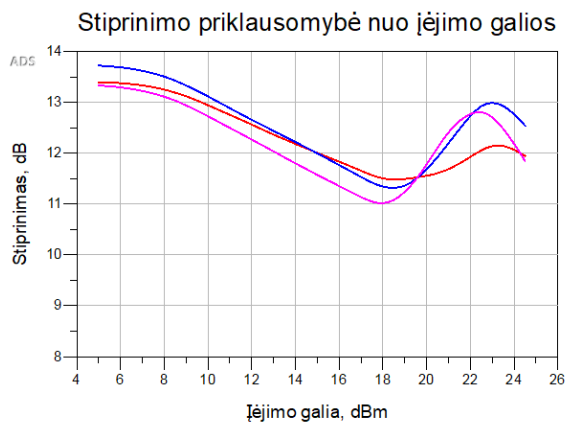
Modeliavimo rezultatai pateikti 2.19 paveiksle iš kurio matyti, kad stiprinimas ir efektyvumas palyginus su 2.16 paveiksle pateiktomis charakteristikomis praktiškai nepakito. Stiprinimas yra vos apie 0,1 dB prastesnis, o efektyvumo skirtumas yra ± 1 % ribose. Tai tik patvirtina pradinis modeliavimo rezultatus.

2.4.2 Doherty stiprintuvo su CGH40006S pagalbinio stiprintuvo projektavimas

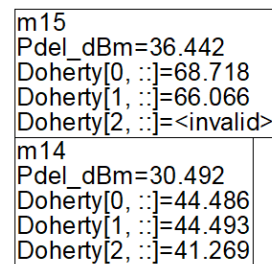
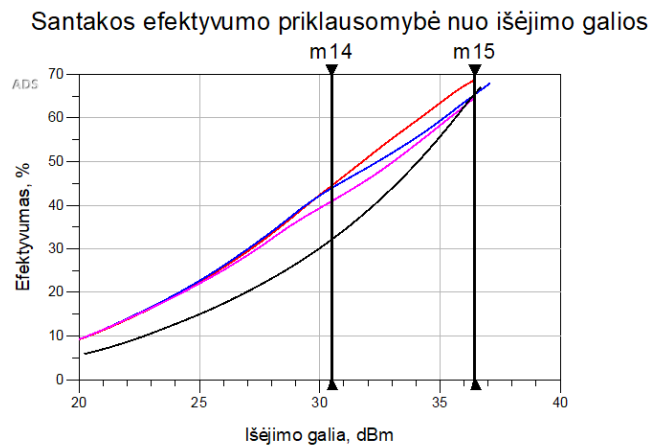
Doherty stiprintuvo su CGH40006S pagalbinio stiprintuvo projektavimo seka yra tokia pati, kaip aprašyta 2.4.1 skirsnyje. Kompensavimo linijų ilgiai pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo išėjimuose yra atitinkamai 20 mm ir 7 mm. Pagalbinio stiprintuvo įėjimo suderinimo grandinė sukuria tam tikrą signalo vėlinimą. Šiam vėlinimui kompensuoti pridedama 45 mm ilgio mikrojuostelinė linija pagrindinio stiprintuvo įėjime. Toliau kompensuojamas impedanso inverterio ilgis ir išėjimo kompensavimo linijų ilgio skirtumas. Iš viso turėtų būti pridėta apie 33 mm ilgio linija prie įėjimo suderinimo grandinės. Šios linijos yra labai ilgos, jos padidintų stiprintuvo užimamą plotą bei pačios linijos įneštų nuostolių. Įėjime svarbu kompensuoti fazių skirtumą, taigi paliekamas tik šių ilgių skirtumas. Tai reiškia, kad pagrindinio stiprintuvo įėjime po papildomų paderinimų pridedama 20 mm ilgio linija. Fizinio išdėstymo vaizdas pateiktas 2.20 paveiksle. Gautas apie 14 cm ilgis ir 5,5 cm plotis.



2.20 pav. Doherty stiprintuvo su skirtingais tranzistoriais fizinis išdėstymas



a)



b)

2.21 pav. Sumodeliuota Doherty stiprintuvo su skirtingais tranzistoriais sumodeliuota a) stiprinimo priklausomybė nuo įėjimo galios b) santakos efektyvumo priklausomybė nuo išėjimo galios

Šiuo atveju yra sudėtingiau suprojektuoti tolygų veikimą reikiamame dažnių ruože. To priežastis yra pagalbinio stiprintuvo charakteristikos, kurios irgi nėra pakankamai tolygios šiame dažnių ruože. Doherty stiprintuvo modeliavimų su viso fizinio išdėstymo elektromagnetiniu modeliu rezultatai pateikti 2.21 paveiksle. Iš stiprinimo charakteristikos matyti, kad šio stiprintuvo stiprinimas ties maža įėjimo galia siekia apie 13,5 dB, tačiau pastoviai slopsta iki maždaug 18 dBm įėjimo galios, ties kuria įsijungia pagalbinis stiprintuvas ir prasideda stiprinimo vingis charakteristikoje. Vingio pike stiprinimas pasiekia (12–13) dB ir galiai didėjant stiprinimas vėl slopsta. Galutinis stiprinimas yra apie 0,5 dB mažesnis. Įėjime turi būti 24,5 dBm galia, kad būtų gauta 36,5 dBm išėjimo galia.

Palyginus su Doherty stiprintuvu su vienodais tranzistoriais, ties maksimalia galia efektyvumas (2,3–2,5) GHz dažnių ruože yra iki 2 % geresnis ir yra (64–68,7) %. 6 dB žemiau šios galios efektyvumas yra (41–44) %, taigi apie 2 % prastesnis. Tačiau dėl didesnio stiprinimo šiam stiprintuvui reikia 3 dBm mažiau įėjimo galios, kad pasiekti tą pačią išėjimo galią. Svarbiausias šio stiprintuvo trūkumas yra aptartų parametrų skirtumas dažnių ruože. Dažniui didėjant efektyvumas didelės galios režime pastebimai mažėja, o tai yra nepageidautina. Vietomis šis skirtumas siekia 5 %. To priežastis yra skirtingos efektyvumo piko vietos dėl taip suprojektuoto pagalbinio stiprintuvo.

Svarbu paminėti, kad šis Doherty stiprintuvo variantas yra patobulintas ir aprašytas 4.1 skyriuje, tačiau tai atlikta jau po pasirinkto stiprintuvo pagaminimo, todėl rezultatų apibendrinime nėra palyginamas.

2.5 Rezultatų apibendrinimas

Šiame skyriuje apžvelgta visų Doherty stiprintuvo dalių modeliavimo ir projektavimo eiga naudojant *Keysight ADS* programinį paketą. Iš viso suprojektuoti du pagrindiniai galios stiprintuvai, du pagalbiniai galios stiprintuvai, du Wilkinson galios dalikliai ir trys Doherty galios stiprintuvai. Pagrindinio galios stiprintuvo projektavimo metu naudotas harmonikų suderinimas ir ištirta stiprintuvų veikimo priklausomybė nuo dviejų dielektrinių medžiagų – FR4 ir PTFE. Šio tyrimo rezultatai pateikti 2.1 lentelėje. Nustatyta, kad pagrindinis stiprintuvas, kuriam naudota mažesnių nuostolių PTFE medžiaga, pasiekia apie 5 % geresnį efektyvumą, todėl tolesnėje projektavimo eigoje visi stiprintuvai ir jų dalys projektuojami naudojant šią dielektrinę medžiagą. Pagrindinis stiprintuvas suprojektuotas 21 dBm įėjimo galiai, kuriai esant pasiekama apie 34 dBm išėjimo galia su didesniu nei 59 % santakos efektyvumu.

2.1 lentelė. Pagrindinių stiprintuvų modeliavimo rezultatai (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje

Dielektrinė medžiaga	Įėjimo galia, dBm	Išėjimo galia, dBm	Stiprinimas, dB	Santakos efektyvumas, %	PAE, %
FR4	21	33,3–34,1	12,3–13,1	52,1–58,7	49,2–55,2
PTFE		33,8–34,3	12,8–13,3	59–64,1	56,1–61,3

Suprojektavus pagrindinį stiprintuvą, suprojektuoti du pagalbiniai stiprintuvai su skirtingais tranzistoriais, kurių pagrindiniai modeliavimo rezultatai pateikti 2.2 lentelėje. Pirmas suprojektuotas stiprintuvas su tokiu pačiu tranzistoriumi kaip ir pagrindinio stiprintuvo (CMPA0530002S) ir pasiekta apie 33 dBm išėjimo galia su didesniu nei 61,5 % santakos efektyvumu, tačiau šiam variantui reikia 3 dBm didesnės įėjimo galios, nei pagrindinio. Pagalbinis stiprintuvas su CGH40006S tranzistoriumi dėl jo didesnės įsotinimo galios ir didesnio stiprinimo pasiekia šią išėjimo galią ir didesnę nei 64,7 % santakos efektyvumą esant tokiai pat įėjimo galiai kaip ir pagrindinio stiprintuvo. Pastarojo stiprintuvo trūkumas yra didesnė parametrų variacija dažnių juostoje, kurioje jis taip pat ir įsijungia esant skirtingam įėjimo galios lygiui – tarp 16 dBm ir 18 dBm.

2.2 lentelė. Pagalbinių stiprintuvų modeliavimo rezultatai (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje

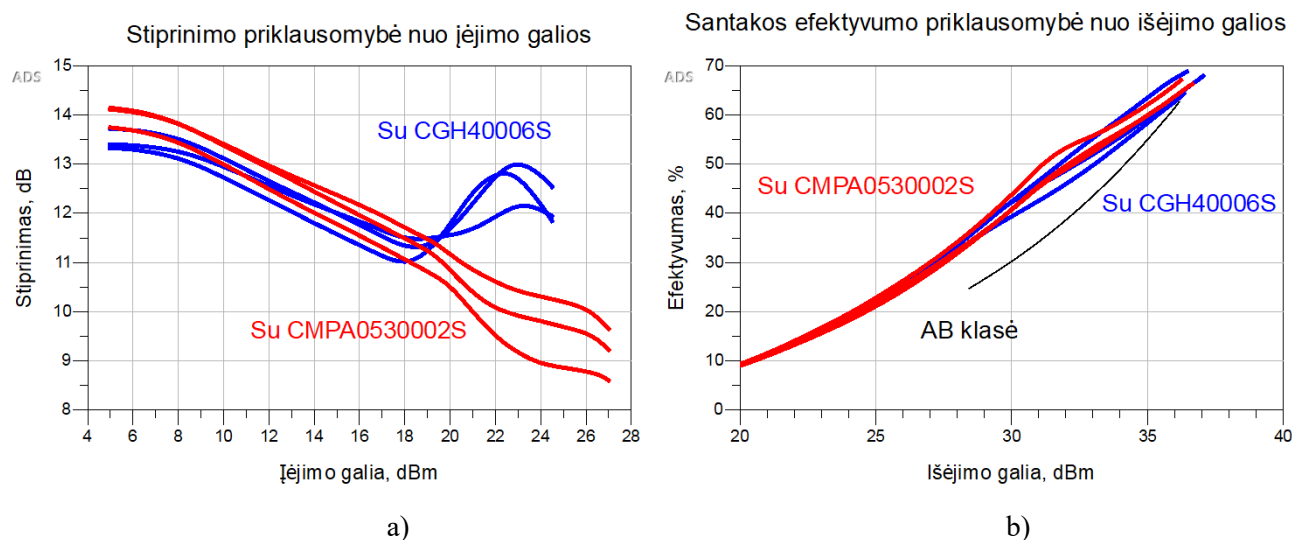
Tranzistorius	Įėjimo galia, dBm	Išėjimo galia, dBm	Stiprinimas, dB	Santakos efektyvumas, %	PAE, %
CMPA0530002S	24	32,5–33,1	8,5–9,1	61,5–66,5	55–58,1
CGH40006S	21	31,5–33,3	10,5–12,3	64,7–71,1	59–66,6

Įėjimo daliai suprojektuoti du Wilkinson galios dalikliai, vienas yra simetrinis, o kitas nesimetrinis su 3 dB galios skirtumu tarp išėjimų. Nesimetrinis naudojamas Doherty stiprintuvui su

CMPA0530002S pagalbinio tranzistoriumi dėl reikiamų skirtingų įėjimo galios lygių pagrindiniam ir pagalbiniam stiprintuvui. Vis tik nustatyta, kad minėtam stiprintuvui geriau naudoti simetrinį daliklį, kad pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo įėjimo galia būtų vienoda. Tuomet pasiekiamas didesnis pagrindinio stiprintuvo efektyvumas. Simetrinis daliklis taip pat naudojamas ir Doherty stiprintuvui su CGH40006S pagalbinio tranzistoriumi, kad pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo įėjimo galia būtų vienoda.

2.3 lentelė. Doherty galios stiprintuvų modeliavimo rezultatai (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje

Pagalbinio stiprintuvo tranzistorius	Įėjimo galia, dBm	Išėjimo galia, dBm	Stiprinimas, dB	Efektyvumas esant maksimaliai galiai, %	Efektyvumas 6 dB žemiau maksimalios galios, %
CMPA0530002S	27	35,6–36,6	8,6–9,6	62–67	43–46,9
CGH40006S	24,5	36,3–37	11,8–12,5	64,3 – 68,7	41,2–44,5

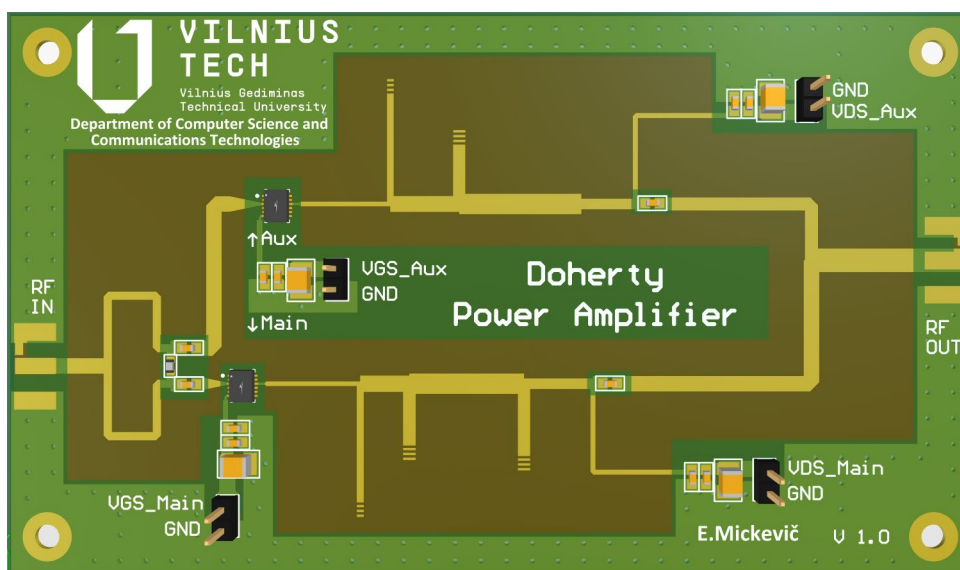


2.22 pav. Doherty stiprintuvų (2,3–2,5) GHz dažnių juostoje a) stiprinimo priklausomybės nuo įėjimo galios palyginimas b) santakos efektyvumo priklausomybės nuo išėjimo galios palyginimas

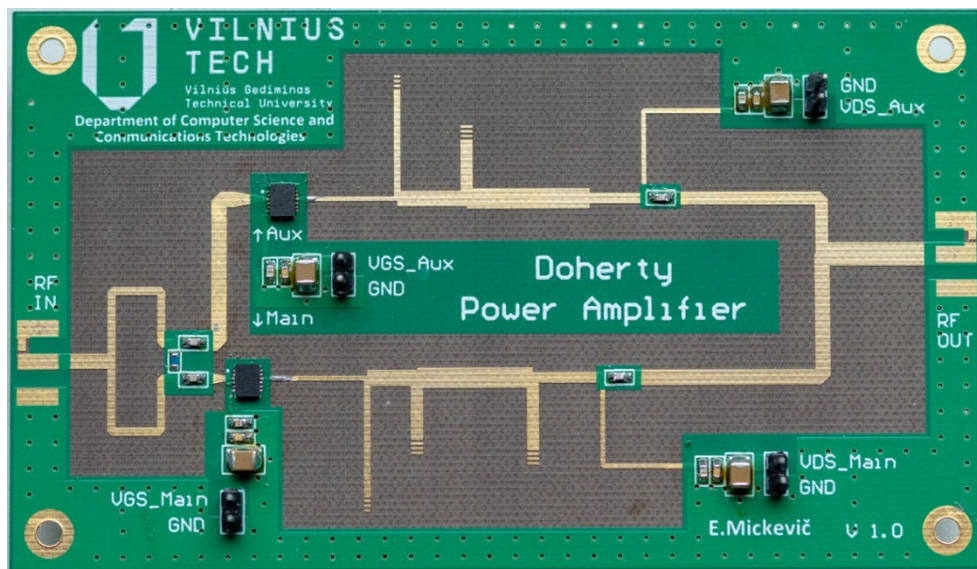
Doherty stiprintuvų modeliavimo rezultatai pateikti 2.3 lentelėje, iš kurios matyti, kad pasiekiamas panašus efektyvumo lygis tiek esant maksimaliai galiai, tiek ir 6 dB žemiau jos. Kai pagalbiniam stiprintuvui naudojamas CGH40006S tranzistorius, Doherty stiprintuvo įėjime reikia apie 2,5 dB mažiau įėjimo galios, kad pasiekti 36,5 dBm išėjimo galią, tačiau šio stiprintuvo veikimas dažnių juostoje yra mažiau tolygus nei Doherty stiprintuvo su CMPA0530002S tranzistoriumi, kaip matyti iš 2.22 paveikslo. Taip pat pastarojo stiprintuvo ilgis yra 2 cm trumpesnis, taigi užima mažiau ploto. Dėl šių priežasčių prototipo gamybai parenkamas Doherty stiprintuvas su CMPA0530002S tranzistoriais.

