VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Edvardas METLEVSKIS

PLAČIAJUOSČIŲ PLANARIŲJŲ LĖTINIMO SYSTEMŲ MODELIAI IR JŲ TYRIMAS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS INŽINERIJA (01T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2014

Disertacija rengta 2010–2014 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Romanas MARTAVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Romualdas NAVICKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Nariai:

prof. dr. Algirdas BAŠKYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

doc. dr. Olga KURASOVA (Vilniaus universitetas, informatika – 09P),

dr. Bartłomiej SALSKI (Varšuvos technologijos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T),

doc. dr. Artūras SERACKIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

Disertacija bus ginama viešame Elektros ir elektronikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2014 m. birželio 13 d. 9 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiusti 2014 m. gegužės 12 d.

Disertaciją galima peržiūrėti interneto svetainėje <http://dspace.vgtu.lt/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2253-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-609-457-683-6

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2014

© Edvardas Metlevskis, 2014

edvardas.metlevskis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Edvardas METLEVSKIS

MODELS OF BROADBAND PLANAR SLOW-WAVE SYSTEMS AND THEIR INVESTIGATION

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING (01T)

LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2014

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2010–2014.

Supervisor

Prof Dr Habil Romanas MARTAVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The Dissertation Defense Council of Scientific Field of Electrical and Electronic Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Habil Romualdas NAVICKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

Members:

Prof Dr Algirdas BAŠKYS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Assoc Prof Dr Olga KURASOVA (Vilnius University, Informatics – 09P),

Dr Bartłomiej SALSki (Warsaw University of Technology, Electrical and Electronic Engineering – 01T),

Assoc Prof Dr Artūras SERACKIS (Vilnius Gediminas Technical University, Electrical and Electronic Engineering – 01T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defense Council of Electrical and Electronic Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **9 a. m. on 13 June 2014**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 12 May 2014.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Internet website <http://dspace.vgtu.lt/> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje sprendžiama papildomų ekranų įtakos meandrinių lėtinimo sistemų dažninėms savybėms įvertinimo problema. Pagrindiniai tyrimo objektai – planariosios meandrinės lėtinimo sistemos (PMLS) su papildomais ekranais, jų modeliai ir analizės bei sintezės metodai. Darbo tikslas – ištirti PMLS su papildomais ekranais, sukurti naujus modelius ir jų tyrimo metodikas leidžiančias įvertinti lėtinimo sistemų kraštų bei galų efektus, sukurti tokių lėtinimo sistemų parametrinės sintezės metodiką.

Darbe sprendžiami uždaviniai: elektrinio lauko meandrinės lėtinimo sistemos trimačio pasiskirstymo modeliavimo metodikos kūrimas; PMLS su papildomais ekranais modelių kūrimas, taikant specializuotus programų paketus; PMLS su papildomais ekranais kraštų bei galų efektų įtakos sistemos dispersinėms savybėms ir įėjimo varžos priklausomybei nuo dažnio tyrimas; PMLS su papildomais ekranais parametrinės sintezės metodikos kūrimas.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir santrauka anglų kalba.

Įvadiniamame skyriuje formuluojama tiriamoji problema, aptariamas darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai. Įvado pabaigoje pristatomi pranešimai konferencijose disertacijos tema ir pateikiama disertacijos struktūra.

Pirmame skyriuje pateikiama literatūros analizė, apžvelgiamos plačiajuosčių planarijų lėtinimo sistemų konstrukcijos, jų taikymo sritys. Taip pat aptariami plačiajuosčių planarijų lėtinimo sistemų tyrimams taikomi analitiniai ir skaitiniai metodai. Skyriaus pabaigoje formuluojami darbo tikslas ir uždaviniai.

Antrame skyriuje pasiūlomi nauji meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais kompiuteriniai modeliai, sukurti specializuotu programų paketu Sonnet® ir momentų metodu grįsta elektrinio lauko meandrinės lėtinimo sistemos trimačio pasiskirstymo modeliavimo metodika.

Trečiame skyriuje pateikiami meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais kompiuterinių modelių dažninių savybių ir elektrinio lauko meandrinės lėtinimo sistemos trimačio pasiskirstymo tyrimo rezultatai.

Ketvirtame skyriuje pasiūloma meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais, įžemintais iš abiejų galų, parametrinės sintezės metodika ir ja remiantis sukuriamas parametrinės sintezės algoritmas.

Disertacijos tema paskelbti 5 moksliniai straipsniai, iš kurių trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Thomson Reuters Web of Knowledge duomenų bazę. Disertacijos tema perskaityti aštuoni pranešimai mokslinėse konferencijose.

Abstract

The dissertation investigates the issues of influence of additional shields on frequency characteristics of meander slow-wave system. The main objects of research include planar meander slow-wave systems with additional shields, their models and the methods of analysis and synthesis. The primary purpose of this dissertation is to investigate the planar meander slow-wave systems with additional shields by creating new models and their investigation techniques which allow to evaluate the effects on the edges and ends of slow-wave systems and create the technique for parametric synthesis of such slow-wave systems.

The paper approaches a few major tasks such as: creation of technique for modelling of 3D electric field distribution in meander slow-wave systems; creation of models of planar meander slow-wave system using high-frequency EM software; investigation of influence of effects on the edges and ends of meander slow-wave system with additional shields on their dispersive properties and input impedance; creation of technique for parametric synthesis of meander slow-wave system with additional shields.

The dissertation consists of four parts including Introduction, 4 chapters, Conclusions, References and Summary in English.

The introduction reveals the investigated problem, importance of the thesis and the object of research and describes the purpose and tasks of the paper, research methodology, scientific novelty, the practical significance of results examined in the paper and defended statements. The introduction ends in presenting the author's presentations in conferences on the subject of the defended dissertation and defining the structure of the dissertation.

Chapter 1 revises used literature. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the tasks for the dissertation are reconsidered.

Chapter 2 describes proposed new computer models of meander slow-wave system with additional shields, which are created using Sonnet[®] software. Moment method based technique for modelling of 3D electric field distribution in meander slow-wave system is also described.

Chapter 3 describes the results of investigation of frequency characteristics of meander slow-wave system with additional shields and modeling of 3D electric field distribution.

In Chapter 4 the technique for parametric synthesis of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges is proposed.

5 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published including three articles in the Thomson Reuters Web of Knowledge register. 9 presentations on the subject have been given in conferences at national and international level.

Žymėjimai

Simboliai

$2A$	– meandro laidininko ilgis;
A	– koeficientas;
a	– koeficientas, matmuo;
B	– koeficientas;
b	– koeficientas;
C	– talpa;
C_1	– ilginė talpa;
c_0	– šviesos greitis vakuume;
$\underline{E}$	– kompleksinė elektrovara;
f	– dažnis;
G	– Gryno funkcija;
g	– funkcija;
h	– matmuo;
I	– srovės stipris;
i	– momentinis srovės stipris, eilės numeris;
K	– atspindžio koeficientas;
k_L	– lėtinimo koeficientas;

L	– induktyvumas, operatorius, kontūras;
L_1	– ilginis induktyvumas;
L_S	– lėtinimo sistemos ilgis;
l	– atstumas;
m	– eilės numeris;
n	– eilės numeris;
q	– krūvis;
R	– aktyvioji varža;
r	– atstumas;
S	– įtakos koeficientas;
$\underline{S}^{LS}$	– sklaidos parametrai;
s	– matmuo;
t	– laikas;
t_v	– fazinė vėlinimo trukmė;
U	– įtampa;
u	– momentinė įtampa;
v_f	– fazinis greitis;
w	– matmuo;
X	– reaktyvioji varža;
x	– koordinatė;
y	– koordinatė;
z	– koordinatė;
Z_0	– banginė varža;
$\underline{Z}_a$	– kompleksinė apkrovos varža;
$\underline{Z}_g$	– kompleksinė generatoriaus varža;
Z_{IN}	– įėjimo varža;
ΔA	– ilgio pokytis;
ΔF	– praleidžiamųjų dažnių juostos plotis;
Δs	– pločio pokytis;
ε_r	– santykinė dielektrinė skvarba;
ε_0	– elektrinė konstanta;
θ	– fazės skirtumo kampas;
Φ	– funkcija;
φ	– potencialas;
ρ	– krūvio tankis;
ω	– kampinis dažnis;

[A] – koeficientų matrica;

[q] – krūvių matrica;

[φ] – potencialų matrica.

Santrumpos

BBEV – bėgančiosios bangos elektroninis vamzdis;

BELS – baigtinių elementų laiko srities metodas;

BEM – baigtinių elementų metodas;

BSLS – baigtinių skirtumų laiko srities metodas;

BSM – baigtinių skirtumų metodas;

DL – daugialaidė linija;

MoM – momentų metodas;

PMLS – planarioji meandrinė lėtinimo sistema;

PPLS – plačiajuostė planarioji lėtinimo sistema;

RFID – radijo dažnio identifikavimo technologija;

VL – vėlinimo linija;

EM – electromagnetic software.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	1
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	2
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	5
Disertacijos struktūra.....	6
 1. PLAČIAJUOSČIŲ PLANARIJŲ LĖTINIMO SISTEMŲ IR JŲ ANALIZĖS	
METODŲ APŽVALGA	7
1.1. Plačiajuosčių planarijų lėtinimo sistemų modeliai ir tyrimas	7
1.2. Plačiajuosčių planarijų lėtinimo sistemų taikymai	10
1.3. Plačiajuosčių planarijų lėtinimo sistemų tyrimams taikomi metodai	17
1.3.1. Analitiniai tyrimų metodai.....	18
1.3.2. Skaitiniai tyrimų metodai	19
1.4. Autoriaus indėlis į problemos sprendimą	23
1.5. Išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	24

2. MEANDRINIŲ LĖTINIMO SISTEMŲ SU PAPILDOMAIS EKRANAIŠ	
MODELIO SUDARYMAS	27
2.1. Meandrinio lėtinimo sistemų su papildomais ekranais kompiuteriniai modeliai. 28	
2.1.1. Meandrinės lėtinimo sistemos su skirtingais papildomų ekranų įžeminimo taškais	28
2.1.2. Meandrinės lėtinimo sistemos su modifikuotomis kraštų topologijomis.....	31
2.2. Meandrinio lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modelių tyrimas	34
2.2.1. Dažninių charakteristikų apskaičiavimo algoritmas	34
2.2.2. Įėjimo varžos nustatymo metodika.....	37
2.3. Elektrinio lauko meandrinės lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo modeliavimo metodika	41
2.3.1. Momentų metodo taikymas	41
2.3.2. Siūloma metodika.....	43
2.4. Antrojo skyriaus išvados	46
3. MEANDRINIŲ LĖTINIMO SISTEMŲ SU PAPILDOMAIS EKRANAIŠ	
SAVYBĖS	49
3.1. Papildomų ekranų įžeminimo taško įtakos sistemos dažninėms charakteristikoms tyrimo rezultatai.....	50
3.2. Kraštų topologijų įtakos sistemos dispersinėms savybėms tyrimo rezultatai	56
3.3. Įėjimo varžos dažninės charakteristikos	60
3.4. Elektrinio lauko meandrinės lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo tyrimo rezultatai	63
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	66
4. MEANDRINIŲ LĖTINIMO SISTEMŲ SU PAPILDOMAIS EKRANAIŠ	
PARAMETRINĖ SINTEZĖ	69
4.1. Specializuotų programų paketų taikymo meandrinio lėtinimo sistemų parametrinei sintezei galimybių analizė.....	70
4.2. Meandrinio lėtinimo sistemų su papildomais ekranais konstrukcinių parametrų įtakos koeficientai.....	72
4.2.1. Konstrukcinių parametrų įtaka sistemos fazinei vėlinimo trukmei	74
4.2.2. Konstrukcinių parametrų įtaka sistemos įėjimo varžai	76
4.2.3. Konstrukcinių parametrų įtaka sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui.....	79
4.3. Meandrinio lėtinimo sistemų su papildomais ekranais parametrinės sintezės algoritmas	80
4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados	84
BENDROSIOS IŠVADOS	87
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	89
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	97

SUMMARY IN ENGLISH.....	99
PRIEDAI.....	117
A priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje	119
B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.....	123

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of a problem.....	1
Importance of the thesis	1
The object of research	2
The goal of the thesis.....	2
The tasks of the thesis	3
Research methodology	3
Importance of scientific novelty	3
Practical significance of achieved results	4
The defended statements	4
Approval of the results	5
The structure of dissertation	6
1. REVIEW OF BROADBAND PLANAR SLOW-WAVE SYSTEMS AND THEIR METHODS OF ANALYSIS.....	7
1.1. Models of broadband planar slow-wave systems and their research	7
1.2. Application areas of broadband planar slow-wave systems	10
1.3. Methods for the research of broadband planar slow-wave systems	17
1.3.1. Analytical methods.....	18
1.3.2. Numerical methods.....	19
1.4. Author's contribution to the solution of the problem	23
1.5. Conclusions of the chapter 1 and formulation of thesis tasks.....	24

2. MODELS OF MEANDER SLOW-WAVE SYSTEMS WITH ADDITIONAL SHIELDS	27
2.1. Computer models of meander slow-wave system with additional shields	28
2.1.1. Meander slow-wave systems with different grounding points of additional shields.....	28
2.1.2. Meander slow-wave system with different topologies of edges	31
2.2. Research technique of meander slow-wave system with additional shields.....	34
2.2.1. Algorithm for calculation of frequency characteristics	34
2.2.2. Technique for estimation of input impedance	37
2.3. Technique for evaluation of 3D distribution of electrical field in meander slow-wave systems	41
2.3.1. Application of the moment method	41
2.3.2. Proposed technique.....	43
2.4. Conclusions of the chapter 2	46
3. CHARACTERISTICS OF MEANDER SLOW-WAVE SYSTEMS WITH ADDITIONAL SHIELDS.....	49
3.1. Influence of grounding point of additional shield on frequency characteristics of a system	50
3.2. Influence of different topologies of edges on dispersion characteristics of a system	56
3.3. Frequency characteristics of the input impedance.....	60
3.4. Research results of 3D distribution of electrical field in meander slow-wave system	63
3.5. Conclusions of the chapter 3	66
4. PARAMETRIC SYNTHESIS OF MEANDER SLOW-WAVE SYSTEM WITH ADDITIONAL SHIELDS.....	69
4.1. Analysis of possibilities of application of EM software for the parametric synthesis of meander slow-wave systems.....	70
4.2. Influence coefficients of constructive parameters of meander slow-wave systems with additional shields	72
4.2.1. Influence of constructive parameters on phase delay time	74
4.2.2. Influence of constructive parameters on input impedance	76
4.2.3. Influence of constructive parameters on bandwidth	79
4.3. Algorithm for parametric synthesis of meander slow-wave system with additional shields	80
4.4. Conclusions of the chapter 4	84
GENERAL CONCLUSIONS	87
REFERENCES	89
LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS RELATED TO THE TOPIC OF DISSERTATION.....	97

SUMMARY IN ENGLISH.....	99
APPENDIXES.....	117
Appendix A. The co-authors agreement to present publications	119
Appendix B. Copies of authors scientific publications on the subject of dissertation	123

Įvadas

Problemos formulavimas

Įprastoje meandrinėje lėtinimo sistemoje fazinio vėlinimo trukmė labai priklauso nuo signalo dažnio – signalo dažniui didėjant vėlinimo trukmė didėja. To priežastis yra nuo dažnio priklausantis elektromagnetinis ryšys tarp gretimų meandro laidininkų. Siekiant sumažinti elektromagnetinę sąveiką, tarp gretimų meandro laidininkų įterpiami papildomi ekranai, kurie trumpikliais sujungiami su išoriniu ekranu.

Meandrinų lėtinimo sistemų analizei dažnai taikomi analitiniai analizės metodai. Šie metodai neleidžia įvertinti meandro formos laidininko kraštuose bei galuose vykstančius procesus. Procesus meandro kraštuose bei galuose galima įvertinti naudojant skaitiniais metodais grįstus modelius.

Disertacijoje sprendžiama papildomų ekranų įtakos meandrinų lėtinimo sistemų dažninėms savybėms įvertinimo problema.

Darbo aktualumas

Meandrinės lėtinimo sistemos yra plačiai taikomos antenose, monolitiniuose mikrobangų integriniuose grandynuose ir didelio duomenų perdavimo greičio

skaitmeniniuose įtaisuose. Filtrai, šakotuvai ir galios dalikliai gali būti pagaminti taikant meandrinės lėtinimo sistemas, kurių gamybos procesas yra pigus ir paprastesnis negu įprastinių bangolaidinių struktūrų gamyba.

Pirmosios meandrinės lėtinimo sistemos atsirado šeštajame XX a. dešimtmetyje. Jų modeliai buvo sudaromi taikant analitinius metodus. Pavyzdžiui, ekvivalentinių grandinių metodu sudaryti modeliai gauti su įvairiomis prielaidomis sprendžiant elektrodinaminį uždavinį. Tačiau taikant šį metodą, neįmanoma nustatyti elektrinio lauko sandaros lėtinimo sistemoje, be to jis galioja tik tam tikrame, ribotame dažnių ruože. Vėliau įvairaus sudėtingumo modeliai buvo sudaromi taikant daugialaidžių linijų metodą. Šiuo metodu dažniausiai modeliuojamos begalinio ilgio sistemos, todėl juo negalima įvertinti galų efekto. XX a. pabaigoje tobulėjant kompiuterinei technikai, buvo sukurti pirmieji komerciniai elektromagnetinių laukų sprendimo programų paketai, pagrįsti skaitiniais metodais, kurie tinka lėtinimo sistemų projektavimui. Šie paketai leidžia sukurti tikslius sudėtingų lėtinimo sistemų modelius.

Įprastose meandrinėse lėtinimo sistemose nuo dažnio priklausantis elektromagnetinis ryšys tarp gretimų meandro laidininkų turi įtakos fazinei vėlinimo trukmei. Siekiant sumažinti elektromagnetinę sąveiką, tarp gretimų meandro laidininkų įterpiami papildomi ekranai, kurie trumpikliais sujungiami su išoriniu ekranu. Tokių meandrinų lėtinimo sistemos su papildomais ekranais konstrukcija yra sudėtinga, todėl tikslinga jas projektuoti taikant skaitiniais metodais grįstus modelius.

Elektromagnetinių bangų sklaidimo procesai meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais kraštuose bei galuose turi įtakos jos dispersinėms savybėms. Be to, literatūroje nėra duomenų apie tokių sistemų įėjimo varžos ir jos S-parametrų dažnines charakteristikas. Taigi, taikant specializuotus programų paketus, aktualu kurti naujus meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modelius, leisiančius praplėsti jų darbo dažnių ruožo ribas, sumažinti vėlinimo trukmės dispersiją ir įvertinti sistemos suderinamumą su signalų traktu.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – planariosios meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais, jų modeliai ir analizės bei sintezės metodai.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas yra ištirti planariausias meandrinės lėtinimo sistemas su papildomais ekranais, sukurti naujus modelius ir jų tyrimo metodikas, leidžiančias

įvertinti lėtinimo sistemų kraštų bei galų efektus, sukurti tokių lėtinimo sistemų parametrinės sintezės metodiką.

Darbo uždaviniai

Tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Taikant momentų metodą, sudaryti elektrinio lauko meandrinės lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo modeliavimo metodiką ir iš-tirti elektrinio lauko struktūrą planariosiose meandrinės lėtinimo sis-temose.
2. Sudaryti planarijų meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ek-ranais modelius, taikant specializuotus programų paketus.
3. Ištirti planarijų meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekra-nais kraštų bei galų efektų įtaką sistemos dispersinėms savybėms ir įėjimo varžos priklausomybei nuo dažnio.
4. Sukurti planarijų meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekra-nais parametrinės sintezės metodiką.

Tyrimų metodika

Darbe, elektrodinaminio uždavinio sprendimui taikomas momentų metodas. Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modeliai įgyvendinami ir analizuojami taikant šiuo metodu grįstu specializuotu programų paketu Sonnet[®], duomenų apdorojimui taikomas programų paketas Matlab[®].

Darbo mokslinis naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Sukurta momentų metodu grįsta metodika elektrinio lauko plokščio-siose meandrinės lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo mode-liavimui ir gauti tyrimo rezultatai.
2. Sukurti bei įgyvendinti planarijų meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modeliai ir taikant momentų metodu grįstą spe-

cializuotą programų paketą ištirta kraštų bei galų efektų įtaką sistemos vėlinimo trukmės dispersijai.

3. Sukurta metodika leidžianti nustatyti meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžą ir tirti šios varžos dažnines savybes taikant momentų metodu grįstą specializuotą programų paketą Sonnet[®].
4. Atlikta meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų elektrinių charakteristikų jautrumo konstrukcinių parametrų keitimui analizė nustatant įtakos koeficientus ir sudaryta tokių sistemų parametrinės sintezės metodika.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sudaryta metodika leidžianti modeliuoti elektrinio lauko trimatį pasiskirstymą meandrinėse lėtinimo sistemose ir įvertinti elektromagnetinį ryšį tarp gretimų meandro laidininkų. Sukurti meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais modeliai, leidžiantys projektuoti lėtinimo sistemas, įvertinant kraštuose bei galuose vykstančius elektromagnetinių bangų sklidimo procesus. Sukurta metodika, leidžianti nustatyti meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžos dažnines charakteristikas, reikalingas sistemos suderinimo su signalu traktu įvertinimui. Sukurta parametrinės sintezės metodika, leidžianti sintezuoti meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų konstrukcinius parametrus pagal nustatytas sistemos elektrines charakteristikas.

Ginamieji teiginiai

1. Įrengus papildomus ekranus plokščiojoje meandrinėje lėtinimo sistemoje ir juos sujungus su išoriniu ekranu iš abiejų galų, sumažinama sistemos vėlinimo trukmės dispersija, kuri dažnių ruože iki 1,97 GHz nevirsėja 0,035 ns.
2. Tarpo didinimas kraštuose ties meandro kilpomis didina sistemos vėlinimo trukmę, kuri žemuosiuose dažniuose gali būti suvienodinta mažinant juostelės ilgį 24. Tokiu būdu, nekeičiant dispersinių savybių sumažinamas bendras sistemos užimamas plotas. Esant meandrinio laidininko ilgiui 19 mm, tarpo pločiui 0,5 mm ir tarpo ilgiui 0,6 mm, sistemos plotas sumažėja apie 3 %.

3. Siūloma metodika tinka plokščiosios meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžos nustatymui jos kraštuose bei viduryje. Įėjimo varža kraštuose yra pastovi dažnių ruože iki 1,5 GHz, sistemos viduryje – iki 2 GHz, o jos vertė žemuosiuose dažniuose yra tokia pati kaip ir sistemos kraštuose.
4. Konstrukcinių parametų įtakos koeficientais paremta meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų parametrinės sintezės metodika leidžia automatizuotą tokių lėtinimo sistemų projektavimą.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 5 moksliniai straipsniai: trys – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į Thomson Reuters Web of Knowledge duomenų bazę (Metlevskis, Urbanavičius 2011; Metlevskis, Martavičius 2011; Metlevskis, Martavičius 2014); vienas – mokslo žurnale, cituojamame kitose tarptautinėse duomenų bazėse (Metlevskis 2012), vienas – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje (Metlevskis, Martavičius 2012).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti aštuoniose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Metlevskis, E. 2011. Plačiajuosčių planarinių lėtinimo sistemų taikymas ir perspektyvos. Keturioliktoji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 2011 m. kovo 18 d.
- Metlevskis, E., Martavičius, R. 2011. Computer Model of Shielded Meander Slow-wave System. Penkioliktoji tarptautinė konferencija „*Elektronika 2011*“. Vilnius, 2011 m. gegužės 17–19 d.
- Metlevskis, E., Martavičius, R. 2011. Computer Models of Meander Slow-wave System with Additional Shields. PhD Students and Young Scientists Conference. Varšuva, Lenkija, 2011 m., rugsėjo 19–22 d.
- Metlevskis, E. 2012. Meandrinės lėtinimo sistemos su kilpų pavidalo papildomais ekranais kraštų efektų tyrimo rezultatai. Penkioliktoji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 2012 m. kovo 16 d.
- Metlevskis, E., Martavičius, R. 2012. Calculation of Characteristics of Meander Slow-wave System with additional shields. XXII International Conference on Electromagnetic Disturbances “*EMD2012*”. Vilnius, 2012 m. rugsėjo 20–21 d.
- Metlevskis, E. 2012. Investigation of Topology of Edges in Meander Slow-wave System with Additional Shields. Tarptautinis seminaras

„*Modern Microwave Devices and Systems*“. Minskas, Baltarusija, 2012 m. lapkričio 18 d.

- Metlevskis, E. 2013. Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais konstrukcinių parametų įtakos vėlinimo laikui ir įėjimo varžai tyrimas. Šešioliktoji respublikinė Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“. Vilnius, 2013 m. kovo 15 d.
- Metlevskis, E., Martavičius, R. 2013. Frequency Characteristics of the Input Impedance of Meander Slow-wave System with Additional Shields. Septynioliktoji tarptautinė konferencija „*Elektronika 2013*“. Palanga, 2013 m. birželio 17–19 d.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios išvados, literatūros bei autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai, santrauka anglų kalba.

Darbo apimtis yra 116 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 38 numeruotos formulės, 50 paveikslų ir 7 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudota 115 literatūros šaltinių.

Plačiajuosčių planariųjų lėtinimo sistemų ir jų analizės metodų apžvalga

Skyriuje apžvelgiamos plačiajuosčių planariųjų lėtinimo sistemų (PPLS) konstrukcijos, jų taikymo sritys, pateikiama trumpa šių sistemų tyrimų istorija. Taip pat aptariami PPLS tyrimams taikomi analitiniai ir skaitiniai metodai ir jų panaudojimas elektromagnetiniams uždaviniams spręsti. Skyriaus pabaigoje formuluojami darbo tikslas ir uždaviniai.

1.1. Plačiajuosčių planariųjų lėtinimo sistemų modeliai ir tyrimas

Mikrobangų įtaisuose panaudojama elektromagnetinio lauko ir elektronų sąveika. Bėgančiosios ir atgalinės bangos lempos elektromagnetinės bangos ir elektronų pluošto greičiai turi būti suderinti. Kadangi elektronų greitis būna mažesnis už šviesos greitį, bėgančiosios bangos įtaisuose, siekiant suderinti bangos ir elektronų greičius, naudojamos sulėtintos elektromagnetinės bangos. Bangoms

lėtinti naudojami lėtinimo įtaisai, dar vadinami lėtinimo sistemomis (Štaras *et al.* 2010).

Lėtinimo sistemos, kaip ir ilgosios linijos, išsamesnei analizei reikalingos jos parametrų ir charakteristikų išraiškos. Parametrai ir charakteristikos gaunami apdorojant eksperimentinių tyrimų rezultatus arba dažniau – kompiuterinių skaičiavimo rezultatus, kuriuos atlikti be analitinių išraiškų neįmanoma. Projektuojant įvairius mikrobangų įtaisy reikia atlikti daugybę skaičiavimų optimizuojant projektuojamo įrenginio parametrus.

Lygtys

$$u(z, t) = Af\left(t - \frac{z}{v_f}\right) + Bg\left(t + \frac{z}{v_f}\right), \quad (1.1)$$

$$i(z, t) = \frac{1}{Z_0} \left[Af\left(t - \frac{z}{v_f}\right) - Bg\left(t + \frac{z}{v_f}\right) \right], \quad (1.2)$$

yra bendri sprendiniai, kurie parodo įtampos ir srovės pasiskirstymus ilgojoje linijoje be nuostolių. Čia A ir B – nežinomi koeficientai. Kaip matome įtampos ir srovės (1.1) ir (1.2) lygtys priklauso nuo parametrų v_f ir Z_0 . Parametras v_f yra vadinamas elektromagnetinės bangos sklidimo faziniu greičiu ir apibrėžiamas kaip

$$v_f = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}, \quad (1.3)$$

čia L_1 ir C_1 yra paskirstytieji ilgosios linijos parametrai, nusakantys perdavimo linijos ilginį induktyvumą ir talpą. Vienas svarbiausių lėtinimo sistemų savybes apibūdinančių parametrų yra Z_0 , kuris vadinamas linijos charakteringuoju impedansu arba bangine varža ir apibrėžiamas taip:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}. \quad (1.4)$$

Banginės varžos priklausomybę nuo kampinio dažnio ω galima apskaičiuoti tam tikrame sistemos pjūvyje, kurio koordinatė z , iš įtampos ir srovės santykio:

$$Z_0(z, \omega) = \frac{U(z, \omega)}{I(z, \omega)}. \quad (1.5)$$

Pasirinkus skerspjūvio tašką, kuriame skaičiuojama dažninė banginės varžos charakteristika, šis dydis gali būti interpretuojamas skirtingai: pavyzdžiui, siste-

mos įėjime ($z = 0$) apskaičiuotą dydį galima interpretuoti kaip sistemos įėjimo varžą Z_{IN} .

Kitas svarbus parametras yra lėtinimo koeficientas k_L , kuris rodo, kiek kartų bangos sklidimo fazinis greitis v_f mažesnis už šviesos greitį vakuume c_0 . Jis išreiškiamas formule:

$$k_L = \frac{c_0}{v_f} = c_0 \sqrt{L_1 C_1}. \quad (1.6)$$

Žinant sistemos lėtinimo koeficientą, vėlinimo trukmę t_v galima apskaičiuoti taikant formulę:

$$t_v = \frac{L_S}{c_0} k_L, \quad (1.7)$$

čia L_S – lėtinimo sistemos ilgis.

Pagal savo struktūrą lėtinimo sistemos skirstomos į trimates ir planariašias. Trimatėse lėtinimo sistemose signalų laidininkas yra išdėstomas keliuose plokštumose (Chua, Aditia 2013; Kim *et al.* 2008). Sukurtos įvairios konstrukcijos trimatės lėtinimo sistemos su iš esmės besiskiriančiomis savybėmis (Liu *et al.* 2013; Sumathy *et al.* 2013). Trimačių LS gamyba yra palyginti sudėtinga. Lengvesniu gamybos procesu pasižymi planariosios lėtinimo sistemos (Nguyen *et al.* 2013; Chua *et al.* 2011), kurių bendras bruožas – plokščia jų konstrukcija, todėl jos gaminamos pagal standartines integrinių grandynų technologijas arba naudojant savaiminio formavimosi technologinius procesus (Navickas 2013). Taikant šias technologijas, suformuojami įvairių konstrukcijų meandriniai, juosteliniai bei mikrojuosteliniai lėtinimo įtaisai. Mikrojuostelinėse meandrinėse lėtinimo sistemose gali būti vienas arba du ištisiniai ekranai. Erdvę tarp meandrinio laidininko ir ekranų užpildo vienalytis arba sluoksniuotas magnetodielektrikas (Martavičius 1996).