3 DOHERTY GALIOS STIPRINTUVO PROTOTIPO IŠMATUOTŲ PARAMETRŲ ANALIZĖ

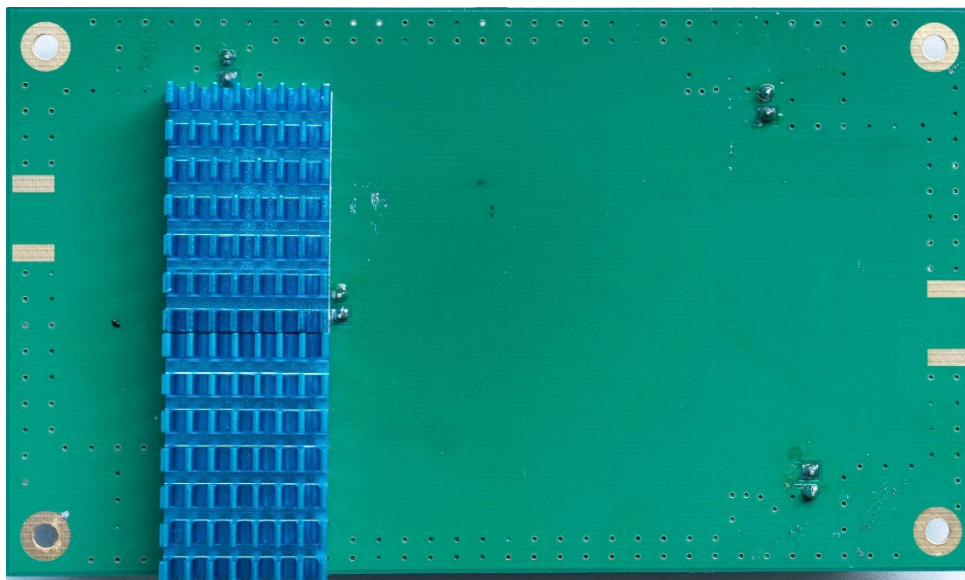
Baigiamojo darbo projektavimo metu nustatyta, kad geriausias iš suprojektuotų variantų yra Doherty galios stiprintuvas su simetriniu galios dalikliu ir vienodais pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo CMPA0530002S tranzistoriais. Pasirinkto stiprintuvo fizinis išdėstymas, kuris yra pateiktas 2.18 paveiksle, yra perkeliamas į *Altium Designer* programinį paketą ir atliekama keletas modifikacijų. Pridedami takeliai vedantys prie užtūros kontaktų, kurių modeliavimo metu nebuvo, nes jų plotis ar ilgis šiuo atveju neturi jokios įtakos stiprintuvo veikimui dėl tranzistoriuose esančio vidinio įėjimo suderinimo. Nuolatinei srovei blokuoti stiprintuvų įėjimuose ir išėjimuose naudojamas jau minėtas 600S100JT250 10 pF kondensatorius. Šalia kiekvieno įtampos šaltinio kontakto pridedami trys kondensatoriai, arčiausiai šaltinio didžiausios talpos, o toliausiai mažiausios talpos. Jų paskirtis yra pašalinti aukštų dažnių srovės reikalingose grandinėse vietose jas užtrumpinant. Tuomet šaltinių maitinimo įtampa grandinėje yra be triukšmų, stabili ir tranzistoriai veikia kaip ir numatyta projektavimo metu. Šių kondensatorių vertės yra 100 pF, 470 pF ir 1 uF. Prie kiekvienos kilpos yra pridėta po tris 0,3 mm ilgio vario saleles su tokiu pat atstumu tarp jų. Šias dalis galima sujungti lydmetaliu su pagrindine kilpa ir taip sudarant galimybę pakoreguoti jos ilgį. Spausdintinės plokštės apačioje yra ištisinis vario užpildas, taip pat palei spausdintinės plokštės perimetrą sudarytas įžeminimo užpildas, kuris sujungtas su apatiniu sluoksniu. Suprojektuotos plokštės vaizdas pateiktas 3.1 pav. a) dalyje. Įsitikinus, kad Kinijos gamintojo JLCPCB pagaminta spausdintinė plokštė neturi akivaizdžių defektų ar blogų kontaktų, ji buvo surinkta. Pagamintos ir surinktos plokštės vaizdas yra 3.1 pav. b) ir c) dalyse.



a)



b)



c)

3.1 pav. Doherty galios stiprintuvo prototipo a) vaizdas Altium Designer programiniame pakete; b) pagamintos ir surinktos spausdintinės plokštės vaizdas iš viršaus; c) vaizdas iš apačios

Projektavimo metu neatsižvelgtą į vieną gana svarbų dalyką – stiprintuvų galios išsklaidymą šilumos būdu. Tai yra iš šaltinio suvartojamos galios dalis, kuri nėra perduodama į apkrovą. Dažnai po stiprintuvų spausdintine plokštė yra pritvirtinama aliuminio arba vario plokštė, kuri padeda išsklaidyti šią šilumą, kad neperkaistų ir nesudegtų tranzistoriai. Taip pat kartais ant tranzistorių arba po jais, ant apatinės plokštės dalies yra tvirtinami radiatoriai. Kuo efektyvesnis stiprintuvas, tuo mažiau šilumos yra išsklaidoma, todėl šio stiprintuvo bendra išsklaidoma galia yra nedidelė, pagal modeliavimus siekia iki 3 W esant maksimaliai išėjimo galiai. Naudojamų tranzistorių pakuočių maksimali temperatūra yra didelė ir siekia 150 C°, kuriai esant gamintojo suprojektuotas stiprintuvas gali išsklaidyti iki 3 W galios. Esant 85 C° temperatūrai minėtas stiprintuvas gali išsklaidyti iki 5,8 W

galios. Kadangi naudojami du tranzistoriai, kurių kiekvienas išsklaido dalį galios, perkaitimo problemų neturėtų būti, tačiau aukšta temperatūra gali neigiamai paveikti pačių tranzistorių veikimą. Projektavimo metu nenumatyta gerų tvirtinimo vietų metalo plokštei po spausdintine plokšte, todėl po tranzistoriais panaudojus specialią šilumai laidžią lipnią juostą pritvirtinami radiatoriai, kaip pavaizduota 3.1 pav. c) dalyje. Matavimų metu aušinimui pagerinti naudojamas ventiliatorius nukreiptas į spausdintinę plokštę.

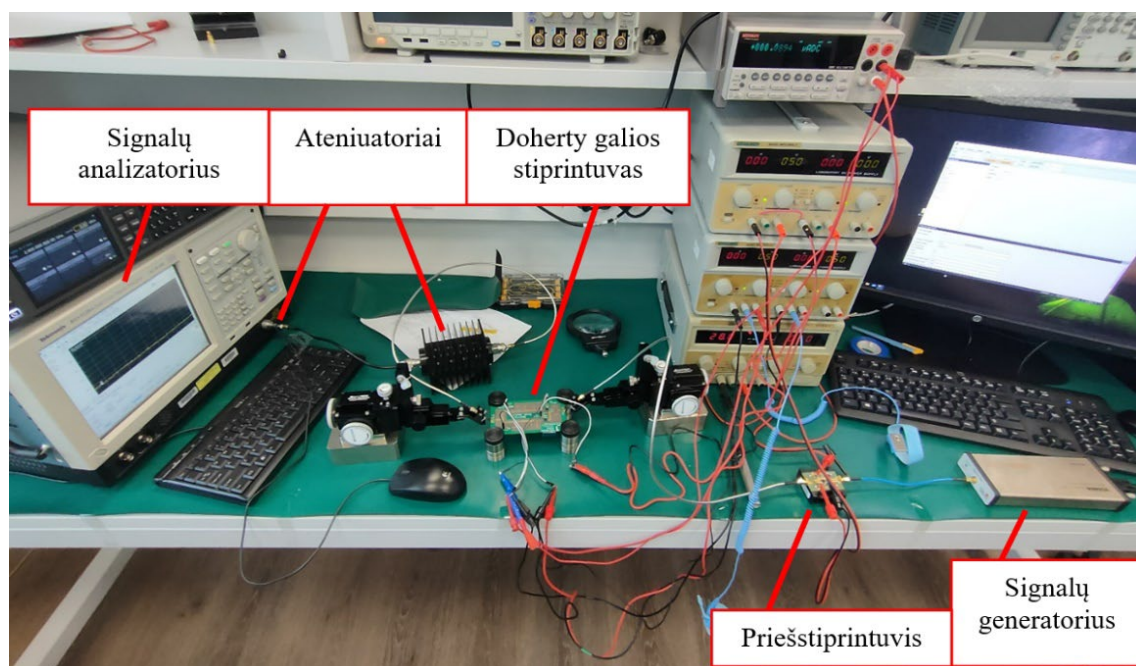
Lieka išmatuoti Doherty stiprintuvo pagrindinių parametrų charakteristikas. Pirmiausia galima atlikti atspindžio ir perdavimo koeficientų (S parametrų) matavimus su vektoriniu grandynų analizatoriumi. Stiprinimui nustatyti reikia apskaičiuoti išėjimo galios ir įėjimo galios skirtumą. Santakos efektyvumui nustatyti reikia išmatuoti išėjimo galią ir suvartojamą galią iš šaltinio, o jų santykis ir bus efektyvumo vertė. Suprojektuoto stiprintuvo matavimui reikalinga tokia įranga:

1. Vektorinis grandynų analizatorius S parametrų matavimui. Naudojamas LA19-13-04B.
2. Signalų generatorius, kuris generuoja tam tikros (įprastai sinuso) formos signalą su nustatytu galios lygiu. Naudojamas *Signal Hound* VSG60A generatorius.
3. Priešstiprintuvis, kuris sustiprina signalą virš signalo generatoriaus maksimalios galios. Jis yra reikalingas, nes turimo signalų generatoriaus maksimali galia yra mažesnė už reikiamą įėjimo galią Doherty stiprintuvui. Naudojamas TQP9111 stiprintuvas.
4. Atenuatoriai, kurie sumažina išėjimo galios lygį, kad nesugadinti matavimo įrangos.
5. Signalų analizatorius, kuriuo matuojama išėjimo galia. Naudojamas *Tektronix* RSA5126A analizatorius.
6. Ampermetras suvartojamai galiai matuoti.
7. Įtampos šaltiniai kiekvieno stiprintuvo maitinimo įtampoms (iš viso 6 šaltiniai).
8. Matavimo zondai, kuriais perduodamas signalas iš generatoriaus į stiprintuvo įėjimą ir iš išėjimo į analizatorių. Naudojami *PacketMicro* SP-GR-201505 zondai su testavimo pozicionatoriais PS600.

S parametrų matavimo metu signalas iš vektorinio grandynų analizatoriaus yra siunčiamas į Doherty stiprintuvo įėjimą, iš jo išėjimo į atenuatorių ir galiausiai į analizatoriaus antrąją jungtį. Stiprinimo ir efektyvumo matavimo metu signalas iš VSG60A generatoriaus siunčiamas į apie 28 dB stiprinimo TQP9111 priešstiprintuvį, iš jo į Doherty stiprintuvą, o iš jo per 20 dB ir 30 dB atenuatorių į RSA5126A signalų analizatorių. Matavimų stendo vaizdas pateiktas 3.2 paveiksle. Prieš matuojant stiprintuvo parametrus, išmatuotas viso trakto slopinimas ir jis nustatytas lygus 25 dB. Tai atitinka šių dėmenų sumą: priešstiprintuvio stiprinimo, atenuatorių slopinimo, slopinimo jungiamuosiuose laiduose. Priešstiprintuvio stiprinimas ir atenuatorių slopinimas plačiame įėjimo galios diapazone yra pastovus, todėl nustatyta 25 dB vertė yra pridedama prie išmatuotų Doherty

stiprintuvo išėjimo galios dydžių. Matavimų metu matuojama tik V_{DS} šaltinio srovė, nes per šių tranzistorių užtūrą srovė neteka. Matavimo eiga yra tokia:

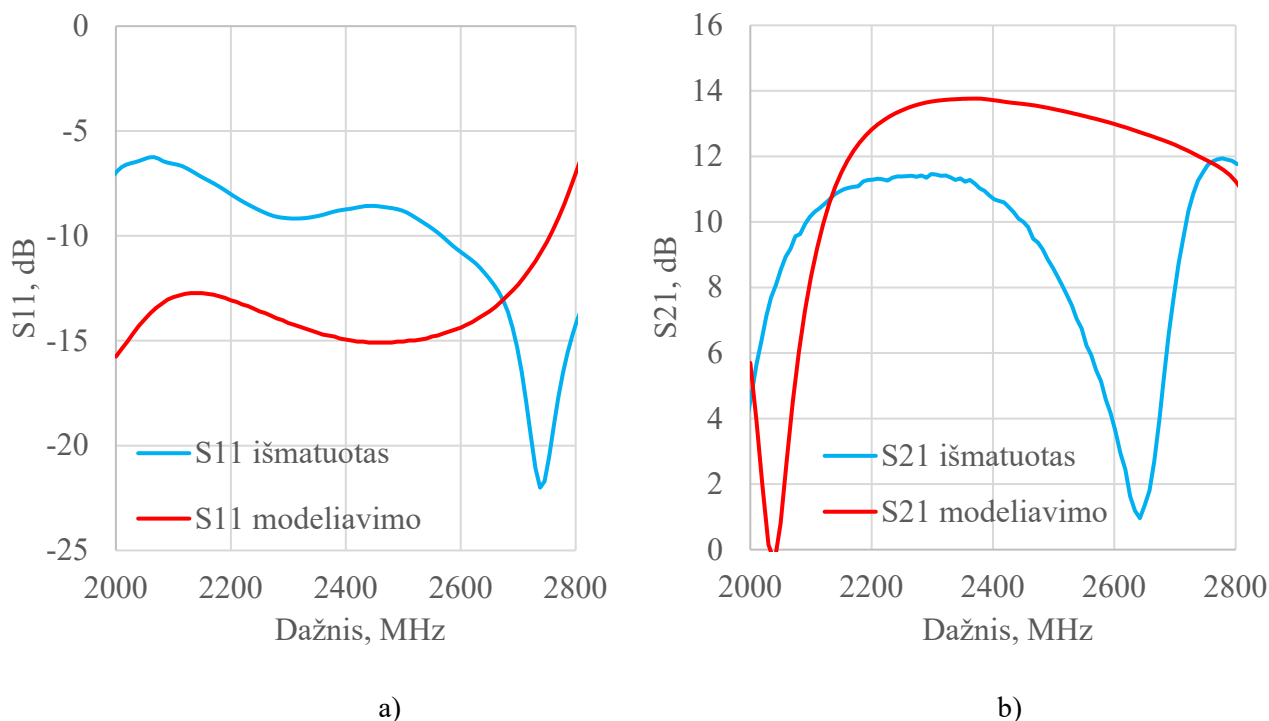
1. Prie Doherty stiprintuvo pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo prijungiamos V_{GS} maitinimo įtampos, kurios iš pradžių nustatomos žemiau slenksinės (žemiau -3 V), kad uždaryti tranzistorių kanalus.
2. Tuomet prijungiama įtampa tarp tranzistorių santakos ir ištakos. Taigi prie V_{DS} prijungiama 28 V įtampa.
3. Užtūrų įtampos pakeičiamos taip, kad būtų nustatytas reikiamas darbo taškas. Pagrindinio stiprintuvo V_{GS} padidinama iki tokios, kad ampermetras, prijungtas nuosekliai su V_{DS} šaltiniu, rodytų apie 40 mA srovę. Tai yra srovė, gauta modeliavimų metu, kai signalas nėra prijungtas. Matavimu metu nustatyta įtampa lygi -2,5 V, vietoj modeliavimų metu gautos -2,7 V.
4. Pagalbinio stiprintuvo įtampa nustatoma tokia, kokia nustatyta modeliavimų metu ir yra lygi -4,7 V.
5. Galiausiai įjungiamas įėjimo signalas, kurio galia nustatyta žingsniu didinama ir užrašomi matavimo įrangos rodmenys.
6. Išjungimo seka yra atvirkštinė.



3.2 pav. Doherty galios stiprintuvo prototipo matavimo stendo vaizdas

Iš pradžių išmatuojami S parametrai, kurie pavaizduoti 3.3 paveiksle kartu su modeliavimo rezultatais. Iš paveikslo matyti, kad įėjimo atspindys (S_{11} parametras) (2,3–2,5) GHz dažnių ruože yra -(8–9) dB. Esant 2,4 GHz dažniui skirtumas su modeliavimo rezultatais yra apie 6 dB. Geriausias suderinimas ir mažiausia S_{11} vertė pasiekama esant 2,3 GHz dažniui. Perdavimo koeficiento pikas

irgi yra šiame dažnyje, kuriame siekia 11,5 dB. Šie rezultatai rodo, kad veikimo dažnis yra pasislinkęs arčiau žemesnio. Sudėtinga paaiškinti, kodėl S11 parametras yra prastesnis nei modeliavimo, nes šių tranzistorių įėjimai yra suderinti pačiame tranzistoriuje, o Doherty stiprintuvo įėjimo dalyje yra tik Wilkinson galios daliklis, kuris neturėtų pabloginti šių rezultatų.



3.3 pav. Išmatuoto Doherty galios stiprintuvo a) įėjimo atspindžio palyginimas su modeliavimo rezultatais; b) perdavimo koeficiento palyginimas su modeliavimo rezultatais

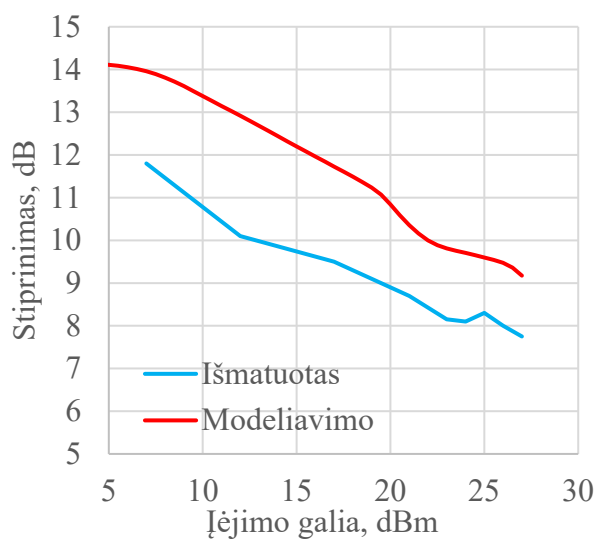
Iš pradžių matuojama siunčiant centrinio 2,4 GHz dažnio signalą į įėjimą, nustatytu žingsniu didinant galią užrašomi išėjimo galios ir srovės duomenys. Matuota tik iki 25 dBm įėjimo galios, tačiau pastebėta, kad esant šiam dažniui nepasiekiamas labai didelis efektyvumas. Tuomet buvo palaipsniui mažinamas dažnis ir iš naujo matuojama keletas charakteristikos taškų. Nustatyta, kad esant 2,27 GHz dažniui pasiekiamas geriausias efektyvumas ir tai yra prototipo centrinis dažnis. Santykinis centrinio dažnio pokytis yra $(2,4 \text{ GHz} - 2,27 \text{ GHz}) / 2,4 \text{ GHz} \times 100 \% = 5,42 \%$. Dažnai projektuojant aukštų dažnių įtaisus, pagaminto prototipo veikimo dažnis pasislenka link žemesnio. To priežastys gali būti didesnė dielektriko dielektrinės skvarbos vertė, platesni pagaminti takeliai ar didesnis spausdintinės plokštės storis. Taip pat veikimą gali paveikti ir parazitinės talpos, kurios neįvertintos arba įvertintos nepakankamu tikslumu modeliavimo metu. Tą ištaisyti galima suprojektavus naują prototipą šiek tiek didesniai dažniui.

Matavimų rezultatai esant 2,27 GHz dažniui pateikti 3.1 lentelėje, o palyginimas su modeliavimo rezultatų Doherty ir AB klasės stiprintuvo charakteristikomis pateiktas 3.4 paveiksle. Iš stiprinimo charakteristikos matyti, kad prototipo stiprinimas yra apie (2–2,5) dB mažesnis. Dėl šios priežasties maksimali galia esant 27 dBm įėjimo galios irgi yra mažesnė ir siekia 34,75 dBm vietoje

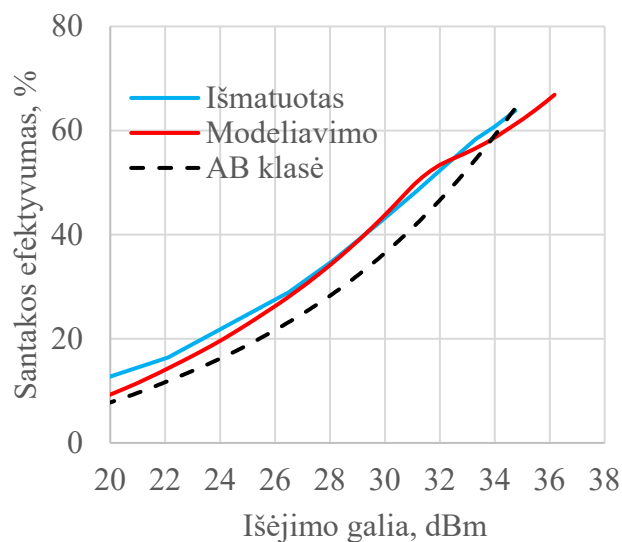
modeliavimo metu gautos 36,5 dBm. Efektyvumo charakteristikoje matyti, kad yra lūžis esant apytiksliai 33,3 išėjimo galiai. Stiprinimo charakteristikoje taip pat matyti stiprinimo pikas esant šiai išėjimo galiai. Tai rodo, kad veikia ne tik pagrindinis bet ir pagalbinis stiprintuvas. Išėjimo galią galima būtų padidinti, jeigu padidinti galią įėjime. Tačiau stiprinimas sumažėtų dar labiau ir būtų priartėta prie užtūros įtampų limitų, o tai galėtų sugadinti tranzistorius.

3.1 lentelė. Nustatyti Doherty galios stiprintuvo prototipo parametrai

Įėjimo galia, dBm	Išėjimo galia, dBm	Stiprinimas, dB	V_{DS} šaltinio srovė, mA	Santakos efektyvumas, %	PAE, %
7	18,8	11,8	25,4	10,7	10,0
12	22,1	10,1	35,3	16,4	14,8
17	26,5	9,5	55,1	29,0	25,7
19	28,1	9,1	65,9	35,0	30,7
21	29,7	8,7	79,6	41,9	36,2
23	31,15	8,15	96,3	48,3	40,9
24	32,1	8,1	109,7	52,8	44,6
25	33,3	8,3	130,9	58,3	49,7
26	34	8	147,6	60,8	51,1
27	34,75	7,75	167	63,8	53,1



a)



b)

3.4 pav. Išmatuoto Doherty galios stiprintuvo a) stiprinimo palyginimas su modeliavimo rezultatais; b) efektyvumo palyginimas su modeliavimo rezultatais ir AB klasės stiprintuvu

Išsamesnis prototipo santakos efektyvumo ir PAE palyginimas su AB klasės modeliavimo rezultatais pateiktas 3.2 lentelėje. Iš lentelės matyti, kad prototipo santakos efektyvumas yra didesnis praktiškai visame išmatuotame išėjimo galios ruože, o ties maksimalia efektyvumas yra vos 0,2 %

mažesnis už įprasto AB klasės stiprintuvo. Nors Doherty stiprintuvo prototipo santakos efektyvumo pranašumas nėra toks didelis kaip modeliavimo metu, vis tik jis yra reikšmingas. Prototipo PAE yra didesnis tik mažoje galioje, o viršijus 31,15 dBm išėjimo galią jis yra prastesnis. Taip yra dėl to, kad pagaminto prototipo stiprinimas yra gana mažas. Jeigu Doherty stiprintuvo stiprinimas būtų didelis, PAE pranašumas būtų didesnis ir didesniame išėjimo galios diapazone ir beveik sutaptu su santakos efektyvumo skirtumu.

3.2 lentelė. Doherty galios stiprintuvo prototipo ir AB klasės galios stiprintuvo efektyvumo palyginimas

Išėjimo galia, dBm	Prototipo santakos efektyvumas, %	AB klasės santakos efektyvumas, %	Santakos efektyvumo skirtumas, %	Prototipo PAE, %	AB klasės PAE, %	PAE skirtumas, %
18,8	10,7	6,1	4,6	10,0	6	4
22,1	16,4	9,6	6,8	14,8	11,6	3,2
26,5	29,0	23,2	5,8	25,7	22,7	3
28,1	35,0	28,7	6,3	30,7	28,1	2,6
29,7	41,9	35,2	6,7	36,2	34,1	2,1
31,15	48,3	42,1	6,2	40,9	40,7	0,2
32,1	52,8	47,3	5,5	44,6	45,4	-0,8
33,3	58,3	55,6	2,7	49,7	52	-2,3
34	60,8	61	-0,2	51,1	56,1	-5
34,75	63,8	63,9	-0,1	53,1	59,9	-6,8

Jeigu šiame prototipe būtų galimybė pasiųsti signalą tik į pagrindinį ar pagalbinį stiprintuvą ir atitinkamai išmatuoti tik jų išėjimo signalą, tai leistų plačiau ištirti Doherty stiprintuvo veikimą. Tai galimai leistų ir surasti prastesnio stiprinimo priežastį. Kadangi 3.4 paveikslo stiprinimo priklausomybėje yra matomas stiprinimo pikas ir yra lūžis efektyvumo charakteristikoje, tai reiškia, kad pagalbinis stiprintuvas veikia, tačiau nėra aišku koks yra jo didžiausias stiprinimas ir galutinė išėjimo galia. Taip pat stiprinimas yra prastesnis visame įėjimo galios diapazone ir tai rodo, kad pagrindinio stiprintuvo stiprinimas yra tikrai mažesnis. Iš naujo peržvelgta modeliavimo schema ir bandyta ją modifikuoti, kad gauti panašius rezultatus kaip ir išmatuoti. Nustatyta, kad panašiausi rezultatai gaunami, kai pagrindinio stiprintuvo įėjime tarp galios daliklio ir kondensatoriaus yra apie 2 dB nuostolių, o toje pačioje vietoje tik pagalbinio stiprintuvo dalyje yra apie 1 dB nuostolių. Taip pat prie nuostolių esant didelei išėjimo galiai prisideda ir tranzistoriaus temperatūra. Matavimų metu pagrindinio tranzistoriaus temperatūra pasiekė apie 80 C°, o pagal gamintojo specifikacijas esant 85 C° temperatūrai stiprinimas sumažėja apie 0,5 dB.

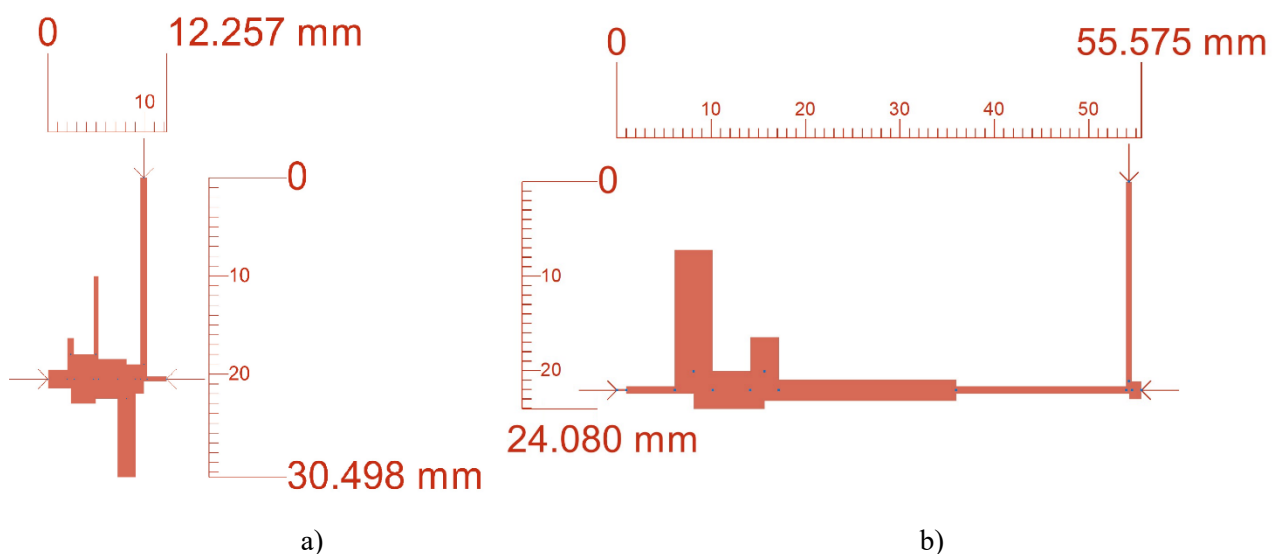
Apibendrinus, pagaminto Doherty galios stiprintuvo prototipas turi keletą reikšmingų skirtumų lyginant su modeliavimo rezultatais. Centrinis dažnis vietoj projektuoto 2,4 GHz nustatytas lygus 2,27 GHz. Stiprinimas yra (2–2,5) dB mažesnis, o efektyvumo lūžis yra apie 1,5 dB žemiau maksimalios galios. Taip yra dėl to, kad nepasiekiamas pakankamai didelė išėjimo galia dėl mažesnio stiprinimo.

4 TOBULINIMO KRYPTYS

4.1 Naujo Doherty stiprintuvo su CGH40006S pagalbinio stiprintuvo projektavimas

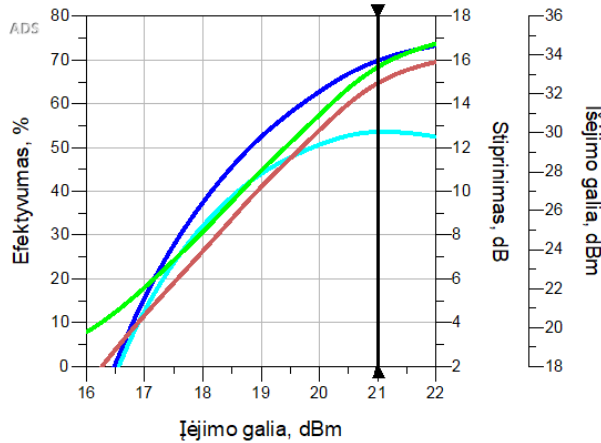
Kadangi suprojektuoto ir pagaminto Doherty stiprintuvo stiprinimas yra gana mažas, o dėl stiprinimo ir mažesnis PAE, buvo iš naujo atlikti pagalbinio ir Doherty stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi modeliavimai. Tam, kad palengvinti projektavimą, pirmiausia suprojektuojama įėjimo suderinimo grandinė, kuri suderintų $50\ \Omega$ impedansą su $10\ \Omega$. Kitas etapas yra išėjimo suderinimo grandinės projektavimas ir optimizavimas nekeičiant įėjimo suderinimo grandinės. Projektavimo eiga panaši kaip ir prieš tai aprašytų stiprintuvų: sukurtas optimizavimo valdiklis, kuris parenka tinkamiausius išėjimo suderinimo grandinės mikrojuostelinių takelių pločius ir ilgius, kad gauti 34 dBm išėjimo galią ir kuo geresnį efektyvumą (2,3–2,5) GHz dažnių ruože esant 21 dBm įėjimo galiai. Gautų įėjimo ir išėjimo suderinimo grandinių išdėstymas pavaizduotas 4.1 paveiksle.

Modeliavimo metu gautos charakteristikos pateiktos 4.2 paveiksle ir iš jų matome, kad esant 21 dBm įėjimo galiai ir centriniam dažniui, išėjime gauta 34 dBm galia, stiprinimas lygus 13 dB, santakos efektyvumas siekia 70 %, o PAE siekia 66,5 %. (2,3–2,5) GHz dažnių ruože stiprinimas yra tarp 12,5 dB ir 13 dB, santakos efektyvumas yra tarp 67 % ir 70 %, PAE yra tarp 63,5 % ir 66,9 %. Patobulinto stiprintuvo rezultatai yra geresni ir tolygesni kintant dažniui, nei pirmojo pagalbinio stiprintuvo su šiuo tranzistoriumi, aprašyto 2.2.2 skirsnyje.