Lėtinimo sistemos buvo pradėtos tirti penktajame XX a. dešimtmetyje (Kalmann 1946; Лошаков, Ольдерогге 1948). Šiuose darbuose buvo analizuojamos spiralinės vėlinimo linijos. Per kitus du dešimtmečius susiformavo lėtinimo sistemų analizės teorijos pagrindai (Ширман, Вайнорис 1959), jos pradėtos taikyti bėgančiosios bangos vamzdžiuose (Burklund 1961) ir kreipimo sistemose (Niklas, Wimpffen 1958). Vėliau atsirado darbų apie sudėtingesnių konstrukcijų lėtinimo sistemas ir jų taikymus (Kowalski 1974; Лошаков *et al.* 1980; Rashed-Mohassel 1991).

Pirmųjų lėtinimo sistemų tyrimams buvo taikomi analitiniai analizės metodai: konforminių pakeitimų (Wheeler 1964), ekvivalentinių schemų (Sato 1971) ir daugialaidžių linijų (Štaras, Skudutis 1996). Šie metodai tinka nesudėtingos konstrukcijos sistemų uždaviniams dvimatėje erdvėje spręsti, tačiau yra neuni-

versalūs – pasikeitus LS konstrukcijai, pagrindinių jos parametrų apskaičiavimui tenka sudarinėti naują sistemą apibrėžiantį matematinį modelį ir išvestinėti sistemos dispersinę lygtį.

Tobulėjant kompiuterinei technikai, XX a. pabaigoje lėtinimo sistemų analizei vis dažniau buvo taikomi skaitiniai metodai. Tarp dažniausiai taikomų galima paminėti baigtinių skirtumų laiko srities (Zhewang *et al.* 1996), baigtinių elementų (Tanaka *et al.* 1994) ir momentų metodus (Ureel, De Zutter 1996). Be to, atsirado ir nauja hibridinių metodų grupė kurių esmė – išspręsti elektromagnetinį uždavinį pasitelkus įvairių metodų derinį. Pavyzdžiui taikant dirbtinių neuronų tinklus nustatyti lėtinimo sistemos parametrus pasinaudojus skaitiniais metodais sudaryta duomenų baze (Guney *et al.* 1999).

Lietuvoje lėtinimo sistemų tyrimai buvo pradėti septintajame XX a. dešimtmetyje, Kauno politechnikos instituto Vilniaus filiale, kuris vėliau tapo Vilniaus Gedimino technikos universiteto Elektronikos fakultetu. Profesoriaus Zenono Vainorio iniciatyva suburta mokslininkų grupė sukūrė vieningą lėtinimo-kreipimo sistemų analizės teoriją, ištyrė ir palygino daugelio šių sistemų charakteristikas ir savybes (Байнорис *et al.* 1986). Prie elektrodinaminių LS tyrimo ir jų taikymo mikrobangų įtaisuose problemos sprendimo daug prisidėjo profesoriai S. Štaras, R. Martavičius, R. Kirvaitis, J. Skudutis, V. Urbanavičius, docentai A. Gurskas, A. Jurjevas, V. Daškevičius. Pastaraisiais metais šia tematika buvo apgintos tris daktaro disertacijos (Pomarnacki 2011, Katkevičius 2013, Krukonis 2013). Lėtinimo sistemų teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai, jų gamybos ir taikymo problemos apibendrintos monografijoje (Štaras *et al.* 2012).

1.2. Plačiajuosčių planarijų lėtinimo sistemų taikymai

Plačiajuostės planariosios lėtinimo sistemos plačiai taikomos elektrodinaminėse vėlinimo linijose (VL) ir bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose (BBEV). Vėlinimo linijos gali būti naudojamos signalų sinchronizavimui didelio duomenų perdavimo greičio skaitmeniniuose įtaisuose. Gerai suprojektuota VL turėtų pasižymėti mažais nuostoliais, būti nedidelių matmenų. Konstrukcinių matmenų mažinimas dažnai pasiekiamas bent vieną VL laidininką sulankstant meandru. Apskritai meandrinų VL praleidžiamųjų dažnių juosta prasideda žemuosiuose dažniuose (Martavičius 1996; Štaras *et al.* 2010), tačiau tokios sistemos pasižymi didele dispersija, kuria reikia mažinti, norint jomis perduoti plačiajuosčius signalus. Be to, dėl padidėjusios elektromagnetinės sąveikos tarp gretimų VL juostelių, sumažėja linijos vėlinimo trukmė ir skaitmeniniame įtaise atsiranda klaidos. VL matmenis gali būti sumažinti ir kitu būdu – užpildant jos skerspjūvį medžiagomis su didelėmis dielektrinėmis ir magnetinėmis skvarbo-

mis. Tokiu būdu darbe (Prodromakis *et al.* 2007) nagrinėjama VL išdėstyta ant sluoksniuoto sintetinio pagrindo, kurio santykinė efektyvioji dielektrinė skvarba $\epsilon_{r \text{ eff}} \approx 2900$.

Atsiradus naujoms integrinių grandynų gamybos technologijoms, tokioms kaip sistema viename korpuse (angl. *system in package*), dielektrinių pagrindų dažnai pasirenkamas silicis. Tokiose sistemos vėlinimo grandinės gali būti įgyvendinamos iš aktyvių arba pasyvių elementų. Nepaisant savo mažų matmenų, aktyvieji elementai suvartoja daugiau energijos ir yra mažiau atsparūs triukšmui, lyginant su pasyviaisiais elementais. Be to, pasyviųjų komponentų gamyba yra paprastesnė ir pigesnė (Khajooeizadeh, Abhari 2006). Todėl vėlinimo linijų išdėstytų ant silicio padėklo analizė ir projektavimas yra plačiai aptarinėjamos darbuose (Hansuek *et al.* 2012) ir (Khajooeizadeh, Abhari 2008). Darbe (Khajooeizadeh, Abhari 2008) projektuojama meandrinė vėlinimo linija ant metalas-dielektrikas-puslaidininkis tipo pagrindo, kurios lėtinimo koeficientas siekia 4,5, esant 5 GHz pralaidumo juostos pločiui.

Vėlinimo linijos taip pat taikomos antenų gardelėse. Iš pradžių antenų gardelių sistemos buvo taikomos karinėje pramonėje, bet vėliau rado pritaikymą ir komercinėse komunikacijų sistemose. Tokios sistemos patrauklios savo ultra-plačiajuostiškumu ir galimybe reguliuoti kryptingumo diagramą elektroniniu

1.1 pav. Vėlinimo linijos celė (Shu-Yin, Wen-Jiao 2012)
Fig. 1.1. Delay line cell (Shu-Yin, Wen-Jiao 2012)

būdu. Darbe (Shu-Yin, Wen-Jiao 2012) VL sudaroma iš 15 vienodų celių. Kiekvieną celę, kuri pavaizduota 1.1 paveiksle, sudaro komplanarusis bangolaidis. Ši planariosios konstrukcijos antenų gardelė yra pagaminta ant pigaus FR-4 pagrindo ir skirta dirbti 2,4 GHz dažnio ruože. Dar vienos vėlinimo linijos, sudarytos iš komplanariojo bangolaidžio, projektavimas aptarinėjamas darbe (Jinglin *et al.* 2010). Ši linija ypatinga tuo, kad keičiant valdymo įtampą, galima kontroliuoti jos fazinio vėlinimo trukmę. Vėlinimo linijos užimamas plotas yra vos $0,06 \text{ mm}^2$.

Lėtinimo sistema yra esminis ir būtinas bėgančiosios bangos įtaisų elementas (Vainoris 2004). Dėl savo didelės galios ir efektyvumo, šie įtaisai plačiai taikomi komercinėse antžeminėse ir palydovinėse komunikacijų sistemose (Cusick *et al.* 2012). Karinėje elektronikoje BBEV naudojami mikrobangų stiprinimui duomenų perdavimo kanaluose, radarų sistemose, elektroninėse apsaugos sistemose. Darbe (Trani, Antoine 2012) pristatomas karo pramonėje taikomas didelės galios mikrobangų stiprintuvas: 200 W esant 6–18 GHz dažnių ruožui ir 80 W esant 18–40 GHz dažnių ruožui. BBEV taip pat rado savo pritaikymą matavimų prietaisuose, elektroninių ginklų gamyboje.

Bėgančiosios bangos elektroniniuose vamzdžiuose taikomos spiralinės (Chen *et al.* 2013; Chua *et al.* 2012) ir meandrinės (Wang *et al.* 2013) plačiajuostės planariosios lėtinimo sistemos. Siekiant pagerinti BBEV savybes, naudojami skirtingos formos meandro laidininkai, pavaizduoti 1.2 paveiksle.

1.2 pav. Skirtingos formos meandro laidininkai:

- a) „U“ formos (Sengele *et al.* 2009); b) „V“ formos (Fei *et al.* 2012);
c) „S“ formos (Bai *et al.* 2013)

Fig. 1.2. Meander conductors of different shapes: a) U-shaped (Sengele *et al.* 2009); b) V-shaped (Fei *et al.* 2012); c) S-shaped (Bai *et al.* 2013)

Meandrinė lėtinimo sistema su įprastu arba „U“ formos laidininku (1.2 pav., a) pasižymi paprastesniu gamybos procesu (Sengele *et al.* 2009). BBEV, kuriose naudojamos lėtinimo sistemos su „V“ formos laidininku (1.2 pav., b) pasižymi didesne galia. Darbe (Fei *et al.* 2012) nagrinėjamas stiprintuvas, kurio išėjimo-galia yra 160 W esant 4700 V įtampai ir 100 mA srovei. Taikant „S“ formos laidininką (1.2 pav., c), sistemos centrinis dažnis pasislenka į aukštesniųjų dažnių sritį, tuo tarpu dispersinės savybės nepasikeičia. Be to, aukštesniųjų dažnių srityje sumažėja perdavimo nuostoliai (Bai *et al.* 2013).

Plačiajuostės planariosios meandrinės lėtinimo sistemos taip pat plačiai taikomos antenose, monolitiniuose integriniuose grandynuose ir didelio duomenų perdavimo greičio skaitmeniniuose įtaisuose. Filtrai, šakotuvai ir galios dalikliai gali būti pagaminti taikant meandrinės lėtinimo sistemas, kurių gamybos procesas yra pigus ir paprastesnis negu įprastinių bangolaidinių struktūrų gamyba.

1.3 pav. Antenos dalis su meandro formos laidininku (Sultan *et al.* 2012)

Fig. 1.3. Meander line part of the antenna (Sultan *et al.* 2012)

Šiuo metu meandrinės lėtinimo sistemos plačiausiai taikomos projektuojant antenas. Meandro formos laidininkas leidžia sumažinti antenos matmenis, todėl tokios antenos yra paplitusios mobiliuosiuose įrenginiuose (Amini, Hassani 2013). Darbe (Ban *et al.* 2013) antenos dalį sudaro du meandro formos induktoriai, padedantys pasiekti 850 MHz ir 900 MHz rezonansinį dažnį, kuriuo veikia GSM (angl. *Global Standart for Mobile Communications*) mobilusis ryšys. Be to, šiuolaikiniuose mobiliuosiuose įrenginiuose naudojamos antenos turi būti ne tik mažų matmenų bet ir veikti keliuose įvairius ryšio standartus atitinkančiuose dažnių ruožuose. Darbe (Sultan *et al.* 2012) projektuojama antena, kuri

gali būti panaudota GSM, LTE (angl. *Long Term Evolution*), WiMAX (angl. *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) ryšių standartus atitinkančiose sistemose, taip pat duomenų perdavimui per WLAN (angl. *Wireless Local Area Network*) bevielius lokalius tinklus. Taipogi, antena pasižymi maža savitąja sugertąja galia (angl. *specific absorption rate*), siejamą su bevielio ryšio sistemų poveikių žmonių sveikatai. Antenos dalis, kuria sudaro meandras pavaizduotas 1.3 paveiksle, skirta pasiekti 900 MHz rezonansinį dažnį. Antenos matmenys – $27 \times 25 \times 0,8$ mm.

Meandrinės lėtinimo sistemos taip pat plačiai taikomos antenose, kurios skirtos radijo dažnio identifikavimo (angl. *Radio Frequency IDentification* - RFID) sistemoms (Soliman *et al.* 2012; Ma *et al.* 2012). RFID technologija vis dažniau naudojama kasdieninėje gyvenimo ir verslo aplinkoje. Jos panaudojimas yra labai platus – nuo medicinos iki logistikos. Vienas iš pagrindinių reikalavimų RFID sistemai – maži matmenys. Todėl darbe (Faudzi *et al.* 2013) projektuojamoje antenoje laidininkas yra sulankstomas meandru. Čia teigiama, kad meandro formos laidininko taikymas gali sumažinti antenos matmenis iki 70 % palyginus su įprastine dipoline antena. Kitame darbe (Abdulhadi, Abhari 2012) projektuojamos RFID sistemoms skirtos antenos, dirbančios 860–960 MHz dažnių ruože. Viena iš antenų yra monopolinė, kitos, pavaizduotos 1.4 paveiksle, laidininkas sulankstytas meandru. Pastarosios antenos veikimo nuotolis – 5,39 m, o jos matmenys, kurie yra 28 % mažesni už monopolinės antenos, siekia $42 \times 25,7$ mm.

1.4 pav. Antenos, naudojamos radijo ryšio identifikavimo sistemose, eskizas (Abdulhadi, Abhari 2012)

Fig. 1.4. Structure of an antenna used in RFID systems (Abdulhadi, Abhari 2012)

Kitą grupę įtaisų, kuriuose plačiai taikomos meandrinės lėtinimo sistemos, sudaro filtrai. Darbe (Lin *et al.* 2012) panaudojant metalo oksido puslaidininkinę (angl. *complementary metal oxide semiconductor* – *CMOS*) technologiją, viršutiniame filtro sluoksnyje yra formuojamas meandro formos laidininkas, kuris yra rezonatorius. Linijos $50\ \Omega$ banginė varža pasiekama parenkant $10\ \mu\text{m}$ laidininko plotį.

1.5 pav. Dviejų modų juostinio filtro eskizas (Gorur, Karpuz 2007)

Fig. 1.5. Structure of a dual-mode filter (Gorur, Karpuz 2007)

1.6 pav. Žemųjų dažnių filtro eskizas (Ge *et al.* 2010)

Fig. 1.6. Structure of a low-pass filter (Ge *et al.* 2010)

Filtrų gamybai taip pat naudojami aukštos temperatūros superlaidininkai (angl. *high temperature superconductors* – HTS). Tokie filtrai pasižymi žemais įėjimo nuostoliais ir aukštu perderinimu (Wang *et al.* 2013). Siekiant sumažinti dviejų modų juostinio filtro matmenis darbe (Gorur, Karpuz 2007) siūloma naudoti meandro formos rezonatorių. Toks filtras, pavaizduotas 1.5 paveiksle, taikomas palydoviniame ir mobiliajame ryšiuose. Projektuojamo rezonatoriaus centrinis dažnis yra 1,6 GHz. Filtro matmenys – $13,6 \times 10,2$ mm, jis yra gaminamas ant RT/Duroid dielektrinio pagrindo su skvarba $\epsilon_r = 10,2$.

Meandro formos laidininkai taip pat naudojami projektuojant žemųjų dažnių filtrus su plačia užtvaros juosta. Tokie filtrai naudojami komunikacijų sistemose harmonikų ir triukšmo signalų slopinimui. Darbe (Wang *et al.* 2010) aptariamas filtras, kuris pasižymi didesniu nei 15 dB slopinimu ruože nuo 1,8 iki 8,84 GHz, o jo matmenys – $13,2 \times 13,2$ mm. Šiuo atveju meandras naudojamas perdavimo linijos ilgiui padidinti. Panašus filtras projektuojamas darbe (Ge *et al.* 2010). Šis filtras, pavaizduotas 1.6 paveiksle, turi itin plačią užtvaros juostą ir pasižymi didesniu nei 17 dB slopinimu bei mažesniu nei 0,3 dB įneštinio slopinimu dažnių ruože nuo 2 iki 14,6 GHz. Filtro matmenys – 11×19 mm.

1.7 pav. Šakotuvo eskizas (Yang *et al.* 2006)
Fig. 1.7. Structure of a coupler (Yang *et al.* 2006)

Meandrinės lėtinimo sistemos taip pat naudojamos šakotuose (Chiu *et al.* 2012). Darbe (Piekarz *et al.* 2012), taikant žematemperatūros sukeptos keramikos (angl. *low temperature co-fired ceramics* – LTCC) technologiją, projektuojamas šakotuvas sudarytas iš susietųjų meandrinių linijų. Čia teigiama, kad laidininko sulankstymas meandru padeda sumažinti įtaiso matmenis: bendras meandrinės linijos ilgis – 8,64 mm, tuo tarpu identiškų parametrų tie-

saus laidininko ilgis yra 17,6 mm. Kitame darbe (Yang *et al.* 2006) kuriamas šakotuvai, sudarytas iš dviejų meandrinių linijų išdėstytų skirtinguose sluoksniuose. Toks įtaisas, pavaizduotas 1.7 paveiksle, gali būti taikomas monolitinuose mikrobangų integriniuose grandynuose (maišikliuose, fazės keitikliuose, stiprintuvuose).

Fazės keitikliai plačiai taikomi fazinių gardelių sistemose spindulio valdymui ir formavimui. Darbe (Wu *et al.* 2012), keitiklio dalį sudaro meandrinė linija, kurios matmenys 18×18 mm. Toks fazinis keitiklis skirtas dirbti 1–6 GHz dažnių ruože. Taip pat vis labiau populiarėja fazės keitikliai gaminami ant skystųjų kristalų pagrindo ir dirbantys 60 GHz dažnių ruože (Deo *et al.* 2013; Bulja *et al.* 2010). Pagrindinis tokių keitiklių privalumas – galimybė valdyti juos išorine įtampa.

Apibendrinant galima teigti, kad planariosios lėtinimo sistemos plačiai taikomos įvairiose srityse. Jų konstrukcija yra labai įvairi ir priklauso nuo įtaiso paskirties. Esamos konstrukcijos yra nuolat tobulinamos, nes mikrobangų įrenginiams keliama vis aukštesni reikalavimai. Šiame darbe pagrindinį dėmesį skirsime plačiajuostėms meandrinėms lėtinimo sistemoms, kurių praleidžiamųjų dažnių juosta prasideda žemuosiuose dažniuose. Tokios sistemos pasižymi didele dispersija, kuria reikia mažinti, norint jomis perduoti plačiajuosčius signalus. Dispersija gali būti sumažinta įtaisant papildomus ekranus tarp gretimų meandro laidininko juostelių.

1.3. Plačiajuosčių planariųjų lėtinimo sistemų tyrimams taikomi metodai

Plačiajuosčių planariųjų lėtinimo sistemų tyrimams taikomus metodus galima suskirstyti į analitinius ir skaitinius. Analitinių metodų galimybės sprendžiant praktinius elektromagnetizmo uždavinius yra gana ribotos, jie tinka tik nesudėtingos konstrukcijos sistemų uždaviniams dvimatėje erdvėje spręsti. Tobulėjant kompiuteriams, atsivėrė naujos galimybės – inžinerinėje praktikoje ir moksliniuose tyrimuose buvo pradėti taikyti skaitiniai metodai. Šiuos metodus taiko ir tobulina daugelio sričių mokslininkai. Elektros ir elektronikos inžinerijos moksle, ypač elektrodinamikoje ir mikrobangų technikoje, skaitiniai metodai buvo pradėti taikyti maždaug prieš 40 metų (Štaras 2008).

Pirmieji lėtinimo sistemų modeliavimo metodai buvo kvazistatiniai. Taikant šiuos metodus manoma, kad struktūroje sklindanti moda nėra grynai TEM (angl. *Transverse Electromagnetic Wave*) – skersinė elektromagnetinė banga, o kvazi-TEM. Terminu „kvazi-TEM“ pabrėžiama, kad laukų struktūra lėtinimo sistemoje dėl aplinkos, kurią dažniausiai sudaro keli dielektrikų sluoksniai, nedaug skiriasi nuo TEM bangos laukų. Dažnių srityje iki 10 GHz, tokia prielaida

garantuoja pakankamą tikslumą, tačiau didėjant dažniui vis labiau pasireiškia išilginė dedamoji, kuri keičia modeliavimo rezultatus. Pavyzdžiui, išryškėja dispersija, t. y. pasireiškia pagrindinių sistemos parametrų priklausomybė nuo dažnio.

Vėliau lėtinimo sistemų tyrimams buvo pradėti taikyti visabangės (angl. *full-wave*) analizės metodai. Šiuo atveju daroma prielaida, kad sklindanti banga yra hibridinė, kas labai sugriežtina sistemos parametrų skaičiavimą. Svarbi visabangės analizės dalis yra tai, kad pagrindiniai lėtinimo sistemos parametrai priklauso nuo dažnio.

1.3.1. Analitiniai tyrimų metodai

XX a. septintajame dešimtmetyje lėtinimo sistemų parametrus skaičiuoti buvo pritaikytas konforminių pakeitimų metodas. Šis metodas leidžia gauti tiesiogines išraiškas, pagal kurias apskaičiuojami pagrindiniai lėtinimo sistemos parametrai. Paprasčiausių mikrojuostelinių struktūrų analizės, taikant konforminių keitimų metodą, išraiškos buvo gautos dar 1964 metais. Tačiau šis metodas yra taikomas ir iki šiol. Darbe (Abbosh 2009) nagrinėjamos tris skirtingos susietųjų mikrojuostelinių linijų konfigūracijos. Čia gaunamos išraiškos, leidžiančios apskaičiuoti banginę varžą esant lyginio ir nelyginio sužadavimo darbo režimams. Siekiant patvirtinti išraiškų tikslumą, jos yra panaudojamos projektuojant 3 dB šakotuvą. Taip pat galima išskirti darbą (Sadiku *et al.* 2007), kuriame palyginamos dvylikos skirtingų autorių išraiškos, leidžiančios apskaičiuoti mikrojuostelinių perdavimo linijų ilginę talpą, gautos per paskutinius keturis dešimtmečius. Konforminių pakeitimų metodas nereikalauja didelių kompiuterinių išteklių bei iteracinių skaičiavimų, tačiau yra neuniversalus – pasikeitus lėtinimo sistemos konstrukcijai, tenka atlikti vis naujus konforminius pakeitimus.

Plačiajuosčių planarijų lėtinimo sistemų tyrimams taip pat taikomas ekvivalentinių schemų metodas. Šis metodas pagrįstas analizuojamosios lėtinimo sistemos ekvivalentinės schemos iš pakopomis sujungtų keturpolių arba daugiapolių sudarymu. Kiekvienas daugiapolis susideda iš tarpusavio sujungtų sutelktųjų talpų ir induktyvumų, o taip pat ilgųjų linijų atkarpų. Sudarytoji ekvivalentinė grandinės schema analizuojama, taikant filtrų arba ilgųjų linijų teoriją. Tai vaizdus metodas, tačiau jis neleidžia nustatyti elektrinio lauko struktūros vėlinimo linijoje. Be to, jis galioja tik tam tikrame, ribotame dažnių ruože. Sudėtingiausia ekvivalentinių schemų metode tiksliai rasti ryšį tarp nagrinėjamosios lėtinimo sistemos konstrukcijos parametrų ir ekvivalentinės schemos elementų parametrų. Ekvivalentinėmis schemomis lėtinimo sistemas modeliuoja (Olaode *et al.* 2012; Lin *et al.* 2009) darbų autoriai, kuriuose nagrinėjamos meandrinės vėlinimo linijos, taikomos projektuojant įtaisus radijo ryšio sistemoms. Darbe (Das *et al.* 2011) teigiama, kad meandro formos laidininkai plačiai taikomos

antenose, tačiau vis dar nėra paprasto analitinio modelio, aprašančio tokias sistemas. Todėl čia pateikiamas ekvivalentinėmis schemomis paremtas meandro formos antenos modelis, skirtas jos rezonansiniam dažniui apskaičiuoti.

Lėtinimo sistemų analizei dažnai taikomas daugialaidžių linijų (DL) metodas. Daugialaidžių linijų metodo taikymas lėtinimo sistemų modeliavimui plačiai aprašytas Lietuvos mokslininkų darbuose, kurie apibendrinti monografijoje (Štaras *et al.* 2010). Taikant šį metodą daroma prielaida, kad vienalytėje analizuojamosios planariosios lėtinimo sistemos skerspjūvio srityje egzistuoja tik TEM banga. Aukštesnieji TE ir TM bangų tipai atsiranda tik netolygumų vietose ir, esant nedideliams netolygumų ilgiams, nuslopsta. Vienalytė planariosios lėtinimo sistemos sritis modeliuojama daugialaide linija, o netolygumai – ekvivalentinėmis sutelktosiomis varžomis (Katkevičius 2010). Modelio daugialaidė linija – tai begalinių lygiagrečių laidininkų gardelė, kurios skerspjūvio konstrukcija ir matmenys tokie kaip analizuojamoje lėtinimo sistemoje. Planarioji lėtinimo sistema sudaroma iš DL suformuojant kraštinių sąlygų lygtis, kurios aprašo DL laidininkų tarpusavio sujungimus. Matematinis planariosios lėtinimo sistemos modelis DL metodu gaunamas apjungus lygtis apibūdinančias TEM bangos sklaidimą DL laidininkuose ir kraštinių sąlygų lygtis į lygčių sistemą (Pomarnacki *et al.* 2010). Planariosios lėtinimo sistemos laidininkų skerspjūvio forma, matmenys, ekranai ir magnetodielektrikai jos konstrukcijoje įvertinami apskaičiuojant DL laidininkų banginius laidumus ir elektromagnetinės bangos sklaidimo išilgai šių laidininkų greitį (Krukonis *et al.* 2013).

Banginiai laidumai gali būti apskaičiuoti taikant anksčiau minėtus analitinius metodus. Tačiau šie metodai neleidžia nustatyti elektrinio lauko struktūros lėtinimo sistemoje ir įvertinti kraštų bei galų efektų sistemos dispersinėms charakteristikoms. Be to, dėl šiems metodams būdingų skaičiavimo neapibrėžčių atsiranda tiriamųjų įtaisų charakteristikų skaičiavimo netikslumai. Todėl sudėtingų konstrukcijų, tokių kaip meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais, tyrimams analitiniai metodai netinka. Tikslesnius skaičiavimo rezultatus galima gauti plačiajuosčių planariųjų lėtinimo sistemų tyrimams pritaikius skaitinius metodus.

1.3.2. Skaitiniai tyrimų metodai

Elektrodinamikoje skaitiniais metodais sprendžiamos Maksvelo, elektrostatikoje – Puasono ir Laplaso lygtys. Maksvelo lygtys gali būti užrašytos diferencialine ir integraline formomis. Todėl yra dvi skaitmeninių metodų grupės. Pirmosios grupės metodais sprendžiamos diferencialinės lygtys su dalinėmis išvestinėmis. Šiai grupei priklauso tokie metodai:

- baigtinių skirtumų metodas – BSM (angl. *finite difference method* – *FDM*);

- baigtinių elementų metodas – BEM (angl. *finite element method* – *FEM*);
- baigtinių skirtumų laiko srities metodas – BSLS (angl. *finite difference time domain* – *FDTD*).

Antrosios grupės metodai taikomi integralinėms lygtims spręsti. Vienas svarbiausių šios grupės metodų – momentų metodas – MOM (angl. *method of moments* – *MoM*).

Pirmasis iš skaitinių metodų elektromagnetiniams uždaviniams spręsti buvo pritaikytas baigtinių skirtumų metodas. Šis metodas, kuris iš pradžių buvo vadinamas kvadratų metodu, buvo sukurtas trečiajame XX a. dešimtmetyje ir naudojamas netiesinėms hidrodinamikos lygtims spręsti (Thom, Apelt 1961). Baigtinių skirtumų metodika remiasi aproksimacijomis, kurios leidžia diferencialines lygtis keisti baigtinių skirtumų lygtimis. Aproksimacijos šiuo atveju yra algebrinio pavidalo; jos nusako ryšį tarp taško, esančio analizuojamoje srityje ir greta esančių taškų. Tokiu būdu, baigtinių skirtumų metodas iš esmės apima šiuos žingsnius:

1. Analizuojamos srities padalinimas į mazgų tinklą.
2. Diferencialinė lygtis išreiškimas ekvivalentiška baigtinių skirtumų lygtimi, kuri susieja kintamąjį tam tikrame analizuojamos srities taške su greta esančiais taškais.
3. Skirtuminės lygties sprendimas nurodytoms ribinėms ir (arba) pradinėms sąlygoms.

Baigtinių skirtumų metodas elektromagnetinių uždavinių sprendimui buvo plačiau taikomas paskutiniame XX a. dešimtmetyje. Galima išskirti darbus, skirtus įvairių mikrojuostelinių struktūrų banginės varžos nustatymui (Rosales, Suster 1995; Bhattacharjee *et al.* 1995; Radhakrishnan, Chew 2000), mikrojuostelinių linijų analizei (Cantaragiu 1999). Tačiau šis metodas aptinkamas ir naujesniuose darbuose (Kui-Song *et al.* 2011). Čia BSM pritaikomas dviejų dalių antenų gardelės sklaidos parametrų apskaičiavimui.

Baigtinių elementų metodas – tai skaitinis metodas skirtas matematinėms fizikos diferencialinėms lygtims spręsti. Taikant baigtinių elementų metodą, galima spręsti ne tik elektromagnetinių bet ir mechaninių, termodinaminių, srautų bei kitokių fizinių sistemų uždavinius. Skirtingai nuo baigtinių skirtumų metodo, BEM nėra iteracinis metodas. Šio metodo teoriniai pagrindai yra sudėtingesni, tačiau jis leidžia rasti apytikrį sprendinį iš karto – netaikant iteracijų. Norint spręsti elektrostatikos uždavinius pasitelkus BEM, reikia žinoti elektromagnetinio lauko teoriją ir turėti programinę įrangą, leidžiančią paprastai programuoti matricų apdorojimo veiksmus.