4.1 pav. Patobulinto pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi a) įėjimo suderinimo grandinė; b) išėjimo suderinimo grandinė

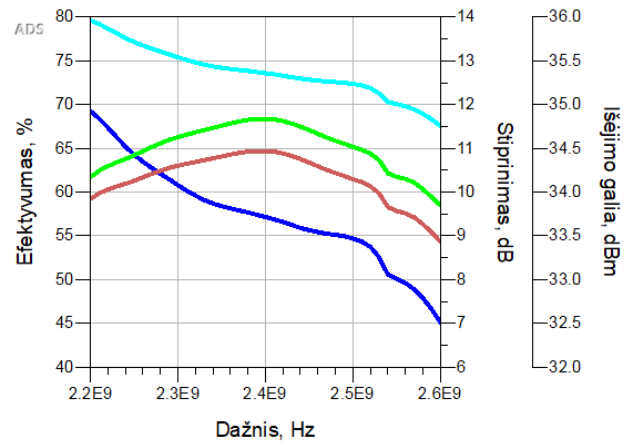
Priklausomybė nuo įėjimo galios, kai dažnis lygus 2,4 GHz



Pavs_dBm_H=21.000
Isejimo_galia_6W_b=33.715
Stiprinimas_6W_b=12.715
Santakos_efekt_6W_b=68.350
PAE_6W_b=64.692

a)

Priklausomybė nuo dažnio, kai įėjimo galia lygi 21 dBm

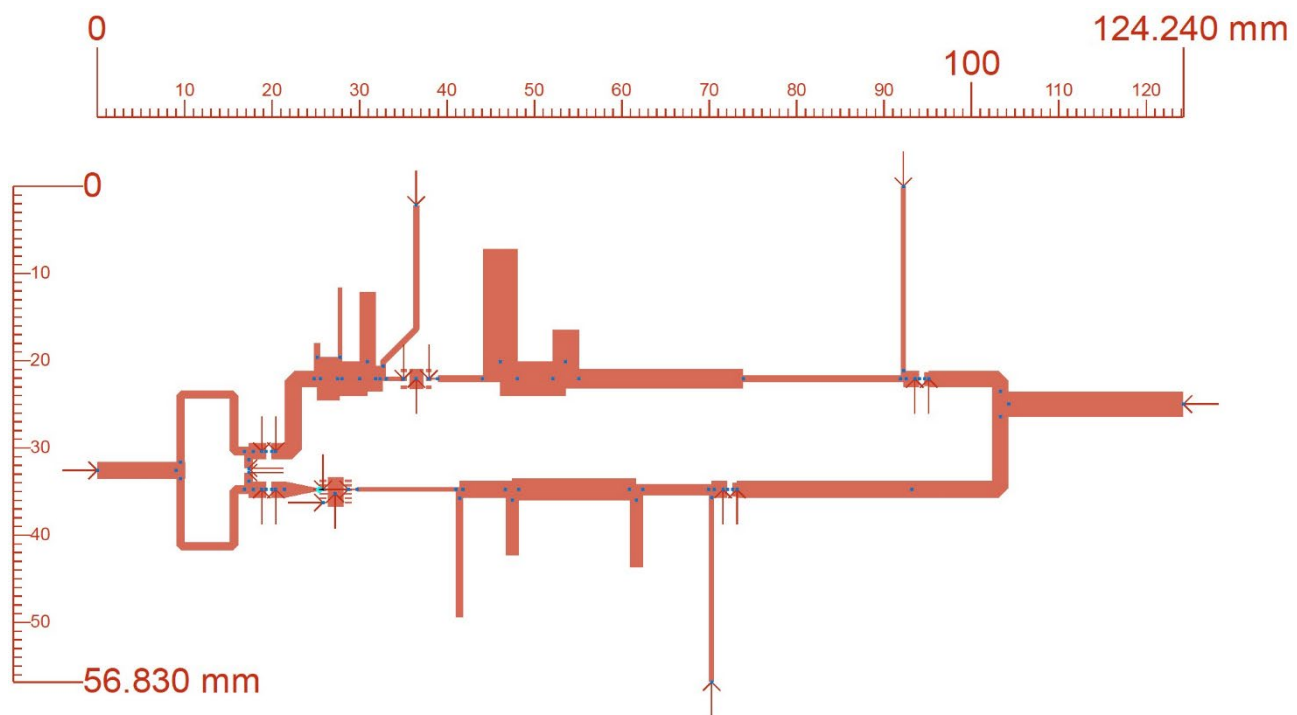


Isejimo_galia_6W —————
Stiprinimas_6W —————
Santakos_efekt_6W —————
PAE_6W —————

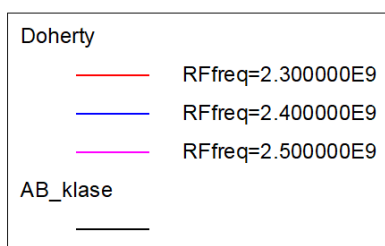
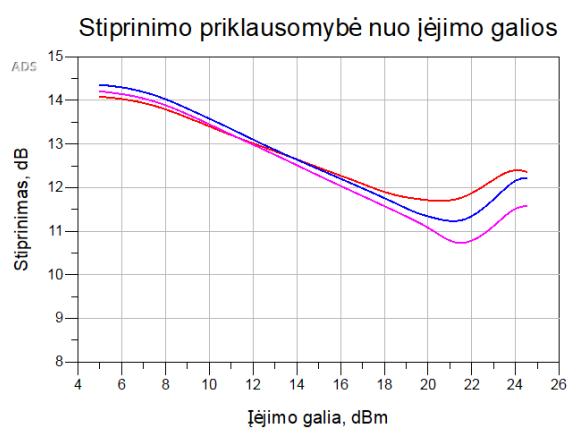
b)

4.2 pav. Patobulinto pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi parametų priklausomybė nuo a) įėjimo galios; b) parametų priklausomybė nuo dažnio

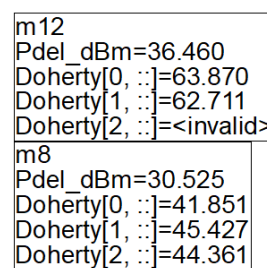
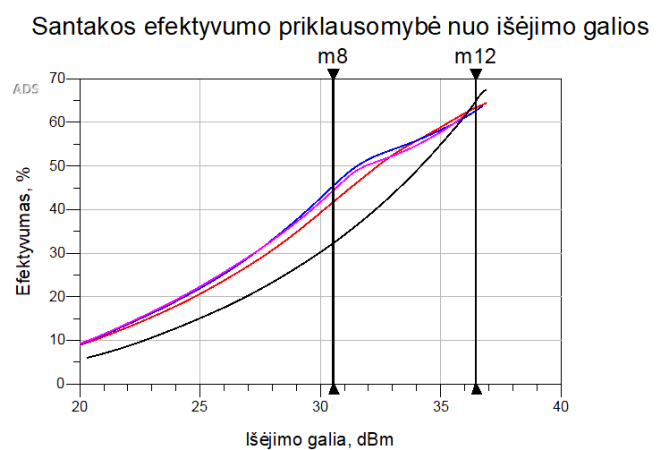
Šis pagalbinis stiprintuvas sujungiamas į Doherty stiprintuvo konfigūraciją ir surandami tinkami kompensavimo linijų ilgiai. Naujo stiprintuvo fizinis išdėstymas pateiktas 4.3 paveiksle. Palyginus su pirmąja šio stiprintuvo projektavimo iteracija, gautas 15 mm trumpesnis stiprintuvas, vos 6 mm ilgesnis nei pagaminto stiprintuvo. Modeliavimo rezultatai pateikti 4.4 paveiksle. Palyginus su pirmąja iteracija, stiprinimas ir santakos efektyvumas dažnių juostoje yra tolygesnis. Iš viso reikia 24,5 dBm galios įėjime, kad pasiekti apie 36,5 dBm išėjimo galią, tačiau galima įėjimo galią dar padidinti ir gauti efektyvumo piką toliau nuo maksimalios galios. Tuomet toks stiprintuvas geriau stiprintų signalus su didesniu PAPR. Efektyvumo charakteristika yra labai panaši į vienodų tranzistorių Doherty stiprintuvo varianto, tačiau šis stiprintuvas turi apie 3 dB stiprinimo pranašumą, o tai pagerina ir PAE. Šis suprojektuotas stiprintuvas įrodo, kad galima naudoti ir skirtingus tranzistorius Doherty stiprintuvo projektavimui. Naudojant CGH40006S tranzistorių ir pagrindiniam stiprintuvui, galima būtų gauti ir tiesesnę stiprinimą žemesnėje galioje. Toliau šis variantas nėra tiriamas, tačiau jeigu būtų galimybė, jis būtų pagamintas su jungtimis pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo testavimui atskirai.



4.3 pav. Patobulinto Doherty stiprintuvo su skirtingais tranzistoriais fizinis išdėstymas



a)



b)

4.4 pav. Patobulinto Doherty stiprintuvo su skirtingais tranzistoriais sumodeliuota a) stiprinimo priklausomybė nuo įėjimo galios; b) santakos efektyvumo priklausomybė nuo dažnio

4.2 Kitos Doherty stiprintuvų tobulinimo kryptys

Doherty galios stiprintuvų architektūra turi daug tobulintinų ir tyrimų vertų vietų. Šio darbo metu tirta tradicinė Doherty architektūra, tačiau ji turi vieną gana svarbų trūkumą. Sumodeliuoti

pagrindinis ir pagalbinis stiprintuvai veikia tinkamai (2,2–2,6) GHz dažnių ruože, tačiau Doherty stiprintuvo dažnių juosta yra 200 MHz siauresnė. Už (2,3–2,5) GHz dažnių ribų Doherty stiprintuvo efektyvumo charakteristika yra panaši į įprasto stiprintuvo, nėra pirmojo efektyvumo piko. Taip yra dėl to, kad impedanso inverteriui naudojama $\lambda/4$ ilgio linija, o tai reiškia, kad inverterio veikimas yra susijęs su signalo dažniu. Didesniame dažnyje šios linijos ilgis yra per didelis, o žemesniame per trumpas. Kompensavimo linijų ilgiai irgi yra susiję su dažniu ir pasiekti plačiau veikimą yra nemenka užduotis. Vis tik yra tiriami įvairūs šios architektūros patobulinimai, kuriant naujus išėjimo sudėtuvas [17], tiksliau įvertinant pagalbinio stiprintuvo tranzistoriaus išėjimo talpą [19,20] ir fazių skirtumo tarp pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo valdymu [21].

Taip pat geresnei apkrovos moduliacijai pasiekti gali būti naudojamas skaitmeninis pagalbinio stiprintuvo užtūros įtampos valdymas, kad pasiekti didesnę pagalbinio stiprintuvo išėjimo srovę. Tai leistų išvengti nevienodo dalinimo koeficiento daliklių naudojimo. Taip pat ši architektūra gali būti kombinuojama su gaubtinės sekimo architektūra, tačiau skaitmeninės elektronikos naudojimas daro projektavimą sudėtingesniu.

5 IŠVADOS

1. Analitinės apžvalgos skyriuje nustatyta, kad šiuolaikiniams signalams su dideliu PAPR efektyviai stiprinti reikalingos tokios stiprintuvų architektūros, kurios pasiekia didelį efektyvumą ne tik pasiekus įsotinimo galią, bet ir žemesnėje išėjimo galioje. Doherty galios stiprintuvai yra vieni tinkamiausių šiai problemai spręsti dėl jų didelio efektyvumo plačiame išėjimo galios diapazone ir paprastesnio projektavimo, palyginti su kitomis architektūromis.
2. Suprojektuoti du pagrindiniai AB klasės stiprintuvai. Nustatyta, kad projektuojant aukštų dažnių galios stiprintuvus dideliame efektyvumui pasiekti svarbu suderinti tranzistorių su apkrova ne tik fundamentiniam dažniui, bet ir antrajai bei trečiajai harmonikoms. Taip pat svarbu naudoti mažesnių nuostolių dielektrines medžiagas. Tyrimo metu nustatyta, kad naudojant PTFE dielektrinę medžiagą buvo pasiektas 5 % didesnis stiprintuvo efektyvumas nei naudojant FR4 medžiagą. Suprojektuoto pagrindinio stiprintuvo su CMPA0530002S tranzistoriumi stiprinimas esant 21 dBm galiai projektuojamame dažnių ruože yra (12,8–13,3) dB, o santakos efektyvumas yra (59–64,1) %.
3. Suprojektuoti du pagalbiniai C klasės stiprintuvai. Pagalbinio stiprintuvo su CMPA0530002S tranzistoriumi stiprinimas yra mažesnis dėl C klasės darbo taško. Dėl šios priežasties jo įėjime turi būti 3 dB daugiau galios, kad pasiekti panašią išėjimo galią kaip ir pagrindinio stiprintuvo. Jeigu naudoti didesnės įsotinimo galios ir didesnio stiprinimo CGH40006S tranzistorių C klasės pagalbiniam stiprintuvui, galima pasiekti panašią išėjimo galią esant vienodai pagrindinio ir pagalbinio stiprintuvo įėjimo galiai. Tokiu būdu galima išvengti nevienodo koeficiento galios daliklio Doherty stiprintuvo įėjime. Abu stiprintuvai pasiekia didelį efektyvumą ($> 61,5$ %) esant maksimaliai išėjimo galiai (apie 33 dBm), bet suprojektuoto stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi veikimas dažnių ruože yra mažiau tolygus.
4. Suprojektuoti trys Doherty galios stiprintuvai. Jiems suprojektuoti du Wilkinson galios dalikliai, išėjimo dalys ir kompensavimo linijos. Doherty stiprintuvui su vienodais tranzistoriais iš pradžių naudotas nesimetrinis galios daliklis, tačiau nustatyta, kad 6 dB žemiau maksimalios galios (ties pirmojo efektyvumo piko vieta) santakos efektyvumas siekia (41–43) %. Tai nėra itin daug, nes pagrindinis stiprintuvas nepasiekia pakankamai didelio efektyvumo. Pakeitus daliklį į simetrinį, kad pasiekti 36,5 dBm išėjimo galią reikia padidinti įėjimo galią 2,5 dB, o efektyvumas 6 dB žemiau maksimalios galios padidėjo iki (43–46,9) %. Pačiame pike efektyvumas siekia iki 52 %, tačiau piko vieta pasislinko 1 dB arčiau išėjimo galios. Esant maksimaliai 27 dBm įėjimo galiai pasiektas (8,6–9,6) dB

stiprinimas. Galiausiai suprojektuotas Doherty stiprintuvas su skirtingais tranzistoriais. Šio stiprintuvo stiprinimas yra didesnis, todėl reikia mažesnės įėjimo galios, kad pasiekti tokią pat išėjimo galią kaip ir jau aptartas Doherty stiprintuvas. Pagalbinio stiprintuvo su CGH40006S tranzistoriumi veikimas dažnių ruože yra netolygus, todėl ir suprojektuoto Doherty stiprintuvo veikimas šiuose dažniuose yra mažiau tolygus. Esant maksimaliai galiai santakos efektyvumas yra (64,3–68,7) %. 6 dB žemiau maksimalios išėjimo galios efektyvumas yra (41,2–44,5), tačiau efektyvumas tarp pikų (2,4–2,5) GHz dažnių juostoje yra prastesnis, nei stiprintuvo su vienodais tranzistoriais. Dėl šios priežasties gamybai pasirinktas Doherty stiprintuvas su vienodais tranzistoriais.

5. Pagamintas Doherty galios stiprintuvo prototipas buvo eksperimentiškai ištirtas, siekiant nustatyti stiprinimą ir efektyvumą plačiame išėjimo galios diapazone. Nustatyta, kad stiprintuvo išėjimo galia siekia 34,7 dBm su stiprinimu lygiu 7,7 dB, o santakos efektyvumas ties šia galia siekia 63,8 %. 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 41,8 %. Tokie rezultatai rodo, kad suprojektuotas stiprintuvas turi iki 6,7 % efektyvumo pranašumą, palyginus su įprastu AB klasės stiprintuvu. Didžiausias skirtumas tarp sumodeliuoto ir išmatuoto stiprintuvo yra mažesnis išmatuotas stiprinimas. To priežastį nustatyti yra sudėtinga, tačiau tikėtina, kad yra reikšmingų nuostolių stiprintuvo įėjimo dalyje, tą patvirtina ir išmatuotas prastesnis įėjimo atspindžio (S_{11}) parametras.
6. Nustatytos kelios tobulinimo kryptys. Ištyrus pagaminta stiprintuvą, naujo modeliavimo metu siekta išspręsti jo didžiausią trūkumą – prastą stiprinimą. Iš naujo suprojektuotas pagalbinis stiprintuvas su CGH40006S tranzistoriumi ir modeliavimo metu gautos tolygesnės charakteristikos dažnių srityje. Su nauju stiprintuvu suprojektuotas ir Doherty stiprintuvas, kurio efektyvumas yra labai artimas Doherty stiprintuvui su vienodais tranzistoriais, tačiau jo stiprinimas yra (12,5–13) dB, taigi apie 3,5 dB didesnis. Padidinus įėjimo galią, galima būtų gauti labiau nutolusį efektyvumo piką, kas tinka signalams su didesniu PAPR stiprinti. Kita tobulintina vieta yra Doherty stiprintuvų veikimo dažnių juostos plotis, kuris yra apribotas impedanso inverterio ir kitų dalių, kurių veikimas tiesiogiai susijęs su mikrojuostelinių linijų ilgiu. Taip pat galimas skaitmeninės elektronikos naudojimas pagalbinio stiprintuvo užtūros įtampai valdyti, kad išvengtų nesimetrinių galios daliklių naudojimo.

LITERATŪRA

1. Camarchia, V., Pirola, M., Quaglia, R., Jee, S., Cho, Y., & Kim, B. (2015). The Doherty Power Amplifier: Review of Recent solutions and Trends. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(2), 559–571. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2014.2387061>
2. Singh, S., & Malik, J. (2021). Review of efficiency enhancement techniques and linearization techniques for power amplifier. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 49(3), 762–777. <https://doi.org/10.1002/cta.2956>
3. Cripps, S. C. (2006). *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*. Artech House Publishers.
4. Watkins, G. T., & Mimis, K. (2015). Envelope tracking RF power amplifier with lead-lag modulator. *2015 IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications (PAWR)*. <https://doi.org/10.1109/pawr.2015.7139206>
5. Cao, T., Huang, F., Zhang, Q., & Liu, Y. (2018). High efficiency and wideband hybrid envelope amplifier for envelope tracking operation of wireless transmitter. *2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*. <https://doi.org/10.1109/ieee-iws.2018.8400847>
6. Yan, J. J., Cowles, D. E., Kimball, D., & Mattsson, A. (2018). Multi-Carrier Envelope Tracking Power Amplifier. *MILCOM 2018 - 2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*. <https://doi.org/10.1109/milcom.2018.8599704>
7. Ruan, X. (2017). A Review of Envelope Tracking Power Supply for Mobile Communication Systems. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2(4), 277–291. <https://doi.org/10.24295/cpsstpea.2017.00026>
8. Grebennikov, A. (2019). *Radio Frequency and Microwave Power Amplifiers: Efficiency and Linearity Enhancement Techniques (Materials, Circuits and Devices)*. The Institution of Engineering and Technology.
9. Grebennikov, A. (2015). *RF and Microwave Power Amplifier Design, Second Edition*. McGraw-Hill Education.
10. Kazimierczuk, M. K. (2014). *RF Power Amplifiers* (2nd ed.). Wiley.
11. Barton, T. (2016). Not Just a Phase: Outphasing Power Amplifiers. *IEEE Microwave Magazine*, 17(2), 18–31. <https://doi.org/10.1109/mmm.2015.2498078>
12. Li, S., Chen, S., Cai, J., Zhou, X., Wang, G., & Liu, T. (2021). A Bandwidth Enhanced Outphasing Power Amplifier. *2021 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC)*. <https://doi.org/10.1109/csrswtc52801.2021.9631561>
13. Aggrawal, E., & Rawat, K. (2020). Reconfigurable Chireix Outphasing Power Amplifier Over Multiple Frequency Bands. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(6), 1019–1023. <https://doi.org/10.1109/tcsii.2019.2926529>
14. Meng, M., Cheng, Z., Xu, P., & Liu, G. (2020). Improved Combiner Design for Broadband Outphasing Power Amplifier. *2020 IEEE 5th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM)*. <https://doi.org/10.1109/icicm50929.2020.9292290>

15. Pengelly, R., Fager, C., & Ozen, M. (2016). Doherty's Legacy: A History of the Doherty Power Amplifier from 1936 to the Present Day. *IEEE Microwave Magazine*, 17(2), 41–58. <https://doi.org/10.1109/mmm.2015.2498081>
16. Iqbal, M., & Iqbal, J. (2018). A 20W single-input doherty power amplifier's bandwidth extension for wireless communication. *2018 15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. <https://doi.org/10.1109/ibcast.2018.8312314>
17. Dong, W., Kong, W., & Xia, J. (2021). A Highly Efficient Doherty Power Amplifier Based on Harmonic-Tuned Technique for 5G Application. *2021 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC)*. <https://doi.org/10.1109/csrswtc52801.2021.9631586>
18. Abadi, M. N. A., Golestaneh, H., Sarbishaei, H., & Boumaiza, S. (2014). An extended bandwidth Doherty power amplifier using a novel output combiner. *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*. <https://doi.org/10.1109/mwsym.2014.6848510>
19. Nikandish, G., Staszewski, R. B., & Zhu, A. (2020). Breaking the Bandwidth Limit: A Review of Broadband Doherty Power Amplifier Design for 5G. *IEEE Microwave Magazine*, 21(4), 57–75. <https://doi.org/10.1109/mmm.2019.2963607>

PRIEDAI

A priedas. Paskirstytųjų parametų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis projektavimo ir tyrimo straipsnio medžiaga

B priedas. Didelio efektyvumo Doherty galios stiprintuvo projektavimo ir tyrimo straipsnio medžiaga

C priedas. Pažyma dėl straipsnių publikavimo

A priedas. Paskirstytųjų parametrų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis projektavimo ir tyrimo straipsnio medžiaga

PASKIRSTYTŲJŲ PARAMETRŲ ŽEMŲJŲ DAŽNIŲ FILTRO SU ATVIROMIS KILPOMIS PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

Erik Mickevič, Vaidotas Barzdėnas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas (VILNIUS TECH)

Anotacija

Šiuo metu aukštadažnių filtrų projektavimui dažniausiai naudojami diskretūs, sutelktųjų parametrų komponentai. Tačiau dėl didelių pašalinių parametrų įtakos filtro dažninėms charakteristikoms, jų projektavimas aukštadažniuose grandynuose tampa sudėtingu, brangiu, o kartais ir neįmanomu procesu. Šiems iššūkiams spręsti siūlomi paskirstytųjų parametrų komponentai, sudaryti iš mikrojuostelinių linijų, leidžiančių efektyviai projektuoti aukštadažnius įrenginius su reikiamomis dažninėmis savybėmis. Todėl šiame darbe, naudojant programinę *Keysight ADS* įrangą ir matematinius modelius, skaičiuojama ir kompiuteriniu būdu modeliuojama žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis geometrinė struktūra ir pagrindiniai matmenys, projektuojama testavimui skirta spausdintinė plokštė. Filtras yra išbandomas ir ištiriamas eksperimentiškai, naudojant *LA19-1304B* vektorinį grandynų analizatorių. Tyrimo metu gaunami tokie pagrindiniai žemųjų dažnių filtro parametrai: ribinis dažnis nedidesnis nei 2,6 GHz, slopinimas ties 4 GHz daugiau nei 24 dB, dažninės charakteristikos netolygumas turi neviršyti 0,1 dB. Šie filtrai plačiai naudojami ir yra aktualūs šiuolaikinėse belaidžio ryšio sistemose.

REIKŠMINIAI ŽODŽIAI. Aukštadažniai grandynai, mataviniai vektoriniai grandynų analizatoriai, paskirstytųjų parametrų filtrai, spausdintinė plokštė, žemųjų dažnių filtro projektavimas.

Ivadas

Elektronikos technologijos vis įgauna didesnę vystymosi pagreitį, vis daugiau įrenginių tobulėja ir tampa išmaniaisiais. Tokie įrenginiai renka, apdoroja informaciją ir dalinasi ja su kitais įrenginiais naudojant įvairias belaidžio ryšio technologijas, tokias kaip Wi-Fi, Bluetooth, NFC, tarp jų ir mobiliojo ryšio technologijas tokias kaip GSM, 4G, 5G. Šie įrenginiai priskiriami daiktų internetui, kuris šiuo metu vis labiau tobulėja (Top 10 IoT, 2020). Tai reiškia, kad dabartiniai elektronikos ir telekomunikacijų inžinieriai susiduria su įvairiais aukštadažnių grandynų projektavimo iššūkiais: kaip tinkamai įvertinti pilnutinę varžą, projektuoti suderinimo grandines, filtrus, užtikrinti signalo vientisumą ir daug kitų (Altium, 2021), (Chen, 2015), (Jiang, 2018).

Įprastuose diskretiniuose sutelktųjų parametrų komponentuose, aukštuosiuose dažniuose pasireiškia pašaliniai parametrai, kurie gali ženkliai pakeisti komponento pilnutinę varžą, įnešti galios nuostolius, bloginti komponentų kokybinius parametrus (Bowick, 2008), (Dong, 2020). Galima naudoti ir aukštadažnėms grandinėms skirtus komponentus, turinčius ypač mažus pašalinius parametrus, tačiau jų kaina keliais kartus didesnė. Todėl tokių komponentų naudojimas didina ir pačio gaminamo įrenginio savikainą. Šioms problemoms spręsti naudojami paskirstytųjų parametrų komponentai. Šie komponentai yra tam tikrų parametrų ir struktūros mikrojuostelinės linijos sudarytos ant spausdintinės plokštės. Priklausomai nuo jų geometrinės parametrų, formų, galima sudaryti tokius komponentus kaip filtrai, galios dalikliai, šakotuvai, cirkulatoriai, antenos, rezonatoriai ir daugelį kitų.

Filtras yra keturpolis, kurio paskirtis – praleisti tam tikrus, pageidaujamus elektrinių signalų dažnius, o kitus nuslopinti. Tokie aukštadažniai filtrai dažnai projektuojami tik iš pasyvių, sutelktųjų parametrų komponentų (kondensatorių ir induktyvumo ričių) panaudojant jų dažnines savybes. Išskiriami keturių tipų filtrai: žemųjų dažnių, aukštųjų dažnių, juostiniai bei užtvariniai filtrai. Projektuojant aukštadažnius filtrus, dažniausiai naudojamas įneštinių nuostolių metodas, kuriame galima išskirti kelis skirtingus filtrų tipus: *Butterworth*, *Chebyshev*, *Bessel* ir kitus. *Butterworth* filtro pralaidumo juosta yra lygiausia ir turi mažiausius nuostolius. *Chebyshev* filtro pralaidumo juosta turi tam tikros vienodos amplitudės netolygumą, tačiau ir statesnį slopinimą. *Bessel* filtrai dažniausiai naudojami fazės keitikliuose, nes jų fazės pokytis visoje dažnių juostoje yra tiesiausias, lyginant su prieš tai minėtais. Dar yra eliptinės funkcijos filtrai, kurie apibūdina ir pralaidumo ir slopinimo juostos netolygumą. Visi šie filtrai gali būti lengvai ir greitai projektuojami naudojant specialias prototipų lenteles, kuriose yra kondensatorių ir induktyvumo ričių normuoti parametrai (Bowick, 2008). Naudojant specialias formules galima paskaičiuoti filtro komponentų vertes tam tikram dažniui, pilnutinės varžos sistemai, slopinimo koeficientui ir netolygumo lygiui. Nors aukštadažnių filtrų projektavimas naudojant diskrečiuosius, sutelktųjų parametrų, paviršinio montažo kondensatorius ir induktyvumo rites yra labai populiarus, tačiau projektuojant šiuos filtrus tenka rinktis ženkliai brangesnius, mažesnių pašalinių parametrų, komponentus. Be to, ne visada galima įsigyti reikiamų nominalų komponentus, galbūt tokie nėra net gaminami. Todėl siekiant spręsti minėtas problemas, projektuojami paskirstytųjų parametrų filtrai, sudaryti iš mikrojuostelinių linijų, leidžiantys atpiginti projektuojamą aukštadažnį įtaisą ir gauti geresnes dažnines savybes.

Darbo tikslas – suprojektuoti, pagaminti, ištestuoti ir ištirti paskirstytųjų parametų, žemųjų dažnių filtrą su atviromis kilpomis, kurio ribinis dažnis 2,6 GHz, slopinimas ties 4 GHz bent 24 dB, o dažninės charakteristikos netolygumas siektų bent 0,1 dB arba būtų mažesnis. Tokių parametų filtrai naudojami šiuolaikinėse belaidžio ryšio sistemose.

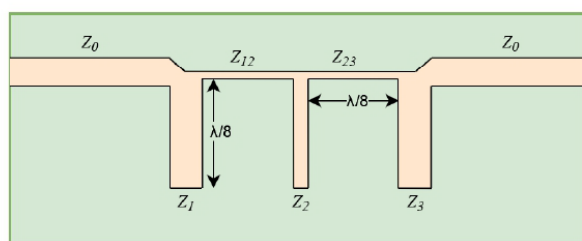
Vykdant šio filtro projektavimą ir tyrimus, buvo sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Taikant programinius paketus ir matematinius modelius, suskaičiuoti šio filtro geometrinę struktūrą ir pagrindinius matmenis;
2. Suprojektuoti šio filtro spausdintinę plokštę ir ją pagaminti;
3. Pagamintas filtras turėtų būti ištestuotas ir ištirtas naudojant LA19-1304B vektorinį grandynų analizatorių.

Šio filtro projektavime ir tyrime buvo taikyti matematiniai, kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Skaičiuojant šio filtro geometrinius matmenis buvo naudoti matematiniai metodai, bei rezultatams patikrinti *Keysight ADS* programinė įranga (Keysight ADS, 2024). Spausdintinių plokščių, skirtų suprojektuoto filtro testavimui ir tyrimams, projektavimui panaudota *Altium Designer* programinė įranga (Altium, 2024). Taip pat filtro veikimas eksperimentiškai tirtas naudojant *LA19-1304B* vektorinį grandynų analizatorių.

Paskirstytųjų parametų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis geometrinių matmenų skaičiavimas

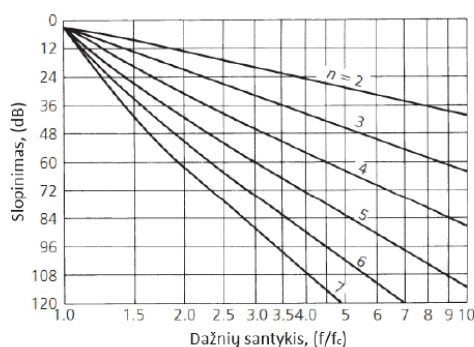
Projektuojamo žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis struktūros pavyzdys pateikiamas 1 paveiksle. Šią filtro struktūrą sudaro mikrojuostelinė linija su šešiomis atkarpomis, turinčiomis vienodą arba skirtingą pilnutinę varžą: Z_0 (50 Ω), Z_1 , Z_{12} , Z_2 , Z_{23} , Z_3 . Prieš skaičiuojant šių atkarpų geometriją, pirmiausia turime užsiduoti reikalavimus šiam projektuojamam filteriui: ribinis dažnis nemažesnis nei $f_c=2,6$ GHz, slopinimas ties 4 GHz bent 24 dB, o dažninės charakteristikos netolygumas neturi viršyti 0,1 dB.



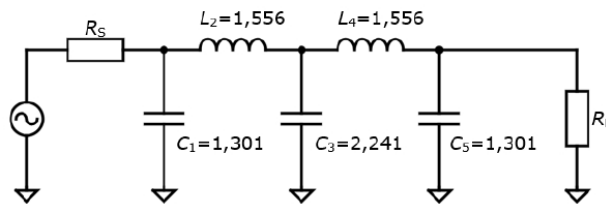
1 pav. Paskirstytųjų parametų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis struktūra

Šaltinis: sudaryta autorių

Užsiduotas 0,1 dB dažninės charakteristikos netolygumas nusako, kad projektuojamas žemųjų dažnių filtras turėtų būti *Chebyshev* tipo. Nagrinėdami žemųjų dažnių *Chebyshev* filtrų dažninių charakteristikų šeimą (2 pav.) matome, kad norint turėti mažiausiai 24 dB slopinimą ties 4 GHz dažniu, reikia mažiausiai 5 eilės filtro. Žinodami *Chebyshev* filtro eilę, iš aukštadažnių grandynų projektavimo žinytų arba matematinių modelių galime nesudėtingai surasti ir pačią filtro grandinę ir normuotas elementų vertes (Bowick, 2008). Šio žemųjų dažnių filtro grandynas su normuotomis elementų vertėmis pavaizduotas 3 paveiksle.

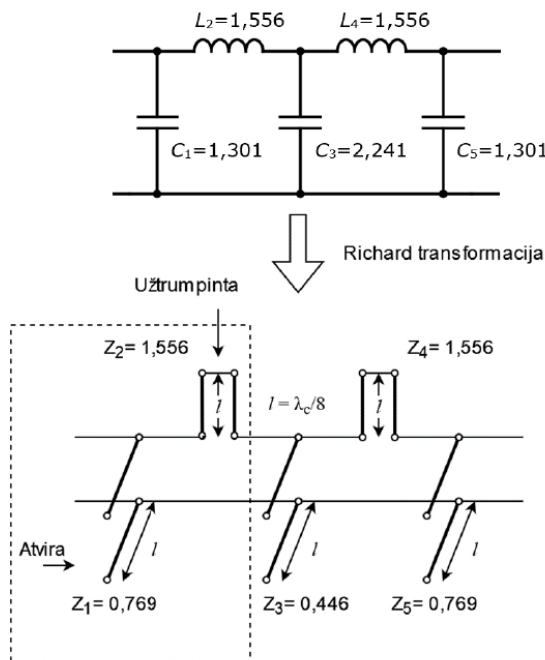


2 pav. Dažninių charakteristikų šeima 0,1 dB netolygumo *Chebyshev* filteriui



3 pav. 5-osios eilės *Chebyshev* žemųjų dažnių filtro su 0,1 dB netolygumu grandynas ir nomuotos elementų vertės. Šiame grandyne R_S atitinka šaltinio varžą ir R_L - apkrovos varžą, kurios yra lygios 50Ω
Šaltinis: sudaryta autorių

Sekančiuose žingsniuose atliekami veiksmai naudojant *Richard* transformaciją ir *Kuroda* tapatybes. *Richard* transformacija leidžia gauti reikiamą induktyvumą ar talpą naudojant atviras arba užtrumpintas mikrojuostelines kilpas. *Kuroda* tapatybės leidžia fiziškai atskirti kilpas naudojant perdavimo linijų dalis, nekeičiant filtro savybių, bei pakeisti nuoseklias kilpas (induktyvumus) į lygiagrečias kilpas (talpas) bei taip palengvinti projektavimą bei gamybą. Naudojant *Richard* transformaciją elementai pakeičiami vienetinio ilgio ($\lambda/8$) kilpomis, kurios pavaizduotos 4 paveiksle. Reiktų atkreipti dėmesį, kad kondensatoriai transformuojami atvirkščiu dydžiu, nei normuota kondensatoriaus vertė bei esant $\omega = 1 \text{ rad/s}$.

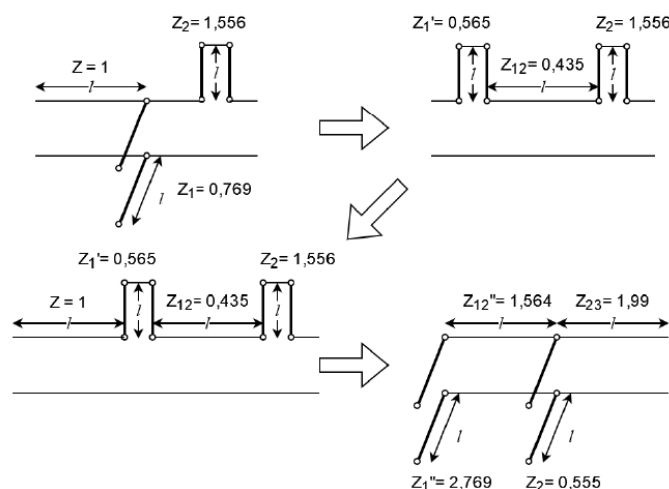


4 pav. Projektuojamo filtro elementų *Richard* transformacija
Šaltinis: sudaryta autorių

Sekantys veiksmai atliekami su 4 paveiksle punktyru pažymėta dalimi. Naudojant *Kuroda* tapatybę, Z_1 elementas pakeičiamas į nuoseklų induktyvumą Z_1' , atskirtą nuo Z_2 panaudojus vienetinio ilgio perdavimo liniją. Toliau Z_2 ir nauja gauta perdavimo linija yra pakeičiami į lygiagrečią talpą Z_2'' . Z_1' induktyvumas su nauja vienetinio perdavimo linija irgi yra pakeičiami į lygiagrečią talpą Z_1'' (5 pav.). Šių veiksmų metu taip pat gauname perdavimų linijų, kurios jungia elementus, pilnutines varžas. Filtras yra simetrinis Z_3 atžvilgiu, todėl Z_4 , Z_5 , Z_{34} ir Z_{45} vertės yra atitinkamai tokios pat kaip jau apskaičiuotos.