Baigtinių elementų metodas taikomas darbe (He *et al.* 2012). Čia nagrinėjama meandro formos dipolinė antena, naudojama radijo dažnio identifikavimo sistemoje. Antenos rezonansinės savybės modeliuojamos ir tikrinamos programinės įrangos paketu HFSS[®] (angl. *high frequency structure simulator*), kuris remiasi BEM. Šis paketas naudojamas ir darbe (Liu *et al.* 2012), kuriame projektuojama spiralinė lėtinimo sistema bėgančios bangos elektroniniam vamzdžiui. BEM taip pat pritaikomas lėtinimo sistemos slopinimo apskaičiavimui (Xu *et al.* 2012).

Elektromagnetinių uždavinių sprendimui plačiai taikomi laiko srities metodai. Vienas iš tokių metodų yra baigtinių skirtumų laiko srities metodas, kuris palyginti nesunkiai įgyvendinamas programiškai, labai efektyvus ir lengvai adaptuojamas prie įvairių uždavinių. Sudėtingesnių struktūrų analizei labiau tinka baigtinių elementų laiko srities metodas – BELS (angl. *finite element time domain* – *FETD*), tačiau BSLS leidžia naudoti tikslų laiko žingsnį, kad padaro jį žymiai efektyvesniu nei BELS. Be to, programuojant BSLS metodą, nereikia saugoti matricių – tai sumažina kompiuterio atminties sąnaudas ir leidžia spręsti uždavinius su dideliu nežinomųjų skaičiumi (Bondeson *et al.* 2005). Baigtinių skirtumų laiko srities algoritmą 1966 metais pasiūlė K. S. Yee.

Baigtinių skirtumų laiko srities metodas pritaikomas meandro formos antenų optimizavimui (Watanabe *et al.* 2011), mikrojuostelinių linijų santykinės efektyviosios dielektrinės skvarbos priklausomybės nuo dažnio tyrimui (Krukonis, Urbanavičius 2011), taip pat įvairių mikrobangų įtaisų analizei (Lingjiang *et al.* 2012) ir trukdžių susietosiose perdavimo linijose įvertinimui (Mital *et al.* 2012).

Analitinės matematikos integralinių lygčių sprendimo metodai yra sudėtingi ir turi tam tikrų apribojimų. Iš taikomosios matematikos yra žinoma, kad integralas gali būti apytiksliai skaičiuojamas suma. Ši integralo savybė taikoma momentų metode – integravimas keičiamas sumavimu ir sudaroma tiesinių lygčių sistema, kurios sprendinys yra aproksimuota ieškoma funkcija. Metodo tikslumas iš esmės priklauso nuo dėmenų, kurių suma yra pakeičiamas integralas, skaičiaus. Pakankamai tikslų rezultatų radimas momentu metodu įmanomas tik naudojant kompiuterį, nes norint tiksliai rasti ieškomus dydžius reikia integralą dalinti į didelį skaičių (paprastai kelis šimtus) dėmenų ir matematinių veiksmų skaičius, priklausomai nuo analizuojamos sistemos, gali būti nuo dešimčių tūkstančių iki milijonų. Tokiu būdu elektromagnetinio uždavinio sprendimas momentu metodu atliekamas keturiais etapais:

1. Tinkamos integralinės lygties išvedimas.
2. Integralinės lygties pakeitimas matricine lygtimi naudojant skaidymo ir svorio funkcijas.
3. Matricos elementų nustatymas.

4. Matricinių lygčių sprendimas ir reikiamų parametrų nustatymas.

Momentų metodas plačiai taikomas mikrobangų įtaisų analizei ir projektavimui. Darbe (Sato *et al.* 2013) ieškoma optimalių meandro formos antenos parametrų taikant adaptyvų genetinį algoritmą, tačiau jos įėjimo varža nustatoma taikant momentų metodą. Siekiant paspartinti skaičiavimus, darbe (Cerjanic *et al.* 2012) kompiuterinis kodas, skirtas antenų projektavimui, yra adaptuojamas grafiniams procesoriams (angl. *graphics processing unit* – GPU). Grafiniai procesoriai ypač tinka lygiagrečiams skaičiavimams, kai ta pati programa yra suskaidoma į daug duomenų elementų ir vykdoma lygiagrečiai. Tokiu būdu pasiekiamas didelis skaičiavimų našumas.

Šiuolaikiniai mikrobangų įtaisams projektuoti skirti programinės įrangos paketai leidžia modeliuoti bei tirti sudėtingus mikrobangų grandynus. Iš labiausiai paplitusių galima paminėti COMSOL[®], CST Microwave Studio[®], Sonnet[®], HFSS[®], QWED[®], SPICE[®]. Šie paketai remiasi įvairiais skaitiniais metodais, o taip pat skiriasi savo sudėtingumu, tikslumu bei pritaikymo galimybėmis. Pavyzdžiui programinės įrangos paketas Sonnet[®] remiasi momentų metodu (Rautio, Harrington 1987) ir yra ypatingai pritaikytas planarijų sistemų analizei, HFSS[®] remiasi baigtinių elementų metodu, QWED[®] – baigtinių skirtumų laiko srities metodu, o CST Microwave Studio[®] ypač tinka trimačių sistemų analizei ir elektromagnetiniams uždaviniams spręsti leidžia pasirinkti vieną iš aukščiau išvardytų metodų.

Tiriant sudėtingas elektrodinamines struktūras labai svarbu tinkamai pasirinkti skaitinį metodą. Kaip jau buvo minėta, baigtinių skirtumų metodas yra iteracinis. Modeliuojant meandrinės lėtinimo sistemas su papildomais ekranais baigtinių skirtumų metodu, analizuojamą sritį tenka dalinti į didelį mazgų skaičių. Dėl to gaunami didesni duomenų masyvai ir didėja iteracijų skaičius, o kartu ir skaičiavimo trukmė. Todėl šis metodas labiau tinka paprastesnių struktūrų tyrimui.

Universalesniu laikomas baigtinių elementų metodas. Tačiau jo teoriniai pagrindai yra sudėtingesni, o uždavinio sprendimas labai priklauso nuo analizuojamos srities sudalinimo elementais procedūros. Šią procedūrą automatizuoti yra sunku, todėl baigtinių elementų metodas reikalauja daug kompiuterinių išteklių. Be to, BEM yra sunkiai įgyvendinamas specializuotuose programų paketuose, modeliuoti meandrinės lėtinimo sistemas su papildomais ekranais šiuo metodu yra nepatogu.

Plačiajuosčių meandrinės lėtinimo sistemų tyrimams plačiausiai taikomi baigtinių skirtumų laiko srities ir momentų metodai. BSLS metodas yra lankstesnis, lengviau įgyvendinamas, nors ir reikalauja didesniu kompiuterinių išteklių nei momentų metodas. Dėl savo lankstumo BSLS metodas labiau tinkamas sklaidos problemoms spręsti. Analizuojant sudėtingas elektrodinamines sistemas, tokias kaip meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais, tikslinga

taikyti momentų metodą, nes tyrimai rodo, kad jis yra tikslesnis, sprendžiant tokio tipo uždavinius (Sheng, Song 2012). Todėl šiame darbe meandrinį lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modelių analizei pasirinktas momentų metodas ir juo grįstas specializuotas programų paketas Sonnet[®].

1.4. Autoriaus indėlis į problemos sprendimą

Mikrobangų įtaisuose naudojamos įvairių konstrukcijų plačiajuostės planariosios lėtinimo sistemos. Plačia praleidžiamųjų dažnių juosta pasižymi spiralinės lėtinimo sistemos (Skudutis, Daškevičius 2001). Tokių LS savybės yra nagrinėjamos ir tiriamos (Skudutis, Daškevičius 2002) ir (Štaras, Burokas 2003) darbuose. Siūlomi ir patobulinti spiralinių lėtinimo-kreipimo sistemų modeliai (Štaras, Burokas 2004; Štaras, Burokas 2006). Taip pat galima paminėti darbus (Skudutis *et al.* 2004; Skudutis, Daškevičius 2006), kuriuose spiralinių lėtinimo sistemų modeliavimui taikomi skaitmeniniai metodai ir naudojami tam skirti specializuoti programų paketai.

Disertacijoje plačiau nagrinėjamos meandrinės lėtinimo sistemos. Tokios sistemos svarbiausia dalis – meandro formos laidininkas (Martavičius, Urbanavičius 1996). Lietuvoje atlikta nemažai meandrinį lėtinimo sistemų tyrimų: iš-tirtos būdingosios ir įėjimo varžų dažninės savybės (Martavičius, Urbanavičius 1997), laidininkų išilginių atkarpų įtaka dažninėms charakteristikoms (Kleiza, Štaras 1998), ekranų įtaka meandrinį vėlinimo linijų savybėms (Martavičius, Urbanavičius 1998). Gaminant meandro formos laidininką, juostelių išdėstymo periode gali atsirasti žingsnio netolygumas. Todėl darbe (Martavičius, Urbanavičius 1999) yra ištirta žingsnio netolygumo įtaka meandrinį lėtinimo sistemų savybėms.

Įprastoje meandrinėje lėtinimo sistemoje fazinio vėlinimo trukmė labai priklauso nuo signalo dažnio – signalo dažniui didėjant vėlinimo trukmė didėja. To priežastis yra nuo dažnio priklausantis elektromagnetinis ryšys tarp gretimų meandro juostelių. Siekiant sumažinti elektromagnetinę sąveiką, tarp gretimų meandro laidininkų įterpiami papildomi ekranai, kurie trumpikliais yra sujungiami su išoriniu ekranu. Tokiu būdu sukurti meandrinės lėtinimo sistemos su šukų (Martavičius, Jurjevas 1999) ir kilpų (Martavičius, Jurjevas 2000) pavidalo papildomais ekranais modeliai. Be to, pateikiami ir patikslinti plačiajuosčių meandrinį LS su papildomais ekranais modeliai (Martavičius, Jurjevas 2001). Panašias konstrukcijas tiria ir užsienio autoriai (Nara, Koshiji 2006; Nara, Koshiji 2007).

Disertacijos autorius pasiūlė naujus meandrinį LS su papildomais ekranais modelius, ištyrė papildomų ekranų įžeminimo taško įtaką meandrinį LS dispersinėms savybėms. Taip pat nustatė meandro kraštų įtaką sistemos dispersinėms

savybėms. Be to, autorius pasiūlė meandrinių LS su papildomais ekranais įėjimo varžos nustatymo metodiką ir išanalizavo įėjimo varžos priklausomybę kintant dažniui.

1.5. Išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

Atlikus plačiajuosčių planarijų lėtinimo sistemų ir jų analizės metodų apžvalgą galima teigti, kad:

1. Meandrinės lėtinimo sistemos plačiai taikomos įvairiuose mikrobangų įtaisuose: vėlinimo linijose, bėgančios bangos elektroniniuose vamzdžiuose, antenose, filtruose, šakotuvuose ir fazės keitikliuose.
2. Meandrinių lėtinimo sistemų praleidžiamųjų dažnių juosta prasideda žemuosiuose dažniuose. Tokios sistemos pasižymi didele dispersija, kuria reikia mažinti, norint jomis perduoti plačiajuosčius signalus. Todėl esamas meandrinių lėtinimo sistemų konstrukcijas tenka tobulinti, norint pagerinti jų dispersines savybes. Dispersinės savybės gali būti pagerintos įtaisant papildomus ekranus tarp gretimų meandro laidininko juostelių.
3. Lėtinimo sistemų tyrimams taikomi analitiniai ir skaitiniai metodai. Analitiniai metodai neleidžia nustatyti elektrinio lauko struktūros lėtinimo sistemoje ir įvertinti kraštų bei galų efektų sistemos dispersinėms charakteristikoms. Todėl sudėtingų konstrukcijų, tokių kaip meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais, tyrimams analitiniai metodai netinka. Tikslesnius skaičiavimo rezultatus galima gauti plačiajuosčių meandrinių lėtinimo sistemų tyrimams pritaikius skaitinius metodus.
4. Modeliuojant lėtinimo sistemas plačiausiai taikomi baigtinių skirtumų laiko srities ir momentų metodai. Tiriant sudėtingas elektrodinamines struktūras momentų metodas yra tikslesnis, todėl šiame darbe meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modeliai analizuojami taikant momentų metodą ir specializuotą programų paketą Sonnet[®].

Taigi aktualu kurti naujus plačiajuosčių planarijų lėtinimo sistemų modelius, leisiančius ištirti galimybes praplėsti darbo dažnių ribas, sumažinti vėlinimo trukmės dispersiją ir įvertinti sistemos suderinamumą su signalų traktu. Tam būtina taikyti specializuotus programinės įrangos paketus. Šiam tikslui pasiekti reikia išspręsti šiuos uždavinius:

1. Taikant momentų metodą, sudaryti elektrinio lauko meandrinėse lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo modeliavimo metodiką ir ištirti elektrinio lauko struktūrą plokščiosiose meandrinėse lėtinimo sistemose.

2. Sudaryti plokščiųjų meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modelius, taikant specializuotus programų paketus.
3. Ištirti plokščiųjų meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais kraštų bei galų efektų įtaką sistemos dispersinėms savybėms ir įėjimo varžos priklausomybei nuo dažnio.
4. Sukurti plokščiųjų meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais parametrinės sintezės metodiką.

Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modelių sudarymas

Šiame skyriuje pasiūlomi nauji meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais kompiuteriniai modeliai, sukurti momentų metodu grįstu specializuotu programų paketu Sonnet[®]. Modeliai skiriasi papildomų ekranų įžeminimo taško vieta ir kraštų topologijomis. Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais savybių tyrimui sudaromas sklaidos parametrų apskaičiavimo algoritmas ir įėjimo varžos nustatymo metodika. Be to, pasiūloma momentų metodu grįsta elektrinio lauko meandrinėse lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo modeliavimo metodika.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Metlevskis, Urbanavičius 2011; Metlevskis, Martavičius 2012; Metlevskis, Martavičius 2012; Metlevskis, Martavičius 2014).

2.1. Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais kompiuteriniai modeliai

Mikrobangų įtaisų tyrimams vis dažniau taikomi specializuoti programų paketai, kurie leidžia kurti įvairaus sudėtingumo grandynų kompiuterinius modelius. Specializuotų programų paketų pagalba sukurti kompiuteriniai modeliai yra greitai ir lengvai modifikuojami, todėl atsiranda galimybė imitaciniu būdu tirti skirtingų konstrukcijų įtaisus išvengiant nemažai laiko trunkančio gamybos proceso.

Šiame poskyryje, taikant momentų metodu grįstą specializuotą programų paketą Sonnet®, sudaromi kompiuteriniai meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modeliai. Sudarytuose modeliuose keičiamas papildomų ekranų įžeminimo taškas, o taip pat modifikuojamos kraštų topologijos.

2.1.1. Meandrinės lėtinimo sistemos su skirtingais papildomų ekranų įžeminimo taškais

Meandrinė lėtinimo sistema pavaizduota 2.1 paveiksle. Ją sudaro meandro formos laidininkas išdėstytas ant h storio dielektrinio pagrindo, kurio santykinė dielektrinė skvarba ϵ_r . Pagrindo apačia yra padegta laidžiuoju sluoksniu atliekančiu išorinio ekrano funkciją. Vienos laidininko juostelės ilgis žymimas $2A$, plotis – w . Tarp tarp gretimų juostelių plotis žymimas s .

2.1 pav. Meandrinė lėtinimo sistema: 1 – meandro formos laidininkas; 2 – pagrindas, kurio santykinė dielektrinė skvarba ϵ_r ; 3 – išorinis ekranas

Fig. 2.1. Meander slow-wave system: 1 – meander-shape conductor; 2 – dielectric substrate of relative permittivity ϵ_r ; 3 – external shield

Meandrine lėtinimo sistema sklindantys plačiajuosčiai signalai yra iškreipiami dėl fazinės vėlinimo trukmės dispersijos, kurios priežastis yra nuo dažnio priklausantis elektromagnetinis ryšys tarp gretimų meandro juostelių. Siekiant mažinti dispersiją, meandrinėse lėtinimo sistemose naudojami papildomi ekranai, įtaisomi tarp meandrinio laidininko juostelių. Kai lėtinimo sistemos gaminamos naudojant standartinę integrinių grandynų technologiją, šie papildomi ekranai gaminami kartu su meandrinio laidininku ir yra siaurų laidžių juostelių formos (Štaras *et al.* 2010).

2.2 pav. Meandrinųjų lėtinimo sistemų topologijos, kai papildomi ekranai įžeminti: a) – viename gale; b) – viduryje; c) – taške tarp ekrano galo ir vidurio; d) – iš abiejų galų; 1 – meandro formos laidininkas; 2 – papildomas ekranas; 3 – trumpiklis

Fig. 2.2. Topology of meander slow-wave system with additional shields grounded at: a) – one edge; b) – center; c) – point between the edge and center; d) – both edges; 1 – meander-shape conductor; 2 – additional shield; 3 – grounded via

2.3. pav. Meandrinių lėtinimo sistemų trimačiai modeliai, kai papildomi ekranai įžeminti: a) – viename gale; b) – viduryje; c) – taške tarp ekrano galo ir jo vidurio; d) – iš abiejų galų; 1 – meandro formos laidininkas; 2 – papildomas ekranas; 3 – trumpiklis; 4 – oras; 5 – dielektrinis pagrindas; 6 – įžemintas išorinis ekranas

Fig. 2.3. 3D models of meander slow-wave system with additional shields grounded at: a) – one edge; b) – center; c) – pint between the edge and a center; d) – both edges; 1 – meander-shape conductor; 2 – additional shield; 3 – grounded via; 4 – air; 5 – dielectric substrate; 6 – grounded external shield

Papildomi ekranai trumpikliais sujungiami su išoriniu ekranu, kuris kaip taisyklė yra įžeminamas. Keičiantis papildomo ekrano įžeminimo taškui, keičiasi ir nagrinėjamos lėtinimo sistemos savybės. Tokiu būdu, siekiant pagerinti meandrinių lėtinimo sistemos dispersines savybes ir padidinti praleidžiamų dažnių juostos plotį, sukuriama ir tiriama keturi meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais kompiuteriniai modeliai, kurių topologijos pavaizduotos 2.2 paveiksle. Šiuo atveju meandro formos laidininko plotis yra žymimas w_1 , papild-

domo ekrano plotis – w_2 , o laidininko jungiančio gretimas meandro juostelės plotis – w_3 . Tarpo tarp laidininko juostelės ir papildomo ekrano plotis pažymėtas s_1 .

Sudarytieji meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modeliai skiriasi trumpiklių, jungiančių papildomą ir išorinį ekranus, išdėstymo padėtimi išilgai papildomo ekrano. Pirmame modelyje (2.2 pav., a) papildomas ekranas yra įžeminamas viename gale, toje vietoje kur nėra meandro juostelių sujungimo. Antrame modelyje (2.2 pav., b), trumpiklis yra išdėstomas papildomo ekrano viduryje. Trečią modelį (2.2 pav., c) sudaro meandrinė lėtinimo sistema su papildomais ekranais, įžemintais taške tarp papildomo ekrano galo ir jo vidurio. Ketvirtas modelis (2.2 pav., d) sudaromas, įžeminus papildomus ekranus iš abiejų galų.

Meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais savybių tyrimui, taikant momentų metodą, Sonnet[®] specializuotu programų paketu sukurti trimačiai kompiuteriniai modeliai pavaizduoti 2.3 paveiksle. Kiekviena sistema yra stačiakampio formos, sudaryta iš 7 lygiagrečių, tarpusavyje sujungtų laidininkų, kurie sudaro meandro formos laidininką ir 6 papildomų ekranų, trumpikliais sujungtų su išoriniu ekranu. Meandro juostelės ir papildomi ekranai patalpinti ant dielektrinės plokštelės su santykinė dielektrine skvarba ϵ_r . Šios plokštelės apatinė dalis padengta metalo sluoksniu, kuris sudaro išorinį ekraną. Virš plokštelės yra oras. Taigi sistemos skerspjuvyje yra du dielektriko sluoksniai. Apatinis dielektrinis sluoksnis turi santykinę dielektrinę skvarbą $\epsilon_r = 7,3$. Tai stiklo keramika, naudojama mikrobangų integrinių grandynų gamyboje (Umayahara, Nishikawa 2003). Viršutinį sluoksnį sudaro oras kurio santykinė dielektrinė skvarba lygi 1. Sistemos įėjimas ir išėjimas yra išdėstyti ties meandro laidininko juostelės viduriu. Meandrinės lėtinimo sistemos matmenys: $2A = 19,6$ mm, $w_1 = 0,5$ mm, $w_2 = 0,25$ mm, $w_3 = 0,2$ mm, $s_1 = 0,2$ mm, $h = 0,5$ mm. Tyrimų metu visi laidininkai laikyti idealiai laidžiais. Taigi tirta sistema be nuostolių.

2.1.2. Meandrinės lėtinimo sistemos su modifikuotomis kraštų topologijomis

Meandrinės lėtinimo sistemos ilgą laiką buvo tiriamos taikant daugialaidžių linių metodą kuriame daroma prielaida, kad sudarant meandro formos laidininką, gretimos juostelės kraštuose yra sujungiamos be galo plonu laidininku (Gurskas *et al.* 2010). Tokia prielaida neleidžia įvertinti kraštuose vykstančius procesus, į kuriuos tikslinga atsižvelgti projektuojant lėtinimo įtaisus. Procesus meandrinės lėtinimo sistemos kraštuose įmanoma įvertinti taikant skaitiniais metodais grįstus modelius.

2.4 pav. Laidininko, jungiančio gretimas meandro juosteles, pločio keitimas: a) – meandro krašto su juosteles jungiančiu laidininku topologija; b) – didžiausias ir c) – mažiausias jungiančio laidininko plotis w_3 ; 1 – meandro juostelė; 2 – papildomas ekranas; 3 – sujungimo su išoriniu ekranu taškas; 4 – meandro juosteles jungiantis laidininkas

Fig. 2.4. Change of a width of a conductor connecting adjacent meander strips: a) – topology of the edge of a meander with a conductor connecting adjacent strips; b) – widest and c) – narrowest width w_3 of a connecting conductor; 3 – grounded via; 4 – conductor connecting adjacent meander strips

2.5 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais tarpų didinimo ties gretimų meandro laidininkų sujungimais tyrimas: a) – topologija; b) – trimačio modelio fragmentas; 1 – meandro formos laidininkas; 2 – papildomas ekranas; 3 – sujungimo su išoriniu ekranu taškas

Fig. 2.5. Investigation of gap increase of meander slow-wave system with additional shields in the area where meander strips form a loop: a) – topology; b) – 3D view; 1 – meander shape conductor; 2 – additional shield; 3 – grounded via

2.6 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais tarpų didinimo ties atvirais meandro laidininkais tyrimas: a) – topologija; b) – trimačio modelio fragmentas; 1 – meandro formos laidininkas; 2 – papildomas ekranas; 3 – sujungimo su išoriniu ekranu taškas

Fig. 2.6. Investigation of gap increase of meander slow-wave system with additional shields in the area where meander strips are open: a) – topology; b) – 3D view; 1 – meander-shape conductor; 2 – additional shield; 3 – grounded via

Norint nustatyti meandro kraštų topologijos įtaką sistemos dispersinėms charakteristikoms, buvo sudarytos trys skirtingos meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais žemintais iš abiejų galų (2.2 pav., d) topologijos. Pirmoji topologija pavaizduota 2.4 paveiksle, a. Šiuo tyrimu siekiama nustatyti kaip keičiasi meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais dispersinės charakteristikos keičiant laidininko, jungiančio gretimas meandro juosteles, plotį w_3 . 2.4 paveiksle taip pat parodyti trimačio modelio fragmentai iš kurių matyti du ištirti meandro juostelių sujungimo variantai: esant plačiam jungiančiam laidininkui (2.4 pav., b) ir esant siauram jungiančiam laidininkui (2.4 pav., c).

Antrojo ir trečiojo meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais tyrimų modelių topologijos yra pavaizduotos 2.5 ir 2.6 paveiksluose, a. Jos skirtos tarpų tarp meandro juostelių ir papildomų ekranų įtakos tyrimui. Iš paveikslų matyti, kad tyrimo metu ΔA ilgio meandro juostelės atkarpoje, esančioje viename ir kitame papildomo ekrano gale, buvo keičiamas tarpo s_1 plotis. Keičiamos dalies plotis buvo žymimas Δs ir parenkamas didesnis už pradinį plotį s_1 . Tokiu būdu buvo didinamas tarpas papildomo ekrano žeminimo taško ir meandrinės lėtinimo sistemos laidininko aplinkoje. Taigi pirmuoju atveju (2.5 pav., a) tarpas buvo didinamas vietose, kur sujungiami gretimi meandro laidininkai, antruoju (2.6 pav., a) – vietose, kur meandro laidininkai atviri. Be to, paveiksluose pavaizduoti trimačio modelio fragmentai (2.5 ir 2.6 pav., b).

2.2. Meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais modelių tyrimo metodika

Šiame poskyryje aprašomos meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais tyrimo metodikos. Pateikiamas modelių, sukurtų taikant specializuotą programų paketą Sonnet[®], dažninių charakteristikų apskaičiavimo algoritmas. Sistemos vėlinimo trukmė nustatoma iš sklaidos parametrų, gautų modelių analizuojant momentų metodu ir duomenis apdorojant MATLAB[®] paketu bei jam skirtu įrankiu SonnetLab Toolbox. Taip pat siūloma meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įėjimo varžos nustatymo metodika, kuri reikalinga sistemos suderinimo su signalu traktu įvertinimui.

2.2.1. Dažninių charakteristikų apskaičiavimo algoritmas

Aukštadažnėms periodinėms sistemoms modeliuoti ir jų savybės analizuoti tinka formalūs keturpolių ir daugiapolių naudojimu grįsti metodai (Štaras *et al.* 2010). Taikant šiuos metodus, sistemą modeliuojantys keturpoliai ir daugiapoliai dažniausiai apibūdinami apibendrintų $\underline{ABCD}$ arba sklaidos $\underline{S}$ parametrų matricomis (Tascone *et al.* 2000).

Lėtinimo sistemos signalų trakto grandinės schema, modeliuojama keturpoliu, pavaizduota 2.7 paveiksle, a. Schemoje $\underline{U}_1$ ir $\underline{I}_1$ žymi įtampos keturpolio įėjime ir į keturpolį įtekančios srovės kompleksinės amplitudės, $\underline{U}_2$ ir $\underline{I}_2$ – įtampos keturpolio išėjime ir iš jo ištekančios srovės kompleksinės amplitudės, $\underline{E}$ – signalų šaltinio kompleksinę elektrovarą, $\underline{Z}_i$ – signalų šaltinio kompleksinę vidinę varžą, $\underline{Z}_a$ – lėtinimo sistemos kompleksinę apkrovos varžą.

$\underline{ABCD}$ parametrai skirti taikyti sutelktųjų parametrų grandinėms, todėl pagal juos negalima įvertinti grandinėje vykstančių banginių procesų. Norint lėtinimo sistemos modelyje įvertinti banginius procesus, reikia keturpoliui taikyti sklaidos parametrus (2.7 pav., b). Modeliuojant lėtinimo sistemą $\underline{S}$ parametrais, įėjimo ir išėjimo įtampos bei srovės išskaidomos į sklaidos kompleksinius komponentus $\underline{a}_i$, $\underline{b}_i$, kurie proporcingi krįntančių į keturpolio polius ir atsispindėjusių nuo jų bangų įtampoms ir srovėms:

$$\underline{U}_i = \underline{U}_{Ki} + \underline{U}_{Ai} = \sqrt{\underline{Z}_{0i}} (\underline{a}_i + \underline{b}_i), \quad (2.1)$$

$$\underline{I}_i = \frac{1}{\underline{Z}_{0i}} (\underline{U}_{Ki} - \underline{U}_{Ai}) = \frac{1}{\sqrt{\underline{Z}_{0i}}} (\underline{a}_i - \underline{b}_i), \quad (2.2)$$

čia $\underline{U}_i$, $\underline{I}_i$ – keturpolio i -ojo poliaus bangos įtampos ir srovės kompleksinės amplitudės, $\underline{U}_{Ki}$, $\underline{U}_{Ai}$ – į keturpolio i -ąjį polių krįntančios ir nuo jo atsispindėjusios

bangų įtampos kompleksinės amplitudės, $\underline{a}_i$, $\underline{b}_i$ – į keturpolio i -ąjį polių krintančio ir nuo jo atspindėjusio sklaidos komponento kompleksinės amplitudės, $\underline{Z}_{0i}$ – keturpolio i -ojo poliaus banginė varža, $i = 1, 2$ – keturpolio įėjimo ir išėjimo polių porų eilės numeris.