Dabar turime filtrą sudarytą vien iš lygiagrečių atvirų kilpų (talpų), atskirtų viena nuo kitos $\lambda/8$ ilgio mikrojuostelinėmis perdavimo linijomis. Kiekvienos atviros kilpos bei perdavimo linijų jungiančių jas pilnutinės varžos, ilgiai bei pločiai yra randami naudojant *Keysight ADS* programinio paketo *LineCalc* įrankį ir

surašytos į 1 lentelę. Matmenys yra suapvalinami 0,1 mm tikslumu. Šie parametrai yra teoriniai ir skaičiavimai neįvertina visų sąveikų tarp komponentų ir nuostolių, todėl projektavimo metu jas tenka pakoreguoti taip, kad ribinis dažnis būtų arčiau reikiamo. Nustatyta, kad reikia patrumpinti apskaičiuotus ilgius apie 5 %.



5 pav. Kuroda tapatybių taikymas 4 paveiksle punktyru pažymėtai daliai
Šaltinis: sudaryta autorių

1 lentelė

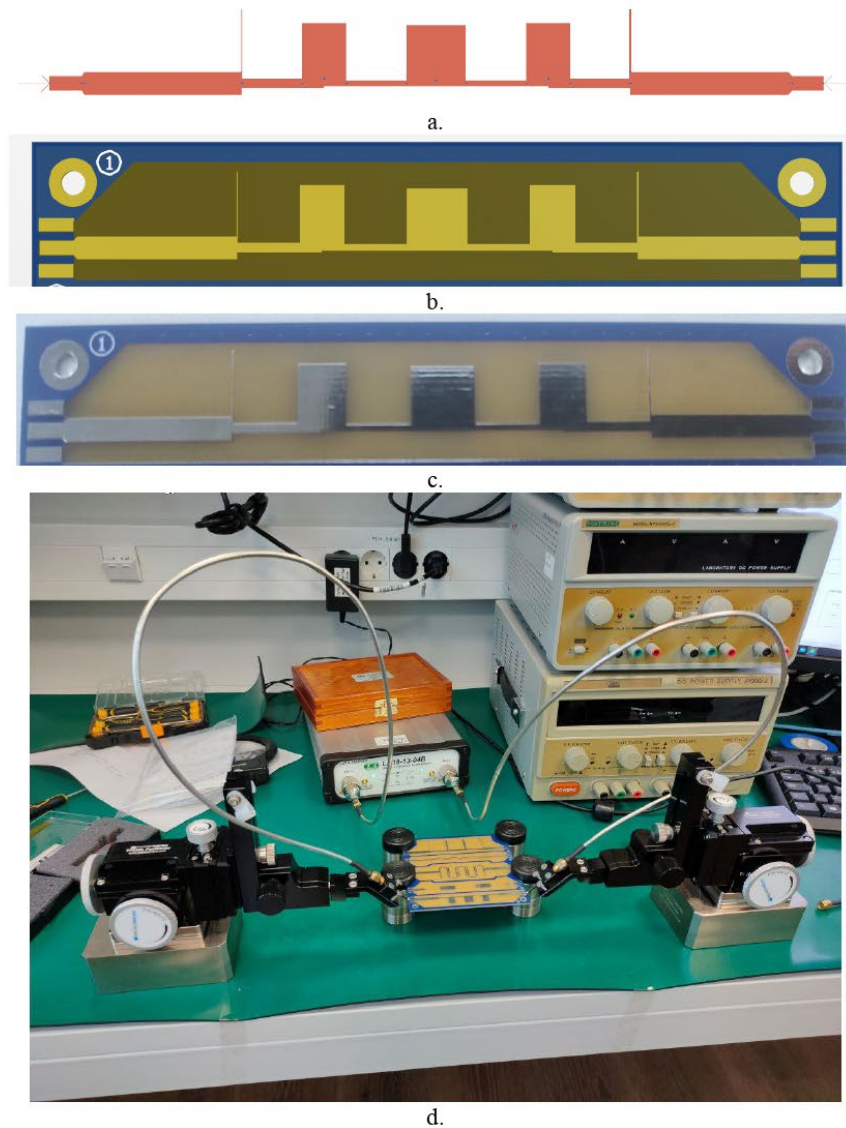
Apskaičiuoti žemų dažnių filtro su atviromis kilpomis struktūros elementų parametrai

Elementas	Normuota pilnutinė varža	Pilnutinė varža, Ω	Apskaičiuotas mikrojuostelės plotis, mm	Apskaičiuotas mikrojuostelės ilgis ($\lambda/8$), mm	Galutinis mikrojuostelės ilgis ($\lambda/8$), mm
$Z_1 = Z_5$	2,769	138	0,2	8,5	8
$Z_2 = Z_4$	0,555	28	6,6	7,4	7,1
Z_3	0,446	22	9	7,3	6,9
$Z_{12} = Z_{45}$	1,564	78	1,1	8	7,6
$Z_{23} = Z_{34}$	1,990	100	0,6	8,2	7,7

Šaltinis: sudaryta autorių

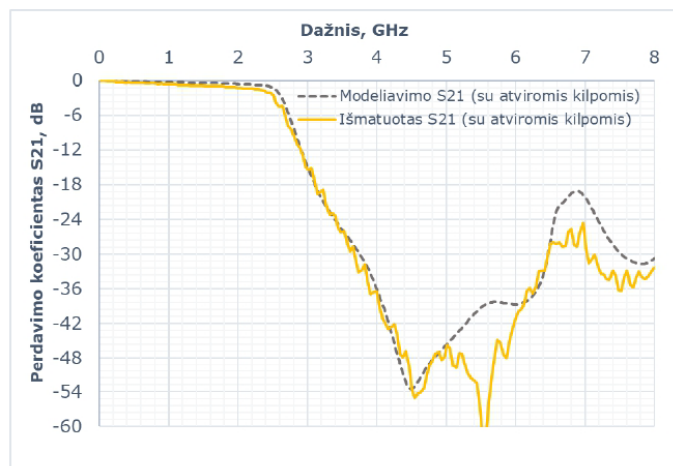
Paskirstytųjų parametru žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis matavimo rezultatai

Suskaičiavus paskirstytųjų parametru žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis geometrinius parametrus, ši filtro struktūra buvo nubraižyta ir kompiuteriniu būdu sumodeliuota *Keysight ADS* programiniame pakete. Filtro vaizdas šiame programiniame pakete pavaizduotas 6 pav., a. Įsitikinus, kad šio filtro pagrindiniai parametrai atitinka išsikeltus reikalavimus, jo geometrinė konfigūracija buvo perkelta į *Altium Designer* programinį paketą, siekiant suprojektuoti spausdintinę plokštę ir paruošti ją gamybai. Projektuojamo filtro vaizdas *Altium Designer* programiniame pakete pavaizduotas 6 pav., b. Žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis spausdintinė plokštė buvo pagaminta *PCBWay* gamintojo, Kinijoje, naudojant 1,6 mm storio KB-6165F 7628 laminatą, kurio dielektrinė skvarba prie 1 GHz yra 4,6, o nuostolių koeficientas 0,016. Pagaminto žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis vaizdas pavaizduotas 6 pav., c. Gavus pagamintą spausdintinę plokštę ir atlikus vizualinę patikrą, pažeidimų neaptikta. Plokštės storis atitiko naudojamą modeliavimo metu ir buvo su gamintojo deklaruojama ± 10 % paklaida. Prilietus *PacketMicro* zondus, buvo atliekami matavimai su vektoriniu grandynų analizatoriumi *LA19-1304B*. Įranga buvo sukalibruota matavimo režiams nuo 3 MHz iki 8,5 GHz su 2001 matavimo taškų (žingsnis apie 4,2 MHz). Šio filtro matavimo stendas pavaizduotas 6 pav., d. Atlikus matavimus ir išsamius tyrimus gauta, kad šio filtro ribinis dažnis ties -3 dB yra apie 2,55 GHz ir tik -0,08 GHz mažesnis nuo modeliuotos kompiuteriniu būdu, ir tik -0,05 GHz nuo išsikeltos 2,6 GHz tikslo. Slopinimas ties 4 GHz gautas apie 36,5 dB (kai kompiuterinio modeliavimo metu 36 dB) yra gerokai didesnis nei užsibrėžtas tikslas >24 dB. Tuo tarpu dažninės charakteristikos netolygumai neviršijo užsaiduoto <0,1 dB lygio. Matavimo ir kompiuterinio modeliavimo rezultatų palyginimo grafikas pateiktas 7 paveiksle.



6 pav. Paskirstytųjų parametrų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis: a) vaizdas *Keysight ADS* programiniame pakete; b) vaizdas *Altium Designer* programiniame pakete; c) vaizdas pagamintoje spausdintinėje plokštėje; d) matavimo stendo vaizdas

Šaltinis: sudaryta autorių



7 pav. Paskirstytųjų parametų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis S21 perdavimo koeficiento kompiuterinio modeliavimo ir matavimo rezultatų palyginimas

Šaltinis: sudaryta autorių

Išvados

1. Įprastuose diskretiniuose sutelktųjų parametų komponentuose, aukštuosiuose dažniuose pasireiškia pašaliniai parametrai, kurie gali ženkliai pakoreguoti komponento pilnutinę varžą, sukelti galios nuostolius ir pabloginti komponentų kokybę. Galima specialiai naudoti aukštųjų dažnių grandinėms skirtus komponentus, kuriuose pašaliniai parametrai yra ypatingai maži, tačiau jų kaina kelis kartus didesnė nei įprastų. Todėl šių komponentų naudojimas didina gaminamo įrenginio savikainą. Šioms problemoms spręsti dažnai naudojami paskirstytųjų parametų komponentai. Šiame darbe išsamiai pateikėme ir paaiškinome paskirstytųjų parametų, žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis projektavimo metodiką.
2. Pateikta žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis skaičiavimo metodika apima šiuos pagrindinius teorinio skaičiavimo žingsnius: filtro eilės ir konfigūracijos pasirinkimą atsižvelgiant į išsikeltus pagrindinius parametrus; projektuojamo filtro elementų *Richard* transformaciją; *Kuroda* tapatybių taikymą.
3. Siekiant patikrinti atliktus skaičiavimus ir atlikti žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis patikrą, buvo atliktas kompiuterinis modeliavimas, naudojant *Keysight ADS* programinį paketą. Kompiuterinio modeliavimo metu gauta, kad šio filtro ribinis dažnis ties -3 dB yra apie 2,65 GHz, slopinimas ties 4 GHz siekia net 36 dB, dažninės charakteristikos netolygumai mažesni nei 0,1 dB ir atitinka išsikeltus tikslus.
4. Siekiant pagaminti ir išmatuoti pagrindinius žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis parametrus, su *Altium Designer* programiniu paketu buvo suprojektuota ir pagaminta šio filtro spausdintinė plokštė. Atlikus su vektoriniu grandynų analizatoriumi *LA19-1304B* perdavimo koeficiento S21 parametro matavimus gauta, kad šio filtro ribinis dažnis ties -3 dB yra apie 2,55 GHz ir tik -0,05 GHz mažesnis nei išsikelto 2,6 GHz tikslo. Slopinimas ties 4 GHz, gautas apie 36,5 dB ir yra gerokai daugiau nei užsibrėžtas pradinis tikslas >24 dB, o dažninės charakteristikos netolygumai <0,1 dB.

Literatūra

1. Altium. The Digital Engineer's Guide to RF PCB Design Guidelines: Layout and Routing. 2021. [Žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga Internetu: <https://resources.altium.com/p/digital-engineers-guide-rf-pcb-layout-and-routing>
2. Altium. Altium Designer 24 From Requested to Required. 2024. [Žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga Internetu: <https://www.altium.com/altium-designer/latest-release>
3. Bowick C., Bayler J., Aljuni C. RF Circuit Design 2nd edition. Elsevier. 2008.
4. Chen A. RF Design Considerations. VP of Technology, Laird, 2015. [Žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga Internetu: <https://www.rfglobalnet.com/doc/rf-design-considerations-0001>
5. Jiang E. Understand RF PCB Design – view and solutions. 2018. [Žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga Internetu: Prieiga per internetą: <https://www.ncabgroup.com/blog/understand-rf-pcb-design-view-and-solutions/>

6. Keysight. PathWave Advanced Design System. 2024 [Žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga Internetu: www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html
7. Dong, M. RF Circuits and Applications for Practicing Engineers. Artech House. 2020.
8. Top 10 IoT applications in 2020. [Žiūrėta 2024-02-20] Prieiga Internetu: <https://iot-analytics.com/top-10-iot-applications-in-2020/>
9. White, J. F. High Frequency Techniques: An Introduction to RF and Microwave Engineering. John Wiley & Sons, 2016.

DESIGN AND INVESTIGATION OF A DISTRIBUTED PARAMETER, LOW-FREQUENCY FILTER WITH OPEN-CIRCUITED STUBS

Summary

Currently, in the design of high-frequency filters, discrete components with lumped parameters are most commonly used. However, due to the significant influence of parasitic parameters on the frequency characteristics of the filter, their design in high-frequency circuits becomes a complex, expensive, and sometimes impossible process. To address these challenges, distributed parameter components made of microstrip lines are proposed, allowing for the efficient design of high-frequency devices with the required frequency characteristics. Therefore, in this work, using Keysight ADS software and mathematical models, the geometric structure and main dimensions of a low-pass filter with open-circuited stubs are calculated and computer-modeled, and a printed circuit board designed for testing is designed. The filter is tested and examined experimentally using an LA19-1304B vector network analyzer. During the study, the following key parameters of the low-frequency filter are obtained: a cutoff frequency not exceeding 2.6 GHz, attenuation at 4 GHz of more than 24 dB, and frequency-response ripple not exceeding 0.1 dB. These filters are widely used and are relevant in modern wireless communication systems.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Erik Mickevič.

Mokslų laipsnis ir vardas: inžinerijos mokslų bakalauras

Darbo vieta ir pozicija: Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH), Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros magistrantas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: aukštadažnė elektronika.

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 60957188, erik.mickevic@stud.vilniustech.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Vaidotas Barzdėnas.

Mokslų laipsnis ir vardas: daktaras, profesorius

Darbo vieta ir pozicija: Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH), Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros profesorius.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: aukštadažnė elektronika, integrinių grandynų projektavimas, šiuolaikinė mikro- ir nanoelektronika.

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 68451453 vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Erik Mickevič.

Science degree and name: bachelor of engineering

Workplace and position: Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, M. Sc. student.

Author's research interests: high-frequency electronics.

Telephone and e-mail address: 8 60957188, erik.mickevic@stud.vilniustech.lt

Author name, surname: Vaidotas Barzdėnas.

Science degree and name: Ph. D., professor.

Workplace and position: Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, professor.

Author's research interests: high-frequency electronics, integrated circuit design, modern micro- and nanoelectronics.

Telephone and e-mail address: 8 68451453 vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt

B priedas. Didelio efektyvumo Doherty galios stiprintuvo projektavimo ir tyrimo straipsnio medžiaga

DIDELIO EFEKTYVUMO DOHERTY GALIOS STIPRINTUVO PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

Erik Mickevič, Vaidotas Barzdėnas, Andžej Borel
Vilniaus Gedimino technikos universitetas (VILNIUS TECH)

Anotacija

Šiuo metu belaidžio ryšio srityje naudojamos sudėtingos moduliacijos schemos, kad būtų pasiekta didelė duomenų perdavimo sparta. Tačiau dėl amplitudės moduliacijos įprasti stiprintuvai didelę laiko dalį veikia žemiau maksimalios galios, o dėl to mažas jų efektyvumas. Šiai problemai spręsti, šiame straipsnyje tirama Doherty galios stiprintuvo architektūra. Šiame darbe, naudojant *Keysight ADS* programinę įrangą, sumodeliuotas Doherty stiprintuvas, kurio efektyvumui padidinti naudojamas harmonikų suderinimas ir mažų nuostolių PTFE (angl. polytetrafluoroethylene) spausdintinės plokštės laminatas. Sumodeliuoto stiprintuvo išėjimo galia siekia 36 dBm ir 65 % efektyvumą. 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 52 %. Išmatavus pagamintą stiprintuvą gauti tokie parametrai: 34,7 dBm išėjimo galia ir 63,8 % efektyvumas, o 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 41,8 %. Palyginus su įprasto AB klasės stiprintuvo efektyvumu, pagamintas Doherty stiprintuvas turi apie 6,6 % geresnį efektyvumą.

REIKŠMINIAI ŽODŽIAI. Aukštadažniai grandynai, matavimai signalų analizatoriumi, Doherty galios stiprintuvas, spausdintinė plokštė, stiprintuvo projektavimas.

Išvadas

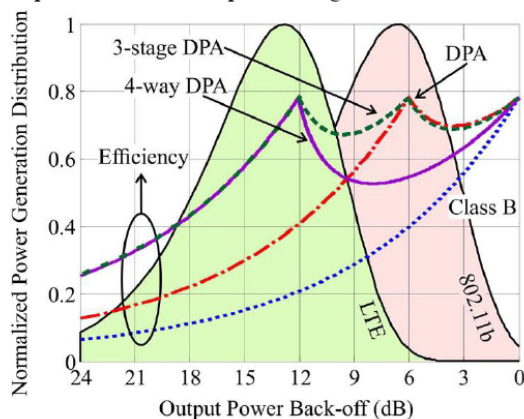
Visuotinis belaidžio ryšio sprendimų integravimas į kasdienį gyvenimą reikalauja nuolatinio belaidžio ryšio infrastruktūros tobulinimo. Pastaruoju metu vis labiau didėja perduodamų duomenų srauto poreikis dėl to, kad plečiasi daiktų internetas, populiarėja vaizdo transliacijos ir daugėja belaidžio ryšio naudotojų. Tam, kad būtų tenkinami belaidžio ryšio spartos reikalavimai, jau nuo 3G mobiliojo ryšio naudojimo pradžios ir dabar naudojamos ne tik fazės ar dažnio moduliacijos schemos, bet ir amplitudės moduliacija (Xia, 2013) (Nasri, 2021). Šiuolaikinės sudėtingos moduliacijos, pavyzdžiui OFDM (angl. orthogonal frequency division multiplexing) ir QAM (angl. quadrature amplitude modulation), išsprendžia spartos problemą, bet sukuria naujas. Signalai, kuriems taikomos minėtos moduliacijos, turi svarbų parametą, vadinamą PAPR (angl. peak to average power ratio) – signalo didžiausios ir vidutinės galios santykiu. Įprastai šiuolaikinių signalų PAPR yra tarp 6 dB ir 12 dB, bet gali būti ir didesnis, o ateityje gali dar didėti (Camarchia, 2015). Dėl šio santykio atsiranda belaidžio ryšio sistemų tiesiškumo ir efektyvumo problema. Įprastai didinant vieną iš šių parametų, kitas prastėja. Vis tik tiesinis veikimas yra labai svarbus, nes dėl signalo iškraipymų gali būti prarasta amplitudėje užkoduota informacija, didėja klaidų skaičius perduodamoje informacijoje, dalis signalo galios nuteka į gretimų dažnių juostas. Visa tai yra nepageidautina ir reguliuojama tam tikrais standartais, todėl įprastai belaidžio ryšio sistemos pasižymi geru tiesiškumu, bet prastu efektyvumu.

Belaidžio ryšio sistemose daugiausiai energijos suvartojanti dalis yra galios stiprintuvas. Galios stiprintuvo paskirtis yra sustiprinti signalą prieš jį paduodant į kitą sistemos bloką, pavyzdžiui, anteną. A, AB ir B klasių stiprintuvai iškraipo signalą mažiausiai, tačiau A klasės teorinis didžiausias efektyvumas yra 50 %, B klasės didžiausias efektyvumas siekia 78,5 %, o AB klasės efektyvumas yra tarp šių verčių. C ir kitų klasių stiprintuvai gali pasiekti teorinį efektyvumą iki 100 %, tačiau tokie stiprintuvai nėra tiesiniai. Visų stiprintuvų efektyvumas praktikoje įprastai yra mažesnis nei teorinis maksimumas. Taip yra dėl to, kad stiprintuvai dirba efektyviausiai, kai jų išėjimo galia yra artima įsisotinimo galiai, tačiau signalas ties šia galia yra iškraipomas. Todėl stiprintuvo projektavimo metu siekiama gero tiesiškumo ir efektyvumo parametų kompromiso.

Dėl prasto efektyvumo suvartojama daug daugiau elektros energijos, o tai yra ypač aktualu vykstant naujų belaidžio ryšio standartų, tokių kaip 5G, bazinių stočių plėtrai. Efektyvūs galios stiprintuvai taip pat labai svarbūs mobiliuosiuose įrenginiuose, kuriuose galios stiprintuvai yra vieni iš daugiausiai energijos vartojančių komponentų, nes kuo prastesnis efektyvumas, tuo trumpiau veikia įrenginys. Taip pat dėl prasto efektyvumo įtaisai šiluminiu būdu išsklaido daugiau galios, kuri gali neigiamai paveikti tiek pačio stiprintuvo, tiek aplinkui esančių komponentų veikimą. Todėl stiprintuvuose, kurių išėjimo galia didesnė nei keli vatai, dažnai reikalingas radiatorius. Tokie radiatoriai dažnai sudaro didelę įrenginio tūrio dalį, o tai irgi nepageidaujama.

Prasto efektyvumo problemai spręsti yra nagrinėjamos ir tiriamos specialios stiprintuvų architektūros. Vieni plačiausiai nagrinėjamų yra Doherty galios stiprintuvai, dėl jų paprastesnio projektavimo ir įgyvendinimo lyginant su kitomis architektūromis, pavyzdžiui Chireix fazių skirtumo ir gaubtinės sekimo (Pengelly, 2016) (Singh, 2021). Vieni plačiausiai nagrinėjamų yra Doherty galios stiprintuvai, kurių ypatinga savybė yra didelis efektyvumas plačiame išėjimo galios diapazone. Toks stiprintuvas yra sudarytas iš dviejų stiprintuvų, vadinamų pagrindiniu ir pagalbinio. Pagrindinis veikia nuolatos, o pagalbinis įsijungia tik tada, kai įėjimo signalo įtampa viršija nustatytą ribą. Pagrindinio stiprintuvo išėjimas su pagalbinio stiprintuvo išėjimu sujungtas panaudojus

papildoma ketvirčio bangos ilgio linija, vadinama impedanso inverteriu. Tam, kad išėjime būtų sudedami vienodos fazės signalai, tokio pat ilgio linija yra pridėdama ir pagalbinio stiprintuvo įėjime. Tokio sujungimo dėka Doherty galios stiprintuvas turi du pikus efektyvumo charakteristikoje, o tarp šių pikų efektyvumas irgi yra didelis. Vienas iš pikų yra kaip įprasta ties maksimalia išėjimo galia, o kitas tam tikrame lygyje žemiau maksimalios galios, kaip pavaizduota 1 paveiksle raudona kreive. Įprastai stiprintuvų galių santykis yra parenkamas projektavimo metu priklausomai nuo stiprinamo signalo PAPR.



1 pav. Normuoto B klasės ir Doherty (įprasto, 4 eilės ir 3 pakopų) galios stiprintuvų efektyvumo palyginimas su normuotu LTE ir 802.11b standarto galios pasiskirstymu
Šaltinis: (Camarchia, 2015)

Darbo tikslas – pasirinktam dažnių ruožui ir išėjimo galiai sumodeliuoti, suprojektuoti ir eksperimentiškai ištirti kuo didesnio efektyvumo Doherty galios stiprintuvą.

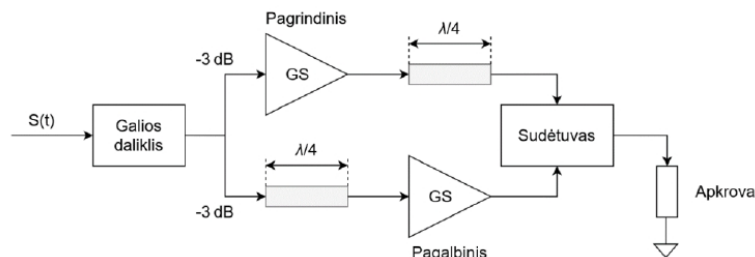
Vykdamas šio stiprintuvo projektavimą ir tyrimus, buvo sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Sumodeliuoti pagrindinius Doherty galios stiprintuvo parametrus siekiant kuo didesnio efektyvumo.
2. Suprojektuoti ir pagaminti pasirinktą architektūrą.
3. Atlikti matavimus ir eksperimentinius tyrimus plačiame Doherty galios stiprintuvo veikimo diapazone.

Šio stiprintuvo projektavime ir tyrime buvo taikyti kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Projektavimo metu naudota *Keysight ADS* programinė įranga (Keysight ADS, 2024). Spausdintinių plokščių, skirtų suprojektuoto stiprintuvo testavimui ir tyrimams, projektavimui panaudota *Altium Designer* programinė įranga (Altium, 2024). Taip pat stiprintuvo veikimas eksperimentiškai tirtas naudojant *Tektronix RSA5126A* spektro analizatorių, testavimo pozicionatorius PS600 ir aukštadažnius testavimo zondus SP-GR-201505, galinčius veikti iki 20 GHz.

Doherty galios stiprintuvo projektavimas ir kompiuterinis modeliavimas

Įprasto Doherty galios stiprintuvo blokinė diagrama pateikta 2 pav., iš kurio matyti, kad toks stiprintuvas susideda iš kelių pagrindinių blokų – pagrindinio stiprintuvo, pagalbinio stiprintuvo, impedanso inverterio, kompensavimo linijos, įėjimo galios daliklio ir išėjimo sudėtuvo. Kartais dar reikia papildomų kompensavimo linijų. Kiekvieną šių blokų modeliavimo metu galima sumodeliuoti atskirai ir taip palengvinti uždavinį. Tam, kad būtų įmanoma tiksliai suprojektuoti šiuos stiprintuvus, reikia tikslų aukštadažnių tranzistorių modelių ir naudoti kompiuterinio modeliavimo programinę įrangą. Tyrimo tikslams siekiama suprojektuoti kuo mažesnei galiai, kad supaprastinti projektavimą ir matavimus. Todėl šiame darbe naudojami *MACOM CMPA0530002S* GaN didelio elektronų judrio tranzistorių (angl. high electron mobility transistor) modeliai modeliavimui su *Keysight ADS* programine įranga. Šio tranzistoriaus įsotinimo galia yra artima 3 W. Šiame darbe siekiama pirmojo efektyvumo piko vieta yra 6 dB žemiau maksimalios galios, taigi pagrindinis ir papildomas stiprintuvai turi išduoti vienodą galią. Projektuojama veikimui 2,3 GHz – 2,5 GHz dažnių ruože.



2 pav. Įprasto Doherty galios stiprintuvo blokinė diagrama

Šaltinis: sudaryta autorių

Pagrindinio stiprintuvo projektavimas

Projektavimas pradedamas nuo pagrindinio stiprintuvo. CMPA0530002S tranzistoriaus įėjimas jau yra suderintas, todėl pagrindinė projektavimo dalis yra sukurti išėjimo suderinimo grandinę 2,3 GHz – 2,5 GHz dažnių juostai. Pagrindinis stiprintuvas įprastai yra projektuojamas AB klasės, arti B klasės, kad galima būtų pasiekti kuo didesnę efektyvumą. Todėl stiprintuvo užtūros įtampa V_{GS} nustatoma 0,3 V virš slenksčio įtampos ir yra lygi -2,7 V, o ištakos srovė I_D neprijungus įėjimo signalo yra lygi 40 mA. Įtampa tarp santakos ir ištakos šiems tranzistoriams nustatoma 28 V. Apkrovos traukos (angl. load pull) modeliavimo metu galima nustatyti apytikslį tranzistoriaus apkrovos impedansą, su kuriuo būtų gautas reikalingas efektyvumo, maksimalios išėjimo galios ir, jeigu reikia, kitų parametų kompromisas. Vienas iš efektyvumo didinimo būdų, naudojamų šiame darbe, yra optimalių impedansų paieška ne tik fundamentinei dažnio dedamajai, bet ir antrajai ir trečiajai harmonikoms. Nustatyta, kad galima pasiekti daugiau nei 60 % ištakos efektyvumą prie 34 dBm išėjimo galios su 13 dB stiprinimu. Šie parametrai gaunami tada, kai fundamentinės dedamosios impedansas lygus $55 + j97 \Omega$, o antrosios ir trečiosios harmonikos impedansai labai dideli, artimi atviram jungimui.

Kitas žingsnis yra suprojektuoti suderinimo grandinę, su kuria būtų pasiekti minėti efektyvumo ir stiprinimo parametrai. Projektavimo metu naudojami paskirstytųjų parametų elementai – mikrojuostelių takeliai ir siekiama rasti tinkamiausią grandinės fizinių išdėstymą. Tyrimo metu taip pat palyginamos dvi dielektrinės medžiagos. Pirmoji yra FR4 medžiaga naudojama įprastoms spausdintinėms plokštėms, tačiau ją naudoti aukštadažniams grandynams virš 2 GHz nerekomenduojama. Svarbiausi trūkumai yra gana dideli nuostoliai (nuostolių koeficientas lygus 0,015) ir dielektrinė skvarba, kuri įprastai specifikacijose nurodoma lygi apie 4,6, tačiau priklauso nuo medžiagos pagaminimo kokybės ir signalo dažnio. Antroji yra brangesnė, aukštesiems dažniams skirta PTFE tipo medžiaga, kuria siūlo Kinijos *JLPCB* gamintojas. Tai yra ZYF300CA-C dielektrikas, kuris palyginus su FR4 turi apie 10 kartų mažesnius nuostolius (nuostolių koeficientas lygus 0,0016) ir stabilesnę dielektrinę skvarbą, lygią 2,94 prie 10 GHz dažnio. Šiuos dielektrikus palyginti galima suprojektavus panašios struktūros suderinimo grandines, kurios suderina apkrovą su apkrovos traukos modeliavimo metu nustatytais optimaliais harmonikų impedansais.

Suprojektavus grandines, atliekamos jų išdėstymo elektromagnetinių laukų modeliai, kurie įvertina grandinės išdėstymą, parazitines talpas tarp šalia esančių takų ar jų dalių. Toliau šis modelis prijungiamas tarp tranzistoriaus išėjimo ir apkrovos. Tuomet atliekami modeliavimai efektyvumo ir stiprinimo parametrams nustatyti ir palyginti. Grandinė su FR4 dielektrine medžiaga su 21 dBm įėjimo galia pasiekia 13,1 dB stiprinimą ir 57,5 % efektyvumą. Tuo tarpu grandinė su PTFE dielektrine medžiaga pasiekia 13,2 dB stiprinimą ir 63 % efektyvumą. Taigi mažiau nuostolingos PTFE dielektrinės medžiagos naudojimas stiprintuvų projektavime leidžia pasiekti geresnį efektyvumą. Dėl šios priežasties, ir dėl to, kad pagamintos spausdintinės plokštės FR4 dielektriko parametrai gali turėti didelį nuokrypį nuo modeliavimo metu naudojamų verčių, nuspręsta šio darbo projektavimo metu naudoti brangesnę, tačiau mažiau nuostolingą PTFE medžiagą.

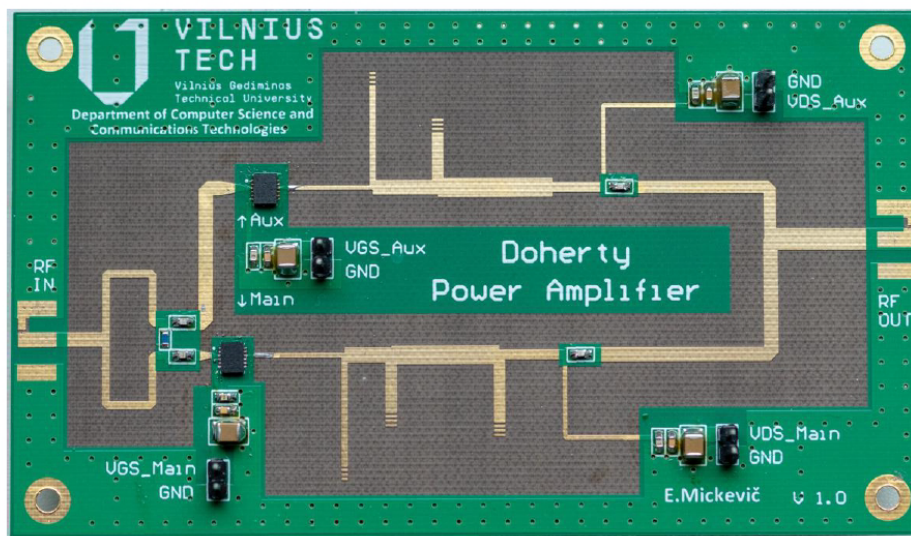
Pagalbinio stiprintuvo projektavimas

Pagalbinį stiprintuvą reikia suprojektuoti tokiai pat galiai kaip ir pagrindinis, nes siekiama gauti pirmąjį efektyvumo piką 6 dB žemiau maksimalios galios. Be to, reikia projektuoti stiprintuvą C klasės, kad jis įsijungtų tik virš tam tikros įėjimo signalo ribos. Kadangi pagalbiniam stiprintuvui naudojamas tas pats tranzistorius, bet projektuojama C klasė, stiprintuvo stiprinimas yra mažesnis ir todėl reikia paduoti didesnę įėjimo galią. Projektavimo eiga yra panaši į pagrindinio stiprintuvo – apkrovos traukos modeliavimo metu ieškomi optimalūs impedansai signalo harmonikoms. Optimalaus impedanso suderinimo sritis yra labai artima AB klasės sričiai, todėl galima naudoti panašios struktūros suderinimo grandinę, kaip ir pagrindinio stiprintuvo. Modeliavimo metu su 24 dBm įėjimo galia ir V_{GS} įtampa lygia -4,5 V gaunamas 9 dB stiprinimas ir 65,8 % efektyvumas.

Doherty galios stiprintuvo projektavimas

Paskutinis žingsnis yra suprojektuoti likusias stiprintuvo dalis – įėjimo galios daliklį ir stiprintuvų išėjimų sujungimą. Kaip minėta, stiprintuvai yra sujungiami lygiagrečiai, o pagrindinio stiprintuvo išėjime dar pridėjama 50 omų ketvirčio bangos ilgio (20 mm) linija impedansui invertuoti. Taip pat pagrindinio stiprintuvo išėjime iki impedanso inverterio ir pagalbinio stiprintuvo išėjime pridėjamos 50 Ω kompensavimo linijos, kad būtų teisingai vykdoma apkrovos moduliacija ir kad būtų gautas Doherty stiprintuvams būdingas papildomas efektyvumo pikas. Modeliavimo metu nustatyta, kad geriausiam veikimui 2,3 GHz – 2,5 GHz dažnių ruože pagrindinio stiprintuvo išėjimo kompensavimo linijos ilgis turi būti lygūs 17,5 mm, o pagalbinio 24 mm. Taip pat pagalbinio stiprintuvo įėjime pridėjama 21 mm ilgio linija, kad kompensuoti stiprintuvų išėjimo fazių skirtumą, sukurtą dėl impedanso inverterio, išėjimo kompensavimo linijų ilgio skirtumo ir skirtingų stiprintuvų klasių. Apkrova prie stiprintuvų išėjimų sujungimų bendro taško sujungiama su 70 Ω ketvirčio bangos ilgio linija. Visa tai yra būtinosios įprastos Doherty konstrukcijos dalys (Kim, 2018).