2.7 pav. Lėtinimo sistemos: a) signalų trakto schema; b) modeliavimui naudojamas keturpolis, apibūdinamas sklaidos parametrais $\underline{S}^{LS}$ (Štaras *et al.* 2010)

Fig. 2.7. Slow-wave system: a) the model of the signal path; b) two-port circuit with $\underline{S}$ parameters used for modeling (Štaras *et al.* 2010)

Iš (2.1) ir (2.2) lygčių išplaukia, kad sklaidos komponentai nusako bangų įtampas arba sroves. Jie apskaičiuojami taip:

$$\underline{a}_i = \frac{\underline{U}_{Ki}}{\sqrt{\underline{Z}_{0i}}} = \underline{I}_{Ki} \sqrt{\underline{Z}_{0i}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\underline{U}_i}{\sqrt{\underline{Z}_{0i}}} + \underline{I}_i \sqrt{\underline{Z}_{0i}} \right), \quad (2.3)$$

$$\underline{b}_i = \frac{\underline{U}_{Ai}}{\sqrt{\underline{Z}_{0i}}} = \underline{I}_{Ai} \sqrt{\underline{Z}_{0i}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\underline{U}_i}{\sqrt{\underline{Z}_{0i}}} - \underline{I}_i \sqrt{\underline{Z}_{0i}} \right). \quad (2.4)$$

Atsispindėjusius $\underline{b}_1$, $\underline{b}_2$ ir krintančius $\underline{a}_1$, $\underline{a}_2$ sklaidos komponentus keturpolio įėjime ir išėjime tarpusavyje sieja sklaidos parametrai $\underline{S}^{LS}$:

$$\underline{b}_1 = \underline{S}_{11}^{LS} \underline{a}_1 + \underline{S}_{12}^{LS} \underline{a}_2, \quad (2.5)$$

$$\underline{b}_2 = \underline{S}_{21}^{LS} \underline{a}_1 + \underline{S}_{22}^{LS} \underline{a}_2, \quad (2.6)$$

čia $\underline{S}_{11}^{LS}$, $\underline{S}_{12}^{LS}$, $\underline{S}_{21}^{LS}$, $\underline{S}_{22}^{LS}$ – keturpolio sklaidos arba $\underline{S}^{LS}$ parametrai. Taigi apibūdinus lėtinimo sistemą sklaidos parametrais, visuomet galima įvertinti šioje sistemoje vykstančius banginius procesus ir apskaičiuoti jos svarbiausias dažnines charakteristikas.

2.8 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais fazinės vėlinimo trukmės apskaičiavimo algoritmas

Fig. 2.8. The calculation algorithm of the phase delay time of meander slow-wave system with additional shields

Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais fazinės vėlinimo trukmės priklausomybę nuo dažnio galime rasti taikant 2.8 paveiksle pateiktą skaičiavimo algoritmą. Visų pirmą, taikant programų paketo Sonnet[®] grafinę aplinką, nubraižomas analizuojamos sistemos modelio eskizas ir nustatomi pagrindiniai parametrai: analizuojamos srities dydis, tinkelio tankis, dažnių ruožas, kuriame bus apskaičiuoti sistemos sklaidos parametrai. Taip pat apibrėžiamos laidininko ir dielektrinio pagrindo savybės (1 blokas). Toliau, taikant momentų metodą, atliekama lėtinimo sistemos analizė (2 blokas), kurios rezultatas yra apskaičiuotieji sklaidos parametrai. Gauti rezultatai išsaugomi tekstiniaame faile, Touchstone[®] formatu. Šio formato, sukurto kompanijos Agilent Technologies, failai naudojami įvairiems daugiapolių parametrams saugoti. Tolimesni skaičiavimai vykdomi MATLAB[®] terpėje, įrankiu SonnetLab

Toolbox (3 blokas). Jame esančios funkcijos leidžia iš Touchstone[®] formatu išsaugoto failo išskirti reikiama sklaidos parametą. Mūsų atveju, sistemos fazinė vėlinimo trukmė buvo nustatoma iš $\underline{S}_{21}^{LS}$ parametro, kuris turi keturpolio perdavimo funkcijos fizikinę prasmę, taikant išraišką:

$$t_v = \frac{\theta_{\underline{S}_{21}^{LS}}}{2\pi \cdot f}, \quad (2.7)$$

čia $\theta_{\underline{S}_{21}^{LS}}$ – fazės skirtumo kampas, apskaičiuojamas iš sklaidos parametro $\underline{S}_{21}^{LS}(f) = e^{-j\theta_{\underline{S}_{21}^{LS}}}$, radianais; f – dažnis, kuriame apskaičiuotas $\underline{S}_{21}^{LS}(f)$ parametras, hercais.

2.2.2. Įėjimo varžos nustatymo metodika

Dažnai lėtinimo sistemų suderinimo su signalų traktais nustatymui naudojama ne lėtinimo sistemos banginė varža, o jos įėjimo varža (Štaras *et al.* 2010). Modeliuojamų lėtinimo sistemų įėjimo varža ties n -tuoju laidininku apskaičiuojama, kaip tai įprasta keturpoliuose, pagal įtampos $\underline{U}_n(x)$ ir srovės $\underline{I}_n(x)$ kompleksinių amplitudžių šiame laidininke santykį:

$$\underline{Z}_{\text{IN}n} = \frac{\underline{U}_n(x)}{\underline{I}_n(x)}. \quad (2.8)$$

Literatūroje nėra duomenų apie meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įėjimo varžos ir jos sklaidos parametų dažnines charakteristikas, todėl šiame skyrelyje pateikiama tokių lėtinimo sistemų įėjimo varžos nustatymo, taikant momentų metodu grįstą specializuotą programų paketą Sonnet[®], metodika.

Įėjimo varžos dažninių charakteristikų tyrimui sukurtas meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais modelis, pavaizduotas 2.9 paveiksle. Jis nedaug skiriasi nuo modelių, pateiktų 2.3 paveiksle. Siekiant išmatuoti įėjimo varžą sistemos kraštuose, šoniniai meandro laidininkai buvo pailginti dydžiu A . Be to, prie pailgintų meandro laidininkų atsirado papildomi ekranai. Tokiu būdu, naują sistemą sudaro ne 6, o 8 papildomi ekranai.

Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įėjimo varža buvo nustatoma pagal darbe (Skudutis, Daškevičius 2002) aprašomą spiralinių lėtinimo sistemų dažninių charakteristikų skaičiavimo metodiką. Įėjimo varža žemuosiuose dažniuose buvo apskaičiuojama dviejose vietose: sistemos kraštuose, kurie 2.9 paveiksle žymimi skaičiais 1 ir 2 ir viduryje, kuris pažymėtas skaičiumi 3.

2.10 paveiksle pavaizduota įėjimo varžos žemuosiuose dažniuose nustatymo sistemos kraštuose principinė schema. Iš schemos analizės išplaukia, kad grandinėje nebus atspindžių, jeigu apkrovos ir generatoriaus varžos Z_g ir Z_a yra suderintos su sistemos įėjimo varža žemuosiuose dažniuose. Tokiu būdu, pasirinkus žemąjį dažnį f , sistemos įėjimo varžą galima rasti keičiant apkrovos ir generatoriaus varžas tol, kol gaunama mažiausia sklaidos parametro S_{11}^{LS} vertė.

2.9 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais modelis su įėjimo varžos nustatymo taškais

Fig. 2.9. Ports at which input impedance of a meander slow-wave system with additional shield was measured

2.10 pav. Įėjimo varžos žemuosiuose dažniuose nustatymo meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais kraštuose principinė schema

Fig. 2.10. A signal path developed for determination of the input impedance on the edge of a meander slow-wave system with additional shields

Kadangi $\underline{S}_{11}^{LS}$ parametras yra lėtinimo sistemos atspindžio koeficientas, tai esant apkrovos, generatoriaus ir lėtinimo sistemos varžų suderinamumui gaunami mažiausi atspindžiai. Tokiu būdu nustatoma įėjimo varža lėtinimo sistemos kraštuose žemuosiuose dažniuose $\underline{Z}_{IN}(f)$.

2.11 pav. Įėjimo varžos žemuosiuose dažniuose nustatymo meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais viduryje principinė schema

Fig. 2.11. A signal path developed for determination of the input impedance in the center of a meander slow-wave system with additional shields

Nustatant įėjimo varžą meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais viduryje, naudojama grandinė, kurios principinė schema pavaizduota 2.11 paveiksle. Šiuo atveju signalas yra siunčiamas į sistemos vidurį, o sistemos galai yra apkraunami varžomis, lygiomis sistemos įėjimo varžai žemųjų dažnių srityje. Kadangi signalas siunčiamas lygiagrečiai į dvi lėtinimo sistemos puses, signalo šaltinio varža suderinimo etape turi būti du kartus mažesnė už sistemos įėjimo varžą žemuosiuose dažniuose. Taigi ji turi būti lygi pusei apkrovos varžos $\underline{Z}'_g = \underline{Z}_a/2$.

Sudarant modelį su Sonnet[®] programų paketu, lėtinimo sistemos įėjimo ir išėjimo prievaduose prijungiami signalų šaltiniai ir apkrovos varžos, kurių apibūdinta principinė schema parodyta 2.12 paveiksle. Ją apibūdina keturi parametrai: aktyvioji varža R , reaktyvioji varža X , induktyvumas L ir talpa C . Šių parametrų dydžius galima keisti. Tam Sonnet[®] programų pakete naudojama generatoriaus ir apkrovos varžų nustatymo 2.1 lentelė. Tyrimo metu buvo keičiama

tik aktyvioji varža. Taigi $\underline{Z}_g = R_g$, $\underline{Z}_a = R_a$, o $R_g = R_a = Z_{\text{ZD}}$. Gautoji Z_{ZD} vertė yra meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varža žemuosiuose dažniuose.

2.12 pav. Lėtinimo sistemos įėjimo ir išėjimo prievaduose prijungtų signalų šaltinių ir apkrovos varžų apibendrinta principinė schema

Fig. 2.12. Equivalent circuit of a signal generator and load resistances connected to a port of the slow-wave system

2.1 lentelė. Sonnet[®] programų paketo generatoriaus ir apkrovos varžų nustatymo lentelė
Table 2.1. Settings for source and load resistances in Sonnet[®]

Prievado numeris	Aktyvioji varža, Ω	Reaktyvioji varža, Ω	Induktyvumas, nH	Talpa, pF
1	50	0	0	0
2	50	0	0	0
3	25	0	0	0

Įėjimo varža žemuosiuose dažniuose buvo nustatoma iš $\underline{S}_{11}^{\text{LS}}$ parametro. Atlikus sistemos analizę momentų metodu ir nustačius $\underline{S}_{11}^{\text{LS}}$ parametro vertes, įėjimo varža gali būti apskaičiuota pagal išraišką:

$$\underline{Z}_{\text{IN}} = Z_a \left(\frac{1 + \underline{S}_{11}^{\text{LS}}}{1 - \underline{S}_{11}^{\text{LS}}} \right), \quad (2.9)$$

čia Z_a yra suderintoji apkrovos varžos vertė. Bendruoju atveju įėjimo varža $\underline{Z}_{\text{IN}}$ yra kompleksinė ir lygi:

$$\underline{Z}_{\text{IN}} = R_{\text{IN}} + jX_{\text{IN}}. \quad (2.10)$$

Taigi iš kompleksinės įėjimo varžos vertės galima nustatyti aktyviąją

$$R_{\text{IN}} = \text{Re}[\underline{Z}_{\text{IN}}], \quad (2.11)$$

ir reaktyviąją

$$X_{\text{IN}} = \text{Im}[\underline{Z}_{\text{IN}}], \quad (2.12)$$

įėjimo varžos dalis.

2.3. Elektrinio lauko meandrinėse lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo modeliavimo metodika

Taikant momentų metodą sukurtos metodikos krūvio pasiskirstymui meandrinų lėtinimo sistemų dvimačiuose modeliuose (skersiniame jų pjūvyje) rasti. Šiame poskyryje siūloma metodika, kuri leidžia apskaičiuoti krūvio pasiskirstymą meandrinėse struktūrose trimatėje erdvėje.

2.3.1. Momentų metodo taikymas

Didžioji dalis elektromagnetinių uždavinių gali būti išreikšta nehomogenine lygtimi (Sadiku 2001)

$$L\Phi = g, \quad (2.13)$$

čia L yra operatorius, kuris gali būti diferencialinis, integralinis arba integralinis-diferencialinis, g – žinoma sužadinimo funkcija, kurios reikšmė šiame darbe lygi į laidininką siunčiamam potencialui, o Φ – nežinoma funkcija, kurią reikia nustatyti. Šiame skyrelyje darysime prielaidą, jog L yra integralinis arba integralinis-diferencialinis operatorius.

Sprendžiant elektromagnetinius uždavinius, sprendiniai dažnai yra ieškomi integralinių lygčių forma. (2.13) lygtį vadinsime integraline, jei joje esanti nežinoma funkcija Φ bus po integralo ženklu. Paprasčiausiais tokių lygčių pavyzdžiais galima laikyti Furjė ir Laplaso transformacijas. Integralinių lygčių sprendimui taikomas momentų metodas, kurį elektromagnetizmo uždaviniams spręsti pritaikė Haringtonas (Harrington 1967; Harrington 1968).

Siekdami paprasčiau atskleisti skaičiavimų momentų metodu algoritmą, pagnagrėkime vienalytę perdavimo liniją laisvoje erdvėje. Jos skerspjūvis, pavaizduotas 2.13 paveiksle, gali būti analizuojamas kaip dvimatis uždavinys. Sakyki-

me, kad laidininkų plotis w , atstumas tarp jų $2h$. Viršutinio laidininko potencialas yra 1 voltas, apatinio – minus 1 voltas.

2.13 pav. Vienalytės perdavimo linijos skerspjūvis
Fig. 2.13. Cross-section of a homogeneous transmission line

Elektrinio lauko, atsiradusio dėl vienetinio krūvio q_i , esančio $P_i(x_i, y_i)$ taške, potencialas φ_j , esantis kitame $P_j(x_j, y_j)$ taške, gali būti nustatytas iš išraiškos:

$$\varphi(x_j, y_j) = - \int_L \vec{E} d\vec{l} . \quad (2.14)$$

Dvimatėje koordinatinių sistemoje laisvoje erdvėje

$$\vec{E} = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0 r} \vec{r}^0 . \quad (2.15)$$

Nagrinėjamu atveju, integravimo kelio ir jėgos linijos kryptys sutampa, todėl $\vec{r}^0 \cdot d\vec{l} = dr$ ir galime užrašyti

$$\varphi(x_j, y_j) = - \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \int_L \frac{dr}{r} = - \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \ln r , \quad (2.16)$$

čia r – atstumas nuo taškinio krūvio iki stebėjimo taško. Stačiakampėje koordinatinių sistemoje

$$r = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} , \quad (2.17)$$

todėl

$$\varphi(x_j, y_j) = -\frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \ln \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (2.18)$$

Pagal priimtą sąlygą krūvis q_i yra vienetinis ir randasi ties plona laidžia styga (kitų laidininkų nėra), todėl (2.18) išraišką galima užrašyti kitaip:

$$G(P_j, P_i) = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (2.19)$$

Ši funkcija yra žinoma kaip tam tikros srities Gryno funkcija. Jeigu nagrinėjama terpė yra nevienalytė ir susideda iš įvairių dielektrikų, turėsime įvairias Gryno funkcijas, priklausančias nuo krūvio ir stebėjimo taško tarpusavio padėties. Potencialų, atsirandančių dėl atskirų krūvių, kurių krūvio tankis $\rho(P_i)$ laidininke kinta, superpozicija išreiškiama integraline lygtimi (Fooks, Zakarevičius 1990)

$$\varphi(x_j, y_j) = \int G(P_j, P_i) \rho(P_i) dP_i. \quad (2.20)$$

Lygtys, sudarytos laidininkų potencialams, yra naudingos, nes jos yra taikomos skaičiuojant elektrines talpas. Tokiu būdu, jeigu laidininkas padalintas į dalines sritis, (2.20) lygtį galima užrašyti kiekvienos srities geometriniam centrui ir gauti matricinę lygtį:

$$[\varphi] = [A] \times [q], \quad (2.21)$$

čia $[\varphi]$ – potencialų taškuose (x_i, y_i) vektorius-stulpelis, $[q]$ – krūvių taškuose (x_j, y_j) matrica-stulpelis, $[A]$ – koeficientų matrica. Invertuojant (2.21) lygtį, gauname

$$[q] = [A]^{-1} \times [\varphi], \quad (2.22)$$

ir galime nustatyti bendrą krūvį arba krūvio pasiskirstymą nagrinėjamame laidininke, o sumuojant visų dalinių sričių krūvius, ir talpą ilgio vienetui.

2.3.2. Siūloma metodika

Nagrinėjame meandrinės lėtinimo sistemos stačiakampę atkarpą, kuri pavaizduota 2.14 paveiksle. Atkarpa yra padalinta į 6 dalines sritis, vienos matmenys yra $a \times a$, todėl bendras atkarpos ilgis $L = 2a$, o plotis $W = 3a$. Nulinio potencialo plokštuma sukurama, išdėsčius to paties dydžio ir priešingo ženklo krūvį atstumu $2h$ nuo tikrojo krūvio. Taip pat reikėtų pažymėti, kad $h = a$.

Matematinis meandrinės lėtinimo sistemos stačiakampės atkarpos modelis bus sudarytas iš tiesinių lygčių sistemos, kuri aprašo potencialų priklausomybę

nuo krūvio tankių ρ_{ij} . Pritaikant momentų metodą ir dalinių atvaizdų principą (Urbanavičius, Martavičius 2006) bei atliekant tris žingsnius, galime rasti kiekvieno krūvio įtaką potencialui tam tikrame taške:

1. Rasti savaiminį potencialą taške P_{ii} , kuris atsiranda dėl krūvio q_{ii} ir jo pirmo dalinio atvaizdo esančių tame pačiame taške. Įrodoma, kad tolygiai įkrautos $a \times a$ kvadratinės plokštelės centre potencialas bus lygus

2.14 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos stačiakampė atkarpa

Fig. 2.14. Rectangular section of meander slow-wave system

$$\varphi_{0,0} = \frac{a\rho_{s0}}{\pi\epsilon} \ln(1 + \sqrt{2}), \quad (2.23)$$

todėl šiuo atveju

$$\varphi_a(P_{ii} : P_{ii}) = \frac{a(1+K)q_{ii}}{\pi\epsilon_0} \ln(1 + \sqrt{2}), \quad (2.24)$$

čia K – atspindžio koeficientas, kuris priklauso nuo terpių dielektrinės skvarbos:

$$K = -\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}. \quad (2.25)$$

2. Rasti potencialą, kuris atsiranda dėl kitų krūvio q_{ii} dalinių atvaizdų:

$$\varphi_b(P_{ii} : P_{ii}) = -\frac{a^2 K(1-K^2)q_{ii}}{4\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^{\infty} K^{2(n-1)} \frac{1}{2nh}, \quad (2.26)$$

čia n – dalinių atvaizdų kiekis.

3. Rasti potencialą, kuris atsiranda dėl veidrodinio krūvio $-q_{ii}$ ir visų jo dalinių atvaizdų, kurie yra taške $-P_{ii}$:

$$\varphi(P_{ii} : -P_{ii}) = -\frac{a^2(1-K^2)q_{ii}}{4\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^{\infty} K^{2(n-1)} \frac{1}{(2n-1)h}. \quad (2.27)$$

2.15 pav. Elektrinio lauko meandrinės lėtinimo sistemos trimačio pasiskirstymo modeliavimo algoritmas

Fig. 2.15. Algorithm for modeling of three-dimensional electric field distribution of meander slow-wave system

Potencialo taške P_{ij} , kuris atsiranda dėl krūvio q_{mn} , esančio taške P_{mn} , nustatymui pakeičiamos 1–3 žingsnio išraiškos. Tuomet (2.24) išraiška atrodo taip:

$$\varphi_a(P_{ij} : P_{mn}) = \frac{a^2(1+K)q_{mn}}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{l}, \quad (2.28)$$

čia l yra atstumas tarp taškų P_{ij} ir P_{mn} , apskaičiuojamas pagal formulę $l = \sqrt{(i-m)^2 + (j-n)^2}$.

Antrojo žingsnio (2.26) išraiška pasikeičia į:

$$\varphi_b(P_{ij} : P_{mn}) = -\frac{a^2 K(1-K^2)q_{mn}}{4\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^{\infty} K^{2(n-1)} \frac{1}{\sqrt{l^2 + (2nh)^2}}. \quad (2.29)$$

Trečiame žingsnyje esanti išraiška pasikeičia į:

$$\varphi(P_{ij} : -P_{mn}) = -\frac{a^2(1-K^2)q_{mn}}{4\pi\epsilon_0} \sum_{n=1}^{\infty} K^{2(n-1)} \frac{1}{\sqrt{l^2 + [(2n-1)h]^2}}. \quad (2.30)$$

Atlikę skaičiavimus aukščiau parodytu būdu, pagal (2.21) galėsime sudaryti matricinę lygtį, o nežinomus krūvius rasti taikant (2.22) išraišką.

Elektrinio lauko meandrinės lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo modelio algoritmas yra pateiktas 2.15 paveiksle. Pagal šį algoritmą, pirmuoju žingsniu įvedami pradiniai konstrukciniai parametrai: meandro laidininko ilgis $2A$ ir plotis w_1 , tarpo tarp laidininkų plotis s , pagrindo dielektrinė skvarba ϵ_r bei storis h . Antrame žingsnyje sistema yra dalinama į stačiakampes dalis bei sudaroma atstumų matrica, kurioje saugoma informacija apie stačiakampių dalių tarpusavio išdėstymą. Trečiame žingsnyje, pagal (2.24)–(2.30) sudaroma $[\mathbf{A}]$ matrica. Matricos $[\mathbf{A}]$ elementas A_{ij} apibūdina i -osios dalinės srities potencialą, kuris atsiranda dėl j -oje dalinėje srityje esančio krūvio. Ketvirtame žingsnyje nežinomi krūviai randami pagal (2.22) išraišką sprendžiant tiesinių lygčių sistemą. Penktame žingsnyje krūvių pasiskirstymas atvaizduojamas trimatėje erdvėje.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

Remiantis sudarytais meandrinės lėtinimo sistemų kompiuteriniais modeliais ir pasiūlytomis jų tyrimo metodikomis galima daryti šias išvadas:

1. Meandrinėse lėtinimo sistemose su papildomais ekranais vykstančius procesus galima ištirti naudojantis sukurtais jų modeliais, kurie skiriasi trumpiklių, jungiančių papildomą ir išorinį ekranus, išdėstymo padėtimi išilgai papildomo ekrano. Tyrimams geriausiai tinka meandrinių lėtinimo sistemų modeliai, kurių papildomi ekranai įžeminami: viename gale, iš abiejų galų, viduryje ir taške tarp papildomo ekrano galo ir vidurio.
2. Projektuojant meandrines lėtinimo sistemas su papildomais ekranais tikslinga atsižvelgti į kraštuose, kurių topologija gali turėti didelę įtaką sistemos savybėms, vykstančius procesus. Todėl reikia naudoti sukurtus modelius, atspindinčius pokyčius meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais gretimų juostelių sujungimo vietoje ir tarpuose ties meandro kilpomis ir atvirąja jo dalimi.
3. Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais dažnines savybes galima ištirti jų modelius analizuojant momentų metodu. Fazinės vėlinimo trukmės dažninės priklausomybės nustatymui reikia naudoti sklaidos parametą $\underline{S}_{21}^{LS}$, turintį keturpolio perdavimo funkcijos fizinę prasmę.
4. Norint nustatyti meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžą žemuosiuose dažniuose, reikia keisti apkrovos ir generatoriaus varžas tol, kol gaunama mažiausia sklaidos parametro $\underline{S}_{11}^{LS}$ vertė. Nustatant įėjimo varžą sistemos kraštuose apkrovos ir generatoriaus varžos turi būti lygios sistemos įėjimo varžai žemuosiuose dažniuose. Tuo tarpu nustatant įėjimo varžą lėtinimo sistemos viduryje, generatoriaus varža suderinimo etape turi būti du kartus mažesnė už sistemos įėjimo varžą žemuosiuose dažniuose ir lygi pusei apkrovos varžos.
5. Siekiant pavaizduoti krūvio pasiskirstymą meandrinės lėtinimo sistemos gretimų juostelių sujungimo vietoje ir išryškinti elektromagnetinį ryšį tarp gretimų meandro juostelių, reikia kurti metodikas, leidžiančias apskaičiuoti krūvio pasiskirstymą trimatėje erdvėje.

Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais savybės

Šiame skyriuje pateikiami meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais tyrimo rezultatai, gauti remiantis antrame skyriuje pasiūlytu dažninių charakteristikų apskaičiavimo algoritmu ir įėjimo varžos nustatymo metodika. Nagrinėjama kaip keičiasi sistemos vėlinimo trukmė esant skirtingiems papildomų ekranų įžeminimo taškams ir įvairioms kraštų topologijoms. Taip pat analizuojamos įėjimo varžos ir $\underline{S}_{11}^{LS}$ parametro priklausomybės kintant dažniui. Be to, pateikiami elektrinio lauko meandrinėse lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo tyrimo rezultatai.

Skyriaus tematika paskelbti keturi autoriaus straipsniai (Metlevskis, Urbanavičius 2011; Metlevskis, Martavičius 2012; Metlevskis, Martavičius 2012; Metlevskis, Martavičius 2014).

3.1. Papildomų ekranų įžeminimo taško įtakos sistemoms dažninėms charakteristikoms tyrimo rezultatai

Vieni iš pagrindinių meandrinę lėtinimo sistemą apibūdinančių parametrų yra jos fazinio vėlinimo trukmė t_v ir praleidžiamųjų dažnių juostos plotis ΔF . Bendruoju atveju fazinio vėlinimo trukmė nustatoma arba apskaičiuojama žemųjų dažnių srityje. Meandrinės lėtinimo sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos plotį nustato žemesnysis iš dviejų dažnių: dažnio $f_{\max DACH}$, kuriam esant sistemos dažninė amplitudės charakteristika kerta -3 dB lygį, arba dažnio $f_{\max DFCh}$, kuriam esant fazės dažninė charakteristika nukrypsta $0,35$ radiano nuo tiesinės charakteristikos. Praktika rodo, kad, kai meandrinės linijos fazinė vėlinimo trukmė neviršija kelių dešimčių nanosekundžių, nuostoliai šioje linijoje nedideli ir galima sakyti, kad lėtinimo sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos plotį lemia jos DFCh eiga. Tuomet linijos fazinės vėlinimo trukmės dažninė priklausomybė $t_v(\omega)$ turi atitikti sąlygą (Štaras *et al.* 2010):

$$\Delta t_v \leq \frac{0,35}{\omega}, \quad (3.1)$$

čia $\Delta t_v = t_v(\omega) - t_{v \text{ nom}}$ – vėlinimo trukmės pokytis praleidžiamųjų dažnių juostos pločio ribose; $t_{v \text{ nom}}$ – nominali vėlinimo trukmė, $\omega = 2\pi f$ – kampinis dažnis.

Papildomų ekranų įžeminimo taško įtakai meandrinės lėtinimo sistemos dažninėms charakteristikoms nustatyti, buvo ištirta sistema su tokiais konstrukciniais parametrais: meandro laidininko ilgis $2A = 19,6$ mm, jo plotis $w_1 = 0,5$ mm, papildomo ekrano plotis $w_2 = 0,25$ mm, laidininko, jungiančio gretimą meandro juosteles plotis $w_3 = 0,2$ mm, tarpo tarp meandro laidininko ir papildomo ekrano plotis $s_1 = 0,2$ mm, pagrindo storis $h = 0,5$ mm, jo santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r = 7,3$. Parinkti konstrukciniai parametrai, esant galimybei, leistų lengvai pagaminti ir ištirti sistemą eksperimento metu. Tokių matmenų sistemą tikslinga analizuoti dažnių ruože iki 3 GHz. Norint nagrinėti sistemą platesniame dažnių ruože, proporcingai turėtų būti mažinami ir konstrukciniai sistemos parametrai.

Tyrimų metu visi laidininkai laikyti idealiai laidžiais. Taigi tirta sistema be nuostolių, todėl jos praleidžiamųjų dažnių juostos plotis ΔF buvo nustatomas iš DFCh kaip parodyta 3.1 paveiksle. Čia pateikiamos meandrinės lėtinimo sistemos be papildomų ekranų idealioji ir realioji DFCh. Iš grafiko matyti, kad $0,35$ rad skirtumas tarp idealios ir apskaičiuotos DFCh susidaro ties $1,16$ GHz, taigi galima teigti, kad nagrinėjamos meandrinės lėtinimo sistemos be papildomų ekranų praleidžiamųjų dažnių juostos plotis ΔF taip pat lygus $1,16$ GHz.

3.1 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos be papildomų ekranų praleidžiamųjų dažnių juostos pločio nustatymas

Fig. 3.1. Bandwidth calculation of meander slow-wave system with additional shields

3.2 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, kai papildomi ekranai yra įžeminti viename gale

Fig. 3.2. Phase delay time dependence on the frequency of meander slow-wave system with additional shields grounded at one edge.

Meandrinės lėtinimo sistemos fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, kai papildomi ekranai yra įžeminti viename gale, vietoje kur nėra meandro juostelių sujungimų (2.3 pav., a), pavaizduota 3.2 paveiksle. Palyginiui grafike taip pat pavaizduota kreivė, vaizduojanti tokių pat matmenų meandrinės lėtinimo sistemos be papildomų ekranų fazinę vėlinimo trukmę kintant dažniui.

Iš 3.2 paveikslo matyti, kad įterpus papildomus ekranus, sistemos fazinė vėlinimo trukmė žemuosiuose dažniuose padidėja, o jos dispersija sumažėja. Iš DFCh nustatyta, kad įžeminus ekranus viename gale, sistemos pralaidumo juosta tampa 1,17 kartų platesnė lyginant su analogiška meandrine lėtinimo sistema be papildomų ekranų ir siekia 1,36 GHz. Taigi praleidžiamųjų dažnių juostos pločio ribose fazinės vėlinimo trukmės dispersija sumažėja 1,74 karto. Be to reikėtų pastebėti, kad dėl papildomų ekranų įterpimo 1,4–1,8 GHz dažnių srityje atsiranda rezonansiniai reiškiniai ir lėtinimo sistema įgyja užtvarinio filtro savybes. Už rezonansinių reiškinių ribos (3.1) sąlyga tenkinama dažnių ruože iki 2,2 GHz, todėl tokią sistemą galima naudoti ir aukštesniuose dažniuose.

3.3 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, kai papildomi ekranai yra įžeminti taške tarp jų galų ir vidurio

Fig. 3.3. Phase delay time dependence on the frequency of meander slow-wave system with additional shields grounded at a point between the edge and a center

Fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, kai meandrinės lėtinimo sistemos papildomi ekranai įžeminami taške tarp jų galų ir vidurio (2.3 pav., c), pateikiama 3.3 paveiksle. Iš paveikslo matyti, kad perkėlus įžeminimo tašką 5 mm link papildomo ekrano vidurio, sistemos fazinė vėlinimo trukmė žemuosiuose dažniuose padidėja, o jos dispersija sumažėja. Tokios sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos plotis $\Delta F = 1,3$ GHz. Taigi lyginant su meandrine lėtinimo sistema be papildomų ekranų, pralaidumo juostos plotis padidėja 1,12 karto, o sistemos fazinės vėlinimo trukmės dispersija jo ribose sumažėja 1,55 karto. Be to, įžeminus papildomus ekranus tarp jų galų ir vidurio, padidėja lėtinimo sistemos rezonansinis dažnis, o rezonansiniai reiškiniai pasislenka į aukštesnius dažnius ir pastebimi 1,85–2,45 GHz dažnių ruože.

Dažnių srityje nuo 2,5 GHz fazinės vėlinimo trukmės dažninės priklausomybės nuokrypis nuo tiesinės charakteristikos yra didesnis nei 0,35 radiano ir ji netenkina (3.1) sąlygos. Dėl to naudoti tokią sistemą aukštesniuose dažniuose nerekomenduojama.

Taip pat reikėtų atkreipti dėmesį į tai, kad pralaidumo juostos pločio ribose sistemos su papildomais ekranais įžemintais tarp jų galų ir vidurio fazinės vėlinimo trukmės charakteristika yra statesnė nei sistemos su papildomais ekranais įžemintais viename gale (3.2 pav.). Taigi perkėlus įžeminimo tašką 5 mm link papildomo ekrano vidurio, sistemos fazinės vėlinimo trukmės dispersija padidėja apie 1,3 karto.

Meandrinės lėtinimo sistemos fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, kai papildomi ekranai yra įžeminti viduryje (2.3 pav., b), pavaizduota 3.4 paveiksle. Iš paveikslo matyti, kad įžeminus papildomus ekranus viduryje, sistemos fazinė vėlinimo trukmė žemuosiuose dažniuose padidėja. Lyginant su meandrine lėtinimo sistema be papildomų ekranų, pralaidumo juostos plotis ΔF sumažėja iki 1,09 GHz arba 1,06 karto, o fazinės vėlinimo trukmės dispersija šiame dažnių ruože padidėja apie 1,1 karto. Be to, papildomų ekranų įžeminimas viduryje rezonansinius reiškinius paslenka dar labiau į aukštesnius dažnius ir jie prasideda nuo 2,8 GHz. Apskritai galima teigti, kad pralaidumo juostos pločio ribose abiejų sistemų fazinės vėlinimo trukmės kitimo pobūdis išlieka panašus, tačiau papildomų ekranų įžeminimas viduryje jos vertę padidina nuo 0,86 iki 0,91 ns arba apie 6 %.

3.4 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, kai papildomi ekranai yra įžeminti centre
Fig. 3.4. Phase delay time dependence on the frequency of meander slow-wave system with additional shields grounded at the center

Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įžemintais viduryje dispersinės savybės yra prastesnės ir lyginant su kitomis sistemomis. Pralaidumų dažnių juostos pločio ribose fazinės vėlinimo trukmės dispersija padidėja apie 2,5 karto lyginant su sistema, kurios papildomi ekranai įžeminti viename gale ir 1,6 karto lyginant su sistema, kurios papildomi ekranai įžeminti tarp jų galų ir vidurio.

3.5 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, kai papildomi ekranai yra įžeminti iš abiejų galų

Fig. 3.5. Phase delay time dependence on the frequency of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges

Fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, kai meandrinės lėtinimo sistemos papildomi ekranai įžeminami iš abiejų galų (2.3 pav, d), pateikiama 3.5 paveiksle. Iš paveikslo matyti, kad dėl papildomų ekranų įterpimo, sistemos fazinio vėlinimo trukmė žemuosiuose dažniuose padidėja, o atsiradę rezonansiniai reiškiniai prasideda nuo 2,8 GHz. Iš DFCh nustatyta, kad nagrinėjamos sistemos pralaidumo juosta $\Delta F = 1,97$ GHz. Fazinės vėlinimo trukmės dispersija šiame dažnių ruože yra $\Delta t_v = 0,035$ ns. Meandrinėje lėtinimo sistemoje be papildomų ekranų fazinės vėlinimo trukmės dispersija tame pačiame dažnių ruože didesnė ir yra 0,135 ns. Taigi įterpus į sistemą papildomus ekranus, įžemintus iš abiejų galų, lėtinimo sistemos fazinės vėlinimo trukmės dispersija dažnių ruože iki 1,97 GHz sumažėja apie 3,89 karto.

Rezultatų palyginimui, visų ištirtų modelių fazinės vėlinimo trukmės priklausomybės nuo dažnio kreivės pavaizduotos viename grafike, 3.6 paveiksle. Be to, fazinės vėlinimo trukmės žemuosiuose dažniuose ir pralaidumo juostos pločio vertės esant skirtingiems papildomų ekranų įžeminimo taškams pateiktos 3.1 lentelėje.

3.6 pav. Meandrinių lėtinimo sistemų fazinės vėlinimo trukmės palyginimas, kai tiriama sistema: 1 – be papildomų ekranų; su papildomais ekranais įžemintais: 2 – viduryje; 3 – tarp jų galų ir vidurio; 4 – iš abiejų galų; 5 – viename gale

Fig. 3.6. Comparison of phase delay time of meander slow-wave systems: 1 – without additional shields; with additional shields grounded at: 2 – center; 3 – point between the edge and the center; 4 – both edges; 5 – one edge

3.1 lentelė. Meandrinių lėtinimo sistemų fazinės vėlinimo trukmės žemuosiuose dažniuose ir pralaidumo juostos pločio vertės esant skirtingiems papildomų ekranų įžeminimo taškams

Table 3.1. Values of phase delay time in lower frequencies and bandwidth of meander slow-wave system with different grounding points of additional shields

Papildomo ekrano įžeminimo taškas	$t_{v\bar{z}D}$, ns	ΔF , GHz
Be papildomų ekranų	0,865	1,16
Viename gale	0,910	1,36
Tarp galo ir vidurio	0,910	1,30
Viduryje	0,911	1,09
Iš abiejų galų	0,907	1,97

Iš 3.6 paveiksle ir 3.1 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad apskritai papildomų ekranų įterpimas didina sistemos fazinę vėlinimo trukmę žemuosiuose dažniuose apie 5 %. Dažnių ruože iki 1 GHz, santykinis vėlinimo trukmės padidėjimas kinta nuo 1,64 %, kai papildomi ekranai įžeminami iš abiejų galų iki 5,8 %, esant papildomų ekranų įžeminimui viduryje. Aukštesniuose dažniuose,

už rezonansinių reiškinių ribos, papildomų ekranų įterpimas mažina sistemos fazinę vėlinimo trukmę, išskyrus atvejį kai papildomi ekranai įžeminami viduryje. Šiuo atveju fazinės vėlinimo trukmės vertė yra didesnė visame nagrinėjama-me dažnių ruože.

Iš 3.1 lentelės taip pat matyti, kad beveik visų meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais praleidžiamųjų dažnių juosta yra platesnė už tokių pat konstrukcinių parametrų meandrinės lėtinimo sistemos be papildomų ekranų. Siauresnė nei meandrinės lėtinimo sistemos be papildomų ekranų pralaidumo juosta pasižymi tik viena iš tirtų sistemų, kurioje papildomi ekranai įžeminami viduryje. Plačiausia praleidžiamųjų dažnių juosta pasižymi sistema, kurioje papildomi ekranai yra įžeminami iš abiejų galų.

Apibendrinant galima teigti, kad geresnėmis dispersinėmis savybėmis pasižymi meandrinė lėtinimo sistema su papildomais ekranais, įžemintais iš abiejų galų. Šios sistemos fazinės vėlinimo trukmės dispersija yra mažiausia. Be to, ji pasižymi plačiausia praleidžiamųjų dažnių juosta. Tokią sistemą gali būti naudojama dažnių ruože iki 1,97 GHz.

3.2. Kraštų topologijų įtakos sistemos dispersinėms savybėms tyrimo rezultatai

3.1 poskyryje buvo nustatyta, kad geresnėmis dispersinėmis savybėmis pasižymi lėtinimo sistema, kurioje papildomų ekranų abu galai yra sujungti su išorinių ekranu (2.3 pav., d). Todėl šiame poskyryje pateikiami tokios meandrinės lėtinimo sistemos kraštų topologijos įtakos dispersinėms savybėms tyrimo rezultatai.

3.7 paveiksle pavaizduota fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, keičiant laidininko, jungiančio gretimas meandro juostelės plotį w_3 (2.4 pav.). Fazinės vėlinimo trukmės žemuosiuose dažniuose ir pralaidumo juostos pločio vertės, gauti šio eksperimento metu, pateiktos 3.2 lentelėje. Iš pateiktų duomenų matyti, kad keičiantis pločiui w_3 , sistemos fazinė vėlinimo trukmė didėja.

Sumažinus jungiančio laidininko plotį 8 kartus, fazinė vėlinimo trukmė padidėja 0,8 %. Tačiau toks w_3 mažinimas siaurina sistemos pralaidumo juostą 7 % iki 1,82 GHz. Minėtas fazinės vėlinimo trukmės padidėjimas išlieka pastovus visame pralaidumo juostos dažnių ruože.

Padidinus jungiančio laidininko plotį w_3 3 kartus, vėlinimo trukmė padidėja 1,4 %, tačiau praleidžiamųjų dažnių juostos plotis sumažėja dar labiau – iki 1,72 GHz arba 13 %. Taigi galima daryti išvadą, kad didesnis efektas pastebimas didinant jungiančio laidininko plotį w_3 . Jis paaiškinamas talpinių netolygumų sudarymu meandriniam laidininke.

3.7 pav. Fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, keičiant laidininko, jungiančio gretimas meandro juosteles, plotį w_3 : 1 – sistema su pradiniais konstrukciniais parametrais; 2 – $w_3 = 0,025$ mm; 3 – $w_3 = 0,6$ mm

Fig. 3.7. Phase delay time dependence on frequency when width w_3 of a conductor connecting adjacent meander strips is changed: 1 – system with initial dimensions; 2 – $w_3 = 0.025$ mm; 3 – $w_3 = 0.6$ mm

3.2 lentelė. Meandrinųjų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais, įžemintais iš abiejų galų fazinės vėlinimo trukmės žemuosiuose dažniuose ir pralaidumo juostos pločio vertės keičiant laidininko, jungiančio gretimas meandro juosteles plotį w_3

Table 3.2. Values of phase delay time in lower frequencies and bandwidth of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges when width w_3 of a conductor connecting adjacent meander strips is changed

Lėtinimo sistemos žymėjimas	w_3 , mm	$t_{v\check{Z}D}$, ns	ΔF , GHz
1	0,2	0,907	1,97
2	0,025	0,914	1,82
3	0,6	0,919	1,72

Fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, didėjant tarpui meandrinės lėtinimo sistemos kraštuose ties gretimų meandro laidininkų sujungimais (2.5 pav.), pateikiama 3.8 paveiksle. Kartu, 3.3 lentelėje, pateikiamos ištirtų sistemų fazinės vėlinimo trukmės žemuosiuose dažniuose ir pralaidumo juostos pločio vertės.

Iš lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad didėjant dydžiui Δs , o kartu ir tarpui, fazinė vėlinimo trukmė žemuosiuose dažniuose taip pat didėja. Tarpo pločiui Δs padidėjus 1,5 karto, vėlinimo trukmė padidėja 0,8 %, tuo tarpu plotį padidinus 2,5 karto, vėlinimo trukmė padidėja 2,7 %. Iš 3.8 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad toks vėlinimo trukmių padidėjimas išlieka pastovus vidutinių bei aukštesniųjų dažnių ruože. Tačiau toks topologijos keitimas šiek tiek siaurina sistemos pralaidumo juostą. Pirmuoju atveju pralaidumo juosta susiaurėja iki 1,81 GHz arba 8,2 %, antruoju – iki 1,73 GHz arba 12,2 %.

Dėl topologijos pasikeitimų padidėjusį fazinę vėlinimo trukmę galima sumažinti, mažinant juostelių ilgį $2A$. Tokiu būdu žemuosiuose dažniuose suvienodinto fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio pateikiama 3.8 paveiksle, 4 kreive. Dispersinės savybės šiuo atveju nepagerėja, tačiau galima sumažinti bendrą sistemos plotą. Iš 3.3 lentelės matyti, kad vienodos fazinės vėlinimo trukmės vertės žemuosiuose dažniuose gaunamos sumažinus juostelių ilgį $2A$ iki 19 mm, dėl ko bendras sistemos plotas sumažėja 3 %. Tai labai svarbu taikant meandrinės lėtinimo sistemas šiuolaikiniuose integriniuose grandynuose.

3.8 pav. Fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, didinant tarpą meandrinės lėtinimo sistemos kraštuose ties gretimų meandro laidininkų sujungimais: 1 – sistema su pradiniais konstrukciniais parametrais; 2 – $\Delta s = 0,3$ mm, $\Delta A = 0,6$ mm, $2A = 19,6$ mm; 3 – $\Delta s = 0,5$ mm, $\Delta A = 0,6$ mm, $2A = 19,6$ mm; 4 – $\Delta s = 0,5$ mm, $\Delta A = 0,6$ mm, $2A = 19$ mm

Fig. 3.8. Phase delay time dependence on frequency when a width of a gap is increased in the area where strips of meander form a loop: 1 – system with initial dimensions; 2 – $\Delta s = 0.3$ mm, $\Delta A = 0.6$ mm, $2A = 19.6$ mm; 3 – $\Delta s = 0.5$ mm, $\Delta A = 0.6$ mm, $2A = 19.6$ mm; 4 – $\Delta s = 0.5$ mm, $\Delta A = 0.6$ mm, $2A = 19$ mm

3.3 lentelė. Meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų fazinės vėlinimo trukmės žemuosiuose dažniuose ir pralaidumo juostos pločio vertės keičiantis tarpui ties meandro laidininkų sujungimais

Table 3.3. Values of phase delay time in lower frequencies and bandwidth of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges when a width of a gap in the area where strips of meander form a loop is changed

Lėtinimo sistemos žymėjimas	$2A$, mm	ΔA , mm	Δs , mm	t_{vD} , ns	ΔF , GHz
1	19,6	0,6	0,2	0,907	1,97
2			0,3	0,914	1,81
3			0,5	0,932	1,73
4	19		0,5	0,907	1,71

3.9 pav. Fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, didinant tarpą meandrinės lėtinimo sistemos kraštuose ties atvira meandro dalimi:

1 – sistema su pradiniais parametrais; 2 – $\Delta s = 0,3$ mm, $\Delta A = 0,6$ mm;

3 – $\Delta s = 0,5$ mm, $\Delta A = 0,6$ mm

Fig. 3.9. Phase delay time dependence on frequency when a width of a gap is increased in the area where meander strips are open: 1 – system with initial dimensions; 2 – $\Delta s = 0.3$ mm, $\Delta A = 0.6$ mm; 3 – $\Delta s = 0.5$ mm, $\Delta A = 0.6$ mm

3.9 paveiksle pavaizduota fazinės vėlinimo trukmės priklausomybė nuo dažnio, didinant tarpą meandrinės lėtinimo sistemos kraštuose ties atvira meandro dalimi (2.6 pav.). Tuo pačiu, 3.4 lentelėje palyginamos skaičiavimų metu gautos fazinės vėlinimo trukmės žemuosiuose dažniuose bei pralaidumo juostos pločio vertės.

3.4 lentelė. Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų fazinės vėlinimo trukmės žemuosiuose dažniuose ir pralaidumo juostos pločio vertės keičiantis tarpui ties atvira meandro dalimi

Table 3.4. Values of phase delay time in lower frequencies and bandwidth of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges when a width of a gap in the area where strips of meander are open is changed

Lėtinimo sistemos žymėjimas	ΔA , mm	Δs , mm	$t_{\text{vžD}}$, ns	ΔF , GHz
1	0,6	0,2	0,907	1,97
2		0,3	0,904	1,80
3		0,5	0,903	1,80

Iš 3.4 lentelės matyti, kad priešingai nei tarpo pločio didinimu ties meandro laidininkų sujungimais atveju (3.3 lentelė), tarpo pločio didinimas ties atvira meandro dalimi mažina sistemos fazinę vėlinimo trukmę. Tačiau pastebima mažesnė įtaka sistemos dispersinėms savybėms. Pavyzdžiui, padidinus tarpo plotį ties atvira meandro dalimi 2,5 karto, sistemos vėlinimo trukmė sumažėja vos 0,4 %, kai toks pat pločio padidėjimas ties meandro laidininko sujungimais padidina sistemos fazinę vėlinimo trukmę 2,7 %. Sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos plotis abiem nagrinėtais atvejais irgi mažėja – iki 1,8 GHz.

Iš 3.9 paveiksl o matyti, kad fazinės vėlinimo trukmės sumažėjimas pastebimas visame nagrinėjamame dažnių ruože. Taigi pasikeitimas šioje meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais topologijos dalyje turi mažai įtakos sistemos dispersinėms savybėms. Tai paaiškinama maža elektromagnetine sąveika šioje lėtinimo sistemos srityje. Todėl daryti topologijos pakeitimus sistemos kraštuose, ties atvira meandro dalimi nerekomenduojama.

3.3. Įėjimo varžos dažninės charakteristikos

3.10 paveiksle pateikiama S_{11} parametro priklausomybė nuo dažnio, nustatant žemuosiuose dažniuose meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžą jos kraštuose. Atliekant sistemos analizę momentų metodu, Sonnet[®] modeliavimo terpėje pagal nutylėjimą laikoma, kad generatoriaus ir apkrovos varžos lygios 50 Ω . S_{11} parametras, atitinkantis tokias varžų vertes, pavaizduotas 3.10 paveiksle pateiktame grafike, 1 kreive. Suderintos sistemos S_{11} parametro priklausomybė nuo dažnio yra pavaizduota 2 kreive. Iš grafiko matyti, kad suderinus apkrovos ir generatoriaus varžas, S_{11} parametro vertė žemuosiuose dažniuose sumažėja praktiškai iki 0.

3.10 pav. S_{11} parametro priklausomybė nuo dažnio, nustatant žemuosiuose dažniuose meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžą jos kraštuose: 1 – kai $R_g = R_a = 50 \Omega$; 2 – esant suderintoms apkrovos ir generatoriaus varžoms $R_g = R_a = 48 \Omega$

Fig. 3.10. Frequency response of S_{11} parameter when determining input impedance in the lower frequencies on the edges of a meander slow-system with additional shields: 1 – when $R_g = R_a = 50 \Omega$; when load and source resistances are matched to the system's input impedance $R_g = R_a = 48 \Omega$

S_{11} parametro priklausomybė nuo dažnio, nustatant žemuosiuose dažniuose meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžą jos viduryje, yra pateikta 3.11 paveiksle. Šiuo atveju 1 kreivė atitinka atvejį, kuomet apkrovos varžos $R_a = 50 \Omega$, o generatoriaus varža $R_g = 25 \Omega$ (2.1 lentelė). Kreivė 2 atvaizduoja S_{11} parametro priklausomybę nuo dažnio esant suderintoms apkrovos ir generatoriaus varžoms. Iš 3.11 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad ir šiuo atveju suderinus apkrovos ir generatoriaus varžas, S_{11} parametro vertė žemuosiuose dažniuose taip pat sumažėja.

Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžos dažnių charakteristikų tyrimo rezultatai pateikiami 3.12 ir 3.13 paveiksluose. 3.12 paveiksle pateiktame grafike pavaizduota įėjimo varžos priklausomybė nuo dažnio sistemos kraštuose. Grafiko 1 kreivė parodo aktyviosios R , o 2 – reaktyviosios X varžų pokyčius. Iš grafiko matyti, kad įėjimo varža tiriamos sistemos kraštuose išlieka beveik pastovi dažnių ruože iki 1,5 GHz ir yra artima 48Ω . Aukštesniuose dažniuose pastebimi įėjimo varžos svyravimai. Įėjimo varžos ties sistemos kraštais svyravimus nulemia sistemos kraštų, kuriuose pakinta elektromagnetinio lauko struktūra, efektai ir elektromagnetinis ryšys tarp gretimų meandrinio laidininko juostelių, dėl kurių atsiranda įėjimo varžos nesuderinamumas su generatoriaus ir apkrovos varžomis ir sistemoje vyksta krentančios ir

3.11 pav. S_{11} parametro priklausomybė nuo dažnio, nustatant žemuosiuose dažniuose meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžą jos viduryje: 1 – kai $R_a = 50 \, \Omega$, $R_g = 25 \, \Omega$; 2 – esant suderintoms apkrovos ir generatoriaus varžoms $R_a = 46,7 \, \Omega$, $R_g = 23,35 \, \Omega$

Fig. 3.11. Frequency response of S_{11} parameter when determining input impedance in the lower frequencies in the center of a meander slow-wave system with additional shields: 1 – when $R_a = 50 \, \Omega$, $R_g = 25 \, \Omega$; 2 – when load and source resistances are matched to the system's input impedance $R_a = 46.7 \, \Omega$, $R_g = 23.35 \, \Omega$

3.12 pav. Įėjimo varžos priklausomybė nuo dažnio meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais kraštuose: 1 – aktyvioji varža R ; 2 – reaktyvioji varža X

Fig. 3.12. Frequency response of the input impedance on the edges of a meander slow-wave system with additional shields: 1 – resistance R ; 2 – reactance X

3.13 pav. Įėjimo varžos priklausomybė nuo dažnio meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais viduryje: 1 – aktyvioji varža R ; 2 – reaktyvioji varža X

Fig. 3.13. Frequency response of the input impedance in the center of a meander slow-wave system with additional shields: 1 – resistance R ; 2 – reactance X .

atsispindėjusios bangų superpozicija. Be to, reikėtų pastebėti, kad sistemos įėjimo varžos reaktyvioji dalis yra labai maža ir visame dažnių ruože yra arti nulio, todėl galima daryti išvadą, kad įėjimo varža meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais kraštuose yra beveik aktyvioji.

3.13 paveiksle pateikiama įėjimo varžos priklausomybė nuo dažnio meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais viduryje. Šiuo atveju matome, kad įėjimo varža tiriamos sistemos viduryje išlieka pastovi platesniame dažnių ruože – iki 2 GHz. Tai paaiškinama tuo, kad šioje vietoje nėra kraštų efektų turinčių įtakos įėjimo varžai. Sistemos viduryje įėjimo varža kinta dėl elektromagnetinio ryšio tarp gretimų meandrinio laidininko juostelių. Įėjimo varžos vertė žemuosiuose dažniuose yra tokia pati kaip ir sistemos kraštuose. Reaktyvioji įėjimo varžos dalis sistemos viduryje, kaip ir kraštuose yra arti nulio, todėl įėjimo varža meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais viduryje taip pat yra beveik aktyvioji.

3.4. Elektrinio lauko meandrinėse lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo tyrimo rezultatai

Siekiant ištirti elektrinio lauko pasiskirstymą, buvo sudarytas meandrinės lėtinimo sistemos modelis, kurio sandara aprašoma 2.1.1 skyrelyje. Meandras bu-

vo sudarytas iš 12 juostelių, kurių konstrukcinių parametrų santykis yra toks: $A/h = 4$, $w/h = 1$, $s/h = 0,25$. Viena meandro laidininko juostelė x ašies kryptimi yra padalinta į 8 dalines sritis, y ašies kryptimi – į 80 dalinių sričių.

Krūvio pasiskirstymas, kai į meandro formos laidininką siunčiamas $+1$ V potencialas, pavaizduotas 3.14 paveiksle. Iš paveikslo matyti, kad didesnis krūvis yra sukauptas šoninėse meandro juostelėse. Be to, reikėtų atkreipti dėmesį į staigų krūvio padidėjimą laidininkų kraštuose. Toks padidėjimas parodo, kad siūloma metodika įvertina elektrinio lauko sklaidą laidžios struktūros kraštuose.

3.14 pav. Krūvio pasiskirstymas meandrinėje lėtinimo sistemoje į laidininką siunčiant $+1$ V potencialą

Fig. 3.14. Surface charge distribution on meander slow-wave system when potential of $+1$ V is applied to the conductor

Krūvio pasiskirstymas meandro laidininko dalyje, kur sujungiamos dvi greimos meandro juostelės pateiktas 3.15 paveiksle. Čia išryškintas krūvio pasiskirstymas vidiniuose meandro kampuose bei šoninėje juostelėje. Iš paveikslo taip pat matyti, kad ties vidiniu meandro kampu krūvis sumažėja. Toks sumažėjimas aiškinamas tuo, kad gretimuose juostelių kraštuose esantys vienodo ženklo krūviai mažina vienas kitą.

Be to, 3.15 paveiksle aiškiau matomas krūvio pasiskirstymas kiekvienoje juostelėje. Šiuo atveju didesnis krūvis kaupiasi juostelių kraštuose. Tai paaiškina tuo, kad į nagrinėjamą lėtinimo sistemą siunčiamas $+1$ V potencialas ir vienodo ženklo krūviai stumia vienas kitą laidininkų kraštų ir kampų link.

3.15 pav. Krūvio pasiskirstymas meandro laidininko dalyje, kur sujungiamos dvi gretimos meandro juostelės.

Fig. 3.15. Surface charge distribution on meander slow-wave system in the area where adjacent strips are connected

3.16 pav. Elektrinio lauko pasiskirstymo meandrinėse lėtinimo sistemose modeliavimas taikant: a) – siūlomą metodiką; b) – Sonnet[®] programų paketą; c) – darbe (Wei-Shan *et al.* 2009) gauti rezultatai

Fig. 3.16. Modeling of distribution of electric field in the meander slow-wave system using: a) – proposed technique; b) Sonnet[®] software; c) – results obtained in (Wei-Shan *et al.* 2009)

3.16 paveiksle pateikiamas elektrinio lauko pasiskirstymo meandrinėje lėtinimo sistemoje vaizdas iš viršaus gautas taikant siūlomą metodiką. Rezultatų palyginimui 3.16 paveiksle taip pat pateikiami krūvio tankio pasiskirstymas gautas su Sonnet[®] programų paketu (3.16 pav., b) ir darbe (Wei-Shan *et al.* 2009) gauti rezultatai (3.16 pav., c).

Vienas iš meandrinės lėtinimo sistemos modeliavimo su Sonnet[®] programų paketų rezultatų gali būti krūvio tankio joje pasiskirstymas. Šiuo atveju (3.16 pav., b) pateikiamas krūvio tankio pasiskirstymas tokių pat konstrukcinių parametrų, kaip ir siūlomo modelio, sistemoje. Iš paveikslo matyti, kad abejose sistemose didesnis krūvis kaupiasi šoninėse meandro juostelėse. Be to, matomas ir staigus krūvio padidėjimas laidininkų kraštuose.

Darbe (Wei-Shan *et al.* 2009) analizuojami parametrai turintys įtakos meandrinės sistemos vėlinimo trukmei. Tyrimai atliekami esant 1 GHz dažnio signalui. Iš pavaizduoto elektrinio lauko pasiskirstymo meandrinėje lėtinimo sistemoje (3.16 pav., c), matyti, kad stipresnis elektrinis laukas taip pat gaunamas juostelių kraštuose, tuo tarpu ties vidiniais kampais elektrinis laukas yra žymiai mažesnis. Nors pavaizduotoje sistemoje tarpai tarp laidininkų yra dideli ($s/h = 10$), pasiskirstymo pobūdis yra panašus į paveiksle (3.16 pav., a) pavaizduotus rezultatus.

Taigi iš rezultatų palyginimų galima teigti, kad siūloma analizės metodika tinka elektrinio lauko meandrinėse lėtinimo sistemose trimačio pasiskirstymo modeliavimui. Be to, ją galima naudoti ir uždavinių sprendimui aukštesniuose dažniuose.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

Remiantis atliktais tyrimais ir jų rezultatų analize galima padaryti šias išvadas:

1. Papildomų ekranų įterpimas didina sistemos fazinę vėlinimo trukmę žemuosiuose dažniuose ir tokiu būdu mažina jos dispersiją. Meandrinė lėtinimo sistema su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų pasižymi mažiausia vėlinimo trukmės dispersija. Įterpus į sistemą papildomus ekranus, įžemintus iš abiejų galų, lėtinimo sistemos vėlinimo trukmės dispersija dažnių ruože iki 1,97 GHz sumažėja apie 3,89 karto ir neviršija $\Delta t_v = 0,035$ ns.
2. Laidininko, jungiančio gretimas meandro juosteles, pločio keitimas didina sistemos vėlinimo trukmę. Didesnis efektas pastebimas didinant jungiančio laidininko plotį. Padidinus jungiančio laidininko plotį 3 kartus, vėlinimo trukmė padidėja 1,4 % ir toks padidėjimas išlieka pastovus siauresniame dažnių ruože – iki 1,72 GHz. Vėlinimo

trukmės padidėjimas paaiškinamas talpinių netolygumų sudarymu meandriniam laidininkui.

3. Tarpo didinimas sistemos kraštuose ties meandro kilpomis didina sistemos fazinę vėlinimo trukmę. Tarpo plotį padidinus 2,5 karto, fazinė vėlinimo trukmė padidėja 2,7 %. Tuo tarpu tarpo didinimas ties meandro atvirąja dalimi turi mažą efektą, todėl topologijos keitimas šios sistemos dalyje nerekomenduojamas.
4. Dėl tarpo didinimo kraštuose ties meandro kilpomis padidėjusi fazinė vėlinimo trukmė žemuosiuose dažniuose gali būti sumažinta, mažinant juostelės ilgį 2A. Tokiu būdu, nekeičiant dispersinių savybių sumažinamas bendras sistemos užimamas plotas. Esant meandrinio laidininko ilgiui 19 mm, tarpo pločiui 0,5 mm ir tarpo ilgiui 0,6 mm, sistemos plotas sumažėja apie 3 %.
5. Įėjimo varža kraštuose yra pastovi dažnių ruože iki 1,5 GHz, sistemos viduryje – iki 2 GHz, o jos vertė žemuosiuose dažniuose yra tokia pati kaip ir sistemos kraštuose.
6. Ištirtas elektrinio lauko pasiskirstymas meandrinėje lėtinimo sistemoje ir jos dalyje, kur sujungiamos dvi gretimos juostelės. Nustatyta, kad didesnis krūvis yra sukaupiamas šoninėse meandro juostelėse. Be to, pastebimas staigus krūvio padidėjimas laidininkų kraštuose. Toks padidėjimas parodo, kad siūloma metodika įvertina elektrinio lauko sklaidą laidžios struktūros kraštuose.

Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais parametrinė sintezė

Šiame skyriuje pasiūloma meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų parametrinės sintezės metodika. Aptariamas apibendrintas lėtinimo sistemų automatizuoto projektavimo procesas ir atliekamas meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais elektrinių charakteristikų jautrumo jos konstrukcinių parametru keitimui įvertinimas nustatant įtakos koeficientus.

Įvertinus konstrukcinių parametru įtaką lėtinimo sistemos elektrinėms charakteristikoms, sudaromas meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų parametrinės sintezės algoritmas, kuris patikrinamas atliekant keturių lėtinimo sistemų sintezę.

Skyriuje pateikta medžiaga buvo pristatyta šešioliktoje respublikinėje Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“.

4.1. Specializuotų programų paketų taikymo meandrinių lėtinimo sistemų parametrinei sintezei galimybių analizė

Šiuolaikiniai mikrobangų įtaisai, tarp jų ir lėtinimo sistemos, projektuojami taikant automatizuoto projektavimo kompiuterizuotas sistemas, kurias valdo specializuoti programų paketai.

Monografijoje (Štaras *et al.* 2010) teigiama, kad mikrobangų įtaisų projektavimas vykdomas keliais etapais – tai konstrukcijos pradinio varianto analizė ir sintezė; pradinio varianto koregavimas ir jei reikia, naujojo varianto analizė; konstrukcijos optimizavimas; projektinės dokumentacijos rengimas.

Pažymėtina, kad automatinės sintezės ir optimizavimo algoritmai automatizuoto projektavimo sistemose įgyvendinami panašiais būdais. Ir sintezės, ir optimizavimo ciklą sudaro analizė, gautų charakteristikų palyginimas su reikalingomis bei įtaiso konstrukcijos parametrų keitimo procedūros.

Apibendrintoji automatizuoto lėtinimo sistemų projektavimo proceso schema pateikta 4.1 paveiksle. Pirmuoju projektavimo etapu (1–4 blokai) projektuotojas, pritaikydamas savo patirtį ir sintezės metodus, sintezuoja pradinį lėtinimo sistemos variantą. Sintzei taikomi pradinę konstrukciją atitinkantis matematinis lėtinimo sistemos modelis ir techniniais reikalavimais pagrįsti pradiniai duomenys.

Šiame skyriuje plačiau aptariamas antrasis projektavimo etapas (5–6 blokai), kuriame analizuojamas lėtinimo sistemos modelis. Šiam tikslui gali būti taikomi programų paketai, pagrįsti matematiniais modeliais, sukurtais lėtinimo sistemų savybėms tirti. Mūsų atveju tai Sonnet[®] programų pakete esantis variklis *em*[®], skirtas aukštadažnių planariųjų grandynų analizei momentų metodu. Analizės metu apskaičiuotos charakteristikos lyginamos su techniniais reikalavimais. Jeigu palyginimo rezultatai yra nepatenkinami, modelio parametrai keičiami ir vėl kartojama analizės procedūra.

Trečiuoju projektavimo etapu gaminamas projektuojamos lėtinimo sistemos bandomasis maketas ir matuojamos jo charakteristikos (7 blokas). Ištyrus bandomąją sistemos maketą rengiama konstrukcijos technologinė dokumentacija (8 blokas) ir gaminama suprojektuotoji lėtinimo sistema.

Reikėtų atkreipti dėmesį į 4.1 paveiksle pateikto algoritmo 9 ir 10 blokus. Analizės metu apskaičiuotos charakteristikos lyginamos su techniniais reikalavimais. Jeigu palyginimo rezultatai yra nepatenkinami, modelio parametrai keičiami ir vėl kartojama analizės procedūra. Tokių būdų vykdoma sistemos parametrinė sintezė ir optimizavimas. Optimizavimo procesui palengvinti, prieš nustatant pakeitimus, gali būti analizuojamas lėtinimo sistemos parametrų jautrumas keitimams. Jautrumo analizei taikomi tie patys matematiniai modeliai.

Sekančiame poskyryje aptarsime meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais elektrinių charakteristikų jautrumą jos konstrukcinių parametrų keitimui.

4.1 pav. Apibendrintoji lėtinimo sistemų automatizuoto projektavimo proceso schema (Štaras *et al.* 2010)

Fig. 4.1. The block diagram illustrating the process of computer aided design of slow-wave system (Štaras *et al.* 2010)

4.2. Meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais konstrukcinių parametrų įtakos koeficientai

Meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais parametrinė sintezė – tai automatizuoto projektavimo proceso dalis, kurios metu siekiant gauti reikiamas įtaiso išėjimo elektrines charakteristikas keičiami jo konstrukciniai parametrai.

Pagrindinės lėtinimo sistemos elektrinės charakteristikos yra tokios: praleidžiamųjų dažnių juostos plotis ΔF , vėlinimo trukmė t_v , ir banginė varža Z_B . Apskritai šios charakteristikos (išskyrus ΔF) nustatomos arba apskaičiuojamos žemųjų dažnių srityje. Monografijoje (Štaras *et al.* 2010) teigiama, kad meandrinų lėtinimo sistemų vienalyčiame dielektrike banginė Z_B ir įėjimo Z_{IN} varžos sutampa, o nevienalyčiame dielektrike skiriasi labai nedaug. Todėl toliau skyriuje bus naudojama įėjimo varžos Z_{IN} sąvoka.

Pagrindiniai meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais konstrukciniai parametrai yra tokie: dielektrinio pagrindo storis h ir santykinė dielektrinė skvarba ϵ_r , vienos meandro laidininko juostelės ilgis $2A$ ir jos plotis w_1 , papildomo ekrano plotis w_2 ir tarpo tarp gretimų juostelių plotis s .

Konstrukcinių parametrų įtaka sistemos elektrinės charakteristikoms yra nevienoda. Todėl, norint pasiekti optimalius sintezės rezultatus, būtina ištirti pagrindinių meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais konstrukcinių parametrų įtaką jos elektrinėms charakteristikoms. Tyrimo rezultatai leis patobulinti tokių sistemų sintezės algoritmus.

Tyrimams buvo panaudota meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų konstrukcija, kurios topologijos fragmentas ir trimatis vaizdas pateikti 4.2 paveiksle. Tiriamos sistemos pradiniai matmenys yra tokie: $2A = 20$ mm; $w_1 = 0,5$ mm; $w_2 = 0,25$ mm; $s = 0,65$ mm; $\epsilon_r = 7,3$; $h = 0,5$ mm.

Įvertinti meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais konstrukcinių parametrų įtaka jos vėlinimo trukmei, įėjimo varžai ir praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui galima nustatant įtakos koeficientus. Tam tikro konstrukcinio parametro įtakos koeficientas gali būti išreikštas formule

$$S = \left(\frac{\Delta p}{p_0} \right) / \left(\frac{\Delta d}{d} \right), \quad (4.1)$$

čia Δp – lėtinimo sistemos elektrinės charakteristikos pokytis; p_0 – lėtinimo sistemos su pradiniais konstrukciniais parametrais elektrinės charakteristikos vertė; Δd – pasirinkto konstrukcinio parametro pokytis; d – pradinė konstrukcinio parametro vertė.

4.2 pav. Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais išžemintais iš abiejų galų: a) topologijos fragmentas; b) trimatis vaizdas

Fig. 4.2. Meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges: a) topology fragment; b) 3D view

4.3 pav. Fazinės vėlinimo trukmės pokytis, sumažinus meandro formos laidininko juostelės ilgį 2A vienu procentu

Fig. 4.3. Change in phase delay time when a length of a meander conductor is changed by one percent

Tyrimų metu, nustatant įtakos koeficientus, konstrukciniai parametrai buvo mažinami 1 %. Pavyzdžiui, fazinės vėlinimo trukmės pokytis, sumažinus

meandro formos laidininko juostelės ilgį $2A$ nuo 20 mm iki 19,8 mm, pavaizduotas 4.3 paveiksle.

Iš 4.3 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad sumažinus juostelės ilgį $2A$ vienu procentu, sistemos fazinės vėlinimo trukmės vertė sumažėja. Tokiu būdu, nustatius fazinės vėlinimo trukmės pokytį žemuosiuose dažniuose Δt_v , galima apskaičiuoti konstrukcinio parametro $2A$ įtakos koeficientą pagal 4.1 išraišką. Sekančiuose skyreliuose pateiksime meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų konstrukcinių parametrų įtakos koeficientus ir įvertinsime sistemos fazinės vėlinimo trukmės, įėjimo varžos ir praleidžiamųjų dažnių juostos pločio jautrumą konstrukcinių parametrų keitimui.

4.2.1. Konstrukcinių parametrų įtaka sistemos fazinei vėlinimo trukmei

Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų fazinės vėlinimo trukmės jautrumo laidininko ilgio $2A$ ir jo pločio w_1 pokyčiams tyrimo rezultatai yra pateikti 4.4 paveiksle.

4.4 pav. Įtakos, sistemos fazinei vėlinimo trukmei, koeficientai keičiant:

a) meandro laidininko ilgį $2A$; b) meandro laidininko plotį w_1

Fig. 4.4. Impact coefficients on phase delay time of a system when changing: a) a length of meander conductor $2A$; b) a width of meander conductor w_1

Čia pavaizduotos įtakos koeficientų vertės kintant dažniui, kai laidininko ilgis $2A$ (4.4 pav., a) ir plotis w_1 (4.4 pav., b) mažinami vienu procentu. Iš grafikuose pateiktų kreivių matyti, kad sumažinus laidininko ilgį $2A$ vienu procentu, sistemos fazinės vėlinimo trukmės vertė irgi sumažėja apie 1 %. Daug mažesnę

įtaką sistemos fazinei vėlinimo trukmei turi meandro laidininko pločio keitimas. Šiuo atveju, sumažėjus pločiui w_1 vienu procentu, fazinės vėlinimo trukmės vertė sumažėja vos 0,06 %.

4.5 paveiksle pateikiamos įtakos koeficientų vertės kintant dažniui, kai vienu procentu mažinamas tarpo tarp gretimų meandro laidininko juostelių plotis s (4.5 pav., a) ir papildomo ekrano plotis w_2 (4.5 pav., b). Iš grafikų matyti, kad sumažėjus tarpui tarp gretimų meandro juostelių vienu procentu, fazinės vėlinimo trukmės vertė žemuosiuose dažniuose sumažėja apie 0,07 %. Tuo tarpu papildomo ekrano pločio w_2 keitimas įtakos fazinei vėlinimo trukmei beveik neturi. Šiuo atveju įtakos koeficiento vertė žemuosiuose dažniuose yra arti nulio.

4.5 pav. a) Įtakos, sistemos fazinei vėlinimo trukmei, koeficientai keičiant: a) tarpo tarp gretimų meandro juostelių plotį s ; b) papildomo ekrano plotį w_2

Fig. 4.5. Impact coefficients on phase delay time of a system when changing: a) a gap between adjacent meander conductors s ; b) width of additional shield w_2

Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais fazinės vėlinimo trukmės jautrumo, keičiant dielektrinio pagrindo parametrus, tyrimo rezultatai pateikiami 4.6 paveiksle. Čia parodyti santykinės dielektrinės skvarbos ϵ_r (4.6 pav., a) ir dielektrinio pagrindo storio h (4.6 pav., b) įtakos koeficientai.

Iš pateiktų grafikų matyti, kad didesnę įtaką sistemos fazinei vėlinimo trukmei turi santykinės dielektrinės skvarbos keitimas. Sumažinus ϵ_r vienu procentu, fazinė vėlinimo trukmė sumažėja apie 0,5 %. Tuo tarpu dielektrinio pagrindo storio h įtakos koeficientas yra neigiamas. Tai reiškia, kad sumažėjus sto-

riui h vienu procentu, sistemos fazinės vėlinimo trukmės vertė padidėja apie 0,1 %.

4.6 pav. Įtakos, sistemos fazinei vėlinimo trukmei, koeficientai keičiant: a) dielektrinio pagrindo santykinę dielektrinę skvarbą ϵ_r ; b) dielektrinio pagrindo storį h

Fig. 4.6. Impact coefficients on phase delay time of a system when changing: a) a relative permittivity ϵ_r ; b) height of a dielectric substrate h

Apibendrinant rezultatus galima teigti, kad didžiausia įtaką meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų fazinei vėlinimo trukmei turi laidininko ilgio $2A$ keitimas. Mažesnė įtaka pastebima keičiant dielektrinio pagrindo parametrus: santykinę dielektrinę skvarbą ϵ_r ir storį h . Keičiant kitus konstrukcinius parametrus, tokius kaip meandro laidininko plotis w_1 , papildomo ekrano plotis w_2 ir tarpo tarp gretimų meandro juostelių plotis s , sistemos fazinė vėlinimo trukmė beveik nesikeičia. Taigi norint pakeisti lėtinimo sistemos fazinę vėlinimo trukmę, reikia keisti meandro laidininko ilgį $2A$ arba jų skaičių, o taip pat dielektrinio pagrindo medžiagą.

4.2.2. Konstrukcinių parametrų įtaka sistemos įėjimo varžai

Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų įėjimo varžos jautrumo, laidininko ilgio $2A$ ir jo pločio w_1 pokyčiams, tyrimo rezultatai yra pateikti 4.7 paveiksle.

Čia pavaizduotos įtakos koeficientų vertės kintant dažniui, kai laidininko ilgis $2A$ (4.7 pav., a) ir plotis w_1 (4.7 pav., b) mažinami vienu procentu. Iš grafiukuose pateiktų kreivių matyti, kad sumažinus laidininko ilgį $2A$ vienu procentu, įtakos koeficientas yra arti nulio, t.y. sistemos įėjimo varžos vertė beveik nesi-

keičia. Didesnę įtaką sistemos įėjimo varžai turi meandro laidininko pločio keičimas. Šiuo atveju, sumažėjus pločiui w_1 vienu procentu, įėjimo varžos vertė žemuosiuose dažniuose sumažėja 0,3 %. Taip pat reiktų atkreipti dėmesį į tai, kad

4.7 pav. Įtakos, sistemos įėjimo varžai, koeficientai keičiant: a) meandro laidininko ilgį $2A$; b) meandro laidininko plotį w_1

Fig. 4.7. Impact coefficients on input impedance of a system when changing: a) a length of meander conductor $2A$; b) a width of meander conductor w_1

4.8 pav. Įtakos, sistemos įėjimo varžai, koeficientai keičiant: a) tarpo tarp gretimų meandro juostelių plotį s ; b) papildomo ekrano plotį w_2

Fig. 4.8. Impact coefficients on input impedance of a system when changing: a) a gap between adjacent meander conductors s ; b) width of additional shield w_2

aukštesniuose dažniuose pastebimi kreivių svyravimai, kurie atsiranda dėl įėjimo varžos nesuderinamumo su generatoriaus apkrova didėjant dažniui.

4.8 paveiksle pateikiamos įtakos koeficientų vertės kintant dažniui, kai vienu procentu mažinamas tarpo tarp gretimų meandro laidininko juostelių plotis s (4.8 pav., a) ir papildomo ekrano plotis w_2 (4.8 pav., b). Iš grafikų matyti, kad sumažėjus tarpui tarp gretimų meandro juostelių vienu procentu, įėjimo varžos vertė žemuosiuose dažniuose sumažėja apie 0,5 %. Tuo tarpu papildomo ekrano pločio w_2 keitimas turi didesnę įtaką sistemos įėjimo varžai. Šiuo atveju įtakos koeficiento vertė žemuosiuose dažniuose yra arti vieneto, todėl sumažinus w_2 vienu procentu, sistemos įėjimo varža taip pat sumažėja apie 1 %.

Meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžos jautrumo, keičiant dielektrinio pagrindo parametrus, tyrimo rezultatai pateikiami 4.9 paveiksle. Čia parodyti santykinės dielektrinės skvarbos ϵ_r (4.9 pav., a) ir dielektrinio pagrindo storio h (4.9 pav., b) įtakos koeficientai.

4.9 pav. Įtakos, sistemos įėjimo varžai, koeficientai keičiant: a) dielektrinio pagrindo santykinę dielektrinę skvarbą ϵ_r ; b) dielektrinio pagrindo storį h

Fig. 4.9. Impact coefficients on input impedance of a system when changing: a) a relative permittivity ϵ_r ; b) height of a dielectric substrate h

Iš pateiktų grafikų matyti, kad didesnę įtaką sistemos įėjimo varžai turi santykinės dielektrinės skvarbos keitimas. Sumažinus ϵ_r vienu procentu, įtakos koeficientas S_{ϵ_r} įgyja neigiamą vertę, o sistemos įėjimo varža padidėja apie 0,5 %. Tuo tarpu dielektrinio pagrindo storio h įtakos koeficientas yra teigiamas. Tai reiškia, kad sumažėjus storiui h vienu procentu, sistemos įėjimo varžos vertė sumažėja apie 0,2 %.

Apibendrinant rezultatus galima teigti, kad didžiausia įtaką meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų įėjimo varžai turi papildomo ekrano pločio w_2 keitimas. Mažesnė įtaka pastebima keičiant tarpą tarp gretimų meandro juostelių plotį s ir pagrindo santykinę dielektrinę skvarbą ϵ_r . Kitų konstrukcinių parametų, tokių kaip dielektrinio pagrindo storis h ir meandro laidininko plotis w_1 , įtakos koeficientai yra dar mažesni ir siekia 0,2–0,3. Tuo tarpu meandro laidininko ilgio $2A$ keitimas sistemos įėjimo varžos žemuosiuose dažniuose nekeičia. Be to reikėtų pastebėti, kad kintant dažniui, įėjimo varžos įtakos koeficientų kreivėse pastebimi svyravimai. Kaip buvo minėta 3.3 poskyryje, svyravimus nulemia sistemos kraštų, kuriuose pakinta įėjimo varžos dydis ir atsiranda signalų trakto nesuderinamumas.

4.2.3. Konstrukcinių parametų įtaka sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui

4.2.1 ir 4.2.2 skyreliuose pateiktų konstrukcinių parametų įtakos koeficientų meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų fazinei vėlinimo trukmei ir įėjimo varžai tyrimo rezultatai apibendrinti 4.1 lentelėje. Čia taip pat parodytas sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos pločio jautrumas konstrukcinių parametų keitimui išreikštas per įtakos koeficientus.

4.1 lentelė. Meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų konstrukcinių parametų įtaka jos elektrinėms charakteristikoms

Table 4.1. Influence of constructive parameters of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges on it's electrical parameters

Konstrukcijos ir topologijos parametrai	Įtakos koeficientai, mažėjant atitinkamam konstrukcijos parametrai 1 %		
	Z_{IN}	t_v	ΔF
Meandro laidininko ilgis $2A$	0	1	–1,36
Meandro laidininko plotis w_1	0,3	0,06	–0,68
Papildomo ekrano plotis w_2	1	0	0
Tarpo tarp gretimų meandro laidininkų plotis s	0,5	0,07	–0,68
Pagrindo santykinė dielektrinė skvarba ϵ_r	–0,5	0,5	–1,36
Dielektrinio pagrindo storis h	0,2	–0,1	–0,68

Iš 4.1 lentelės matyti, kad didžiausią įtaką sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui turi meandro laidininko ilgio $2A$ ir pagrindo santykinės dielektrinės skvarbos ϵ_r keitimas. Sumažinus šiuos didžius 1 %, ΔF padidėja apie 1,36 %. Nemažą įtaką praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui turi ir meandro laidininko pločio w_1 , tarpo tarp gretimų meandro laidininko pločio s ir dielektrinio pagrindo storio h pokyčiai. Sumažinus šiuos dydžius 1 %, ΔF padidėja 0,68 %. Papildomo ekrano pločio w_2 keitimas, įtakos sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui neturi.

Apibendrinant galima teigti, kad tam tikras meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų elektrinis parametras priklauso nuo kelių konstrukcinių parametrų. Pavyzdžiui, reikiamas įėjimo varžos Z_{IN} vertes galima gauti keičiant tarpo tarp gretimų meandro laidininkų plotį s , pagrindo santykinę dielektrinę skvarbą ϵ_r arba meandro laidininko plotį w_1 . Reikiama vėlinimo trukmės vertę galima gauti keičiant meandro laidininko ilgį $2A$ arba dielektrinio pagrindo parametrus ϵ_r ir h .

Tačiau ne visi šie parametrai keistini. Kai kurių konstrukcinių parametrų keitimą riboja pasirinkta gamybos technologija, todėl jie negali būti laisvai varijuojami. Tokie parametrai yra dielektrinio pagrindo storis h ir jo santykinė dielektrinė skvarba ϵ_r . Tai įvertinus, varijuojamų konstrukcijos parametrų skaičius sumažėja, o sintezės procesas tampa paprastesnis. Taigi pagrindiniai sintezės metų varijuojami parametrai yra šie: meandro laidininko ilgis $2A$ ir jo plotis w_1 , papildomo ekrano plotis w_2 ir tarpo tarp gretimų meandro juostelių plotis s .

Kai konstrukcijos parametrų įtaka sistemoms elektrinėms charakteristikoms yra žinoma, gali būti sudarytas meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų sintezės algoritmas.

4.3. Meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais parametrinės sintezės algoritmas

Įvertinus 4.2.1–4.2.3 skyreliuose pateiktus duomenis buvo sudarytas meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų sintezės algoritmas.

Parametrinė sintezė, kurios algoritmas pavaizduotas 4.10 paveiksle, pradedama reikiamų elektrinių charakteristikų – praleidžiamųjų dažnių juostos pločio ΔF_{reik} , fazinės vėlinimo trukmės t_{vreik} ir įėjimo varžos Z_{INreik} įvedimu (1 blokas). Toliau projektuotojas, naudodamasis savo patirtimi parenka pradinis sistemos konstrukcinius parametrus (2 blokas) ir susintezuoja pradinį meandrinės lėtinimo sistemos konstrukcijos variantą. Tai daroma iteraciniu būdu, MATLAB™ terpe valdant kompiuterizuotą projektavimo sistemą. Be to, šiame sintezės etape galima keisti tuos konstrukcinius parametrus, kurių keitimas tolimesniuose etapuose

nėra numatytas – tai meandro laidininkų skaičius N , pagrindo santykinė dielektrinė skvarba ϵ_r ir jo storis h . Įvedus pradinį sistemos konstrukcinius parametrus, naudojant instrumentinių priemonių komplektą (angl. *toolbox*) SonnetLab nubraižomas pradinis lėtinimo sistemos variantas, kuris vėliau analizuojamas Sonnet[®] programų pakete esančiu varikliu $em^{\text{®}}$, skirtu aukštadažnių planariųjų grandynų analizei momentų metodu.

4.10 pav. Meandrinų lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų parametrinės sintezės algoritmas

Fig. 4.10. Algorithm for synthesis of a meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges

Parinkus pradines konstrukcinių parametų vertes prasideda automatinės sintezės procesas, kurį sudaro tris ciklai. Kiekvieno ciklo metu konstrukcinis parametras, turintis didžiausią įtaką vienai iš elektrinių charakteristikų, keičia-

mas tol, kol bus gauta reikiama šios elektrinės charakteristikos vertė žemųjų dažnių srityje. Šio proceso metu kitų konstrukcinių parametrų vertės yra fiksuotos.

Pirmuoju ciklu (3–5 blokai) papildomo ekrano plotis w_2 keičiamas tol, kol gaunama reikiama įėjimo varžos žemuosiuose dažniuose vertė Z_{IN} . Antruoju ciklu (6–8 blokai) meandro laidininko ilgis $2A$ keičiamas tol, kol gaunama reikiama vėlinimo trukmės žemųjų dažnių srityje t_v vertė. Trečiuoju ciklu (10 ir 11 blokai) gali būti keičiami meandro laidininko plotis w_1 arba tarpo tarp gretimų meandro juostelių plotis s , kurie lemia sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos plotį ΔF . Tačiau kintant šiems konstrukciniams parametrams keičiasi sistemos įėjimo varža Z_{IN} ir vėlinimo trukmė t_v , todėl po trečiojo ciklo grįžtama į pirmąjį.

Sintezės algoritmo patikros rezultatai apibendrinti 4.2 lentelėje. Čia pateikiamos keturių meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų elektrinės charakteristikos ir sintezuoti šių sistemų konstrukciniai parametrai. Sintezės metu buvo naudojami du skirtingi dielektriniai pagrindai – kompanijos Rogers Corporation RO3006™ medžiaga, kurios santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r = 6,15$ ir plačiai spausdintinių plokščių gamyboje naudojama FR4 medžiaga, kurios $\epsilon_r = 4,4$.

4.2 lentelė. Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų elektrinės charakteristikos ir sintezuoti konstrukciniai parametrai

Table 4.2. Electrical properties and constructive parameters of synthesized meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges

Lėtinimo sistemos žymėjimas	t_v , ns	Z_{IN} , Ω	ΔF , GHz	h , mm	ϵ_r	w_1 , mm	w_2 , mm	s , mm	$2A$, mm	N
LS1	1	50	2,72	0,13	6,15	0,22	0,47	0,9	25	5
LS2	1	75	2,72	0,25	6,15	0,18	0,8	0,9	25	5
LS3	3	50	1,82	0,13	6,15	0,22	0,4	0,9	25,5	15
LS4	1	50	2,67	0,3	4,4	0,62	0,85	0,42	29,4	5

Iš 4.2 lentelėje pateiktų duomenų matyti, kad didesnė įėjimo varža, nekinstant vėlinimo trukmei t_v ir praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui ΔF , gaunama padidinus dielektrinio pagrindo storį h ir papildomo ekrano plotį w_2 bei sumažinus meandro laidininko plotį w_1 (LS1 ir LS2).

4.11 pav. Sintezuotų meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų LS1 ir LS2 fazinės vėlinimo trukmės ir įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio

Fig. 4.11. Frequency response of phase delay time and input impedance of synthesized meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges LS1 and LS2

4.12 pav. Sintezuotų meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų LS3 ir LS4 fazinės vėlinimo trukmės ir įėjimo varžos priklausomybės nuo dažnio

Fig. 4.12. Frequency response of phase delay time and input impedance of synthesized meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges LS3 and LS4

Trigubai didesnė vėlinimo trukmė, esant tokiai pačiai 50 Ω įėjimo varžai, gaunama tris kartus padidinus laidininkų skaičių N , nežymiai padidinus meandro

laidininko ilgį $2A$ ir sumažinus papildomo ekrano plotį w_2 (LS1 ir LS3). Dėl šių pasikeitimų praleidžiamųjų dažnių juostos plotis ΔF sumažėja apie 33 %.

Pakeitus RO3006™ dielektrinio pagrindo medžiagą į FR4, 1 nanosekundės vėlinimo trukmė ir 50Ω įėjimo varža gaunamos didinant meandro laidininko plotį w_1 ir ilgį $2A$, taip pat didinant papildomo ekrano plotį w_2 bei mažinant tarpą tarp gretimų meandro juostelių s (LS1 ir LS4). Praleidžiamųjų dažnių juostos plotis šiuo atveju sumažėja apie 2 %.

4.2 lentelėje pateiktų sintezuotų lėtinimo sistemų LS1–LS4 fazinės vėlinimo trukmės ir įėjimo varžos dažninės priklausomybės pateiktos 4.11 ir 4.12 paveiksluose.

4.4. Ketvirtąjo skyriaus išvados

Remiantis atliktais tyrimais ir jų rezultatų analize galima daryti šias išvadas:

1. Konstrukcinių parametų įtaka sistemos elektrinės charakteristikoms yra nevienoda. Todėl, sintezės procesui paspartinti būtina nustatyti meandrinį lėtinimo sistemų su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų konstrukcinių parametų įtakos koeficientus įvertinančius sistemos fazinės vėlinimo trukmės, įėjimo varžos ir praleidžiamųjų dažnių juostos pločio jautrumą konstrukcinių parametų keitimui.
2. Didžiausią įtaką meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų fazinei vėlinimo trukmei turi laidininko ilgio keitimas. Sumažinus laidininko ilgį vienu procentu, sistemos fazinės vėlinimo trukmės vertė irgi sumažėja apie 1 %. Mažesnę įtaką pastebima keičiant dielektrinio pagrindo parametrus: santykinę dielektrinę skvarbą ir storį. Keičiant kitus konstrukcinius parametrus – meandro laidininko plotį, papildomo ekrano plotį ir tarpą tarp gretimų meandro juostelių plotį, sistemos fazinė vėlinimo trukmė beveik nesikeičia.
3. Didžiausią įtaką meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įžemintais iš abiejų galų įėjimo varžai turi papildomo ekrano pločio w_2 keitimas. Sumažinus w_2 vienu procentu, sistemos įėjimo varža taip pat sumažėja apie 1 %. Mažesnę įtaką pastebima keičiant tarpą tarp gretimų meandro juostelių plotį ir pagrindo santykinę dielektrinę skvarbą. Kitų konstrukcinių parametų – dielektrinio pagrindo storio ir meandro laidininko pločio, įtakos koeficientai yra dar mažesni ir siekia 0,2–0,3. Tuo tarpu meandro laidininko ilgio keitimas sistemos įėjimo varžos žemuosiuose dažniuose nekeičia.

4. Didžiausią įtaką sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui turi meandro laidininko ilgio ir pagrindo santykinės dielektrinės skvarbos keitimas. Sumažinus šiuos didžius 1 %, praleidžiamųjų dažnių juostos plotis padidėja apie 1,36 %. Nemažą įtaką praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui turi ir meandro laidininko pločio, tarpo tarp gretimų meandro laidininko pločio ir dielektrinio pagrindo storio pokyčiai. Sumažinus šiuos dydžius 1 %, praleidžiamųjų dažnių juostos plotis padidėja 0,68 %. Papildomo ekrano pločio keitimas, įtakos sistemos praleidžiamųjų dažnių juostos pločiui neturi.
5. Konstrukcinių parametrų įtakos lėtinimo sistemos elektrinėms charakteristikoms įvertinimas leido sudaryti meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais, įžemintais iš abiejų galų parametrinės sintezės algoritmą, kurio tinkamumas patikrintas atliekant keturių lėtinimo sistemų sintezę.