Dažnai Doherty stiprintuvai projektuojami su dviem identiškais tranzistoriais ir tai reiškia, kad C klasės stiprintuvai, kaip ir šiame darbe, turės mažesnį stiprinimą. Todėl reikia į jį paduoti didesnę įėjimo signalo dalį panaudojus reikiamo dalinimo koeficiento galios daliklį. Šiame darbe suprojektuotas pagrindinis stiprintuvai 21 dBm įėjimo galiai, o pagalbinis stiprintuvai - 24 dBm įėjimo galiai, kai tuo tarpu jų išėjimo galios atitinkamai yra apie 34 dBm ir 33 dBm. Tai reiškia, kad į pagalbinį stiprintuvą reikėtų paduoti apie (3-4) dB daugiau galios, tuomet būtų pasiekta apytiksliai vienoda abiejų stiprintuvų išėjimo galia. Tačiau modeliavimo metu pastebėta, kad padavus 24 dBm galios signalą į abu stiprintuvus, jų išėjimo galia yra beveik vienoda, efektyvumas didelis ir išvengiama stiprinimo nuostolių dėl nevienodo dalinimo koeficiento daliklio. Dėl šių priežasčių suprojektuotas Doherty stiprintuvai turi vienodo dalinimo koeficiento Wilkinson galios daliklį, ir turi būti paduodamas 27 dBm įėjimo galios signalas. Suprojektuoto Doherty stiprintuvo galutinis vaizdas pateiktas 3 pav., o simuliacijų rezultatai pateikti 5 pav. Iš šių charakteristikų matome, kad padavus 27 dBm įėjimo signalą maksimali galia (2,3–2,5) GHz dažnių ruože yra apie 36 dBm, o efektyvumas ties ja siekia (65–67) %. Modeliavimo metu antras efektyvumo pikas gautas apie 5 dB žemiau maksimalios galios ir efektyvumas jame siekia (47-52) %.

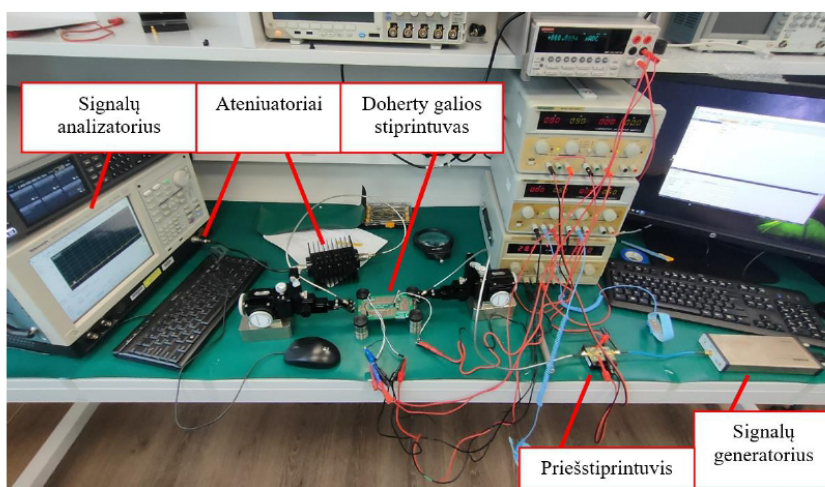


3 pav. Suprojektuoto Doherty galios stiprintuvo surinktos spausdintinės plokštės vaizdas
Šaltinis: sudaryta autorių

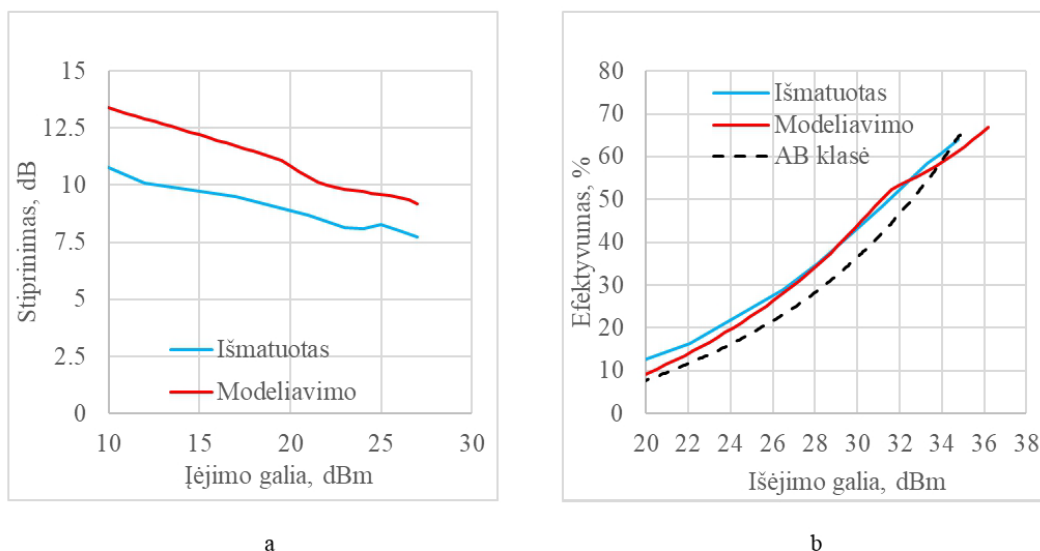
Doherty galios stiprintuvo testavimas ir eksperimentiniai tyrimai

Modeliavimo su Keysight ADS metu pasiekus kuo geresnius parametrus, suprojektuota stiprintuvo geometrinė struktūra buvo perkelta į Altium Designer programinį paketą, siekiant suprojektuoti spausdintinę plokštę ir paruošti ją gamybai. Spausdintinė plokštė buvo pagaminta JLCPCB gamintojo, Kinijoje, naudojant 0,76 mm storio ZYF300CA-C laminatą. Gavus pagamintą spausdintinę plokštę, prie jos prilituoti visi reikiami komponentai (3 pav.), o stiprintuvo matavimo standas pavaizduotas 4 pav. Pirmiausia nustatyta tai, kad pagrindinio stiprintuvo V_{GS} įtampa turi būti lygi -2,3 V, kad gauti $I_D = 40$ mA srovę. Pagalbinio stiprintuvo V_{GS} įtampa nustatyta kaip ir modeliavime ir yra lygi -4,7 V. Tada atlikti matavimai, kurių metu paduodama sinusinė

bangą ir matuojamas išėjimo signalas signalų analizatoriumi Tektronix RSA5126A. Pirmiausia nustatyta tai, kad stiprintuvo centrinis dažnis pasislinko iš 2,4 GHz į 2,27 GHz. Paduodama įėjimo signalo galia didinama tam tikru žingsniu ir išmatuojama išėjimo galia ir vartojama elektros srovė. Iš šių duomenų apskaičiuojamas stiprinimas ir efektyvumas, jų charakteristikos kartu su palygintais modeliavimo rezultatais pateiktos 5 pav. Iš matavimų rezultatų matyti, kad pasiekama 34,7 dBm išėjimo galia padavus 27 dBm signalą į įėjimą, o efektyvumas siekia 63,8 %, o 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 41,8 %. Palyginus su modeliavimo rezultatais, išmatuotas stiprintuvas turi apie (2-2,5) dB prastesnį stiprinimą ir dėl to maksimali galia yra mažesnė. Mažesnis stiprinimas gali būti priežastis to, kad efektyvumo pikas pasislinko arčiau nustatytos maksimalios galios. Tam, kad nustatyti Doherty stiprintuvo pranašumą, jo efektyvumas dar palyginimas ir su suprojektuoto pagrindinio AB klasės stiprintuvo efektyvumo charakteristika, jeigu tokio stiprintuvo ir suprojektuoto Doherty stiprintuvo maksimali išėjimo galia sutaptų. Pagamintas Doherty stiprintuvas turi iki 6,6 % efektyvumo pranašumą palyginus su AB klase plačiame išėjimo galios diapazone iki maksimalios galios, kur jų efektyvumas sutampa.



4 pav. Suprojektuoto Doherty galios stiprintuvo matavimo stendo vaizdas
Šaltinis: sudaryta autorių



5 pav. Sumodeliuoto ir išmatuoto Doherty a) stiprinimo charakteristika; b) efektyvumo charakteristika ir palyginimas su AB klasės stiprintuvu
Šaltinis: sudaryta autorių

Išvados

1. Šiuolaikiniams signalams efektyviai stiprinti reikalingos naujos stiprintuvų architektūros, kurios pasiekia didelį efektyvumą ne tik ties išotinio galia, bet ir žemesnėje išėjimo galioje. Doherty galios stiprintuvai yra vieni tinkamiausių šiai problemai spręsti dėl jų didelio efektyvumo plačiame išėjimo galios diapazone ir paprastesnio projektavimo, nei kitų architektūrų.
2. Aukštų dažnių galios stiprintuvų projektavime dideliame efektyvumui pasiekti svarbu suderinti tranzistorių su apkrova ne tik fundamentiniui dažniui, bet ir antrajai bei trečiajai harmonikoms. Taip pat svarbu naudoti mažesnių nuostolių dielektrines medžiagas. Šiame darbe nustatyta, kad naudojant PTFE buvo pasiektas 5,5 % didesnis AB klasės stiprintuvo efektyvumas nei naudojant FR4 medžiagą.
3. Doherty galios stiprintuvo projektavimo metu suprojektuotos visos būtinosios stiprintuvo dalys, tarp kurių yra AB klasės pagrindinis ir C klasės pagalbinis stiprintuvai (2,3-2,5) GHz dažnių ruožui, kurių stiprinimas yra atitinkamai 13,2 dB ir 9 dB, o efektyvumas yra atitinkamai 63 % ir 65,8 %. Sumodeliuoto Doherty stiprintuvo išėjimo galia siekia 36 dBm, stiprinimas 9 dB, efektyvumas ties maksimalia šia galia siekia 67%, o 5 dB žemiau šios galios gautas iki 52 % efektyvumo pikas.
4. Pagamintas Doherty galios stiprintuvas buvo eksperimentiškai ištirtas, siekiant nustatyti stiprinimą ir efektyvumą plačiame išėjimo galios diapazone. Nustatyta, kad stiprintuvo išėjimo galia siekia 34,7 dBm su stiprinimo lygiu 7,7 dB, o efektyvumas ties šia galia siekia 63,8 %. 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 41,8 %. Tokie rezultatai rodo, kad suprojektuotas stiprintuvas turi iki 6,6 % efektyvumo pranašumą, palyginus su įprastu AB klasės stiprintuvu.

Literatūra

1. Altium. Altium Designer 24 From Requested to Required. 2024. [Žiūrėta 2024-03-25]. Prieiga Internetu: <https://www.altium.com/altium-designer/latest-release>
2. Camarchia, V., Pirola, M., Quaglia, R., Jee, S., Cho, Y., & Kim, B. (2015). The Doherty Power Amplifier: Review of Recent solutions and Trends. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 63(2), 559–571. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2014.2387061>
3. Keysight. PathWave Advanced Design System. 2024 [Žiūrėta 2024-03-25]. Prieiga Internetu: www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html
4. Kim, B. (2018). Doherty Power Amplifiers: From Fundamentals to Advanced Design Methods. Academic Press.
5. Nasri, A., Estebsari, M., Toofan, S., Piacibello, A., Pirola, M., Camarchia, V., & Ramella, C. (2021). Design of a Wideband Doherty Power Amplifier with High Efficiency for 5G Application. Electronics, 10(8), 873. <https://doi.org/10.3390/electronics10080873>
6. Pengelly, R., Fager, C., & Ozen, M. (2016). Doherty's Legacy: A History of the Doherty Power Amplifier from 1936 to the Present Day. IEEE Microwave Magazine, 17(2), 41–58. <https://doi.org/10.1109/mmm.2015.2498081>
7. Singh, S., & Malik, J. (2021). Review of efficiency enhancement techniques and linearization techniques for power amplifier. International Journal of Circuit Theory and Applications, 49(3), 762–777. <https://doi.org/10.1002/cta.2956>
7. Xia, J., Zhu, X., Zhang, L., Zhai, J., & Sun, Y. (2013). High-Efficiency GAN Doherty Power Amplifier for 100-MHz LTE-Advanced application based on Modified Load Modulation network. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 61(8), 2911–2921. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2013.2269052>

DESIGN AND INVESTIGATION OF A HIGH EFFICIENCY DOHERTY POWER AMPLIFIER

Summary

Currently in wireless communications complex modulation schemes are used to achieve high data rates. However, due to amplitude modulation, conventional amplifiers operate below their maximum power point most of the time and therefore have lower efficiency. To solve this problem, Doherty power amplifier architecture is investigated. In this work a Doherty amplifier is computer-modeled, which uses harmonic impedance matching and a low-loss PTFE dielectric material to improve efficiency. The simulated amplifier achieves 36 dBm output power with 65 % efficiency and 5 dB below this power the efficiency reaches 52 %. The measurements of the fabricated amplifier give an output power of 34.7 dBm with efficiency of 63.8 %, while efficiency 5 dB below this power is 41.8 %. Compared to efficiency of a conventional class AB amplifier, the Doherty amplifier has an efficiency improvement of about 6.6 %.

AUTORIŲ LYDRAŠTIS

Autoriaus vardas, pavardė: Erik Mickevič.

Mokslo laipsnis ir vardas: inžinerijos mokslų bakalaurs

Darbo vietą ir poziciją: Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH), Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros magistrantas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: aukštadažnė elektronika.

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 60957188, erik.mickevic@stud.vilniustech.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Vaidotas Barzdėnas.

Mokslo laipsnis ir vardas: daktaras, profesorius

Darbo vietą ir poziciją: Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH), Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros profesorius.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: aukštadažnė elektronika, integrinių grandynų projektavimas, šiuolaikinė mikro- ir nanoelektronika.

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 68451453 vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt

Autoriaus vardas, pavardė: Andžej Borel.

Mokslo laipsnis ir vardas: inžinerijos mokslų magistras

Darbo vietą ir poziciją: Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH), Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros doktorantas.

Autoriaus mokslinių interesų sritys: aukštadažnė elektronika.

Telefonas ir el. pašto adresas: 8 60588897, andzej.borel@vilniustech.lt

A COVER LETTER OF AUTHORS

Author name, surname: Erik Mickevič.

Science degree and name: bachelor of engineering

Workplace and position: Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, M. Sc. student.

Author's research interests: high-frequency electronics.

Telephone and e-mail address: 8 60957188, erik.mickevic@stud.vilniustech.lt

Author name, surname: Vaidotas Barzdėnas.

Science degree and name: Ph. D., professor.

Workplace and position: Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, professor.

Author's research interests: high-frequency electronics, integrated circuit design, modern micro- and nanoelectronics.

Telephone and e-mail address: 8 68451453 vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt

Author name, surname: Andžej Borel.

Science degree and name: master of engineering

Workplace and position: Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, PhD student.

Author's research interests: high-frequency electronics.

Telephone and e-mail address: 8 60588897, andzej.borel@vilniustech.lt

C priedas. Pažyma dėl straipsnių publikavimo



KAUNO TECHNIKOS KOLEGIJA

Viešoji įstaiga, Tvirtovės al. 35, LT-50155 Kaunas, tel. (8 37) 30 86 20, el. p. ktk@edu.ktk.lt.
Duomenys kaupiami ir saugomi Juridinių asmenų registre, kodas 111967869.

Vilniaus Gedimino technikos
universitetui – VILNIUS TECH

2024-05-14 Nr.V16-85

DĖL STRAIPSNIO PUBLIKAVIMO

Aurių Erik Mickevič, Vaidoto Barzdėno (VILNIUS TECH) straipsnis PASKIRSTYTŲJŲ PARAMETRŲ ŽEMŲJŲ DAŽNIŲ FILTRO SU ATVIROMIS KILPOMIS PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS priimtas publikuoti į mokslinio žurnalo „Inžinerinės ir edukacinės technologijos“ (ISSN 2029-9303) 2024 metų 1 numerį.

Vyr. redaktorė

Dr. Lina Girdauskienė

Giedrė Adomavičienė, tel. 8 61157620, el. p. giedre.adomaviciene@edu.ktk.lt

KAUNO TECHNIKOS KOLEGIJA

Viešoji įstaiga, Tvirtovės al. 35, LT-50155 Kaunas, tel. (8 37) 30 86 20, el. p. ktk@edu.ktk.lt.
Duomenys kaupiami ir saugomi Juridinių asmenų registre, kodas 111967869.

Vilniaus Gedimino technikos
universitetui – VILNIUS TECH

2024-05-14 Nr.V16-86

DĖL STRAIPSNIO PUBLIKAVIMO

A autorių Erik Mickevič, Vaidoto Barzdėno, Andžej Borel (VILNIUS TECH) straipsnis
DIDELIO EFEKTYVUMO DOHERTY GALIOS STIPRINTUVO PROJEKTAVIMAS IR
TYRIMAS priimtas publikuoti į mokslinio žurnalo „Inžinerinės ir edukacinės technologijos“ (ISSN
2029-9303) 2024 metų 1 numerį.

Vyr. redaktorė



Dr. Lina Girdauskienė

Giedrė Adomavičienė, tel. 8 61157620, el. p. giedre.adomaviciene@edu.ktk.lt