Bendrosios išvados

1. Pasiūlyta metodika leidžia apskaičiuoti krūvio pasiskirstymą meandrinėse struktūrose trimatėje erdvėje. Krūvio pasiskirstymo tyrimas išryškino elektromagnetinį ryšį tarp gretimų meandro juostelių, kuris yra fazinės vėlinimo trukmės dispersijos priežastis. Todėl, siekiant pagerinti meandrinės lėtinimo sistemos dispersines savybes, sukurti ir ištirti keturi meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais kompiuteriniai modeliai, kurie skiriasi trumpiklių, jungiančių papildomą ir išorinį ekranus, išdėstymo padėtimi išilgai papildomo ekrano.
2. Kompiuteriniais eksperimentais parodyta, kad papildomų ekranų įterpimas didina sistemos vėlinimo trukmę žemuosiuose dažniuose ir tokiu būdu mažina jos dispersiją. Meandrinė lėtinimo sistema su papildomais ekranais, įžemintais iš abiejų galų, pasižymi mažiausia vėlinimo trukmės dispersija. Įterpus į sistemą papildomus ekranus, įžemintus iš abiejų galų, lėtinimo sistemos vėlinimo trukmės dispersija dažnių ruože iki 1,97 GHz sumažėja apie 3,89 karto ir neviršija 0,035 ns.
3. Projektuojant meandrines lėtinimo sistemas su papildomais ekranais tikslinga atsižvelgti į kraštuose, kurių topologija gali turėti didelę įtaką sistemos savybėms, vykstančius procesus. Šiuos procesus galima

įvertinti tiriant modelius, atspindinčius pokyčius meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais gretimų juostelių sujungimo vietoje ir tarpuose ties meandro kilpomis ir atvirąja jo dalimi.

4. Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais ir modifikuotomis kraštų topologijomis tyrimas parodė, kad laidininko, jungiančio gretimas meandro juosteles, pločio keitimas didina sistemos vėlinimo trukmę. Tai paaiškinama talpinių netolygumų sudarymu meandriniame laidininke. Be to, sumažinti bendrą sistemos plotą nekeičiant jos dispersinių savybių galima didinant tarpą kraštuose ties meandro kilpomis. Esant meandrinio laidininko ilgiui 19 mm, tarpo pločiui 0,5 mm ir tarpo ilgiui 0,6 mm, sistemos plotas sumažėja apie 3 %.
5. Pasiūlyta meandrinės lėtinimo sistemos su papildomais ekranais įėjimo varžos nustatymo metodika leido kompiuteriniais tyrimais įrodyti, kad įėjimo varža kraštuose yra pastovi dažnių ruože iki 1,5 GHz, sistemos viduryje – iki 2 GHz, o jos vertė žemuosiuose dažniuose yra tokia pati kaip ir sistemos kraštuose.
6. Meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais, įžemintais iš abiejų galų konstrukcinių parametrų įtakos koeficientų nustatymas ir sistemos fazinės vėlinimo trukmės, įėjimo varžos ir praleidžiamųjų dažnių juostos pločio jautrumo konstrukcinių parametrų keitimui įvertinimas leido sudaryti meandrinių lėtinimo sistemų su papildomais ekranais, įžemintais iš abiejų galų, parametrinės sintezės algoritmą, kuris patikrintas atliekant keturių lėtinimo sistemų sintezę.

Literatūra ir šaltiniai

Abbosh, A. M. 2009. Analytical Closed-Form Solutions for Different Configurations of Parallel-Coupled Microstrip Lines, *IET Microwaves, Antennas & Propagation* 3(1): 137–147.

Abdulhadi, E. A; Abhari, R. 2012. Design and Experimental Evaluation of Miniaturized Monopole UHF RFID Tag Antennas, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 11: 248–251.

Amini, M. H.; Hassani, H. R. 2013. Compact Polarisation Reconfigurable Printed Monopole Antenna at 2.4 GHz, *Electronics Letters* 49(17): 1049–1050.

Bai, N; Gu, L; Shen, C; Feng, J; Liao, F; Sun, X. 2013. S-Shaped Microstrip Meander-Line Slow-Wave Structure for W-Band Travelling-Wave Tube, in *IEEE Fourteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Paris, France, 1–2.

Ban, Y. L.; Liu, C. L.; Li, J. L. W.; Guo, J.; Kang, Y. 2013. Small-Size Coupled-Fed Antenna With Two Printed Distributed Inductors for Seven-Band WWAN/LTE Mobile Handset, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 61(11): 5780–5784.

Bhattacharjee, P. S.; Das, S.; Chowdhury, S. K. 1995. Characteristic Impedance of Coupled Microstrip Lines, in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Atlanta, USA, 137–138.

Bondeson, A.; Rylander, T.; Ingelström, P. 2005. *Computational Electromagnetics*. New York: Springer. 244 p.

- Bulja, S.; Mirshekar-Syahkal, D.; Yazdanpanahi, M.; James, R.; Day, S. E.; Fernandez, F. A. 2010. Liquid Crystal Based Phase Shifters in 60 GHz Band, in *Proceedings of the Third European Wireless Technology Conference*, Paris, France, 37–40.
- Burklund, C. 1961. A Broadband Megawatt Traveling Wave Tube Utilizing a Ring-Loaded Meander Line Interaction Circuit, in *International Electron Devices Meeting*, Washington, USA, p. 8.
- Cantaragiu, S. 1999. Analysis of Shielded Microstrip Lines by Finite-Difference Method, in *IEEE Sixth International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Pafos, Cyprus, 565–567.
- Cerjanic, A.; Sheikman, B.; Chatterjee, I. 2012. Method of Moments Modeling of Microstrip Patch Antennas with Automatic GPU Acceleration, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, Montreal, Canada, 1–3.
- Chen, Z.; Aditya, S.; Chua, C. 2013. Analysis of Coupled Planar Helices with Straight-Edge Connections for Application in Millimeter-Wave TWTs, *IEEE Transactions on Electron Devices* 60(3): 1244–1250.
- Chiu, H. C.; Lai, C. H.; Ma, T. G. 2012. Miniaturized Rat-Race Coupler with Out-of-Band Suppression Using Double-Layer Synthesized Coplanar Waveguides, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, Montreal, Canada, 1–3.
- Chua, C.; Aditya, S.; Tsai, J.; Shen, Z. 2012. PIC Simulation for W-Band Planar Helix with Straight-Edge Connections, in *IEEE Thirteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Monterey, USA, 459–460.
- Chua, C.; Aditya, S. 2013. A 3-D U-Shaped Meander-Line Slow-Wave Structure for Traveling-Wave-Tube Applications, *IEEE Transactions on Electron Devices* 60(3): 1251–1256.
- Chua, C.; Tsai, M. J.; Aditya, S.; Tang, M.; Wee Ho, S.; Shen, Z.; Wang, L. 2011. Microfabrication and Characterization of W-Band Planar Helix Slow-wave Structure With Straight-Edge Connections, *IEEE Transactions on Electron Devices* 58(11): 4098–4105.
- Cusick, M.; Begum, R.; Gajaria, D.; Grant, T.; Kolda, P.; Legarra, J.; Meyer, C.; Ramirez-Aldana, J. L.; San Pedro, D.; Stockwell, B.; Yamane, G. 2012. 700 W Ka-Band Coupled-Cavity Traveling Wave Tubes (CCTWT) for Communication, in *IEEE Thirteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Monterey, USA, 227–228.
- Das, A.; Dhar, S.; Gupta, B. 2011. Lumped Circuit Model Analysis of Meander Line Antennas, in *11th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, Hammamet, Tunisia, 21–24.
- Deo, P.; Mirshekar-Syahkal, D.; Seddon, L.; Day, S. E.; Anibal Fernandez, F. 2013. Liquid Crystal Based Patch Antenna Array for 60 GHz Applications, in *IEEE Radio and Wireless Symposium*, Austin, USA, 127–129.
- Faudzi, N. M.; Ali, M. T.; Ismail, I.; Ya'acob, N.; Jumaat, H.; Sukaimi, N. H. M. 2013. UHF-RFID Tag Antenna with Miniaturization Techniques, in *10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Krabi, Thailand, 1–5.

- Fei, S.; Yan-Yu, W.; Xiong, X.; Hai-Rong, Y.; Yu-Bin, G.; Wen-Xiang, W. 2012. Study on a W-Band Modified V-Shaped Microstrip Meander-Line Traveling-Wave Tube, *China Physics B* 21(6): 064210
- Fooks, E. H.; Zakarevicius, R. A. 1990. *Microwave Engineering Using Microstrip Circuits*. Australia: Prentice Hall. 333 p.
- Ge, L.; Wang, J. P.; Guo, Y. X. 2010. Compact Microstrip Lowpass filter with Ultra-Wide Stopband, in *Electronics Letters* 46(10): 689–691.
- Gorur, A.; Karpuz, C. 2007. Miniature Dual-Mode Microstrip Filters, in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* 17(1): 37–39.
- Guney, K.; Erler, M.; Sagioglu, S. 1999. Artificial Neural Networks for the Characteristic Impedance Calculation of Conductor-Backed Coplanar Waveguides, in *International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, 224–228.
- Gurskas, A.; Urbanavicius, V.; Martavicius, R. 2010. Evaluation of the Microstrip Lines Connectors in the Meander Delay Line Model, *Electronics and Electrical Engineering* 99(3): 39–42.
- Hansuek, L.; Tong, C.; Jiang, L.; Vahala, K. 2012. Ultra-Low-Loss Delay Lines and Resonators on a Silicon Chip, in *IEEE Photonics Conference (IPC)*, Burlingame, USA, 518 – 519.
- Harrington, R. F. 1967. Matrix Methods for Field Problems, in *Proceedings of the IEEE* 55(2): 136–149.
- Harrington, R. F. 1968. *Field Computation by Moment Methods*. New York: Macmillan. 229 p.
- He, Z.; Zhan, G.; Li, Z. 2012. Research on Passive Meander-Lined Radio Frequency Identification Tag Antenna on Ultrahigh Frequency, in *Fifth International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, Chongqing, China, 1507–1510.
- Yang, J. G.; Yongsik, J.; Sunkyu, C.; Kyoungsoon, Y. 2006. A New Compact 3-D Hybrid Coupler Using Multi-Layer Microstrip Lines at 15 GHz, in *Proceedings of the 36th European Microwave Conference*, Manchester, UK, 25–28.
- Jinglin, S.; Yong-Zhong, X.; Sanming, H.; Lei, W.; Bo, Z. 2010. Controllable Slow-Wave Delay Line, in *IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems Symposium (EDAPS)*, Singapore, Singapore, 1–4.
- Kallmann, H. E. 1946. Equalized Delay Lines, in *Proceedings of the IRE* 34(9): 646–657.
- Katkevičius, A. 2013. Spiralinių ir meandrinių lėtinimo sistemų dažninių savybių tyrimas, *daktaro disertacija*. VGTU, Vilnius: Technika. 119 p.
- Katkevičius, A. 2010. Linijų su periodiniais netolygumais savybių tyrimas, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 2(1): 108–111.
- Khajooeizadeh, A.; Abhari, R. 2008. Compact Metal Insulator Semiconductor Delay Lines, *Journal of Applied Physics* 103(4): 044909.

- Khajooeizadeh, A.; Abhari, R. 2006. Design of Compact Meander Delay Lines on Si Substrate, in *IEEE Electrical Performance of Electronic Packaging*, Scottsdale, USA, 141–144.
- Kim, G.; Lu, A. C.; Wei, F.; Wai, L. L.; Kim, J. 2008. 3D Strip Meander Delay Line Structure for Multilayer LTCC-Based SiP Applications, in *Electronic Components and Technology Conference*, Lake Buena Vista, USA, 2081–2085.
- Kleiza, A.; Štaras, S. 1998. Meandrinių laidininkų išilginių atkarpų įtaka, iš *Elektronika'98: Tarptautinės konferencijos medžiaga*, Kaunas, 79–81.
- Kowalski, G. 1974. Coplanar Printed Meander Lines, *Arch. Elektron. Übertragungstech.* 28(6): 257–262.
- Krukonis, A. 2013. Mikrojuostelinių lėtinimo sistemų tyrimas dažniniais ir laiko metodais, *daktaro disertacija*, VGTU, Vilnius: Technika. 129 p.
- Krukonis, A.; Mikucionis, S.; Urbanavicius, V. 2013. The Influence of Non-Uniformity of the Multi-Conductor Line Parameters on Frequency Responses of the Meander Delay Line, *Electronics and Electrical Engineering* 19(6): 81–86.
- Krukonis, A.; Urbanavicius, V. 2011. Investigation of Microstrip Lines Dispersion by the FDTD Method, *Electronics and Electrical Engineering* 115(9): 51–54.
- Kui-Song, Z.; Gao, W.; Jia-Dong, X.; Jian-Ying, L. 2011. Simulation and Measurement of an Planar Two-Element Antenna Array with Metamaterials, in *Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference*, Harbin, China, 13–16.
- Lin, S.; Cui, H.; Wu, L.; Wang, W.; Sun, X. 2012. Design of Broadside-Coupled Parallel Line Millimetre-Wave Filters by Standard 0.18- μm Complimentary Metal Oxide Semiconductor Technology, *IET Microwaves, Antennas & Propagation* 6(1): 72–78.
- Lin, S.; Sun, X.; Li, L.; Wang, W.; Yang, L. 2009. Equivalent Circuit Design of Compact K-Band Bandpass Filters by Standard 0.18- μm CMOS Technology, in *Proceedings of the 4th European Microwave Integrated Circuits Conference*, Rome, Italy, 290–293.
- Ling-jiang, Z.; Bo, Z.; Zheng-hui, X.; Wei-ming, L.; Wu, R. 2012. Analysing Periodic Structures using FDTD Algorithm, in *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Shenzhen, China, 1–4.
- Liu, L.; Wei, Y.; Xu, J.; Lu, Z.; Yin, H.; Yue, L.; Gong, H.; Zhao, G.; Duan, Z.; Wang, W.; Gong, Y. 2013. A Novel Slotted Helix Slow-Wave Structure for Millimeter-Wave Traveling-Wave Tube, *Progress in Electromagnetics Research* 135: 347–362.
- Liu, L.; Wei, Y.; Xu, X.; Shen, F.; Zhao, G.; Huang, M.; Tang, T.; Wang, W. X.; Gong, Y. 2012. A Novel Helical Slow-Wave Structure for Millimeter-Wave Traveling-Wave Tube, in *5th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM)*, Harbin, China, 312–315.
- Лошаков, Л. Н.; Ольдерогге, Е. Б. 1948. К теории коаксиальной спиральной линии, *Радиотехника* 3(2): 11–20.
- Лошаков, Л. Н.; Шумская Л. Н.; Иванова, Н. Е. 1980. К расчету медленной волны в спиральной линии с эллиптическим поперечным сечением, *Радиотехника и электроника* 25(11): 2286–2291.

Ma, Z. L.; Jiang, L. J.; Xi, J.; Ye, T. T. 2012. A Single-Layer Compact HF-UHF Dual-Band RFID Tag Antenna, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 11: 1257–1260.

Martavičius, R. 1996. *Elektrodinaminės planarinės lėtinimo sistemos plačiajuosčiams elektroniniams prietaisams*. Vilnius: Technika. 264 p.

Martavičius, R.; Jurjevas, A. 1999. Meandrinių lėtinimo sistemų su šukų pavidalo papildomais ekranais modelis, *Elektronika ir Elektrotechnika* 21(3): 53–57.

Martavičius, R.; Jurjevas, A. 2000. Plačiajuosčių mikrojuostelių meandrinių lėtinimo sistemų savybės, *Elektronika ir Elektrotechnika* 28(5): 43–48.

Martavičius, R.; Jurjevas, A. 2001. Patikslinti plačiajuosčių meandrinių lėtinimo sistemų modeliai, *Elektronika ir Elektrotechnika* 34(5): 38–43.

Martavičius, R.; Urbanavičius, V. 1996. Netolygaus žingsnio daugialaidės linijos, *Elektronika ir elektrotechnika* 8(4): 24–30.

Martavičius, R.; Urbanavičius, V. 1997. Meandrinių lėtinimo sistemų banginė ir įėjimo varža, *Elektronika ir elektrotechnika* 10(1): 14–17.

Martavičius, R.; Urbanavičius, V. 1998. Ekranų įtaka mikrojuostelių meandrinių vėlinimo linijų savybėms, *Elektronika ir elektrotechnika* 16(3): 42–46.

Martavičius, R.; Urbanavičius, V. 1999. Žingsnio netolygumo įtaka meandrinių lėtinimo sistemų savybėms, *Elektronika ir elektrotechnika* 21(3): 65–68.

Mittal, S.; Kaushik, B. K.; Yadav, K. L.; Sharma, D. K.; Majumder, M. K. 2012. Cross-talk Effect in Coupled Interconnect Lines Using FDTD Method, in *International Conference on Communications, Devices and Intelligent Systems (CODIS)*, Kolkata, India, 365–368.

Nara, S.; Koshiji, K. 2006. Study on Delay Time Characteristics of Shielded Meander Lines, in *17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Singapore, 324–327.

Nara, S.; Koshiji, K. 2007. Characteristics of Phase-Delay Time on Meander Differential Signal Lines and a Shielded Meander Differential Signal Line, in *18th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Munich, Germany, 217–220.

Navickas, R. 2013. Self-Formation Processes in High-Speed Integrated Circuits, in *31st Norchip Conference*, Vilnius, Lithuania, 1–8.

Nguyen, L. B.; Antonsen, T. M. Jr.; Nusinovich, G. S. 2013. Open Planar Sheath Slow-wave System, in *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*, San Francisco, USA, 1–2.

Niklas, W. F.; Wimpffen, J. 1958. Oscilloscope Tube with Traveling Wave Deflection System and Large Field of View, *Journal of the British Institution of Radio Engineers* 18(11): 653–660.

Olaode, O. O.; Devereux Palmer, W.; Joines, W. T. 2012. Characterization of Meander Dipole Antennas with a Geometry-Based, Frequency-Independent Lumped Element Model, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 11: 346–349.

- Piekarz, I.; Sorocki, J.; Wincza, K.; Gruszczynski, S.; Muller, J.; Welker, T. 2012. Meandered Coupled-Line Single-Section Directional Coupler Designed in Multilayer LTCC Technology, in *20th Telecommunications Forum (TELFOR)*, Belgrade, Serbia, 983–986.
- Pomarnacki, R. 2011. Elektrodinaminių lėtinimo įtaisų tyrimas taikant lygiagrečiąsias kompiuterines sistemas, *daktaro disertacija*, VGTU, Vilnius: Technika. 123 p.
- Pomarnacki, R.; Krukonis, A.; Urbanavičius, V. 2010. Parallel Algorithm for the Quasi-TEM Analysis of Microstrip Multiconductor Line, *Electronics and Electrical Engineering* 101(5): 83–86.
- Prodromakis, T.; Papavassiliou, C.; Konstantinidis, G. 2007. A Miniaturized Delay Line Based on Slow-Wave Substrates, in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, New Orleans, USA, 369–372.
- Radhakrishnan, K.; Chew, W. C. 2000. Efficient Analysis of Microstrip Structures with Multiple Discontinuities, in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* 1: 124–127.
- Rashed-Mohassel, J. 1991. The Radiation Characteristics of a Resonant Meander Line Section as a Monopole, *Microwave and Optical Technology Letters* 4(12): 537–540.
- Rautio, J. C.; Harrington, R. F. 1987. An Electromagnetic Time-Harmonic Analysis of Shielded Microstrip Circuits, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 35(8): 726–730.
- Rosales, O. S.; Suster, D. 1995. Finite-Difference Computation of the Characteristic Impedance of Unbounded Striplines and Microstrip Line, in *Proceedings of the First IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*, Caracas, Venezuela, 323–327.
- Sadiku, M. N. O. 2001. *Numerical techniques in electromagnetics*. New York: CRC Press. 760 p.
- Sadiku, M. N. O.; Musa, S. M.; Nelatury, S. R. 2007. Comparison of Approximate Formulas for the Capacitance of Microstrip Line, in *Proceedings of IEEE SoutheastCon*, Richmond, USA, 427–432.
- Sato, R. 1971. A Design Method for Meander-Line Networks Using Equivalent Circuit Transformations, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 19(5): 431–442.
- Sato, Y.; Campelo, F.; Igarashi, H. 2013. Meander Line Antenna Design Using an Adaptive Genetic Algorithm, *IEEE Transactions on Magnetics* 49(5): 1889–1892.
- Sengele, S.; Jiang, H.; Booske, J. H.; Kory, C. L.; van der Weide, D. W.; Lawrence Ives, R. 2009. Microfabrication and Characterization of a Selectively Metallized W-Band Meander-Line TWT Circuit, *IEEE Transactions on Electron Devices* 56(5): 730–737.
- Sheng, X.-Q.; Song, W. 2012. *Essentials of Computational Electromagnetics*. Singapore: John Wiley & Sons. 352 p.
- Shu-Yin, H.; Wen-Jiao, L. 2012. A Delay Line Based on Synthesized Coplanar Waveguide, in *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Shenzhen, China, 1–4.

- Skudutis, J.; Daškevičius, V.; Garšva, E. 2004. Microwave Office programų paketo taikymo lėtinimo sistemoms tirti patirtis, *Elektronika ir elektrotechnika* 52(3): 68–74.
- Skudutis, J.; Daškevičius, V. 2001. Bendraašių spiralių lėtinimo sistemos savybių tyrimas, *Elektronika ir elektrotechnika* 34(5): 32–37.
- Skudutis, J.; Daškevičius, V. 2002. Lėtinimo ir kreipimo sistemos įėjimo varžos tyrimas, *Elektronika ir elektrotechnika* 42(7): 13–17.
- Skudutis, J.; Daškevičius, V. 2006. Spiralinės lėtinimo sistemos savybių tyrimas programų paketu MicroWave Studio, *Elektronika ir elektrotechnika* 65(1): 38–42.
- Soliman, E. A.; Sallam, O.; De Raedt, W.; Vandenbosch, G. A. E. 2012. Miniaturized RFID Tag Antenna Operating at 915 MHz, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* 11: 1068–1071.
- Sultan, K. S.; Abdullah, H. H.; Abdullah, E. A.; Hashish, E. A. 2012. Low SAR, Compact and Multiband Antenna for Mobile and Wireless Communication, in *Middle East Conference on Antennas and Propagation (MECAP)*, Cairo, Egypt, 1–5.
- Sumathy, M.; Datta, S. K.; Kumar, L. 2013. Folded Meander-Line Slow-Wave Structure for Millimeter-Wave TWTs, in *IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference*, Paris, France, 1–2.
- Ширман, Я. Д.; Вайнорис, З. А. 1959. Основы теории спиральной линии задержки, *Радиотехника и электроника* 4(9): 1486–1492.
- Štaras, S.; Skudutis, J. 1996. The Influence of Dielectric Holders on Characteristics of Meander Slow-Wave Structure, *Baltic Electronics* 2(1): 37–38.
- Štaras, S. 2008. *Įvadas į skaitmeninius elektrodinamikos metodus ir jų taikymą*. Vilnius: Technika. 186 p.
- Štaras, S.; Martavičius, R.; Skudutis, J.; Urbanavičius, V.; Daškevičius, V. 2010. Plačiajuosčių lėtinimo įtaisų modeliavimas ir taikymas: monografija. Vilnius: Technika. 442 p.
- Štaras, S.; Martavičius, R.; Skudutis, J.; Urbanavičius, V.; Daškevičius, V. 2012. *Wide-band slow-wave systems: simulation and application*. New York: Taylor & Francis Group. 460 p.
- Štaras, S.; Burokas, T. 2003. Nevienalyčių spiralinių sistemų savybės, *Elektronika ir Elektrotechnika* 43(1): 17–20.
- Štaras, S.; Burokas, T. 2004. Lėtinimo-kreipimo sistemų ir jų jungių modeliavimas ir tobulinimas, *Elektronika ir Elektrotechnika* 50(1): 9–15.
- Štaras, S.; Burokas, T. 2006. Kvazisimetrinės spiralinės kreipimo sistemos modelis ir savybės, *Elektronika ir Elektrotechnika* 66(2): 63–68.
- Tanaka, H.; Banba, N.; Arai, S.; Nishikawa, T. 1994. 2 GHz One Octave-Band 90 Degree Hybrid Coupler Using Coupled Meander Line Optimized by 3-D FEM, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, San Diego, USA, 903–906.
- Tascone, R.; Savi, P.; Trinchero, D.; Orta, D. 2000. Scattering Matrix Approach for the Design of Microwave Filters, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques* 48(12): 423–430.

- Thom, A.; Apelt, C. J. 1961. *Field Computations in Engineering and Physics*. London: D. Van Nostrand. 165 p.
- Trani, P.; Antoine, P. 2012. MPM for ECM systems, in *IEEE Thirteenth International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Monterey, USA, 149–150.
- Umayahara, Y.; Nishikawa, Y. 2003. *Glass Ceramics dielectric material and sintered glass ceramics*. USA Patent No. 6649550
- Urbanavičius, V.; Martavičius, R. 2006. Model of the Microstrip Line with a Non-Uniform Dielectric, *Electronics and Electrical Engineering* 67(3): 55–60.
- Ureel, J.; De Zutter, D. 1996. Shape Sensitivities of Capacitances of Planar Conducting Surfaces Using the Method of Moments, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 44(2): 198–207.
- Vainoris, Z. 2004. *Bangų elektronikos pagrindai*. 1-oji laida. Vilnius: Technika. 513 p.
- Вайнорис, З.; Кирвайтис, Р.; Штарас, С. 1986. *Электродинамические задерживающие и отклоняющие системы*. Вильнюс: Мокслас. 266 с.
- Wang, J.; Xu, L. J.; Zhao, S.; Guo, Y. X.; Wu, W. 2010. Compact Quasi-Elliptic Microstrip Lowpass Filter with Wide Stopband, *Electronics Letters* 46(20): 1384–1385.
- Wang, S.; Gong, Y.; Hou, Y.; Wang, Z.; Wei, Y.; Duan, Z.; Cai, J. 2013. Study of a Log-Periodic Slow Wave Structure for Ka-Band Radial Sheet Beam Traveling Wave Tube, *IEEE Transactions on Plasma Science* 41(8): 2277–2282.
- Wang, J.; Wei, B.; Cao, B.; Zhang, X.; Guo, X.; Song, X. 2013. A UHF-Band Narrow-Band HTS Bandpass Filter With Wide Stopband Using Interdigital Structure, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 23(6): 1502108.
- Watanabe, Y.; Watanabe, K.; Igarashi, H. 2011. Optimization of Meander Line Antenna Considering Coupling Between Nonlinear Circuit and Electromagnetic Waves for UHF-Band RFID, *IEEE Transactions on Magnetics* 47(5): 1506–1509.
- Wei-Shan, S.; Kye-Kas, S.; Chang, R. W.-Y.; Oswal, M.; Ling-Biao, W. 2009. Comprehensive Analysis of Serpentine Line Design, *IEEE Asia Pacific Microwave Conference APMC2009*, Singapore, 1285–1288.
- Wheeler, H. A. 1964. Transmission-line properties of parallel wide strips by a conformal-mapping approximation, *IEEE Microwave theory and techniques* 12(3): 280–289.
- Wu, J.; Lou, J.; Li, M.; Yang, G.; Yang, X.; Adams, J.; Sun, N. X. 2012. Compact, Low-Loss, Wideband, and High-Power Handling Phase Shifters with Piezoelectric Transducer-Controlled Metallic Pertruber, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 60(6): 1587–1594.
- Xu, L.; Yang, Z. H.; Li, J. Q.; Li, B. 2012. Accurate and Fast Finite-Element Modeling of Attenuation in Slow-Wave Structures for Traveling-Wave Tubes, *IEEE Transactions on Electron Devices* 59(5): 1534–1541.
- Zhewang, M.; Miyata, A.; Yamashita, E. 1996. Analysis of Compensated Structures in Planar Transmission Lines Using the FDTD Method Incorporating Triangular Subcells, in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, San Francisco, USA, 1015–1018.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Metlevskis, E.; Urbanavičius, V. 2011. Analysis of Charge Distribution on Rectangular Microstrip Structures, *Acta Physica Polonica A*. 119(4): 503–508. ISSN 0587–4246. (Thomson Reuters Web of Knowledge)

Metlevskis, E. 2012. Planarijų plačiajuosčių lėtinimo sistemų taikymo sritys, *Mokslas – Lietuvos ateitis* 4(1): 85–88. ISSN 2029–2341. (ICONDA, Gale®, ProQuest, EBSCOhost, IndexCopernicus)

Metlevskis, E.; Martavičius, R. 2012. Computer Models of Meander slow-wave system with additional shields, *Electronics and electrical engineering*. 119(3): 61–64. ISSN 1392–1215 (Thomson Reuters Web of Knowledge).

Metlevskis, E.; Martavičius, R. 2014. Frequency Characteristics of the Input Impedance of Meander Slow-wave System with Additional Shields, *Electronics and electrical engineering*. 20(4): 59–62. ISSN 1392–1215 (Thomson Reuters Web of Knowledge).

Straipsniai kituose leidiniuose

Metlevskis, E.; Martavičius, R. 2012. Calculation of Characteristics of Meander Slow-wave System with Additional Shields, in *EMD'2012 proceedings of the XXII interna-*

tional conference on electromagnetic disturbances: 87–90. ISSN 1822–3249. ISBN 9786094572609.

Summary in English

Introduction

The investigated problem

In a common meander slow-wave system phase delay time is highly dependent on the frequency of propagated signal – the higher the frequency the higher the phase delay time. The reason for that is the frequency dependent electromagnetic interaction between adjacent meander strips. In order to reduce the electromagnetic interaction, additional shields are inserted between adjacent meander conductors and connected to an external shield by vias.

Analytical analysis methods are often chosen for an analysis of meander slow-wave systems. Such methods don't take into account the ongoing processes on the edges and ends of meander conductor. Processes can be taken into account by analyzing models of meander slow-wave systems that are based on numerical methods.

Evaluation of influence of additional shields on frequency properties of meander slow-wave systems is discussed in dissertation.

Importance of the thesis

Meander slow-wave systems are widely used in antennas, monolithic microwave integrated circuits and high speed digital devices. Filters, couplers and phase shifters can be made using meander slow-wave systems, whose fabrication process is simpler and cheaper, compared to common waveguide structures.

First meander slow-wave system was designed in 1960's. Their models were based on analytical methods. For example models based on equivalent circuit method were made solving electromagnetic problem with various assumptions. However this method doesn't allow to estimate the structure of electric field in the slow-wave system, moreover it can only be used in limited frequency range. Later models of different complexity were based on multiconductor line method. Using this method a system of infinite length is often modeled, which doesn't take into the account the effects on the ends of the system. At the end of XX century with the improvement of computers, first commercial electromagnetic field solvers based on numerical methods were created. Such software can be applied for design of slow-wave systems and allows creating precise models of complex slow-wave systems.

In a common meander slow-wave system phase the frequency dependent electromagnetic interaction between adjacent meander strips has an influence on phase delay time. In order to reduce the electromagnetic interaction, additional shields are inserted between adjacent meander conductors and connected to an external shield by vias. Structure of such meander slow-wave system is complex, therefore it is purposeful to design them using models based on numerical methods.

Propagation processes of electromagnetic waves on the edges and ends of slow-wave system with additional shields have influence on its dispersive properties. Moreover in literature there are no data about frequency response of input impedance and S-parameters of such systems. Therefore it is relevant to create new models of meander slow-wave systems with additional shields which allow extending the limits of their operating frequency, reducing the dispersion of phase delay time and evaluating the compatibility of a system with a signal tract.

The object of research

Object of research – planar meander slow-wave system with additional shields, their models and methods of analysis and synthesis.

Goal of the thesis

Goal of the thesis is to investigate the planar meander slow-wave systems with additional shields, to create new models and their investigation techniques which allow evaluating the processes on the edges and ends of slow-wave system, creating technique for parametric synthesis of such systems.

Tasks of the thesis

To achieve the goal of the thesis, following tasks have to be solved:

1. Create a technique for modeling of 3D distribution of electric field in meander slow-wave system using method of moments and investigate the structure of electric field in planar meander slow-wave systems.
2. Create models of planar meander slow-wave systems with additional shields using dedicated software.

3. Investigate the ongoing effects on the edges and ends of planar meander slow-wave systems with additional shields and their influence on system's dispersive properties and frequency response of input impedance.
4. Create a technique for parametric synthesis of planar meander slow-wave systems with additional shields.

Research methodology

Throughout this work method of moments is used for solution of electrodynamical tasks. Models of meander slow-wave systems with additional shields are implemented and analyzed using moment method based Sonnet[®] software, Matlab[®] is used for data processing.

Importance of scientific novelty

Dissertation provides following novelty in the field of electrical and electronics engineering:

1. A technique based on moment method for modeling of 3D distribution of electrical field in planar meander slow-wave systems is created and investigation results are obtained.
2. Models of planar meander slow-wave systems with additional shields are created and implemented using moment method based software and influence of ongoing effects on the edges and ends of such systems on their dispersion of phase delay time is investigated.
3. A technique for determination of input impedance of meander slow-wave system with additional shields using moment method based software Sonnet[®] is created and frequency properties of input impedance are investigated.
4. Analysis of sensitivity of electrical properties to the changes of constructive parameters of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges is performed, influence coefficients are obtained and technique for parametric synthesis is created.

Practical significance of achieved results

A technique for modeling of 3D distribution of electric field in meander slow-wave system using method of moments and investigate the structure of electric field in planar meander slow-wave systems is created. Models of planar meander slow-wave systems with additional shields which allow taking into account the processes of propagation of electromagnetic waves on their edges and ends are created. Technique for determination of frequency response of input impedance of meander slow-wave system with additional shields which is needed for compatibility of a system with a signal tract is created. Technique of parametric synthesis which allow to synthesize the constructive parameters of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edged in accordance with systems electrical parameters.

The Defended statements

1. When additional shields are inserted in the meander slow-wave system and are grounded at both edges, dispersion of phase delay time of a system is reduced and in the frequency range up to 1.97 GHz is less than 0.035 ns.
2. Increase of a gap in the area where meander conductors forms a loop increases a phase delay time, which in the lower frequencies can be equalized by reducing a meander conductor length $2A$. Thus, total area of a system is reduced, while its dispersive properties are unchanged. For given length of a meander conductor 19 mm, gap width of 0.5 mm and gap length of 0.6 mm, systems area is reduced about 3 %.
3. Proposed technique is applicable for determination of input impedance at the edges and in the center of planar meander slow-wave system with additional shields. Input impedance at the edges of a system is permanent in the frequency range up to 1.5 GHz. In the center input impedance is permanent in the frequency range up to 2 GHz and its value in lower frequencies is the same as at the edges of a system.
4. A synthesis technique based on influence coefficients of constructive parameters of meander slow-wave system with additional shield grounded at both edges allows an automatic design of such systems.

Approval of the results

Five articles are published on the subject of dissertation – three in scientific journals included in Thomson Reuters Web of Knowledge list (Metlevskis, Urbanavičius 2011; Metlevskis, Martavičius 2011; Metlevskis Martavičius 2014); one in scientific journal listed in other international databases (Metlevskis 2012); one paper in reviewed international conference proceedings (Metlevskis, Martavičius 2012).

Dissertation research results have been announced in eight scientific conferences in Lithuania and abroad.

The structure of dissertation

Dissertation consists of introduction, four chapters, general conclusions, lists of references and author's publications on the subject of dissertation and summary in English. The total scope of dissertation – 116 pages, 38 indexed equations, 50 pictures, 7 tables, 115 references have been used.

1. Review of broadband planar slow-wave systems and their methods of analysis

In microwave devices, interaction of electromagnetic field and electrons is used. In traveling wave tubes velocities of electromagnetic wave and electron beam have to be matched. Since a velocity of electrons is lower than a speed of light, in traveling wave devices, slow waves are used to match a velocity of electrons. Slowing of waves is achieved by using devices called slow-wave system.

Broadband planar slow-wave systems are widely used in delay lines and traveling wave tubes. Delay lines in turn can be used for signal synchronization in high speed Digital circuits. Slow-wave system is an essential part of a traveling-wave tube. Because of its high power and efficiency, traveling wave tubes find many applications in terrestrial and satellite communications systems, electronic warfare.

In microwave devices, helical and meander slow-wave systems are most commonly used. Meander slow-wave systems are of a special interest, because they provide compact size and high efficiency in wide frequency range. Meander slow-wave system find applications in antennas, monolithic microwave integrated circuits, filters and couplers.

When investigating complex electro-dynamical structures it is very important to choose a right numerical method. In investigation of broadband meander slow-wave systems, finite difference time domain (FDTD) and moment methods (MoM) are often used. FDTD is more flexible, easily programmable, but requires more computer resources than MoM. Because of its flexibility, FDTD is more suitable for solving scattering problems. When analyzing complex structures such as meander slow-wave systems with additional shields, it is purposeful to use a moment method, as investigation shows that moment method is more accurate.

2. Models of meander slow-wave systems with additional shields

A meander slow-wave system is shown in Figure S1. It consists of a conductor which has a shape of meander. Conductor is placed on a dielectric substrate with the permittivity ϵ_r and a thickness h . Bottom of the substrate is covered by a conductive layer which has a function of a grounded external shield. A single conductor has a length of $2A$ and width w , a gap between neighboring conductors is s .

Fig. S1. Meander slow-wave system: 1 – meander-shape conductor; 2 – dielectric substrate of relative permittivity ϵ_r ; 3 – external shield

In order to reduce the electromagnetic interaction, additional shields are inserted between adjacent meander conductors and connected to an external shield by vias.

To improve the dispersive properties and increase a bandwidth of meander slow-wave system, four models of meander slow-wave systems, whose topologies are shown in Figure S2, are created and investigated. From Figure S2 it can be seen that created models of meander slow-wave systems differ in position of via along the additional shield.

Fig. S2. Topology of meander slow-wave system with additional shields grounded at: a) – one edge; b) – center; c) – point between the edge and center; d) – both edges; 1 – meander-shape conductor; 2 – additional shield; 3 – grounded via

Investigation of meander slow-wave system with additional shields was performed using Sonnet[®] software. Slow-wave system has a rectangular shape; it consists of 7 parallel conductors which are connected in a shape of meander and 6 additional shields which are connected by vias at both ends to an external shield. Strips of a meander together with additional shields are placed on a dielectric plate of permittivity ϵ_r . Bottom of a plate is covered with metal which forms an external shield. Above the dielectric plate is air. Therefore cross-section of a system contains two layers of dielectric. Bottom layer has a permittivity of $\epsilon_r = 7.3$, which is a glass ceramic dielectric material. Top layer consists of air which has a relative dielectric permittivity of 1. Input and output of a sys-

tem were placed at the center of meander. Initial dimensions of a meander slow-wave system are: $2A = 19.6$ mm, $w_1 = 0.5$ mm, $w_2 = 0.25$ mm, $w_3 = 0.2$ mm, $h = 0.5$ mm, $s_1 = 0.65$ mm, $s_2 = 0.2$ mm. During the investigation perfect conductors were used. So investigated system has no loss.

In the process of designing meander slow-wave systems with additional shields it is purposeful to take into account the ongoing processes on the edges of a system because their topology can have a large impact on system's characteristics. For that matter, models which reflect changes in the areas where adjacent meander conductors connect are created. Also models with different topologies in the area where meander strips are open and form a loop are created. To determine an impact of topology of meander edges on dispersion properties of a slow-wave system, three different topologies of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges, shown in Figure S3, were investigated.

Fig. S3. Investigation of different topologies of meander edges: a) change of a width of a conductor connecting adjacent meander strips; b) gap increase in the area where meander strips form a loop; c) gap increase in the area where meander strips are open

For determination of compatibility of slow-wave system with the signal tract, system's input impedance is often used instead of its characteristic impedance. However there is still a lack of information about input impedance and S-parameters of meander slow-wave systems with additional shields, therefore a technique for determination of input impedance of such systems using Sonnet[®] is discussed below.

The input impedance of meander slow-wave system with additional shields in the lower frequencies was determined at two points: on the edge of a system and in the center of a system.

Reflections in the path with the slow-wave system do not exist if the internal resistance of the signal source and load resistance are matched with system's input impedance in the lower frequencies. Thus, at a selected low frequency f , system's input impedance can be determined by changing the signal source and load resistances until minimum value of S_{11} parameter is obtained. So when load and source resistances are matched with slow-wave system's impedance, least reflections are obtained since S_{11} parameter is known as the input reflection coefficient. In such way input impedance $Z_{IN}(f)$ in the lower frequencies on the edge of the slow-wave system is determined.

For determination of the input impedance in the lower frequencies in the center of a system, a signal is sent through a port in the center of a system while both ends of a system are loaded by resistances that are equal to slow-wave system's input impedance in the lower frequencies. Since signal is sent simultaneously in both directions the resistance of signal source must be equal to half of the system's input impedance in the lower frequencies. Therefore it must be equal to the half of the load resistance $\underline{Z}_g = \underline{Z}_a/2$, where Z_a is matched load resistance.

Fig. S4. Rectangular section of meander slow-wave system

In order to reflect the charge distribution in the area of meander slow-wave system where two adjacent strips are connected and point up the electromagnetic interaction between two adjacent strips, techniques for evaluation of 3D distribution of electrical field should be created.

A model of rectangular section of meander slow-wave system is shown in Figure S4. In the model, the section is divided into square sub-areas of size $a \times a$. According to the example of model shown in Figure S4, the number of sub-areas is 6, so total length of the section is $L = 2a$ and width is $W = 3a$. Ground plane is modeled placing the mirror charges at a distance of $2h$ from their original charges. It is also can be noted that $h = a$.

Mathematical model of rectangular section of meander slow-wave system, based on the MoM, will consist of system of linear equations which describe dependence of potentials of sub-areas on their charge densities ρ_{ij} . Using the MoM and principle of partial images, the influence of every sub-area charge on the potential at the certain point of the section can be obtained by completing three steps:

1. Find self-potential at point P_{ii} that is raised by the charge q_{ii} and its first partial image situated in the same point. It can be shown that potential at the center of uniformly charged square-shaped plate of size $a \times a$ can be calculated as

$$\varphi_{0,0} = \frac{a\rho_{s0}}{\pi\varepsilon} \ln(1 + \sqrt{2}), \quad (\text{S1})$$

so

$$\varphi(P_{ii} : P_{ii}) = \frac{a(1+K)q_{ii}}{\pi\varepsilon_0} \ln(1 + \sqrt{2}), \quad (\text{S2})$$

where K is the reflection coefficient, which is dependent on relative permittivity of a medium:

$$K = -\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1}. \quad (\text{S3})$$

2. Find potential that is raised by other partial images of charge q_{ii} :

$$\varphi(P_{ii} : P_{ii}) = -\frac{a^2 K(1-K^2)q_{ii}}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{n=1}^{\infty} K^{2(n-1)} \frac{1}{2nh}, \quad (\text{S4})$$

where variable n represents n -th partial image.

3. Find potential which is raised by the mirror charge $-q_{ii}$ and all its partial images which are situated in the point $-P_{ii}$:

$$\varphi(P_{ii} : -P_{ii}) = -\frac{a^2(1-K^2)q_{ii}}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{n=1}^{\infty} K^{2(n-1)} \frac{1}{(2n-1)h}. \quad (\text{S5})$$

To find a potential at point P_{ij} that is raised by the charge q_{mn} situated in the point P_{mn} , equations of steps 1–3 must be changed. Equation (S2) changes to

$$\varphi(P_{ij} : P_{mn}) = \frac{a^2(1+K)q_{mn}}{4\pi\varepsilon_0} \frac{1}{l}, \quad (\text{S6})$$

where $l = \sqrt{(i-m)^2 + (j-n)^2}$ is the distance between points P_{ij} and P_{mn} . Equation (S4) changes to:

$$\varphi(P_{ij} : P_{mn}) = -\frac{a^2 K(1-K^2)q_{mn}}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{n=1}^{\infty} K^{2(n-1)} \frac{1}{\sqrt{l^2 + (2nh)^2}}. \quad (\text{S7})$$

Equation (S5) changes to:

$$\varphi(P_{ij} : P_{mn}) = -\frac{a^2(1-K^2)q_{mn}}{4\pi\varepsilon_0} \sum_{n=1}^{\infty} K^{2(n-1)} \frac{1}{\sqrt{l^2 + [(2n-1)h]^2}}. \quad (\text{S8})$$

After the calculations are performed, a matrix equation can be written:

$$[\mathbf{1}] = [\mathbf{A}] \times [\mathbf{q}], \quad (\text{S9})$$

and unknown charges can be obtained solving equation (S9):

$$[\mathbf{q}] = [\mathbf{A}]^{-1} \times [\mathbf{1}], \quad (\text{S10})$$

where the element A_{ij} of matrix $[\mathbf{A}]$ represents the potential of i -th sub area that is raised by the charge in the j -th sub-area.

3. Characteristics of meander slow-wave system with additional shields

The comparison of phase delay time dependencies on the frequency of proposed models is shown in Figure S5.

From Figure S5 it can be seen that insertion of additional shields increases a phase delay time in lower frequencies and decreases its dispersion. When additional shields are grounded at one edge (Fig. S5, curve 5), bandwidth of a system becomes 1.17 times wider compared to a system without additional shields and equals 1.36 GHz. So, in the boundaries of bandwidth, phase delay time dispersion is decreased by 1.74 times. Moreover it can be noticed that when additional shields are inserted and grounded at one edge, in the frequency range of 1.4–1.8 GHz resonance phenomena can be observed and slow-wave system acts like a stop-band filter. After the resonance phenomena, slow-wave system can be used in the frequency range up to 2.2 GHz.

Frequency response of a phase delay time when additional shields are grounded at the point between the edge and the center is shown in Figure S5, curve 3. It can be seen that when the grounding point of additional shields is shifted by 5 mm towards the center of a system, phase delay time is increased and its dispersion is decreased. Bandwidth of such system is $\Delta F = 1.3$ GHz. So compared to a system without additional shields, bandwidth is increased by 1.12 times and dispersion of phase delay time in the boundaries of a bandwidth is decreased by 1.55 times. Moreover, when additional shields are grounded at the point between the edge and the center the resonant frequency increases. Therefore the frequency range where resonance phenomena can be observed is also shifted to higher frequencies of 1.85–2.45 GHz. In the frequency range from 2.5 GHz deviation of frequency response of phase delay time from linear phase is more than 0.35 radians. Therefore it is not recommended to use this system in higher frequencies.

Figure S5, curve 2 shows the phase delay time dependence on the frequency of meander slow-wave system with an additional shield grounded at the center. It can be seen that when additional shields are grounded in the center, phase delay time in lower frequencies is increased. Compared to a system without additional shields, bandwidth is decreased to 1.09 GHz and dispersion of a phase delay time in that frequency range is increased about 1.1 times. Moreover, a resonance phenomenon is shifted to even higher frequencies starting at 2.8 GHz. Generally in the boundaries of a bandwidth, alterations of phase delay time of both systems is similar, however grounding of additional shields in the center increases phase delay time from 0.86 to 0.91 ns, or about 6 %.

Fig. S5. Comparison of delay time of meander slow-wave systems: 1 – without additional shields; with additional shields grounded at: 2 – center; 3 – point between the edge and the center; 4 – both edges; 5 – one edge

Frequency response of a phase delay time when additional shield are grounded at both edges is shown in Figure S5, curve 4. It can be seen that grounding of additional shields at both edges increases phase delay time in lower frequencies and resonant phenomena starts at 2.8 GHz. Calculated bandwidth of such system is $\Delta F = 1.97$ GHz. Phase delay time dispersion in that frequency range is $\Delta t_v = 0.035$ ns. Phase delay time of a meander slow-wave system without additional shields in the same frequency range is higher and equals 0.135 ns. So insertion of additional shields grounded at both edges decreases phase delay time dispersion by 3.89 times in the frequency range up to 1.97 GHz.

In summary meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges can be characterized as having best dispersive properties. Such system has a least phase delay time dispersion. Moreover it has a widest bandwidth and can be used in a frequency range up to 1.97 GHz.

Values of phase delay time in lower frequencies and bandwidth when width w_3 of a conductor connecting adjacent meander strips is changed (Fig. S3, a) is shown in Table S1. It can be seen that when width w_3 is changed, phase delay time of a system is increased. When width of a connecting conductor is reduced by 8 times, phase delay time is increased by 0.8 %. However, reduction of w_3 narrows a bandwidth by 7 % or up to 1.82 GHz. An increase of phase delay time remains constant in boundaries of a bandwidth. Meanwhile, when width of a connecting conductor is increased by 3 times, phase delay time is increased by 1.4 %, but bandwidth is narrowed even more – by 13% or up to 1.72 GHz. Hence a bigger impact is observed when a width w_3 of a connecting conductor is increased. This effect can be explained by a formation of a capacitive inequality in a meander shape conductor.

Table S1. Values of phase delay time in lower frequencies and bandwidth of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges when width w_3 of a conductor connecting adjacent meander strips is changed

Slow-wave system	w_3 , mm	$t_{v\check{Z}D}$, ns	ΔF , GHz
1	0.2	0.907	1.97
2	0.025	0.914	1.82
3	0.6	0.919	1.72

Phase delay time dependence on frequency when a width of a gap is increased in the area where strips of meander form a loop (Fig. S3, b) is shown in Figure S6. It can be seen that when Δs , and naturally a gap is increased, phase delay time is also increased. When width of a gap is increased by 1.5 times, phase delay time is increased by 0.8 %, whereas increase of a gap by 2.5 times raises a phase delay time by 2.7 %. Such an increase of a phase delay times can be observed over all examined frequency range. However such change in topology narrows bandwidth: in the first case bandwidth is narrowed by 8.2 % or up to 1.81 GHz, in the second case – by 12.2 % or up to 1.73 GHz.

Phase delay time which is increased due to the changes in topology can be equalized by reducing the length of a meander conductor $2A$. Frequency response of a reduced phase delay time is shown in Figure S6, curve 4. In such case, dispersive characteristics are not improved; however a total area of a system can be reduced. For example, when length of a meander conductor $2A$ is reduced to 19 mm, total area of a system is reduced by 3 %. This improvement can be important when applying meander slow-wave systems in integrated circuits.

Fig. S6. Phase delay time dependence on frequency when a width of a gap is increased in the area where strips of meander form a loop: 1 – system with initial dimensions; 2 – $\Delta s = 0.3$ mm, $\Delta A = 0.6$ mm, $2A = 19.6$ mm; 3 – $\Delta s = 0.5$ mm, $\Delta A = 0.6$ mm, $2A = 19.6$ mm; 4 – $\Delta s = 0.5$ mm, $\Delta A = 0.6$ mm, $2A = 19$ mm

Contrariwise to the changes of a gap in the area where strips of meander form a loop, changing a gap in the area where meander strip are open (Fig. S3, c) decreases a phase delay time. However a much less effect on the dispersion properties is observed. For example when a width of a gap is increased by 2.5 times a phase delay time is only reduced by 0.3 %.

Results of investigation of frequency characteristics of input impedance of meander slow-wave system with additional shield are presented in Figure S7. Curves 1 and 2 represent a frequency response of the input impedance on the edges of a meander slow-wave system with additional shields. Curve 1 represents a resistance R and curve 2 a reactance X of the input impedance.

It can be seen that resistance of the input impedance on the edges of investigated system remains almost constant in a frequency range up to 1.5 GHz and has a value of 48 Ω . In the higher frequencies fluctuations of the input impedance can be observed. Fluctuations of input impedance are caused by effect on the edges of a system and electromagnetic interaction between adjacent meander strips. Because of that effects incompatibility between system's input impedance and impedance of generator and load occur. Moreover it should be noted that reactance of the input impedance has a very small value on the whole investigated frequency range so the input impedance on the edges of a meander slow-wave system with additional shields is purely resistive.

Fig. S7. Frequency response of: 1 – resistance R and 2 – reactance X of the input impedance on the edges of a system; 3 – resistance R and 4 – reactance X of the input impedance in the center of a system

In Figure S7, curves 3 and 4 represent a frequency response of the input impedance in the center of a meander slow-wave system. Curve 3 represents a resistance R and curve 4 a reactance X of the input impedance. Here it can be seen that the input impedance in the center of investigated system remains constant in the wider frequency range up to 2 GHz. It can be explained by the fact that in this point of system edge effects has no influence on the input impedance. Input impedance in the center of a system fluctuates due to electromagnetic interaction between adjacent meander strips. Value of the input impedance in the lower frequencies is the same as on the edges of a system. Reactance

tance of the input impedance in the center of the system as well as on the edges also has very small value so the input impedance in this part of a system is purely resistive too.

Fig. S8. Surface charge distribution on meander slow-wave system when potential of +1 V is applied to the conductor

To analyze the surface charge distribution in complex microstrip structure, a model of meander microstrip delay line was proposed. Analyzed delay line consists of 12 conductors. The design parameters of the delay line are: $A/h = 4$, $w/h = 1$, $s/h = 0.25$. Every single meander line strip was divided into 8 sub-areas along x -axis and into 80 sub-areas along y -axis.

Surface charge distribution, when the potential of +1 V is applied to the meander conductor is shown in Figure S8. It is seen that more charge is concentrated on the strips of the conductor. Moreover, sharp increase of a charge on the edges of conductor should be noted. Such an increase shows that proposed technique can be used to evaluate the electrical field on the edges of a structure.

4. Parametric synthesis of meander slow-wave system with additional shields

The synthesis of meander slow-wave systems with additional shields is a part of automated design process in which in order to obtain necessary electrical parameters of a device its constructive parameters are changed.

Influence of constructive parameters of a system on its electrical characteristics is unequal. Thus, to achieve the optimal results of the synthesis, influence of main constructive parameters of meander slow-wave system with additional shields on its electrical characteristics must be investigated. Results of investigation will allow to improve the synthesis algorithms of such systems.

Evaluation of constructive parameters of meander slow-wave system with additional shields on its phase delay time, input impedance and bandwidth can be made by

estimating the influence coefficients. Influence coefficient of particular constructive parameter can be expressed by formula

$$S = \left(\frac{\Delta p}{p_0} \right) / \left(\frac{\Delta d}{d} \right), \quad (\text{S11})$$

where Δp – a change in the electrical characteristic of a slow-wave system; p_0 – value of electrical characteristic of slow-wave system with initial parameters; Δd – a change in constructive parameter of a slow-wave system; d – initial value of constructive parameter. During the investigation, when evaluation of influence coefficients was made, constructive parameters were reduced by 1 %.

Investigation results of influence coefficients of constructive parameters on phase delay time, input impedance and bandwidth of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges are summarized in Table S2.

In summary, changing of the length of meander conductor has the biggest impact on the phase delay time of meander slow-wave system with additional shields. When length $2A$ is reduced by 1 %, phase delay time is also reduced by 1 %. Less impact is observed when changing parameters of dielectric substrate: relative permittivity ϵ_r and thickness h . Reduction of ϵ_r by 1%, decreases a phase delay time by 0.5 %, while reduction of thickness of dielectric substrate h increases a phase delay time by 0.1 %.

Table S2. Influence of constructive parameters of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges on its electrical parameters

Constructive parameter	Influence coefficients when corresponding constructive parameter is reduced by 1 %		
	Z_{IN}	t_v	ΔF
Length of meander conductor $2A$	0	1	–1.36
Width of meander conductor w_1	0.3	0.06	–0.68
Width of additional shield w_2	1	0	0
Width of a gap between adjacent meander conductors s	0.5	0.07	–0.68
Relative permittivity of dielectric substrate ϵ_r	–0.5	0.5	–1.36
Thickness of dielectric substrate h	0.2	–0.1	–0.68

In summary, changing the width of additional shields w_2 has the biggest impact on the system's input impedance. When width w_2 is reduced by 1 %, input impedance is also reduced by 1 %. Less impact is observed when changing a gap between adjacent meander strips s and relative permittivity of dielectric substrate ϵ_r . Reduction of ϵ_r by 1%, increases an input impedance by 0.5 %, while reduction of gap s decreases an input impedance by 0.5 %. Influence coefficients of other constructive parameters, such as

dielectric substrate thickness h and meander conductor width w_1 , are even smaller and their values are 0.2–0.3.

From Table S2 it can be seen that biggest impact on the system's bandwidth is observed when changing length of meander conductor $2A$ and relative permittivity of dielectric substrate ϵ_r . Reduction of these parameters by 1%, increases a bandwidth ΔF by 1.36 %. Less impact is observed when changing width of meander conductor w_1 , width of a gap between adjacent meander conductors s and thickness of dielectric substrate h . Reduction of these parameters by 1 %, increases ΔF by 0.68 %.

Table S3. Electrical properties and constructive parameters of synthesized meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges

Slow-wave system	t_v , ns	Z_{IN} , Ω	ΔF , GHz	h , mm	ϵ_r	w_1 , mm	w_2 , mm	s , mm	$2A$, mm	N
LS1	1	50	2.72	0.13	6.15	0.22	0.47	0.9	25	5
LS2	1	75	2.72	0.25	6.15	0.18	0.8	0.9	25	5
LS3	3	50	1.82	0.13	6.15	0.22	0.4	0.9	25.5	15
LS4	1	50	2.67	0.3	4.4	0.62	0.85	0.42	29.4	5

Verification results of synthesis algorithm based on influence coefficients are summarized in Table S3. Herein, electrical characteristics and synthesized constructive parameters of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges are presented. Two different dielectric substrates were used during the synthesis: RO3006™ by Rogers Corporation, with relative permittivity of $\epsilon_r = 6.15$ and FR4, with relative permittivity of $\epsilon_r = 4.4$.

General conclusions

1. A technique which allows modeling of 3D distribution of electric field in meander slow-wave system using method of moments is proposed. Investigation of distribution of electric field pointed up the electromagnetic bond between adjacent meander strips which causes phase delay time dispersion. Therefore, in order to improve the dispersion properties of meander slow-wave system, four computer models of meander slow-wave system with additional shields grounded at different point are created and investigated.
2. As shown by computer-based experiment, insertion of additional shield increases a phase delay time in lower frequencies and thus reduces its dispersion. Meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges has least phase delay time dispersion. With the insertion of additional shield grounded at both edges, phase

delay time dispersion in the frequency range up to 1.97 GHz is reduced by 3.89 times and is less than $\Delta t_v = 0.035$ ns.

3. In the process of designing meander slow-wave systems with additional shields it is purposeful to take into account the ongoing processes on the edges of a system because their topology can have a large impact on system's characteristics. For that matter, models which reflect changes in the areas where adjacent meander conductors connect are created. Also models with different topologies in the area where meander strips are open and form a loop are created.
4. Investigation of meander slow-wave system with additional shield and modified topologies of edges pointed out that change in a width of a conductor connecting adjacent meander strips increases a phase delay time of a system. This effect can be explained by a formation of a capacitive inequality in a meander shape conductor. Moreover, reduction of total area of a system, while its dispersive properties remain unchanged, can be achieved by increasing a gap in the area where meander strips form a loop. For a meander conductor length of 19 mm, gap width of 0.5 mm and gap length of 0.6 mm, area of a system is reduced by 3 %.
5. A proposed technique for determination of input impedance of meander slow-wave system with additional shields, with the help of computer-based experiment allowed to demonstrate that input impedance on the edges of a system remains constant in the frequency range up to 1.5 GHz, and in the center of the system – up to 2 GHz, while its value in the lower frequencies in the center and on the edges is the same.
6. Estimation of influence coefficients of constructive parameters of meander slow-wave system with additional shields and evaluation of sensitivity of phase delay time, input impedance and bandwidth to a changes of constructive parameters, enabled a creation of algorithm for parametric synthesis of meander slow-wave system with additional shields grounded at both edges which was verified by synthesizing four slow-wave systems.

Priedai¹

A priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje.

B priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos.

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje

Edvardas METLEVSKIS

PLAČIAJUOSČIŲ PLANARIŲJŲ LĖTINIMO SISTEMŲ MODELIAI IR JŲ TYRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

MODELS OF BROADBAND PLANAR SLOW-WAVE SYSTEMS AND THEIR INVESTIGATION

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Electrical and Electronic Engineering (01T)

2014 05 12. 11,5 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Ciklonas“
J. Jasinskio g. 15, 01111 Vilnius